ISSN 1609-9192 (print) • ISSN 2587-9138 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ГОРНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

№ 5 / 2026



МОДУЛЬНЫЕ ЭМУЛЬСИОННЫЕ ЗАВОДЫ

16+

РЕКЛАМА

Любая производительность
Возможность наращивания мощностей

Быстрый монтаж
без капитального строительства

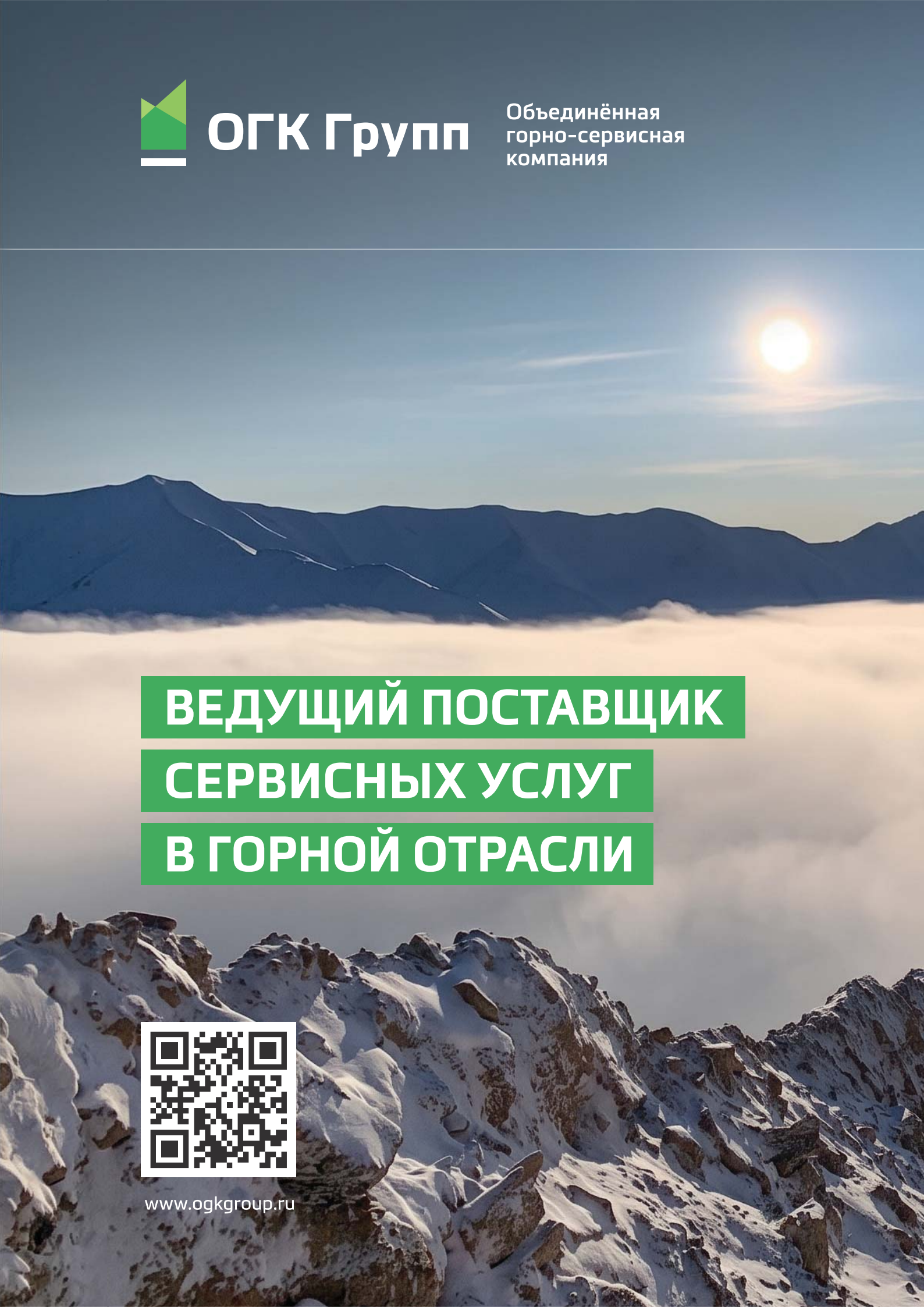
Автоматизированная система
производства и контроля

Быстрое перемещение
на новую территорию

Все заводы по ссылке

АЗОТТЕХ

Консультация и заказ
+7 495 120-43-30 / office@azottech.ru


ОГК Групп
Объединённая
горно-сервисная
компания
ВЕДУЩИЙ ПОСТАВЩИК
СЕРВИСНЫХ УСЛУГ
В ГОРНОЙ ОТРАСЛИ
www.ogkgroup.ru

РЕКЛАМА **16+**

Полный спектр буровзрывных технологий

ЭВОБЛАСТ®

Обеспечиваем
эффективный
и безопасный доступ
к природным ресурсам

Следуйте за ЭВОБЛАСТ



16+

РЕКЛАМА

evoblast.ru

КОРПОРАТИВНАЯ ПРОГРАММА
«МОЛОДОЙ СПЕЦИАЛИСТ»

16+

РЕКЛАМА



СОТРУДНИЧЕСТВО

ОТ «МОЛОДОГО СПЕЦИАЛИСТА» К ГОРНОМУ ИНЖЕНЕРУ

Группа ЭВОБЛАСТ
www.evoblast.ru

Содержание

6 **Горное дело – академическая наука**

12 **О предстоящем выездном заседании Высшего горного совета России в рамках юбилейной XV Международной горнопромышленной конференции МГПК БАЭП-2026**
Интервью ВРИО Исполнительного директора Ассоциации «Горнопромышленники России» Сергея Юрьевича Кононенко

16 **Институт ИИ МФТИ, Академия горных наук и IMC Montan подписали соглашение о сотрудничестве**

Б.П. Горбунов

18 **Сервис БЕЛАЗ: от мотора до колеса**

В.В. Рыжков

22 **Холодный резерв электроснабжения северного объекта: требования, предъявляемые к силовым трансформаторам, и конструктивные решения**

26 **Комплексные решения для горнодобывающих предприятий**
Интервью генерального директора ООО «Синотех Машинери» Романа Александровича Колпакова

31 **От дронов до сверхзвуковых струй: какие решения предложили участники CASE-IN для повышения безопасности добычи алмазов**

Оригинальные статьи

А.С. Иванов, О.А. Лукашук, Д.С. Стожков, А.В. Угольников

32 **Безлюдная выемка карьерными экскаваторами: алгоритмическое управление и моделирование процесса черпания**

П.Г. Пацкевич, И.И. Айнбиндер, А.А. Меркулов, Е.Д. Якушева

39 **Об особенностях современных технологий информационного обмена при подземной разработке руд**

И.В. Скворцова, Ю.Р. Нурулин, А.А. Ильинский, А.Г. Сомов, О.В. Калинина

45 **Цифровой двойник тепловой сети в управлении внутренним спросом на энерготопливо**

Г.Ф. Балакина, О.Н. Монгуш

54 **Инклюзивное развитие горнопромышленного региона России: на примере Республики Тыва**

Ю.А. Крупнов, Ю.Б. Надточий, Н.Н. Щепкина, Б. Аскарбеков

59 **Финансовые механизмы реализации зелёных проектов в горнодобывающей промышленности**

Д.С. Лопаткин, Л.Е. Копылова, Т.Н. Шушунова, Н.Н. Гринев, Т.А. Шпилькина

67 **Исследование мотивационного механизма в деятельности горнодобывающих предприятий Российской Федерации сегмента критических металлов как фактор повышения качества эффективности производства**

О.С. Богданова

79 **Система трансформации глобальной энергетики: роль углеводородов**

Н.Ю. Чернегов, А.В. Овсянникова, И.Х. Утакаева

82 **Методология комплексной оценки эффективности работы предприятий горной промышленности России**

А.А. Ксенофонтов, Н.С. Самойлов, А.А. Хусейнова, А.А. Юссуф

90 **Возможности эффективной оценки и развития компетенций специалистов в горнодобывающей отрасли**

Н.А. Череповская, А.Б. Моттаева, Е.С. Якушова, М.Ю. Алейникова

99 **Эконометрическое моделирование финансового риска и кредитного пространства малого и среднего предпринимательства горнодобывающей промышленности**

А.Э. Салимов, С.Л. Иванов, Д.А. Шибанов

107 **Экспресс-диагностика трансмиссионных систем карьерных экскаваторов**

В.О. Ооржак

114 **Определение основ комплексной оценки освоения месторождений минерального сырья Республики Тыва**

Ю.В. Забайкин, Е.В. Красавина, Д.В. Лютягин, Е.В. Новикова, Д.А. Лунькин

118 **Теоретико-методологические основы проактивного управления операционной эффективностью горнодобывающих предприятий**

И.В. Самарин

127 **Роботизация буровзрывных работ на открытых горных работах: автоматизация технологического цикла, точность бурения и управление качеством взрывной подготовки горной массы**

А.И. Конурин

135 **Эффективное крепление подземных горных выработок как фактор снижения последствий геодинамических явлений**

Р.В. Клюев

142 **Повышение энергоэффективности процесса рудоподготовки на основе анализа энергопотребления мельниц полусамоизмельчения**

Д.В. Хосоев, А.М. Бураков, В.В. Киселев, А.Д. Никифорова, Е.Л. Алькова

147 **Оценка физико-механических и физико-технических свойств вскрышных пород Эльгинского каменноугольного месторождения**

П.А. Докукин, А.А. Поддубский, Р.В. Шевчук, А.И. Маневич, М.В. Алешин

152 **Выявление критических смещений и деформаций на объектах недропользования по временным рядам ГНСС-наблюдений**

И.О. Паничкин, Г.О. Абрамян

159 **Применение многоточечной статистики к нерегулярным данным кернового опробования при моделировании медно-порфировых месторождений**

С.Е. Чернышов, А.А. Мелехин, И.В. Домбровской, В.В. Прохоров, В.В. Дерендяев, А.В. Николаев

164 **Создание головной платы погружной части системы управляемого бурения**

Д.С. Юсов, П.В. Иванова, С.Л. Иванов

169 **Оптимизация геометрии резца для глубокого фрезерования пнистой торфяной залежи**

А.С. Дубровский, С.С. Шадрин, Д.А. Макарова, Ю.М. Фурлетов

178 **Оптимизация скоростного режима седельного тягача на основе гибридной модели расхода топлива с автоматической калибровкой по данным CAN-шины**

Н.Н. Ефремовцев

186 **Доступные технологии повышения энергетической эффективности и безопасности разрушения горных пород**

В.А. Матчинов, И.Г. Моисеева, Н.Н. Губернаторова, И.В. Дробышева, О.М. Орловцев

190 **Оценка экономической эффективности инвестиционных проектов освоения месторождений твёрдых полезных ископаемых**

В.Ю. Панков

200 **Изменение энтальпии вентиляционной струи при работе дизельной техники в подземных сооружениях криолитозоны**

Н.П. Овчинников, И.В. Зырянов

206 **Обеспечение эффективной работы рудничной водоотливной установки в условиях перекачивания высокоабразивных и агрессивных рассолов**

С.А. Сат, Ш.Ч. Соян, А.Ч. Кылгыдай, Х.Б. Бадарчи, А.Д. Монгуш

211 **Перспективы разработки Улуг-Танзекского редкометалльного месторождения Республики Тыва**

А.П. Господариков, В.И. Кириленко

215 **Оценка влияния параметров буровзрывных работ на потери при выпуске горной массы методом физического моделирования**

Н.В. Мурзин, Б.Л. Тальгамер, И.А. Мешков

223 **Вовлечение в драглайную разработку мощных продуктивных отложений, превышающих выемочные возможности драги**

Ю.В. Дмитрак, А.А. Кравцов

229 **Применение технологии машинного зрения для определения кинематики мелющих тел в помольной камере вибрационной мельницы**

Е.Ю. Ботян, И.А. Королев, А.Э. Уразбахтина, А.Е. Пушкарев

235 **Сокращение числа аварийных отказов узлов карьерных автосамосвалов на основании корректировки регламентной периодичности проведения их ремонтных работ**

В.Ю. Заляднов, С.Е. Гавришев, И.В. Зырянов

244 **Подход к обеспечению устойчивого функционирования горнодобывающих предприятий за счет адаптации параметров горнотехнической системы к условиям изменения внешних и внутренних факторов**

А.Л. Билин, А.С. Калюжный

251 **Геомеханические резервы оптимизации конструкции борта карьера на этапе доработки месторождения**

Н.Н. Кузнецов, М.С. Кулькова

258 **Исследование изменения физико-механических свойств скальных горных пород и их трещиноватости с глубиной залегания (на примере Хибинского массива)**

С.А. Жукова, В.С. Онуприенко, А.А. Стрешнев

265 **Исследование сейсмического режима и удароопасности Кукисвумчоррского месторождения на глубоком горизонте +10 м**

В.В. Лаптев, Е.Д. Зикрацкая

272 **Системы среднесрочного планирования открытых и подземных горных работ: единая методика и опыт импортозамещения в компании «АЛРОСА»**

Contents

6 **Mining engineering is an academic science**

12 **On the upcoming visiting session of the Supreme Mining Council of Russia as part of the anniversary 15th International Mining Industry Conference "Barents Arctic Economic Partnership" (MGPC BAEP-2026)**
An interview with Sergey Yu. Kononenko, Acting Executive Director, Association of Mining Industrialists of Russia

16 **The MIPT Institute of Artificial Intelligence, Academy of Mining Sciences, and IMC Montan signed a cooperation agreement**
B.P. Gorbunov

18 **BELAZ Service: from the engine to the wheel**
V.V. Ryzhkov

22 **Standby power supply reserve for a northern facility: requirements to power transformers and design solutions**

26 **Comprehensive solutions for mining companies**
An interview with Roman A. Kolpakov, CEO of Sinotech Machinery LLC

31 **From drones to supersonic jets: what solutions were proposed by the CASE-IN participants to enhance the safety of diamond mining**

Original papers

A.S. Ivanov, O.A. Lukashuk, D.S. Stozhkov, A.V. Ugol'nikov
32 **Unmanned excavation using open-pit excavators: algorithmic control and bucket path modelling**

P.G. Patskevich, I.I. Aynbinder, A.A. Merkulov, E.D. Yakusheva
39 **On specific features of modern information exchange technologies in underground ore mining**

I.V. Skvortsova, Yu.R. Nurulin, A.A. Iliinsky, A.G. Somov, O.V. Kalinina
45 **A digital twin of the heat supply network in managing domestic energy demand**

G.F. Balakina, O.N. Mongush
54 **Inclusive development of a mining region in the Russian Federation: the case of the Republic of Tyva**

Yu.A. Krupnov, Yu.B. Nadtochiy, N.N. Shchepkina, B. Askarbekov
59 **Financial mechanisms for implementing green projects in the mining industry**

D.S. Lopatkin, L.E. Kopylova, T.N. Shushunova, N.N. Grinev, T.A. Shpilkina
67 **Research into the motivational mechanism in activities of Russian mining companies in the critical metals segment as a factor in improving the quality of production efficiency**

O.S. Bogdanova
79 **Global energy transition: the role of hydrocarbons**

N.Y. Chernegov, A.V. Ovsyannikova, I.Kh. Utakaeva
82 **Methodology of comprehensive efficiency assessment of Russian mining companies**

A.A. Ksenofontov, N.S. Samoylov, A.A. Khuseynova, A.A. Yussuf
90 **Opportunities for efficient assessment and competence development of specialists in the mining industry**

N.A. Cherepovskaya, A.B. Mottaeva, E.S. Yakushova, M.Yu. Aleynikova
99 **Econometric modeling of financial risks and credit space of small and medium-size mining businesses**

A.E. Salimov, S.L. Ivanov, D.A. Shibanov
107 **Express diagnostics of power transmission systems of mine excavators**

V.O. Oorzhak
114 **Defining foundations for a comprehensive assessment of mineral deposit development in the Republic of Tyva**

Yu.V. Zabaikin, E.V. Krasavina, D.V. Lyutyagin, E.V. Novikova, D.A. Lunkin
118 **Theoretical and methodological foundations of proactive operational efficiency management in mining companies**

I.V. Samarin
127 **Autonomous drilling and blasting operations in open-pit mining: automation of the process cycle, drilling accuracy and management of blast fragmentation of rocks**

A.I. Konurin
135 **Efficient underground mine support as a factor in reducing consequences of rock bursts**

R.V. Klyuev
142 **Improving energy efficiency of the ore preparation process based on analyzing energy consumption of semi-autogenous grinding mills**

D.V. Hosoev, A.M. Burakov, V.V. Kiselev, A.D. Nikiforova, E.L. Alkova
147 **Assessment of the physical, mechanical and engineering properties of overburden rocks in the Elga coal deposit**

P.A. Dokukin, A.A. Poddubsky, R.V. Shevchuk, A.I. Manevich, M.V. Aleshin
152 **Identification of critical displacements and deformations at subsoil assets based on GNSS observation time series**

I.O. Panichkin, G.O. Abramyan
159 **Application of multi-point statistics to irregular core sampling data in modeling of copper-porphyry deposits**

S.E. Chernyshov, A.A. Melekhin, I.V. Dombrovsky, V.V. Prokhorov, V.V. Derendyaev, A.V. Nikolaev
164 **Designing a control board for the submersible section of a rotary steer drilling system**

D.S. Yusov, P.V. Ivanova, S.L. Ivanov
169 **Optimization of cutter geometry for deep milling of stump-containing peat deposit**

A.S. Dubrovskii, S.S. Shadrin, D.A. Makarova, Yu.M. Furletov
178 **Speed profile optimisation for a semi-trailer truck based on a hybrid fuel consumption model with automatic calibration based on CAN bus data**

N.N. Efremovtsev
186 **Available technologies for improving energy efficiency and safety in rock blasting**

V.A. Matchinov, I.G. Moiseeva, N.N. Gubernatorova, I.V. Drobysheva, O.M. Orlovtseva
190 **Assessment of the economic efficiency of investment projects for the development of solid mineral deposits**

V.Yu. Pankov
200 **Changes in the enthalpy of the ventilation stream during operation of diesel equipment in underground facilities in the permafrost zone**

N.P. Ovchinnikov, I.V. Zyryanov
206 **Ensuring efficient operation of a mine dewatering plant when pumping highly abrasive and aggressive brines**

S.A. Sat, Sh.Ch. Soyan, A.Ch. Kylgyday, H.B. Badarchi, A.D. Mongush
211 **Development prospects of the Ulug-Tanzek rare metal deposit in the Republic of Tyva**

A.P. Gospodarikov, V.I. Kirilenko
215 **Impact of the drilling and blasting parameters on the ore drawing losses: a physical modeling study**

N.V. Murzin, B.L. Talgamer, I.A. Meshkov
223 **Dredging of thick productive placer deposits that exceed the dredger excavation capacity**

Yu.V. Dmitrak, A.A. Kravtsov
229 **Application of machine vision to analyze grinding media kinematics in grinding chambers of vibratory mills**

E.Y. Botyan, I.A. Korolyov, A.E. Urazbakhtina, A.E. Pushkarev
235 **Reducing the number of component failures in open pit dump trucks based on adjustments to the frequency of scheduled maintenance**

V.Yu. Zalyadnov, S.E. Gavrishev, I.V. Zyryanov
244 **An approach to ensuring sustainable operation of mining companies by adapting parameters of the mining system to changing external and internal factors**

A.L. Bilin, A.S. Kalyuzhny
251 **Geomechanical reserves for optimizing open-pit slope design during the final mine development stage**

N.N. Kuznetcov, M.S. Kulkova
258 **A study of changes in the physical and mechanical properties of hard rocks and their fracturing with the occurrence depth (using the case of the Khibiny mountain range)**

S.A. Zhukova, V.S. Onuprienko, A.A. Streshnev
265 **A study into the seismic settings and rock-bump hazard at the Kukisvumchorr apatite-nepheline deposit at the deep +10 m level**

V.V. Laptev, E.D. Zikratskaya
272 **Medium-term planning systems for open-pit and underground mining operations: a unified methodology and import substitution experience at ALROSA**

Advertising index:

БЕЛАЗ (ИП ООО «HAUL TRUCKS-CA») *17, 29*
БЕЛАЗ (ЗМ-Сервис) *11*
Муфта Про, ООО *25*
НПК «Механобр-техника», АО *25*
СПК-Стык, ООО *30*
Цифровой Горизонт, ООО *15*

On the cover:
ООО «АзотТех»; АО «ОГК Групп»; АО «Эвобласт Рус»; ООО «Флотент Кемикалс Рус»; ООО «Карьер-Сервис»

Рецензируемый научно-технический и производственный журнал
«Горная промышленность»

Главный редактор:

Валерий Афонасьевич Язев, д-р экон. наук; профессор, Президент НП «Горнопромышленники России», Председатель Российского национального комитета Мирового нефтяного совета, Москва, Российская Федерация

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Артемьев Владимир Борисович, председатель Редакционного совета, заместитель генерального директора – директор по производственным операциям ООО «Горнорудная компания», горный инженер, д-р техн. наук, Москва, РФ

Трубецкой Климент Николаевич, главный научный сотрудник ИПКОН РАН, академик РАН, д-р техн. наук, Москва, РФ

Иванов Михаил Игоревич, заместитель Министра промышленности и торговли Российской Федерации, Москва, РФ

Бортников Николай Стефанович, научный руководитель Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, академик РАН, Москва, РФ

Захаров Валерий Николаевич, научный руководитель ИПКОН РАН, академик РАН, д-р техн. наук, Москва, РФ

Осипов Виктор Иванович, научный руководитель Института геоэкологии им. А.Е. Сергеева РАН, академик РАН, Москва, РФ

Нигматулин Роберт Искандерович, научный руководитель ИО РАН имени П. П. Ширшова, академик РАН, Москва, РФ

Барях Александр Абрамович, Директор Пермского федеральный исследовательский центра Уро РАН, академик РАН, Пермь, РФ

Будзуляк Богдан Владимирович, президент Саморегулируемая организация Ассоциация строителей газового и нефтяного комплексов (СРО АСГиНК), проф., д-р техн. наук, Москва, РФ

Исмагилов Ринат Иршатович, канд. техн. наук, директор по техническому развитию ООО УК «МЕТАЛЛОИНВЕСТ», Москва, РФ

Милетенко Николай Васильевич, советник генерального директора Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского, ученый секретарь Научно-технического совета Минприроды России, д-р геол.-минерал. наук, Москва, РФ

Машковцев Григорий Анатольевич, ФГБУ «ВИМС», д-р геол.-минерал. наук, профессор, Москва, РФ

Владимиров Дмитрий Ярославович, канд. техн. наук, Группа компаний «Цифра», заместитель генерального директора по работе с горной промышленностью и органами власти, Москва, РФ

Дмитриевский Анатолий Николаевич, академик РАН, д-р геол.-минерал. наук, профессор, научный руководитель института ИПНГ РАН, Москва, РФ

Зелинская Елена Валентиновна, д-р техн. наук, профессор кафедры «Обогащение полезных ископаемых и охрана окружающей среды им. С.Б. Леонова» Институт недропользования ИРНИТУ, г. Иркутск, РФ

Зырянов Игорь Владимирович, д-р техн. наук, профессор, Политехнический институт (филиал) СВФУ в г. Мирном, Республика Саха (Якутия), РФ

Кириченко Юрий Васильевич, д-р техн. наук; профессор, Горный институт НИТУ МИСИС, Москва, РФ

Клебанов Алексей Феликсович, канд. техн. наук, директор по науке и работе с образовательными учреждениями, ГК «Цифра», Москва, РФ

Колесниченко Игорь Евгеньевич, д-р техн. наук; профессор, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Шахты, РФ

Корнилков Сергей Викторович, д-р техн. наук; профессор, Институт горного дела Уральского отделения РАН, Екатеринбург, РФ

Крюков Валерий Анатольевич, д-р экон. наук; профессор, академик РАН, директор ФГБУН «Институт экономики и организации промышленного производства Сибирского Отделения РАН», Новосибирск, РФ

Лукичев Сергей Вячеславович, директор Горного института КНЦ РАН, д-р техн. наук, чл.-корр. РАН, РФ, г.Апатиты, РФ

Малахов Юрий Валентинович, канд. техн. наук, председатель технического комитета по стандартизации «Горное дело» (ТК 269) Росстандарта, член технического комитета ISO/TC 82 - Mining

Орехова Наталья Николаевна, д-р техн. наук, профессор каф. ГМД и ОПИ ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, РФ

Плакиткин Юрий Анатольевич, д-р экон. наук; профессор, Институт энергетических исследований Российской академии наук (ИНЭИ РАН), Заместитель директора по научной работе, Москва, РФ

Рожков Анатолий Алексеевич, д-р экон. наук; проф., директор по науке АО «Росинформуголь», Москва, РФ

Рыльникова Марина Владимировна, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник ИПКОН РАН, Москва, РФ

Соннов Максим Александрович, заместитель генерального директора ООО «ФИДЕСИС» (Научный парк МГУ), Москва, РФ

Титова Ася Владимировна, д-р техн. наук, профессор, ФГБУН «Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского Российской академии наук», Заместитель директора по развитию, Москва, РФ

Шадрунова Ирина Владимировна, д-р техн. наук, зав. отделом горной экологии, ИПКОН РАН, Москва, РФ

Великанов Владимир Семенович, д-р техн. наук, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и роботов, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, РФ

Го Лицзе, д-р техн. наук, профессор, заместитель директора, Пекинский институт горного дела и металлургии, Научно-исследовательский институт горного дела, Международная исследовательская группа по направлению «Зеленое горное дело», Пекин, Китай

Б. Бат-Очир, профессор; исполнительный директор, Академия горных наук Монголии, Улан-Батор, Монголия

Рыспанов Нурлан Бектасович, Президент Национальной Академии Горных Наук Республики Казахстан, Президент Горнопромышленного союза Казахстана, д-р техн. наук, Республика Казахстан

Галиев Сейтгали Жолдасович, д-р техн. наук, профессор, чл.-корр. НАН РК, академик НАГН РК, ТОО «Научно-исследовательский технический центр Евразийской Группы» (ERG), директор горного подразделения, Республика Казахстан

Журнал зарегистрирован 09.10.2019 г. Роскомнадзором реестровая запись ПИ № ФС77-76915

16+

Издатель и учредитель: ООО Научно-Производственная компания «Гемос Лимитед»

Адрес: 119049, г. Москва, проспект Ленинский, д. 6 стр. 3 этаж 5, ком. 24.

ISSN 1609-9192 (print); 2587-9138 (online)

Адрес редакции: 119049, Москва, Ленинский проспект, д. 2А, офис 728. Телефон редакции: +7 (499) 237-03-11;

e-mail: info@mining-media.ru, сайт: https://mining-media.ru

Тираж 5000 экз.

Подписной индекс 72557 по каталогу «Почта России». Цена свободная.

Над выпуском работали:

Е.В. Анистратова, Г.А. Демина, Л.В. Павлова, Л.А. Горочнина, А.А. Раизин, Н.В. Матвиевская, Е.В. Никитина.

Отпечатано в типографии ООО «Роликс».

Адрес: 117105, Москва, Нагорный пр., д. 7, стр. 5. Телефон: +7 (495) 661-46-22

Дата выхода в свет: 10.11.2026

Russian Mining Industry Journal

is a peer-reviewed scientific and technical journal

Chief Editor:

Valeriy A. Yazev, Doctor of Sciences (Economics), Professor, President of the Non-profit Partnership for Mining Industries, Chairman of the Russian National Committee of the World Petroleum Council, Moscow, Russian Federation

EDITORIAL BOARD:

Vladimir B. Artemyev, Doctor of Technical Sciences, mining engineer, Deputy Executive Director – Director of Production Operations, Gornorudnaya Kompaniya LLC, Moscow, Russia

Kliment N. Trubetskoy, Chief Scientific Officer, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources (IPKON) of RAS, Academician of RAS, Moscow, Russia

Mikhail I. Ivanov, Deputy Minister, Ministry of Industry and Trade of the Russia, Russia

Nikolay S. Bortnikov, Head of Research, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of RAS (IGEM RAS), Academician of RAS, Moscow, Russia

Valeriy N. Zakharov, Head of Research, IPKON RAS (Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of RAS), Academician of RAS, Moscow, Russia

Victor I. Osipov, Head of Research, Sergeev Institute of Environmental Geoscience of RAS (IEG RAS) Academician of RAS, Moscow, Russia

Robert I. Nigmatulin, Head of Research, Shirshov Institute of Oceanology of RAS. , Academician of RAS, Moscow, Russia

Alexander A. Baryakh, Director, Perm Federal Research Centre of Ural Branch of the RAS, Academician of the RAS, Perm, Russia

Bogdan V.Budzulyak, President, Self-regulated organization Association of gas and oil complex builders (SRO ASGINK), Doctor of Engineering, Moscow, Russia

Rinat I. Ismagilov, PhD (Engineering), Director for Technical Development, METALLOINVEST MC LLC, Moscow, Russia

Rais S. Khisamov, Doctor of geol.-miner. sciences, Russia

Nikolay V. Militenko, General Director's Advisor, A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, Scientific Secretary of the Scientific and Technical Council of the Ministry of Natural Resources, Doctor of Mining and Metallurgical Sciences, Moscow, Russia

Grigoriy A. Mashkovtsev, Director General, Federal State Budgetary Institution «All-Russian Scientific-research Institute of Mineral Resources named after N.M.Fedorovsky» (FSBI VIMS), Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Moscow, Russia

Dmitriy Ya. Vladimirov, Cand. of Sciences in Technology, Deputy General Director for work with the mining industry and government, Zyfra Group, Moscow, Russia

Anatoly N. Dmitrievsky, academician of the RAS, Doctor of geol.-miner. sciences, Professor; Scientific Director of the Institute of oil and gas, Moscow, Russia

Elena V. Zelinskaya, Doctor of Engineering, Professor of the Mineral Processing and Environmental Department named S. B. Leonov, Institute of Subsoil Use, IRNITU, Irkutsk, Russia

Igor V. Zyrjanov, Doctor of Engineering, Professor, Mirny Polytechnic Institute (branch) of North-Eastern Federal University, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia

Yuriy V. Kirichenko, Doctor of Engineering, Professor; Mining Institute of the MISiS National Research Technological University, Moscow, Russia

Alexey F. Klebanov, PhD (Engineering), Director for Research and Relations with Educational Institutions, Zyfra Group, Moscow, Russia

Igor Ye. Kolesnichenko, Doctor of Engineering, Professor; Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Shakhty, Russia

Sergey V. Kornilkov, Doctor of Engineering, Professor; Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekarinburg, Russia

Valeriy A. Kryukov, Academician, Doctor of Sciences (Economics), Prof., The Institute of Economics and Industrial Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Sergey V. Lukichev, Doctor of Engineering, Professor; Mining Institute of the Kola Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Director, Apatity, Russia

Yuri V. Malakhov, PhD (Engineering), Chairman of the Mining Technical Committee (TC 269), Rosstandart, Member of Technical Committee ISO/TC 82 - Mining

Nataliya N. Orekhova, Doctor of Engineering, Professor; Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russia

Yuriy A. Plakitkin, Doctor of Science, Economics, Professor; The Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Science, Moscow, Russia

Anatoliy A. Rozhkov, Doctor of Science, Economics, Professor; Director for Science of JSC «Rosinformugol», Moscow, Russia

Marina V. Rylnikova, Doctor of Engineering, Professor, Chief Scientific Officer; IPKON of RAS, Moscow, Russia

Maksim A. Sonnov, Deputy General Director of FIDESYS LLC (Lomonosov Moscow State University Science Park), Moscow, Russia

Asya V. Titova, Doctor of Engineering, Professor; Vernadskiy State Geological Museum of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Development, Moscow, Russia

Irina V. Shadrunova, Doctor of Engineering, Chair of Mining Ecology Department; IPKON of RAS, Moscow, Russia

Vladimir S. Velikanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Hoisting and Hauling Machines and Robots, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

Guo Lijie, Deputy Director, Professor, Ph.D., Beijing Institute of Mining and Metallurgy Research Institute of Mining Engineering, International Research Group on Green Mining Engineering field, Beijing, China

B. Bat-Ochir, Professor, Executiv Director, Mongolian Academy of Mining Science, Ulaanbaatar, Mongolia

Nurlan B. Ryspanov, President, National Academy of Mining Sciences of Kazakhstan; President, Mining Union of Kazakhstan, Doctor of Engineering, Kazakhstan

Seitgali Galiev, Director of the Mining Department ERG «Research and Development Engineering Center», Kazakhstan

ISSN 1609-9192 (print)
2587-9138 (online)

16+

Published by: Scientific & Industrial company "Gemos Limited", LLC

Publication Frequency: bimonthly (6 issues per year)

web-site: https://mining-media.ru

Adress: Leninskiy Prospect, 2a, office 728, Moscow, Russian Federation, 119049

e-mail: info@mining-media.ru

Phone: +7 (499) 237-03-11

Printing House: Roliks, Moscow
+7 (495) 661-46-22

Subscription: the magazine is distributed by subscription and free of charge.

Appearance: 10.11.2026

Editorial

Director General, Publisher	**Elena V. Anistratova** eanistratova@mining-media.ru
Deputy Chief Editor	**Aleksey A. Raizin** at@mining-media.ru
Managing Editor	**Galina A. Demina** info@mining-media.ru
Advertise	**Nataliya V. Matvievskaya** pr@mining-media.ru
Events	**Elena V. Nikitina** event@mining-media.ru
Design, layout	**Larisa V. Pavlova**

Горное дело — академическая наука

От редакции журнала «Горная промышленность»

В июне 2026 г. в Горном институте Кольского научного центра РАН прошла X Всероссийская научно-техническая конференция «Прогноз и предупреждение удароопасности при ведении горных работ». Название конференции подчёркивает проблему, над решением которой в тесном контакте на протяжении многих лет работают научные и производственные организации страны. Разнообразие геомеханических условий разработки месторождений твёрдых полезных ископаемых и особенности применяемых технологий диктуют необходимость применения различных методов оценки устойчивости техногенно нарушенного массива горных пород и предотвращения его катастрофического разрушения.

Исследования в области геомеханики являются важным, но далеко не единственным направлением горной науки, флагманами которой являются институты горного профиля Российской академии наук.

О том, что может предложить академическая горная наука отечественной горнодобывающей промышленности, мы попросили рассказать членов академии наук РФ и директоров институтов горного профиля, входящих в её состав.





Лукичев Сергей Вячеславович,
член-корреспондент РАН,
директор Горного института КНЦ РАН

Для Горного института КНЦ РАН исследования в области обеспечения геомеханической безопасности горных работ являются одним из приоритетных направлений. Целевая направленность этих исследований – развитие методологии прогноза разрушения массива горных пород (по времени, месту, масштабу события) и разработка программных средств расчёта напряженно-деформированного состояния (НДС) массива для решения задач при проектировании и планировании горных работ. Для этих целей разработан программный комплекс SIGMA GT, позволяющий специалистам предприятий самостоятельно проводить оценку НДС массива при планировании горных работ. Для снижения ущерба от потери устойчивости уступов борта карьера разработана методология прогноза вероятности обрушений на основе данных радарного мониторинга.

Для контроля за устойчивостью насыпных дамб хвостохранилищ разработана методология их многоуровневого (воздушного, наземного и подповерхностного) мониторинга. Методология прошла многолетнюю проверку на промышленных объектах Мурманской области и успешно применяется на всех горнодобывающих предприятиях Кольского полуострова.

Разработана и успешно развивается горно-геологическая информационная система (ГГИС) MINEFRAME. Программное обеспечение разработано совместно с IT-компанией «Лаборатория МАЙНФРЭЙМ», созданной при участии Горного института КНЦ РАН, и является успешным примером трансфера технологии при решении задачи импортозамещения.

ГГИС MINEFRAME внедрена на десятках горнодобывающих предприятий страны, включая такие как АО «АЛРОСА», ППГХО, СЗФК. В MINEFRAME решены задачи среднесрочного планирования открытых и подземных горных работ, созданы инструменты неявного моделирования контактных поверхностей литологических разностей. В развитие системы ведутся работы, направленные на создание Горной цифровой платформы, обеспечивающей более лёгкую интеграцию инструментов инженерного обеспечения горных работ в цифровое пространство горного предприятия.

Для решения задач обогащения рудного и техногенного минерального сырья создан научно-экспериментальный комплекс, включающий оборудование для проведения как лабораторных исследований, так и опытно-промышленной проверки технологий обогащения с наработкой концентратов в объёме до десятков тонн. Возможности комплекса за последние несколько лет существенно расширились за счёт создания на средства компании ФОСАГРО научно-исследовательского центра, что позволяет решать задачи разработки технологий обогащения с использованием современного технологического оборудования и инструментального контроля. Дальнейшее развитие комплекса идёт в направлении создания инжинирингового центра, где кроме задач обогащения полезных ископаемых на одной площадке будут комплексно решаться вопросы химико-технологической переработки концентратов и обеспечения экологической безопасности горного производства.



Шляпин Алексей Владимирович,
кандидат технических наук,
директор Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН (ИПКОН РАН)

В ИПКОН РАН проводятся системные исследования в области создания реагентов направленного действия для повышения извлечения ценных металлов из комплексных руд и отходов обогащения. Научно обоснованы и разработаны новые селективные реагенты группы дитиазинов и дитиокарбаматов для флотации минералов цветных, редких и благородных металлов, не уступающие по своим свойствам зарубежным аналогам. Комплексом аналитических методов спектроскопии и сканирующей микроскопии (РЭМ, ЛСМ, УФС, ИКФС, СЭП) получены новые научные данные об избирательном взаимодействии новых реагентов с минералами, содержащими Au и другие стратегические металлы, что обеспечивает повышение селективности процесса флотации и рост извлечения ценных металлов при комплексной переработке руд сложного вещественного состава**.** Применение разработанных отечественных реагентов группы дитиазинов и дитиокарбаматов в процессах флотации обеспечит импортонезависимость российских горно-обогатительных комбинатов от поставок зарубежных реагентов при комплексной переработке руд сложного вещественного состава.

Разработаны современные гранулированные промышленные взрывчатые составы, которые сочетают высокую эффективность, технологичность и возможность адаптации к различным горно-геологическим условиям. Гранулит Игданит-П представляет собой практичное решение для выполнения взрывных работ, обеспечивающее удобство применения и стабильность технологических характеристик. Гранулит А-3 отличается рецептурой с использованием алюминиевого порошка, который выступает в качестве высокоэнергетической добавки и способствует повышению эффективности состава. Гранулит А-6и развивает этот подход, сочетая гранулированную основу с алюминиевым компонентом для увеличения теплового и энергетического эффекта взрыва. Применение алюминиевых порошков позволяет целенаправленно управлять энергетическими характеристиками состава и расширяет возможности его использования при решении задач, требующих повышенной эффективности воздействия. Особое место занимает инновационная линейка гранулитов ИСУ, в которой реализован принцип вовлечения материалов рециклинга в производство промышленных взрывчатых составов. Такой подход позволяет рассматривать вторичные ресурсы не как отходы, а как ценную сырьевую базу для создания функциональных компонентов взрывчатых веществ (ВВ). Использование рециклированных материалов способствует снижению потребления первичного сырья и повышению ресурсной эффективности горнодобывающего производства. Гранулиты ИСУ объединяют технологические преимущества традиционных гранулированных составов с принципами экономики замкнутого цикла. Их применение открывает перспективы снижения техногенной нагрузки и формирования более рациональной сырьевой модели производства. Гранулиты Игданит-П, А-3, А-6и и линейка ИСУ демонстрируют современный вектор развития промышленных ВВ – от оптимизации энергетических характеристик до создания ресурсосберегающих и экологически ориентированных технологий.



Левин Лев Юрьевич,
член-корреспондент РАН,
директор Горного института УрО РАН

Горный институт УрО РАН проводит комплексные исследования, направленные на повышение безопасности, эффективности и экологической устойчивости освоения недр. Основные направления работы института связаны с рациональным недропользованием и освоением стратегических георесурсов, изучением подземного пространства в районах крупных промышленных агломераций, а также развитием научных основ мониторинга геосистем и оценки их пространственно-временной трансформации под воздействием природных и техногенных факторов.

В институте имеется развитое геолого-геофизическое направление, представленное отделами геологии месторождений полезных ископаемых, активной сейсмоакустики, лабораториями природной и техногенной сейсмичности, электромагнитных и геопотенциальных полей. Приборная база и кадровый потенциал подразделений позволяют обеспечивать полный цикл геологического сопровождения разработки месторождений полезных ископаемых и выполняемых научных исследований в области наук о Земле. В рамках направления разработаны и внедрены на горнодобывающих предприятиях оригинальные технологии сейсмоакустических исследований на основе распределенных оптоволоконных датчиков, методики прогнозирования особенностей геологического строения и свойств породных массивов при интенсивном освоении месторождений твёрдых полезных ископаемых, усовершенствованы методы дистанционного мониторинга геологической среды и неразрушающего контроля природных и техногенных объектов.

Одним из ключевых направлений является геомеханическое обеспечение горных работ. Разрабатываются и внедряются методы оценки и прогноза деформационных процессов в породных массивах и на земной поверхности, основанные на построении синтезированных математических моделей. В частности, создана технология площадного мониторинга оседаний земной поверхности, базирующаяся на совместном использовании радиолокационной интерферометрии, данных сейсморазведочных исследований и геомеханического моделирования, позволяющая контролировать развитие деформационных процессов при ведении горных работ.

Значительное внимание уделяется цифровизации горного производства. В институте разработаны решения для автономной навигации проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р», применение которых позволяет сокращать технологические простои и повышать эффективность ведения горных работ. Развиваются программные методы построения глубинных сейсмических разрезов межскважинного пространства, а также технологии совместной интерпретации сейсмических и электроразведочных данных, предназначенные для более надёжного выявления локальных неоднородностей и опасных зон в породном массиве.

Отдельный комплекс разработок связан с обеспечением безопасных аэрологических и газодинамических условий на подземных предприятиях. Сформированы научные основы управления проветриванием шахт со сложной разветвлённой сетью, усовершенствованы принципы «вентиляции по требованию», разработаны новые подходы к подготовке воздуха и управлению тепловым режимом горных выработок, а также интеллектуальные системы контроля вредных и горючих газов, пыли, микроклиматических параметров рудничной атмосферы. Разработанный учеными Горного института аналитический комплекс «Аэросеть» сегодня успешно применяется во многих проектных институтах и горнодобывающих предприятиях России, а также Беларуси и Казахстана.

Практическую направленность имеют проводимые исследования в области прогноза и предотвращения газодинамических явлений при ведении горных работ, плановой ликвидации рудников, повышения извлечения руды из недр и управления искусственным замораживанием горных пород при проходке шахтных стволов. Разработанные методы позволяют снижать аварийные риски, повышать надёжность подземного строительства и обоснованность принимаемых технологических решений.

Важной особенностью деятельности Горного института УрО РАН является тесная связь фундаментальных исследований с задачами реального горного производства. Институт выполняет исследования для крупнейших предприятий России и стран СНГ, среди которых ПАО «Уралкалий», ОАО «Беларуськалий», АО «МХК «ЕвроХим», АО «ВКК», АК «АЛРОСА», ПАО «ГМК «Норильский никель» и другие компании. Это позволяет ориентировать научные разработки на конкретные производственные задачи и доводить их до практического применения на горных предприятиях.



Соколов Игорь Владимирович,
доктор технических наук,
директор Института горного дела
УрО РАН

В ИГД УрО РАН выполняются комплексные междисциплинарные исследования, направленные на разработку техники и технологий освоения георесурсов в области: геотехники и геотехнологий добычи твердых полезных ископаемых; систем учета и мониторинга состояния запасов техногенных образований и технологий их ликвидации, консервации, переработке и утилизации; систем геомеханического, геологического и геофизического мониторинга и комплексной оценки состояния подработанных территорий; создания БД природных условий и параметров горнодобывающих предприятий, а также методов технолого-эколого-экономической оценки последствий освоения месторождений.

Разработанное ПО «Транспортная система карьера» позволяет оптимизировать логистические потоки в реальном времени и разрабатывать оптимизированный ремонтный цикл горнотранспортного оборудования, а «ДКК» – на основе данных о рудопотоке оптимизировать параметры транспорта и дробильно-сортировочного комплекса.

Для ПАО «Уралмашзавод» разработаны технологические регламенты для проектирования дробильно-перегрузочных установок (ДПУ). ДПУ-7200 смонтирована на карьере Михайловского ГОКа, три ДПУ-6500 возводятся на Алмалыкском ГМК (Узбекистан). Внедрение ЦПТ с данными ДПУ позволяет снизить эксплуатационные затраты на транспортирование руды в 2–4 раза в сравнении с автотранспортом и заместить ДПУ ThyssenKrupp (Германия) или Metso (Финляндия).

Разработаны и доведены до практического использования:

Методика формирования БД и цифровых моделей гипсометрии водоносных горизонтов в районе ведения горных работ, позволяющая структурировать данные из разнородных источников по гипсометрии, литологии и фильтрационным параметрам. На основе обработки данных ДЗЗ, геофильтрационного, гидрогеомиграционного и физико-химического моделирования разработана система учета комплексного показателя загрязнения горнопромышленных территорий, позволяющая проводить количественное ранжирование защищенности горнопромышленных территорий. Реализуется на территории Урала и Казахстана.

Методика оценки влияния тектонических напряжений на устойчивость уступов и участков бортов, реализованная в виде компьютерных программ: обоснования условий возникновения тектонических подвижек прибортового массива по протяженной трещине; расчёта предельных параметров уступа или группы уступов в зависимости от прочностных свойств протяженной трещины, угла ее падения и величины максимального главного напряжения. Внедряется на карьерах Качканарского ГОКа.

Методика автоматизированного перспективного и текущего планирования открытых горных работ в режиме управления качеством и динамикой развития горнотехнических систем (ГТС). Реализуется при перспективном планировании на ряде предприятий России.

Методика адаптации параметров БВР к изменяющимся горно-геологическим условиям при разработке сложноструктурных месторождений ТПИ в динамике развития ГТС. Внедряется на комбинате Ураласбест и карьере ПАО Магнезит.

Развиваются методы управления производственным риском на горнодобывающем предприятии на основе

контроля и прогноза опасной производственной ситуации. Реализуется на предприятиях ОАО «СУЭК». Технологические новации ИГД УрО РАН широко внедрены на горнорудных предприятиях Урала, Сибири, Дальнего Востока, Казахстана, что позволило существенно повысить эффективность и безопасность горного производства.



Хмелинин Алексей Павлович,
кандидат технических наук,
директор Института горного дела
им. Н.А. Чинакала СО РАН

Институт проводит исследования в следующих научных направлениях: современные геодинамические поля и процессы, вызванные техногенной деятельностью; геомеханика горных пород и их массивов; теория разработки месторождений полезных ископаемых и комплексная переработка минерального сырья на основе ресурсо- и энергосберегающих экологически безопасных технологий; горное и строительное машиноведение.

Для решения актуальной проблемы освоения глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых коллективом института предложена методология моделирования и технологии отработки рудных месторождений в сложных горно-геологических условиях больших глубин. Использование цифровых моделей в рамках методологии позволяет всесторонне исследовать проявления горного давления при выемке полезных ископаемых в различных геолого-геомеханических условиях. Апробация методологии проведена на объектах компаний ПАО «ГМК «Норильский никель» (месторождение Октябрьское) и «Евраз-ЗСМК» (месторождение Таштагольское), а также при проектировании горных работ на Томинском и Маломырском месторождениях.

Разработаны технология и технические средства для дегазации угольных пластов с помощью множественного гидроразрыва. В рамках обоснования параметров технологии формируется 3D-модель углепородного массива с элементами, моделирующими процесс формирования трещин. Технические средства проведения гидроразрыва прошли успешную апробацию на ряде угольных предприятий Кузбасса, в результате чего установлено, что множественный гидроразрыв в среднем позволяет увеличить дебит метана из дегазационных скважин в 10–15 раз по сравнению со скважинами без гидроразрыва.

В сотрудничестве с компанией АО «СУЭК-Кузбасс» разработаны технические средства и технология бурения дегазационных скважин как из подземных условий, так и с дневной поверхности. Для бурения скважин разработаны погружные пневмоударники, адаптированные к использованию на отечественных станках вращательного бурения БУГ-200. Разработаны технология и комплект оборудования для бурения дегазационных скважин ударно-вращательным способом с одновременной обсадкой стальными трубами. Конструкция разработанного комплекта бурового оборудования исключает сужение внутреннего диаметра трубы обсадной колонны, что улучшает условия проведения последующих технологических операций.

Совместно с компанией АО «СУЭК-Кузбасс» для прогноза устойчивости горных выработок в окрестности очистного забоя угольных шахт разработан прибор СТ-ЭМИ-2 для регистрации электромагнитной эмиссии горных пород, предшествующей их разрушению. Прибор и измерительные антенны устанавливаются на передвижное горно-шахтное оборудование, что исключает необходимость их переноса в процессе отработки пласта.

Для решения проблемы импортозамещения буровой техники разработана конструкторская документация для изготовления гидроперфоратора ГП23 – аналога гидроперфоратора COP 1838 HD+.

По заказу компании АО «Машиностроительный холдинг» разработана конструкторская документация узлов самоходного бурового станка – улучшенного аналога буровой установки для открытых горных работ западных производителей. Станок предназначен для бурения взрывных вертикальных и наклонных скважин диаметром до 270 мм и глубиной до 60 м. При бурении возможно использование как шарошечного долота, так и пневмоударников высокого давления.



Рассказов Игорь Юрьевич,
академик РАН, директор
Хабаровского федерального
исследовательского центра
ДВО РАН

Для входящего в состав нашего Центра Института горного дела ДВО РАН приоритетными являются исследования в области геотехнологии, геомеханики, обогащения полезных ископаемых, геоэкологии и ряда других направлений горной науки.

В Институте разработаны эффективные методы и аппаратные средства геомеханического мониторинга массива горных пород при разработке опасных по горным ударам месторождений полезных ископаемых. К их числу относится автоматизированная система контроля горного давления «Prognoz-ADS», которая на основе сейсмоакустического мониторинга способна прогнозировать опасные проявления горного давления, выявлять и контролировать потенциально удароопасные участки, тем самым значительно повышая безопасность горных работ. Система отличается высокой разрешающей способностью, широкими частотным и динамическим диапазонами, прецизионной точностью регистрации времени начала сигнала, а также наличием оригинального программного обеспечения для управления элементами системы.

Высокую оценку специалистов получили также микро-

сейсмическая система «Prognoz-S» и прибор для экспресс-оценки состояния горного массива «Prognoz-L2». Все вышеперечисленные измерительные комплексы для контроля и управления горным давлением широко применяются на предприятиях России и ближнего зарубежья.

Показали высокую эффективность разработанные в ИГД ДВО РАН промывочные приборы ПБШ-100, позволяющие перерабатывать золотосодержащие пески природных и техногенных россыпных месторождений, в том числе содержащие тонкое и мелкое золото. В них заложено более десятка защищенных патентами РФ инновационных решений. Каждый новый прибор совершенствуется с учетом полученного опыта эксплуатации. Приборы ПБШ-100 эксплуатируются на целом ряде объектов Дальнего Востока и были положительно оценены недропользователями.

Ведутся работы по созданию технологии безцианидных схем извлечения полезных компонентов из различных по минеральному составу руд благородных и цветных металлов, а также отходов обогащения, предусматривающих применение электро-фото-активированных растворов и водно-газовых эмульсий. В результате испытаний активированных реагентов на рудах и россыпях месторождений различных полезных ископаемых, в том числе на золото-медно-порфировых рудах Малмыжского месторождения и рудах месторождения Чульбаткан (Хабаровский край), установлена их высокая эффективность. Применение активированных реагентов позволит значительно сократить период выщелачивания и достичь более высоких показателей извлечения в сравнении с традиционными технологиями.

Для оптимизации процессов подготовки взрывчатых веществ, заряжания скважин и производства взрыва разработан метод обеспечения качества скважинного заряда из наливных эмульсионных взрывчатых веществ, основанный на контроле скорости детонации зарядов. Внедрение этого метода на действующих угольных разрезах позволило повысить уровень эффективности и безопасности буровзрывных работ и снизить на 10–15 % и более выделение вредных газов в атмосферу.

Сотрудниками ИГД ДВО РАН получены новые научные результаты в области парлифтной добычи геотермальной энергии, и на их основе по заказу недропользователей были разработаны практические рекомендации по повышению эффективности процессов добычи и транспортировки флюидов на высокотемпературных геотермальных месторождениях России.



Ткач Сергей Михайлович,
доктор технических наук, директор Института горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН

ИГДС СО РАН является единственным академическим учреждением горного профиля на Северо-Востоке России, проводящим комплексные исследования в области освоения месторождений полезных ископаемых в условиях криолитозоны.

В области горной теплофизики. Разработан программный комплекс для совместного расчета температурного режима сети горных выработок и массива вмещающих пород криолитозоны, позволяющий обосновать оптимальные параметры системы регулирования вентиляционного и теплового режимов рудника, прогнозировать интенсивность протаивания горного массива и устойчивость горных выработок. Разработана методика расчета и контроля температурного режима грунтов оснований башенных копров рудников, учитывающая климатические и гидрогеологические условия, а также тепловые характеристики стволов, влияющие на режимы работы замораживающей установки. Использование данной методики позволило АК «АЛРОСА» обеспечить устойчивость башенных копров на длительный период их эксплуатации.

В области геотехнологии. Для рудников АК «АЛРОСА» разработана технология возведения теплозащитных набрызгбетонных крепей, позволившая существенно улучшить качество крепления горных выработок, снизить скорость выветривания пород и расходы на крепление выработок. На золоторудном месторождении Бадран в Республике Саха (Якутия) внедрена технология подземной разработки с льдопородной закладкой: значительно улучшены показатели извлечения руды, потери снижены с 28–30% до 3%. На разрезе «Кангаласский» реализованы рекомендации, исключающие повторное смерзание горных пород при бестранспортной системе разработки месторождения угля.

Разработан программно-аппаратный комплекс георадиолокационных исследований, позволяющий с достаточной степенью точности и достоверности решать задачи доразведки месторождений, получать информацию о детальном строении и криогенном состоянии массива многолетнемерзлых горных пород. Разработана георадиолокационная технология, позволяющая с борта вертолета осуществлять мониторинг толщины ледового покрова и заторообразований на северных реках. Технология успешно прошла межведомственные испытания и в настоящее время используется МЧС в Республике Саха (Якутия) при разработке превентивных мероприятий в период ледохода на реках Якутии.

Разработаны технологии и оборудование для сухого обогащения минерального сырья в условиях криолитозоны. В частности, совместно с ЗАО «Усольмаш» (г. Усолье-Сибирское) разработано, изготовлено и испытано в натурных условиях основное оборудование для модульной передвижной рудообогатительной установки по переработке руды малообъемных месторождений золота. Разработано и прошло опытно-промышленные испытания высокоэффективное оборудование для пробоподготовки и сухого обогащения полезных ископаемых (роторная дробилка многократного ударного действия РД-МДВ-900, мельница-дробилка роторная МДР, вертикальный центробежный измельчитель ВЦИ-12, пневмосепаратор ПОС- 200).

В области глубокой переработки углей разработана технология и установка для производства гуминовых удобрений из бурых углей методом термовыщелачивания при выходе гуматов (стимуляторов роста растений) до 85% от сухой беззольной массы угля.

РЕКЛАМА
16+

СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

BELAZ

ГАРАНТИЯ НАДЁЖНОЙ РАБОТЫ ВСЕХ УЗЛОВ ВАШИХ САМОСВАЛОВ ОТ КОЛЬСКОГО ПОЛУСТРОВА ДО КАМЧАТКИ

- **УЛУЧШЕННЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА**
- **СООТВЕТСТВУЮТ НОВЕЙШИМ ТРЕБОВАНИЯМ**
- **СПОСОБСТВУЮТ УВЕЛИЧЕНИЮ МЕЖСЕРВИСНЫХ ИНТЕРВАЛОВ УЗЛОВ И АГРЕГАТОВ**
- **ГАРАНТИРУЮТ ЗАЯВЛЕННЫЙ РЕСУРС РАБОТЫ АГРЕГАТОВ**



По вопросам приобретения обращайтесь к генеральному дистрибьютору АО «ТД «БЕЛАЗ»:

info@tdbelaz.ru ***+7 (495) 956-41-40***

О предстоящем выездном заседании Высшего горного совета России в рамках юбилейной XV Международной горнопромышленной конференции МГПК БАЭП-2026

Интервью ВРИО Исполнительного директора Ассоциации «Горнопромышленники России» ***Сергея Юрьевича Кононенко***



12–13 ноября 2026 года в Кировске Мурманской области пройдет XV Международная горнопромышленная конференция «Баренц-Арктическое экономическое партнерство – взгляд в будущее» (МГПК БАЭП-2026). Тема конференции – «Развитие потенциала минерально-сырьевых ресурсов Арктики на основе экономики замкнутого цикла: лучшие практики». Тема выездного заседания Высшего горного совета России и Комитета ТПП РФ по энергетической стратегии и развитию ТЭК – «Практика поддержки освоения минерально-сырьевых ресурсов (МСР) арктических проектов: энерговооруженность, добыча, переработка, логистика, сбыт». Ключевым событием первого дня станет выездное заседание Высшего горного совета России.

– Сергей Юрьевич, какое значение для Высшего горного совета имеет проведение выездного заседания именно в Кировске и именно в рамках юбилейного БАЭП-2026?

– Кировск и в целом Кольский полуостров – это один из ключевых горнопромышленных центров российской Арктики, где в реальном производственном контуре соединены добыча, переработка сырья, энергетика, наука, кадры и инфраструктура. Поэтому выездной формат для Высшего горного совета принципиален: он позволяет обсуждать отраслевые задачи не в отрыве от производства, а непосредственно там, где эти задачи решаются каждый день.

Юбилейный, пятнадцатый БАЭП дает для этого особенно содержательную площадку. Кроме того, проведение конференции и выездного заседания Высшего горного совета приурочено к 25-летию «ФосАгро», что придает программе дополнительный юбилейный контекст и позволяет обратиться к накопленному компанией производственному и технологическому опыту. В программе объединены представители горнодобывающих и энергетических предприятий, научных организаций, региональной власти и профессионального сообщества. Для нас важно, чтобы заседание стало не формальным мероприятием, а рабочей площадкой, где можно сопоставить стратегические задачи с практикой предприятий Арктической зоны.

– Какие темы станут центральными в дискуссии на выездном заседании Высшего горного совета?

– Актуальная программа выездного заседания формирует три взаимосвязанных содержательных блока. Первый – «Ключевые подходы к развитию минерально-сырьевого потенциала России: взаимодействие власти, науки, бизнеса». В нем будут рассмотрены освоение минерально-сырьевых ресурсов Арктической зоны Российской Федерации в рамках Стратегии МСБ РФ-2050, роль Мурманской области в развитии российской Арктики, опыт «ФосАгро» и роль прикладной российской науки в освоении минерально-сырьевых ресурсов Арктики.

Второй блок – «Стратегия развития предприятий горнопромышленного и энергетического секторов на примере ведущих предприятий экономики АЗРФ. Раздел: лучшие практики». Здесь речь пойдет уже о конкретных производственных решениях: глубоком переделе сырья на объектах Кировского филиала АО «Апатит» с использованием российских технологий, международном опыте добычи минерального сырья в условиях подземной выработки, роли Кольской АЭС, развитии производства меди, никеля и кобальта, создании российского редкоземельного кластера, диверсификации производственной линейки и инновационных разработках для горнодобывающей отрасли.

Третий блок – «Партнерство и кооперация предприятий горного машиностроения, сервиса и цифрового менеджмента с производственными предприятиями ГПК Арктики». Он посвящен взаимодействию производителей, сервисных и технологических компаний непосредственно с горнопромышленными предприятиями. В программе, в частности, заявлены тема эволюции ИТ-решений для геологоразведки и перехода к цифровым экосистемам, а также презентационные доклады компаний по практическим технологическим решениям. Таким образом, три блока последовательно соединяют стратегический уровень, лучшие практики предприятий и конкретные инструменты промышленной кооперации, сервиса и цифровизации.

– Почему вопрос поддержки арктических минерально-сырьевых проектов рассматривается именно через всю цепочку – от добычи до сбыта?

– Потому что в Арктике особенно хорошо видно: слабое звено в любой части цепочки способно повлиять на экономику всего проекта. Можно иметь качественную ресурсную базу и современную технологию добычи, но столкнуться с ограничениями по энергоснабжению, логистике или переработке. И, наоборот, развитая инфраструктура не даст полной отдачи без эффективной сырьевой и производственной модели.

Поэтому нам важно обсуждать проект как единую систему. Для Высшего горного совета это возможность свести в одном разговоре интересы недропользователей, энергетиков, переработчиков, производителей оборудования, науки и регионов. Именно такой межотраслевой подход позволяет переходить от фиксации проблем к конкретным решениям. Предстоящее выездное заседание станет хорошим продолжением заседания Высшего горного совета, прошедшего в мае 2026 года, и позволит развить ранее обозначенные подходы уже применительно к практической повестке российской Арктики.

– В программе отдельное место занимает Мурманская область и опыт предприятий Кольского полуострова. Почему регион сегодня особенно важен для отраслевой повестки?

– Мурманская область дает очень показательный пример того, как в арктическом регионе взаимодействуют горнодобывающий комплекс, энергетика, наука и промышленная инфраструктура. В первом блоке программы предусмотрено отдельное выступление «Мурманская область – флагман развития современной русской Арктики». Во втором блоке представлены лучшие практики предприятий, работающих в регионе и Арктической зоне: КФ АО «Апатит», АО «Северо-Западная фосфорная компания», АО «Ковдорский ГОК», Кольская АЭС, АО «Кольская ГМК», ООО «Ловозерский ГОК» и АО «Олкон». Третий блок дополняет эту повестку вопросами партнерства и кооперации предприятий горного машиностроения, сервиса и цифрового менеджмента с производственными предприятиями горнопромышленного комплекса Арктики.

Особое значение имеет и географическое, и геополитическое положение Мурманской области. Мурманск – незамерзающий глубоководный порт, имеющий через Баренцево море выход к Северной Атлантике и тесно связанный с развитием Северного морского пути. Это делает регион важным звеном арктической логистики и связывает его промышленную и минерально-сырьевую повестку с транспортными коридорами и освоением Арктики. Для нас это важно именно как практический материал: не абстрактная модель, а реальные решения, которые уже работают или проходят апробацию в сложных северных условиях и могут быть полезны для других арктических территорий.

– Насколько важен в работе Высшего горного совета прямой диалог между бизнесом, наукой и региональной властью?

– Это один из ключевых принципов нашей работы. В президиуме выездного заседания проектом программы заявлены Председатель Высшего горного совета Юрий Шафраник, губернатор Мурманской области Андрей Чибис, генеральный директор ФИЦ КНЦ РАН академик Сергей Кривовичев и генеральный директор ПАО «ФосАгро» Александр Гильгенберг. Кроме того, к участию в заседании заявлены руководитель Федерального агентства по недропользованию Олег Казанов и Министр промышленности и торговли Российской Федерации Антон Алиханов. Сам состав показывает, что разговор строится сразу на нескольких уровнях – отраслевом, федеральном, региональном, научном и корпоративном.

Особое значение имеет участие прикладной науки. В программе отдельно предусмотрена тема роли российской науки в решении вопросов освоения минерально-сырьевых ресурсов Арктики. Нам необходимо, чтобы научные разработки быстрее доходили до промышленного применения, а предприятия, в свою очередь, формулировали для исследовательского сообщества конкретный технологический запрос.

– Как общая тема БАЭП-2026 – экономика замкнутого цикла – связана с повесткой Высшего горного совета?

– Связь прямая. Для горнопромышленного комплекса экономика замкнутого цикла – это прежде всего более полное и рациональное использование минерального сырья, повышение глубины переработки, снижение потерь и развитие технологий, позволяющих эффективнее использовать ресурсы на всех этапах производства.

В актуальной программе эта тема получает конкретное выражение во втором блоке заседания. В частности, заявлен доклад о системном внедрении глубокого передела сырья на объектах КФ АО «Апатит» с использованием российских технологий и о создании механизма стимулирования технологий замкнутого цикла. Поэтому для Высшего горного совета экономика замкнутого цикла рассматривается не как отдельная абстрактная тема, а через конкретные производственные практики и технологические решения предприятий.

– В чем будет заключаться третий, практический блок программы и почему он важен для Высшего горного совета?

– Третий блок программы называется «Партнерство и кооперация предприятий горного машиностроения, сервиса и цифрового менеджмента с производственными предприятиями ГПК Арктики». Он логично продолжит первые два блока: после обсуждения стратегических подходов и лучших практик предприятий акцент будет перенесен на конкретные решения, которые могут применяться непосредственно в производственном контуре.

В программе третьего блока заявлена тема «Эволюция ИТ-решений для геологоразведки – переход к цифровым экосистемам», которую представит генеральный директор ООО «АГР Софтвер» Ростислав Билик. Далее предусмотрено время для презентационных докладов компаний по темам, утверждаемым Редакционным советом МГПК БАЭП; в проекте программы отдельно обозначены АО «Эвобласт» с докладом о повышении эффективности буровзрывных работ и АО «Уралхим».

Для Высшего горного совета этот блок важен тем, что он связывает стратегическую отраслевую повестку с конкретными технологиями, оборудованием, сервисом и цифровыми решениями. После его завершения программой предусмотрено подведение итогов заседания и принятие проекта резолюции. Таким образом, результаты всех трех блоков должны получить итоговое оформление в проекте резолюции заседания.

– Какую роль в программе играет обмен лучшими практиками крупных предприятий?

– Это принципиально важная часть. Первый блок включает выступление генерального директора ПАО «ФосАгро»

Александра Гильгенберга на тему «ФосАгро – история мирового лидерства». Второй блок целиком посвящен стратегии развития предприятий горнопромышленного и энергетического секторов на примере ведущих предприятий экономики Арктической зоны Российской Федерации и разделу «лучшие практики».

В нем представлены конкретные кейсы КФ АО «Апатит», АО «Северо-Западная фосфорная компания», АО «Ковдорский ГОК», Кольской АЭС, АО «Кольская ГМК», ООО «Ловозерский ГОК», АО «Олкон» и ОАО «БЕЛАЗ». Наша задача – не ограничиваться демонстрацией успешных кейсов, а понять, какие технологические, производственные, энергетические и кооперационные решения могут быть полезны для развития других арктических проектов.

– Что должно стать практическим результатом заседания Высшего горного совета и всей конференции?

– Для нас результат – это не только сама дискуссия на выездном заседании. Важно, что программа выстроена последовательно: первый блок рассматривает ключевые подходы к развитию минерально-сырьевого потенциала России через взаимодействие власти, науки и бизнеса; второй переводит разговор на уровень стратегий и лучших практик конкретных предприятий Арктической зоны; третий посвящен партнерству и кооперации предприятий горного машиностроения, сервиса и цифрового менеджмента с производственными предприятиями ГПК Арктики.

По завершении трех содержательных блоков предусмотрено подведение итогов заседания и принятие проекта резолюции. Поэтому мы рассчитываем, что обсуждение трех блоков позволит сформулировать конкретные предложения по освоению минерально-сырьевых ресурсов Арктики, развитию глубокой переработки, энергетическому обеспечению, технологической кооперации, сервису и цифровизации горнопромышленного комплекса.

– Какого результата лично вы ожидаете от юбилейного БАЭП-2026?

– Хотелось бы, чтобы пятнадцатый БАЭП стал точкой, где мы не только подведем итог накопленному опыту, но и сформируем понятную повестку следующего этапа развития горнопромышленного комплекса российской Арктики.

Кировск для такого разговора – очень правильное место. Здесь непосредственно представлены крупные горнопромышленные предприятия, научная база и энергетическая инфраструктура региона. Если по итогам заседания нам удастся связать стратегические задачи с лучшими практиками предприятий и конкретными технологическими, сервисными и кооперационными решениями, это и будет одним из главных практических результатов работы Высшего горного совета в рамках конференции.

Примечание:
Интервью актуализировано на основании проекта программы выездного заседания Высшего горного совета России и Комитета ТПП РФ по энергетической стратегии и развитию ТЭК от 21.09.2026. Состав участников, формулировки тем и расписание могут уточняться организаторами.



XV Международная горнопромышленная конференция «Баренц-Арктическое экономическое партнерство – взгляд в будущее» (МГПК БАЭП-2026)

г. Кировск, Мурманская обл., 12-13 ноября 2026 года.

Развитие потенциала минерально-сырьевых ресурсов Арктики на основе экономики замкнутого цикла: лучшие практики.

Конференция проводится под патронатом Высшего горного совета,
НП «Горнопромышленники России» и при поддержке Правительства Мурманской области.

Регистрация на конференцию уже открыта

Подробнее о конференции на сайте: **conference.ncci.ru**

МАГМА

Единая цифровая среда для геологов, маркшейдеров и производства

16+

РЕКЛАМА

Разработано в рамках ИЦК «Металлургия»

МАГМА Минерал
Управление горно-геологическими данными

МАГМА Гео
Горно-геологическое моделирование и проектирование

МАГМА План
Проектирование и планирование горных работ

МАГМА Контроль
Управление открытыми и подземными горными работами

ЦИФРОВОЙ ГОРИЗОНТ

→ digital-horizon.ru
→ t.me/magma_digital_horizon
→ info@digital-horizon.ru

ИНСТИТУТ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА МФТИ

IMC Montan

Институт ИИ МФТИ, Академия горных наук и IMC Montan подписали соглашение о сотрудничестве

7 октября 2026 года в рамках проведения горно-геологического форума МАЙНЕКС Россия 2026 Институт искусственного интеллекта МФТИ, Академия горных наук и международная консалтинговая компания IMC Montan подписали соглашение о долгосрочном сотрудничестве. Партнёрство направлено на развитие и внедрение цифровых технологий в горнодобывающей, нефтегазовой, перерабатывающей промышленности, геологоразведке и геологических поисковых работах.

Соглашение охватывает несколько технологических направлений: искусственный интеллект, облачные технологии, кибербезопасность, роботизацию и автономные мобильные системы. Совместная работа будет ориентирована на повышение производительности, эффективности и безопасности предприятий и развитие новых технологических решений для отрасли.

Партнёрство объединяет научную базу и R&D-компетенции Института ИИ МФТИ, отраслевую экспертизу Академии горных наук и практический опыт IMC Montan. Такое взаимодействие позволит точнее определять запросы индустрии к научным и инженерным командам, формировать задачи для разработки востребованных ИИ-решений и сокращать путь от научного результата до его практического применения.



Президент Академии горных наук Сергей Никишичев, генеральный директор Института искусственного интеллекта МФТИ Азамат Жилоков и технический директор IMC Montan Андрей Твердов

В числе приоритетных задач сотрудничества – развитие технологий для поиска и прогнозирования запасов полезных ископаемых, планирования добычи и обогащения сырья, управления технологическими процессами горно-обогатительных предприятий, роботизации и создания автономных систем. Отдельное направление связано с повышением безопасности сотрудников предприятий и предотвращением аварий.

Стороны планируют обмениваться экспертными мнениями и информацией о потребностях отрасли в цифровых решениях, готовить предложения по созданию консорциумов для проведения исследований и разработки технологий искусственного интеллекта, востребованных в масштабе отрасли, и участвовать в профильных форумах, семинарах и выставках.

После подписания участники обсудили актуальные задачи горнодобывающей отрасли, в том числе необходимость объединения усилий компаний в вопросах цифровизации, импортозамещения и применения искусственного интеллекта в процессах добычи и переработки. Эксперты отметили, что объединение научной, отраслевой и инженерной экспертизы может повысить эффективность разработки новых решений и ускорить их внедрение на предприятиях.

Соглашение подписали генеральный директор Института искусственного интеллекта МФТИ **Азамат Жилоков**, президент Академии горных наук **Сергей Никишичев** и технический директор IMC Montan **Андрей Твердов**.

Подписанное соглашение формирует основу для дальнейшей совместной работы и реализации проектов в сфере цифровых технологий для горнодобывающей, нефтегазовой, перерабатывающей промышленности и геологоразведки. Конкретные научно-исследовательские, опытно-конструкторские и прикладные проекты будут оформляться отдельными договорами.

16+

РЕКЛАМА

ФИРМЕННЫЙ СЕРВИС BELAZ

ОТ МОТОРА ДО КОЛЕСА



Качественные оригинальные запасные части, фильтры и смазочные материалы BELAZ

Сервис БЕЛАЗ рядом в режиме 24/7

Восстановительный ремонт и реновация техники

Онлайн-мониторинг технического состояния парка техники

Онлайн-сервис крупногабаритных шин

Услуги ТО, планового и аварийного ремонта

Мобильный сервис выездными бригадами

По вопросам сервисного обслуживания и ремонта обращайтесь к официальному дилеру:
ИП ООО «HAUL TRUCKS-CA»

info@h-truck.com ***+998-71-203-09-23***

Сервис БЕЛАЗ: от МОТОРА до КОЛЕСА

Б.П. Горбунов, канд. техн. наук, директор по сервису АО «ТД «БЕЛАЗ»

Карьерный самосвал – это высокотехнологичное транспортное средство, безопасная и эффективная работа которого напрямую зависит от соблюдения правил и регламентов завода-изготовителя по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту.

Отход от соблюдения правил в любой сфере, связанной с работой сложной техники на опасном производстве – это всегда риски:

- нанесения тяжкого вреда здоровью персонала и угрозы для жизни людей;
- убытков из-за повреждения или утраты техники;
- увеличения непроизводственных потерь из-за простоя в ремонте;
- снижения ходимости крупногабаритных шин и сверхкрупногабаритных шин;
- повышения расходов на ГСМ (топливо, масла, специальные жидкости).

Для исключения или сведения к минимуму вышеперечисленных рисков эксплуатирующих организаций, завод-изготовитель ОАО «БЕЛАЗ», занимающий доминирующую долю рынка в России и одно из ключевых мест в мире среди производителей карьерной техники, обеспечивает в регионах присутствия надежный фундамент для реализации своей сервисной политики:

1. **Широкое покрытие территории Российской Федерации инфраструктурой фирменного сервиса**: более 2600 человек, 151 мобильная бригада, 13 Центров технической поддержки, 85 опорных пунктов.
2. **Обученный сертифицированный персонал** центров технической поддержки, опорных пунктов и мобильных бригад ТО и ремонта на сервисных автомобилях с наличием всех средств механизации работ.
3. **Широкая сеть региональных складов** фирменных запасных частей, фильтров и смазочных материалов в непосредственной близости от мест эксплуатации – 41 консигнационный склад общей площадью более 14,5 тыс. м^2;
4. **Наличие достаточного количества подменных агрегатов** на складе или опорном пункте официального дилера в регионе эксплуатации парков техники для сокращения времени простоя оборудования в ремонте (ДВС, тяговые генераторы и электродвигатели, ГМП и ведущие мосты и т.д. в пропорции 1/10-20 самосвалов в зависимости от модели).

Вся инфраструктура фирменного сервиса БЕЛАЗ в России обеспечивает качественные и доступные программы ТО, планового, аварийного и капитального ремонта техники, ее узлов и агрегатов.

Доступен восстановительный ремонт дорогостоящих базовых узлов: наплавка, шлифовка, механическая и термообработка, сложный ремонт электрических машин, а также оперативный полевой ремонт выездными мобильными бригадами.

Систематические воздействия делятся на две основные группы:

1. **Профилактические:** техническое обслуживание, анализ масел и специальных жидкостей, удаленный мониторинг технического состояния техники.
2. **Восстановительные:** плановый, аварийный и капитальный ремонт узлов и агрегатов карьерных самосвалов.

Регулярное сервисное обслуживание силами аттестованных сервисных центров завода-изготовителя, техническими средствами и оригинальными, одобренными производителем техники материалами позволяет обеспечить надежную и бесперебойную работу техники многие годы.

Крупные узлы и агрегаты карьерной техники, ремонтируемые Центрами технической поддержки БЕЛАЗ

1	Ремонт ДВС	
2	Ремонт РМК	
3	Ремонт тяговых генераторов	
4	Ремонт тяговых электродвигателей	
5	Ремонт шкафов управления	
6	Ремонт ГМП	
7	Ремонт заднего моста	
8	Ремонт подвесок (ПГП)	
9	Ремонт ЦОМ	

Ремонт узлов и агрегатов в дилерской сети «БЕЛАЗ» позволяет значительно снизить простои техники во время текущего (аварийного ремонта), планового и капитального ремонта за счет наличия оборотного ремонтного фонда узлов и агрегатов, гарантируя качество выполненных работ и стабильную работоспособность парка карьерной техники в течение всего жизненного цикла.

Преимущества узлового ремонта в дилерской сети «БЕЛАЗ»:

1. Комплексный подход для проведения плановых и капитальных ремонтов техники.
2. Отсутствие простоев техники на время восстановительного ремонта узлов и агрегатов.
3. Экономия до 20% в сравнении с приобретением новых компонентов.
4. Агрегаты и узлы сравнимы по надежности и ресурсу с новыми изделиями.
5. Гарантия для защиты интересов эксплуатирующих организаций.
6. Компоненты проходят сборку и испытания по стандартам качества ОАО «БЕЛАЗ».
7. В процессе ремонта используются 100% оригинальные запчасти и расходные материалы.
8. Возможность модернизации отдельных деталей в процессе узлового ремонта для обеспечения более высоких характеристик.

Ремонт двигателей внутреннего сгорания

На базе Центров технической поддержки (ЦТП) дилеров «БЕЛАЗ» работают участки по текущему и капитальному ремонту ДВС, элементов топливной аппаратуры и электрооборудования. Высококвалифицированными мотористами, прошедшими обучение у производителей двигателей, производятся разборочно-сборочные, дефектовочные и восстановительные работы.

Разборочно-сборочные работы:
- разборка двигателя на стенде (снятие навесного оборудования, ГБЦ, масляного поддона, поршней, коленвала)
- мойка и очистка деталей

Дефектовка и контроль:
- измерение геометрических параметров деталей
- выявление микротрещин, задиров, царапин
- проверка вращающихся деталей на биение и соосность
- сортировка деталей (годные, подлежащие восстановлению, негодные)
- составление перечня необходимых запасных частей

Механообработка:
- опрессовка ГБЦ на герметичность
- фрезеровка плоскостей ГБЦ
- замена направляющих втулок клапанов
- правка фасок клапанов

Ремонт топливной аппаратуры:
- диагностика и ремонт форсунок
- обслуживание и регулировка ТНВД

Регулировочные и пусконаладочные работы:
- пробный запуск двигателя после ремонта



Процесс ремонта ДВС ГЗПД на манипуляторе-кантователе



Балансировка ротора электрических машин после ремонта



Ремонт РМК на специализированном оборудовании



Ремонт гидромеханической передачи



Испытания и обкатка гидромеханической передачи после ремонта



Ремонт цилиндра подвески

Испытания и обкатка:
- приработка двигателя после сборки
- контрольное испытание на соответствие техническим параметрам
- обкатка двигателя с соблюдением режима нагрузок
- финальная проверка работоспособности всех систем

Постоянное наличие и своевременное наполнение склада оригинальных запасных частей и материалов обеспечивает надежный и своевременный результат.

Ремонт электрических машин

Самосвалы БЕЛАЗ грузоподъемностью от 90 тонн и выше имеют электромеханическую трансмиссию. Все элементы тягового электропривода самосвала (тяговый генератор, электродвигатели, шкаф управления и установка вентиляции тормозных резисторов, силовые кабели) могут быть профессионально отремонтированы и испытаны на высокотехнологичном оборудовании с оформлением соответствующих протоколов.

Основные виды работ по электрическим машинам:

Диагностика и оценка состояния:
- замер ключевых параметров (температура, вибрация, нагрузка)
- проверка заземления и сопротивления изоляции
- визуальный осмотр и выявление дефектов
- составление отчёта с рекомендациями по ремонту

Профилактическое обслуживание:
- очистка от загрязнений (обтирка, продувка)
- смазка подвижных частей и замена расходных материалов
- проверка работоспособности защитных устройств

Локальный ремонт узлов:
- замена изношенных деталей
- восстановление изоляции и частей обмоток
- шлифовка и полировка контактных колец

Комплексное восстановление механической и электрической части:
- полная разборка оборудования с дефектовкой всех узлов
- перемотка или замена обмоток
- ремонт или замена базовых элементов (вал, станина, подшипниковые щиты)
- предварительные испытания перед финальной наладкой

Специализированные работы (по типу оборудования):
- генераторы – балансировка роторов с вентиляторными колесами, проверка полюсов
- машины постоянного тока — обслуживание коллекторов и щёточного аппарата

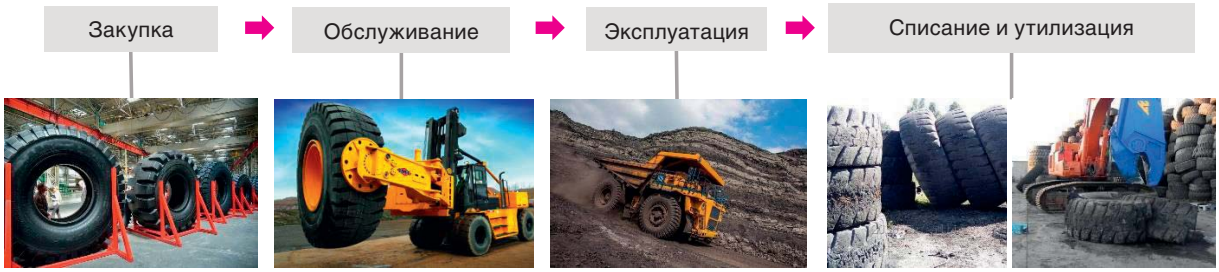
Финальная наладка и испытания:
- замеры электрических параметров и сопротивления изоляции
- настройка систем защиты и автоматики
- пробные пуски под нагрузкой
- выдача протокола испытаний и рекомендаций по эксплуатации

Сервис крупногабаритных и сверхкрупногабаритных шин «БЕЛШИНА»

При закупке шин предприятие должно завести карточку учета работы на каждую шину. Карточка шины хранит весь жизненный цикл шины от момента ввода в эксплуатацию до списания и дальнейшей утилизации.

Для эффективного управления шинами на горнодобывающем предприятии важно следить за состоянием и историей каждой шины.

Жизненный цикл шины



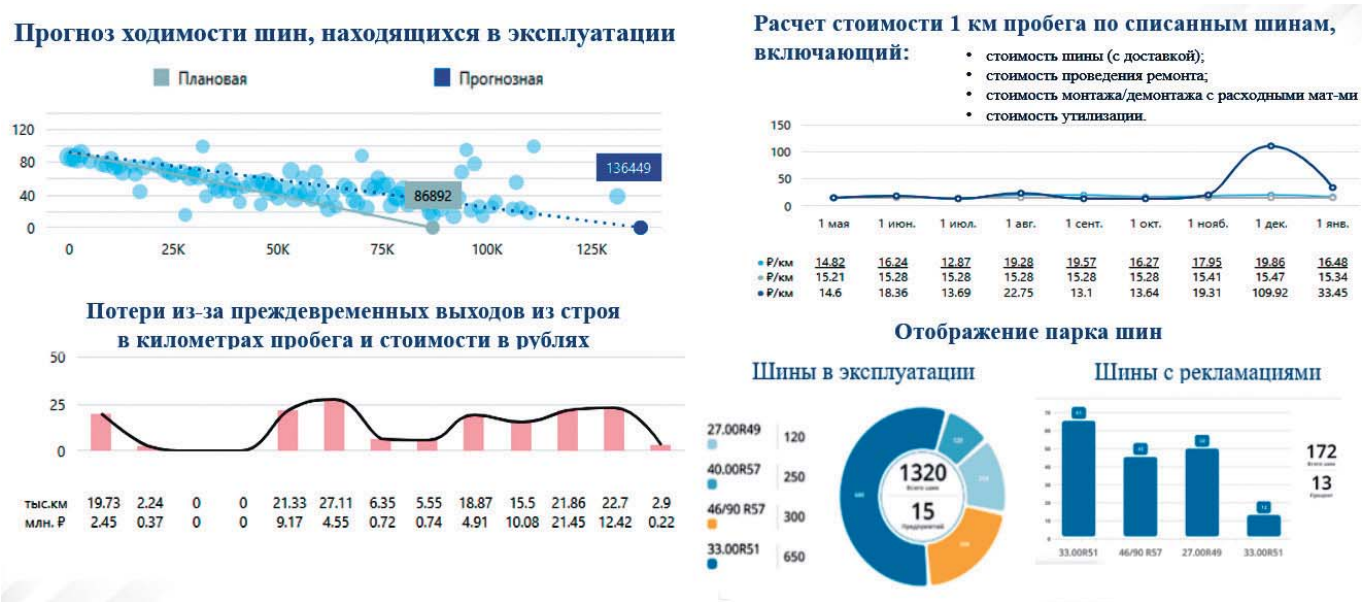
Основные преимущества шинного сервиса от дилеров «БЕЛАЗ»:
- Автоматизация сбора, хранения и анализа информации на всем жизненном цикле шины.
- Индивидуальный подход к каждому потребителю.
- Гарантийное обслуживание шин до полного износа.
- Оптимальное соотношение цена/качество.
- Индивидуальный контроль качества эксплуатации шин.
- Мониторинг состояния шин и условий эксплуатации с помощью онлайн-сервиса в режиме реального времени.
- Постоянный анализ и контроль режимов эксплуатации квалифицированными шинными инженерами: пробег, давление, температура, нагрузка на шину, показатель ТКВЧ, интенсивность износа.
- Проведение осмотров и замеров остаточной глубины протектора каждой шины не менее 1 раза в 2 недели.
- Ежеквартальное посещение мест эксплуатации представителями дилера и ОАО «БЕЛШИНА» с целью проведения обследования условий эксплуатации с предоставлением рекомендаций по дальнейшей эксплуатации и прогноза ходимости шин.
- Оперативное урегулирование рекламационных случаев.

Система онлайн-мониторинга «ШИНЫ» разработана специально для управления всем жизненным циклом крупногабаритных шин (КГШ) и сверхкрупногабаритных шин (СКГШ), поставляемых для карьерной техники БЕЛАЗ.

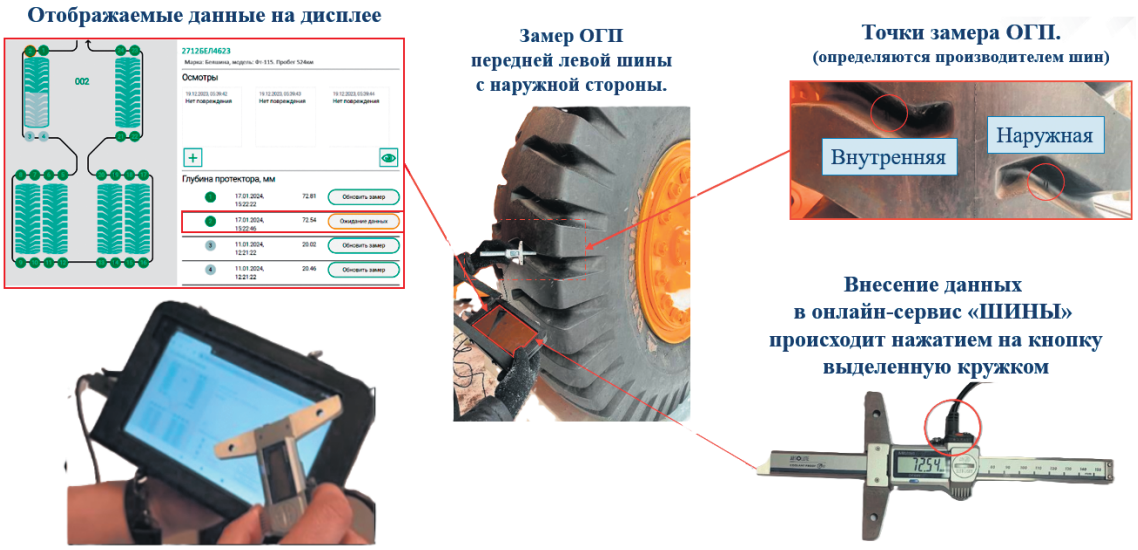
Программное обеспечение для системы онлайн-мониторинга «ШИНЫ» позволяет:

1. Организовать системную и эффективную работу шинных инженеров с большим массивом данных по всему парку КГШ и СКГШ на предприятии.

Пример отображения аналитики о работе шин в системе онлайн-мониторинга «ШИНЫ»



Пример проведения аудита парка шин в системе онлайн-мониторинга «ШИНЫ»



2. Автоматизировать сбор и анализ получаемой информации о ходимости шин, причинах их преждевременного выхода из строя.
3. Повысить прозрачность рекламационной работы и исключить субъективный фактор при принятии решений по гарантийным случаям.
4. Предупреждать преждевременные выходы из строя шин.
5. Управлять жизненным циклом шин.

Использование системы онлайн-мониторинга «ШИНЫ» для осуществления контроля и ведения учета КГШ и СКГШ позволяет увеличить ходимость шин на 5–10%, а также сократить аварийные сходы на 30–40%.

Ценность работы с официальной дилерской сетью «БЕЛАЗ»:

1. Ремонт по технологии завода-изготовителя с гарантией ходимости узлов.
2. Соблюдение всех норм контроля качества и безопасности.
3. Компетенции и техническая поддержка завода-изготовителя техники ОАО «БЕЛАЗ».
4. Широкая дилерская сеть из 13 центров технической поддержки и 85 пунктов технического обслуживания на территории Российской Федерации и Республики Узбекистан.
5. Современное оборудование, оригинальные запасные части и технологии ремонта завода-изготовителя.
6. Квалифицированный кадровый состав, прошедший обучение на заводе-изготовителе техники.
7. Полный комплекс гарантийного и постгарантийного обслуживания от ТО до капитального ремонта, ремоторизации и модернизации техники в соответствии с конструкторской документацией завода-изготовителя БЕЛАЗ.
8. Индивидуальный подход к каждому ремонту.
9. **Единое окно для обращений и оперативного принятия решений по всем узлам и агрегатам техники: от МОТОРА до КОЛЕСА.**

Холодный резерв электроснабжения северного объекта:
требования, предъявляемые к силовым трансформаторам, и конструктивные решения

В.В. Рыжков, главный конструктор по силовым трансформаторам ОАО «СЗТТ»

Промышленное развитие северных регионов, в том числе Арктики, является одним из приоритетов политики Российской Федерации. Особую роль в данном процессе занимают горнодобывающая и нефтегазовая отрасли, объекты которых работают в экстремальных природно-климатических условиях. Эксплуатация данных объектов требует применения энергооборудования, способного обеспечить бесперебойное питание горнодобывающих предприятий, а также выдерживать низкие температуры до минус 60 °С.

Изготовлением энергетического оборудования: измерительных трансформаторов тока и напряжения до 110 кВ, силовых трехфазных и однофазных трансформаторов, способных эксплуатироваться в условиях пониженных температур, занимается ОАО «Свердловский завод трансформаторов тока» (ОАО «СЗТТ»).

На данный момент ОАО «СЗТТ» изготавливает две линейки силовых трехфазных трансформаторов: номинальной мощностью от 10 до 63 кВА (рис. 1) и от 100 до 4000 кВА (рис. 2) различного конструктивного исполнения. Трансформаторы первой группы (от 10 до 63 кВА) изготавливаются для установки в малогабаритных ячейках комплектных распределительных устройств (КРУ). Данные трансформаторы имеют небольшие габариты и обладают защитой от внешних воздействующих факторов за счёт того, что обмотки высокого и низшего напряжения заливаются в общей литьевой форме, образуя единый моноблок. По требованию заказчика трансформаторы изготавливаются с медными и алюминиевыми проводами.



Рис. 1 **Силовой трансформатор ТЛС-40 кВА:**
а – общий вид; б – литой блок

Трансформаторы второй группы (от 100 до 4000 кВА), в отличие от моноблочных моделей малой мощности, изготавливаются с раздельными обмотками низшего и высокого напряжения. Главная особенность данных изделий заключается в том, что намотка высоковольтной обмотки выполняется проводом, низковольтная обмотка, в свою очередь, изготавливается из фольги. Материал проводников выбирается по требованию заказчика.

Для надёжной работы в аварийных режимах, а также для эксплуатации в особо холодных климатических условиях об-



Рис. 2 **Силовой трансформатор ТЛС мощностью 1600 кВА**

мотки высокого напряжения изготавливаются с армированием внутренних и внешних поверхностей катушки стеклосеткой, после чего заливаются компаундом. Межслоевая изоляция формируется стеклосетками различных толщин. Толщина продольной изоляции выбирается исходя из напряжения между слоями.

Такое конструктивное решение обеспечивает механическую прочность в соответствии с требованиями основных отраслевых ГОСТов, в том числе стойкость к коротким замыканиям, которая подтверждена фактическими испытаниями.

Одним из главных факторов, который определяет надёжную работу силовых трансформаторов в районах с экстремально холодным климатом, является качество используемого компаунда.

Так как с середины XX века ОАО «СЗТТ» непосредственно связан с литой изоляцией, на предприятии действует собственная химическая лаборатория, осуществляющая входной контроль поступающего компаунда, подбор его составов и оценку поставщиков. Также на заводе функционируют две климатические камеры, позволяющие проводить регулярные исследования новых компаундов при различных климатических условиях. В целях компенсации коэффициента теплового расширения подбираются различные составы компаундов для алюминиевых и медных обмоток, что, в свою очередь, обеспечивает работоспособность силовых трансформаторов в климатической категории УХЛ2 до минус 60 °С.



Рис. 3 Исследовательские испытания компаунда

Каждая новая опытная партия компаунда проходит исследовательские испытания. Образцы заливаются в виде шестигранников и проходят испытания посредством воздействия низких и высоких температур. Испытания проводятся в два этапа по два цикла. На первом этапе проводится два цикла испытаний: компаунд охлаждается до температуры минус 45 °С, далее проводится нагрев до температуры 140 °С. В случае положительного результата испытаний проводится следующий этап – два цикла испытаний: компаунд охлаждается до температуры минус 60 °С, затем осуществляется нагрев компаунда до температуры 140 °С (рис. 3).

Если заливочная система прошла первичные исследовательские испытания и принято решение применить её при изготовлении силовых трансформаторов, начинается этап климатических испытаний литых блоков (рис. 4). Испытания проводятся в два этапа по одному циклу. Литые блоки помещаются в климатическую камеру и охлаждаются до температуры минус 45 °С, затем нагреваются до температуры 140 °С. После успешного прохождения первого этапа испытания литые блоки охлаждают до температуры минус 60 °С, после чего проводится нагрев до температуры 140 °С.



Рис. 4 Климатические испытания литых блоков

На объектах горнодобывающей отрасли силовые трансформаторы могут длительное время находиться в резерве. При возникновении нештатных ситуаций может потребоваться оперативно ввести в работу трансформатор, который продолжительное время находился без нагрузки. Запуск силового трансформатора, который простаивал в условиях низких температур без выполнения комплекса мероприятий по прогреву и сушке трансформатора, может привести его к необратимому выходу из строя. Велик риск появления внутренних трещин в изоляции между витками или слоями, вследствие чего затрачивается большое время на восстановление энергоснабжения, что, в свою очередь, может привести к нарушению производства и дорогостоящим простоям.

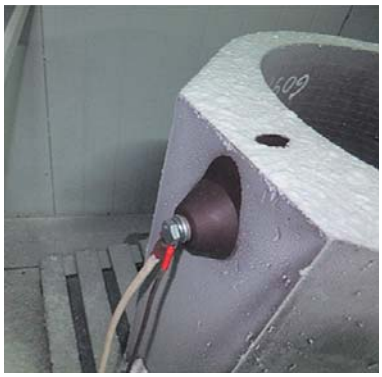


Рис. 5 Испытания литых блоков на тепловой удар (класс С4)

Для исключения подобных рисков в испытательном центре ОАО «СЗТТ» проводится испытание термической ударной нагрузкой (класс С4) по ГОСТ 54827–2011 – это один цикл испытаний при подаче двойного номинального тока (рис. 5). При этом нагрев обмоток трансформатора продолжается до достижения температуры 140 °С.

Суть данного исследования заключается в том, что подача двойного тока номинального тока при температуре минус 60 °С позволяет достоверно сымитировать холодный пуск трансформатора в условиях экстремально низких температур.

Критерием успешного прохождения данного испытания является целостность литых блоков, то есть отсутствие трещин, а также последующая проверка внутренней изоляции литых блоков индуктированным напряжением и измерение частичных разрядов.

По результатам климатических испытаний далее проводится решение о применении данной партии компаунда в изготовлении литых блоков для силовых трансформаторов.

В рамках испытаний силовых трансформаторов для работы в условиях Арктики и районов Крайнего Севера на предприятии проводится уникальное исследование – определение

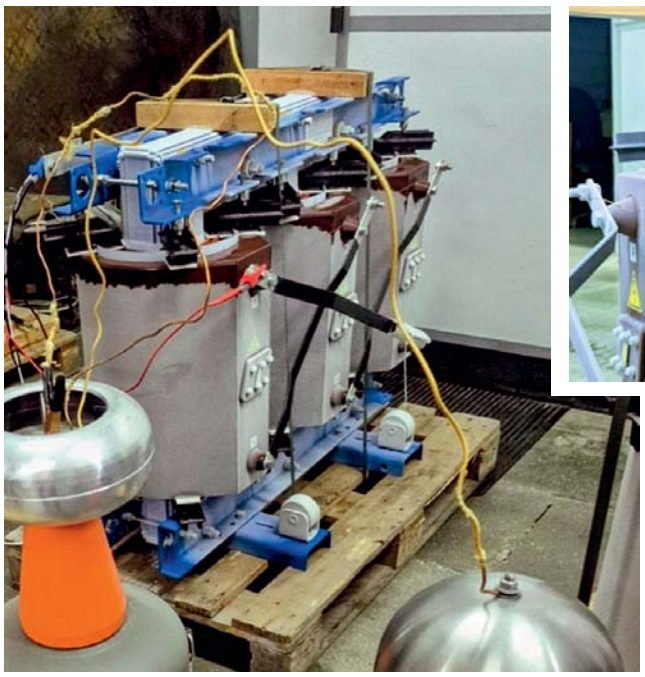




Рис. 6 Определение диэлектрических характеристик трансформатора при пониженных температурах

диэлектрических характеристик трансформатора при пониженных температурах (рис. 6).

Суть данного исследования заключается в следующем: трансформатор помещается в климатическую камеру, где происходит постепенное охлаждение до температуры минус 60 °С, затем на трансформатор подаётся напряжение промышленной частоты 20 кВ. В процессе испытания контролируются сопротивления изоляции трансформатора на всех участках в соответствии с Руководством по эксплуатации силовых трансформаторов.

Результатом данных испытаний является готовность трансформаторов ОАО «СЗТТ» к эксплуатации в суровых климатических условиях пониженных температур с возможностью холодного пуска без риска растрескивания компаунда без проведения мероприятий по прогреву и сушке трансформаторов.

Помимо безотказной работы горнодобывающего сектора в экстремальных природно-климатических условиях одним из ключевых факторов является обеспечение технологического суверенитета оборудования для энергоснабжения объектов горнодобывающей отрасли. ОАО «СЗТТ» одно из немногих ведущих предприятий, которое имеет полный цикл производства, где все этапы изготовления подвергаются строгому контролю качества. Выпускаемая продукция полностью соответствует Постановлению РФ от 17.07.2015 г. № 719 «О подтверждении производства российской промышленной продукции» за счёт применения отечественных материалов и комплектующих, а также изготовления энергетического оборудования на собственных мощностях предприятия. Это подтверждается включением выпускаемых трансформаторов в Реестр российской промышленной продукции Минпромторга РФ №10577846 и наличием аттестации крупнейших холдингов, что, в свою очередь, позволяет ОАО «СЗТТ» конкурировать с зарубежными аналогами в условиях замещения импортного оборудования.

В подтверждении надежности изготавливаемого оборудования ОАО «СЗТТ» готово расширить гарантийный срок на литую изоляцию трансформатора от климатического растрескивания до 10 лет.

СЗТТ / СВЕРДЛОВСКИЙ ЗАВОД ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

620043, Россия, г. Екатеринбург, ул. Черкасская, 25
тел.: **8 (800) 201-03-77**; +7 (343) 234-31-04
e-mail: cztt@cztt.ru
www.cztt.ru • СЗТТ.рф

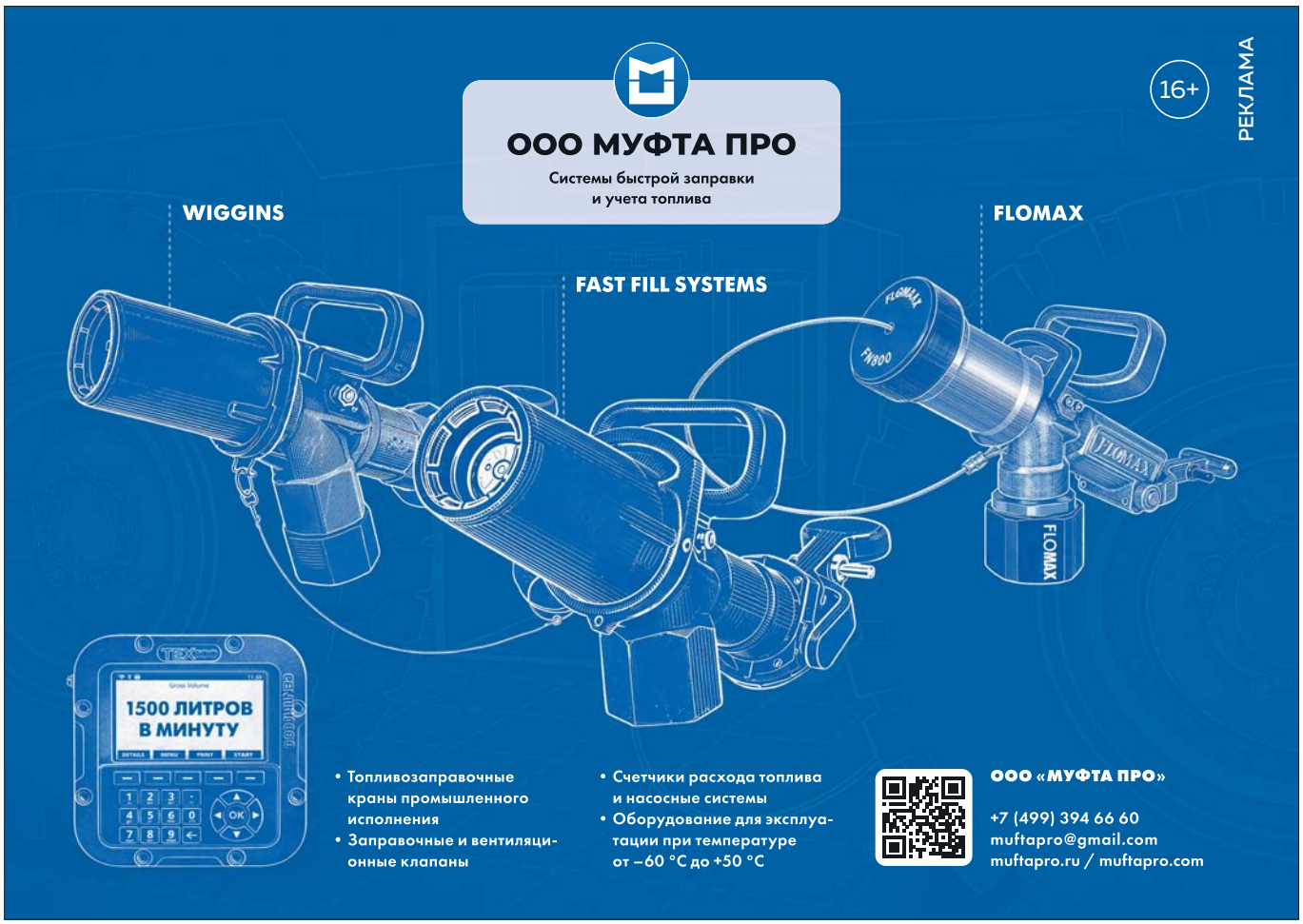
О КОМПАНИИ

ОАО «Свердловский завод трансформаторов тока» (СЗТТ) в декабре 2026 года отмечает свой 85-летний юбилей. История предприятия началась в декабре 1941 года, с небольшой ремонтной мастерской для электродвигателей оборонных заводов, а уже к середине 1950-х годов стало первым в СССР производителем измерительных трансформаторов тока с литой эпоксидной изоляцией.

В настоящее время завод представляет собой мощный научно-производственный комплекс полного цикла, самостоятельно разрабатывающий новые виды электротехники. Ассортимент продукции включает измерительные трансформаторы тока и напряжения, распределительные устройства, комплектные подстанции и силовые трансформаторы. Общий объем номенклатуры завода превышает 100 тыс. видов продукции с ежедневным выпуском около 750 высокотехнологичных изделий и историческим рубежом в 10 миллионов произведенных трансформаторов.

СЗТТ развивает новые производственные площадки в Екатеринбурге, активно участвует в программе импортозамещения и продолжает расширять линейки энергоэффективного оборудования. Высокое качество оборудования подтверждено собственным испытательным центром, проводящим 555 видов тестов, а продукция официально аттестована для объектов ПАО «Россети» и сертифицирована по международным стандартам менеджмента качества.





МЕХАНОБР ТЕХНИКА

РОССИЙСКИЙ РАЗРАБОТЧИК И ПРОИЗВОДИТЕЛЬ ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

СЕПАРАТОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВАЛКОВЫЕ ТИПА ЭВС

ПРЕДНАЗНАЧЕНЫ ДЛЯ:

- доводки черновых редкометальных/редкоземельных концентратов (ильменитовый, вольфрамитовый, лопаритовый, оловянный, танталовый, алмазосодержащий, золотосодержащий, марганцевый, рутиловый, ниобиевый и др.);
- обогащения различных руд с целью получения продуктов, близких по составу к мономинеральным (гранат, пегматит, вермикулит, волластонит, нефелин);
- сухого магнитного обогащения слабомагнитных руд;
- обезжелезивания различных материалов (кварцевый песок, керамика, полевой шпат, абразивы и др.);
- лабораторных исследований и полупромышленных испытаний.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ:

- плавная регулировка магнитной индукции с возможностью получения максимального значения до 2 Тл (на зубцах валка);
- быстрая очистка рабочей поверхности от налипших магнитных включений;
- возможность получения за один цикл сепарации до четырёх продуктов, различающихся по магнитным свойствам;
- сыпучие материалы крупностью -6+0,071 мм.



WWW.MTSPB.COM

sales@mtspb.com 8 (812) 331-02-43 8 (800) 550-35-56

РЕКЛАМА 16+

ООО «Синотех Машинери»

Комплексные решения для горнодобывающих предприятий



«Синотех Машинери» работает с 2022 года и развивает сервисную и инженерную поддержку горнодобывающих предприятий России. В основе компании команда специалистов и руководителей с опытом работы в ведущих международных компаниях отрасли. Их компетенции охватывают весь жизненный цикл техники: от технико-экономического обоснования и подбора парка до поставки, ввода в эксплуатацию, обслуживания и капитального ремонта.

Компания выстраивает работу вокруг производственных задач заказчика и технической готовности оборудования. Обязательства по КТГ закрепляются в сервисных договорах, а по согласованию с заказчиком на его площадке организуется постоянное сервисное присутствие, в том числе в рамках MARC-контракта.

Мы попросили Романа Александровича Колпакова, генерального директора ООО «Синотех Машинери», рассказать о работе компании.

– В чем уникальность вашей компании?

– Для горнодобывающего предприятия ценна не сама машина, а тонны горной массы, которые она перевозит или отгружает каждую смену. Поэтому мы рассматриваем каждый проект с точки зрения дальнейшей эксплуатации: как обеспечить необходимую производительность, организовать обслуживание и поддерживать техническую готовность парка.

По сути, мы сервисная компания с инженерными компетенциями и возможностью комплексно оснащать предприятия техникой. Наши специалисты понимают, как оборудование ведет себя в реальных условиях, какие ресурсы потребуются для его эксплуатации и что необходимо предусмотреть еще на этапе выбора.

В основе нашей работы три принципа. Первый: решение под параметры производства. Мы анализируем условия работы, объемы и логистику карьера, готовим технико-экономическое обоснование и подбираем состав парка, количество и сочетание машин.

Второй: готовность техники как обязательство. Мы готовы закреплять согласованные показатели в сервисном договоре вместе с условиями их обеспечения, порядком расчета и ответственностью сторон.

Третий: сервис рядом с заказчиком. Специалисты, запасные части и необходимое оснащение должны быть доступны там, где работает техника.

Заказчик может обратиться к нам с производственной задачей, еще не имея готовой спецификации. Мы проработаем решение, организуем поставку, сборку и ввод в эксплуатацию, подготовим сервисную поддержку. При этом учитываем и оборудование, которое уже работает на предприятии: новый парк должен вписываться в существующий производственный процесс.

– Сегодня при выборе поставщика оборудования большое значение имеют наличие складов запасных частей и сервисного обслуживания. Расскажите о контракте MARC, по которому работает «Синотех Машинери».

– В разговорах с заказчиками мы часто слышим, что основные сложности возникают уже после поставки: техника есть, а запасных частей, специалистов или понятного порядка решения технических вопросов не хватает. Поэтому сервисное обеспечение мы рассматриваем как обязательную часть подготовки проекта.

MARC (maintenance and repair contract) – это контракт на техническое обслуживание и ремонт. Его основа в системной работе с оборудованием: регламентном обслуживании, диагностике, плановых регулировках и ремонтах, включая превентивную замену компонентов до возникновения отказа. Конкретный состав работ и ответственность сторон определяются договором.

Наши специалисты совместно с представителями заводов-изготовителей разрабатывают технологические карты обслуживания, оценивают ресурс компонентов и планируют их замену с учетом наработки и фактического состояния. Такой подход помогает заранее готовить запасные части и согласовывать работы с производственным графиком заказчика.

Наличие запасных частей является одним из ключевых условий обеспечения КТГ. Мы формируем запасы компонентов и развиваем сервисную инфраструктуру на территории заказчиков. Консигнационная модель позволяет разместить необходимые компоненты на объекте без требования предварительного выкупа всего запаса.

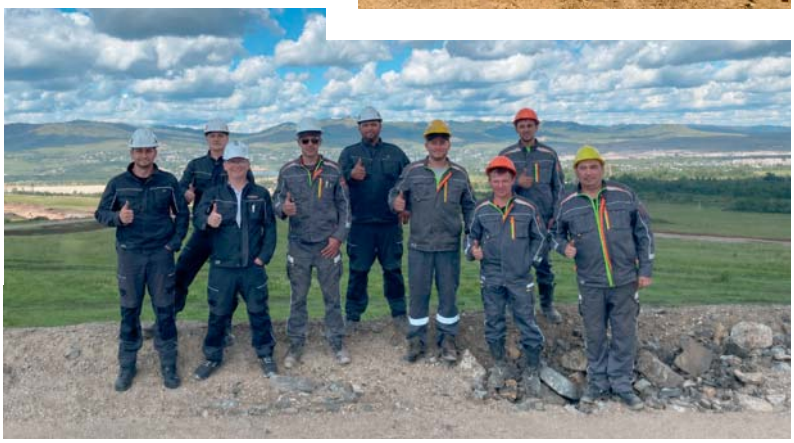
Сегодня наши склады включают ГСМ, сервисные пакеты, рукава высокого давления, основные агрегаты и режущие элементы. По мере расходования запас пополняется до установленного неснижаемого остатка.

Для поставляемого парка мы организуем сервисное сопровождение, в том числе с постоянным присутствием на площадке. В действующих сервисных договорах предусмотрены обязательства по КТГ не ниже 0,85. Мы готовы закреплять показатели технической готовности и ответственность за их обеспечение в договорах.









Целевые значения, методику расчета и условия согласовываем с заказчиком применительно к конкретному проекту.

– Главное богатство любой компании – люди. Расскажите о вашей команде.

– Свою трудовую деятельность я начал в 2006 году, еще совсем молодым выпускником. На протяжении 20 лет моя работа связана с горным производством. Со многими сотрудниками нашей компании я знаком лично с давних пор, и для меня особенно ценно, что сегодня мы работаем в одной команде.

В «Синотех Машинери» работают специалисты и руководители с опытом в Hitachi, Volvo, Liebherr, Caterpillar, Komatsu и других международных компаниях. Это люди, которые занимались поставками и эксплуатационной поддержкой горной техники, организовывали сервис на удаленных объектах, выполняли сложные ремонты и отвечали за результат перед заказчиком.

Этот опыт дает нам широкую техническую базу и понимание разных подходов к обслуживанию оборудования. У команды есть опыт диагностики сложных неисправностей, планирования ремонтов и восстановления оборудования, взаимодействия с изготовителями и поставщиками компонентов. Поэтому отправной точкой для нас всегда служат условия работы и задача предприятия.

Этот опыт подкреплен выстроенными процессами внутри компании. Сервисные специалисты на объектах работают во взаимодействии с центральной службой технической поддержки, логистикой запасных частей, гарантийным отделом и продуктовым менеджментом. Технические вопросы, обеспечение компонентами и исполнение обязательств перед заказчиком решаются в рамках общей системы.

Главное отличие моей команды в том, что люди понимают свою ответственность и заинтересованы в общем результате. Я благодарен каждому, кто продолжил свою карьеру в «Синотех Машинери». На сложных проектах особенно заметно, насколько важны опыт, взаимная поддержка и готовность довести работу до конца.

– В каких регионах есть представительства компании?

– Наши представительства работают во всех федеральных округах Российской Федерации. Основные сервисные хабы находятся в Красноярске и Чите.

При этом география сервиса определяется прежде всего расположением объектов заказчиков. Для удаленного предприятия важен не только адрес ближайшего представительства, но и то, кто будет обслуживать машины, где находятся запасные части и как организовать ремонт. Поэтому в крупных проектах мы развиваем сервисное присутствие непосредственно на площадке, формируем запас компонентов и определяем необходимое оснащение.

– Откуда вы поставляете запасные части? Есть ли возможность использовать российские компоненты и выполнять восстановительные ремонты?

– Значительная часть поставок оборудования сегодня связана с нашими партнерами из КНР. При этом на машинах используются агрегаты и компоненты различных мировых производителей. При подборе запасных частей мы учитываем технические требования, совместимость, ресурс и условия гарантии.

Возможность применения российских компонентов рассматриваем по конкретному узлу. Такая замена должна быть технически обоснованной. Для сложных агрегатов во многих случаях целесообразнее восстановительный ремонт.

На базе нашего ремонтно-складского комплекса в Красноярске доступны ремонты силовых агрегатов и гидравлических цилиндров, а также полный цикл обслуживания и ремонта шоссейных самосвалов и гусеничных бульдозеров.

Мы выполняем капитальные ремонты как в цехах, так и непосредственно на объекте заказчика. После диагностики и дефектовки определяем состав работ, потребность в запасных частях и сроки. Выбор места ремонта зависит от его сложности, оснащения площадки и возможности транспортировки машины или агрегата. Это позволяет подобрать решение с учетом состояния техники и производственных планов предприятия.

– Какую гарантию на поставляемую технику вы предоставляете заказчику?

– Гарантия является частью общей системы сервисного сопровождения. Заказчику важно понимать, к кому обращать-

ся при неисправности, кто проведет диагностику и как будут организованы необходимые работы.

По отдельным поставкам мы предоставляем гарантию сроком один год без ограничения наработки машины. Конкретные сроки, состав покрытия и порядок выполнения гарантийных обязательств фиксируются в договоре.

Мы исполняем гарантийные обязательства перед заказчиком. Для этого у нас выстроено взаимодействие гарантийного отдела, центральной службы технической поддержки, логистики запасных частей и сервисных специалистов. Организуем диагностику, поставку необходимых компонентов и выполнение гарантийных работ, взаимодействуем с изготовителем по техническим вопросам.

Заказчик обращается к нам и получает сопровождение до устранения неисправности в рамках гарантийных обязательств. После окончания гарантии техническая поддержка и обслуживание продолжаются на согласованных условиях.

– С какими компаниями вы работаете? Есть ли у вас ключевые заказчики?

– Мы работаем с горнодобывающими предприятиями на всей территории Российской Федерации. Среди наших заказчиков крупные золотодобывающие и угольные компании.

География поставок и организации сервисного присутствия охватывает Мурманскую и Иркутскую области, Красноярский и Забайкальский края, а также Сахалин со своими особенностями логистики и климата.

Мы выстраиваем взаимодействие по принципу одного окна, объединяя поставку оборудования и его дальнейшую эксплуатационную поддержку.

Для нас партнерство продолжается на протяжении всего жизненного цикла машины. По мере развития предприятия меняются состав парка, нагрузки и потребности в ремонтах. Наша задача в том, чтобы сервисное обеспечение соответствовало этим изменениям.

– Расскажите подробнее о проекте с «Мангазея Майнинг».

– В 2026 году мы начали масштабный проект, предусматривающий поставку 55 единиц техники. Такое оснащение требует большой подготовительной работы. Она начинается задолго до поступления машин на предприятие и продолжается после их ввода в эксплуатацию.

«Мангазея Майнинг» работает в Забайкальском крае с 2011 года и выполняет полный цикл работ: геологоразведку, проектирование карьеров, добычу и переработку на собственных мощностях. Компания развивается, и для нового проекта необходимо было обеспечить согласованную работу разнопланового парка.

Программа поставки включает:

- 23 жесткорамных самосвала грузоподъемностью 90 тонн;
- 17 трехосных самосвалов грузоподъемностью 60 тонн;
- 3 гидравлических экскаватора с обратной лопатой массой 200 тонн;
- 2 колесных бульдозера;
- 2 гидравлических экскаватора с обратной лопатой массой 120 тонн;
- парк гусеничных бульдозеров массой 40–50 тонн;
- фронтальный погрузчик с шинозахватом с поворотом на 360°.

Большая часть оборудования уже поставлена на участок и эксплуатируется. Поставки будут продолжены и в 2027 году.

За каждой единицей техники стоит цепочка работ: подготовка, транспортировка, сборка, наладка, проверка, ввод в эксплуатацию и организация сервисной поддержки. Для минимизации простоев условия для технического обслуживания и оперативного ремонта необходимо создавать одновременно с поставкой парка.

На площадке заказчика мы организовали склад запасных частей. Его номенклатура формируется под установленный парк, чтобы необходимые для обслуживания и ремонта компоненты были доступны на месте. Для удаленного производственного объекта это особенно важно.

Также заключен сервисный договор на два года, предусматривающий показатели КТГ в диапазоне 0,85–0,90 в соответствии с согласованными условиями. Такая модель дает заказчику основу для планирования эксплуатации и оценки качества сервисного сопровождения.

В число ключевых задач вошла подготовка машинистов и операторов. Проводим вводные инструктажи по безопасным и эффективным приемам работы: теоретическую часть и практику непосредственно на технике. Оцениваем знания и практические навыки персонала, даем рекомендации по дополнительной подготовке. Особое внимание уделяем предсменным проверкам, рабочим режимам, ежедневному обслуживанию и действиям при обнаружении неисправностей.

Нехватка квалифицированных операторов остается серьезной проблемой отрасли. При вводе нового оборудования подготовка персонала особенно важна: от нее зависят безопасность, производительность и ресурс машин.

Этот проект показывает, как работают вместе наши инженерные, сервисные и организационные компетенции. Подбор и поставка техники, ее запуск, подготовка персонала, запасные части и ремонт должны быть согласованы между собой. Именно такую работу мы берем на себя, чтобы заказчик мог сосредоточиться на выполнении производственной программы.

Беседовала Наталия Матвиевская

sinotechmach.ru



16+
РЕКЛАМА

BELSHINA

НОВЫЕ СОВРЕМЕННЫЕ КРУПНОГАБАРИТНЫЕ И СВЕРХКРУПНОГАБАРИТНЫЕ

ШИНЫ «BELSHINA»

25-63 дюйма

ОБОРУДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОНЛАЙН-МОНИТОРИНГА «ШИНЫ»



Гарантийное обслуживание шин и индивидуальный контроль условий эксплуатации

Подбор шин под условия эксплуатации

Мониторинг состояния шин в режиме реального времени в мобильном приложении

Управление всем жизненным циклом крупногабаритных шин (КГШ) и сверхкрупногабаритных шин (СКГШ)

Использование системы онлайн-мониторинга «ШИНЫ» позволяет увеличить ходимость шин **более чем на 10%**, а также сократить аварийные сходы **на 30-40%**

МОБИЛЬНОЕ РАБОЧЕЕ МЕСТО ШИННОГО ИНЖЕНЕРА



КОНТРОЛЬ 24/7

По вопросам приобретения обращайтесь к официальному дилеру: ИП ООО «HAUL TRUCKS-CA»

info@h-truck.com *+998-71-203-09-23*

РЕКЛАМА 16+

СПК СТЫК

21 год вместе с вами!

Российский производитель

оригинальных механических соединений конвейерных лент

оригинального инструмента для монтажа соединений

оригинального аккумуляторного взрывозащищенного инструмента и оборудования

«Сарган»
линейное устройство отрезки конвейерной ленты



Предназначено для быстрого и ровного отрезания резинотканевого и монопрокладочного ленточного полотна



Не требует предварительной разметки или использования дополнительных инструментов (ножей, рулеток, шаблонов)

Вся продукция собственной разработки и защищена патентами!

г. Новокузнецк, проезд Защитный, д.28 кор.9
Телефон: 8-(3843)-99-14-26
E-mail: info@spk-styk.ru
www.spk-styk.ru

НОЯБРЬ' 2026

12.11-13.11 БАРЕНЦ-АРКТИЧЕСКОЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ПАРТНЕРСТВО» – «МГПК БАЭП – 2026»
Международная горнопромышленная конференция
Мурманская обл., Кировск
Тел.: +78152 55 47 20; +7902 281 14 88
E-mail: conference@ncci.ru
www.conference.ncci.ru

16.11-18.11 MINING WORLD SUMMIT
Россия, Москва
Тел.: +7 (495) 136-39-84
+7 (968) 443-51-22
E-mail: Irina.Kachalova@ite.group
www.summit.miningworld.ru

17.11-20.11 БИОТ-2026: БЕЗОПАСНОСТЬ И ОХРАНА ТРУДА
30-я Юбилейная выставка-форум
Тел.: +7495 789 93 20
E-mail: biot-@asiz.ru
www.biot-expo.com

24.11-26.11 SEYMARTEC DIGITAL. ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ В ГОРНОЙ ДОБЫЧЕ, МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГЕТИКЕ И НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ
Россия, Челябинск
Тел.:+7 351 2003735; +7 499 6382329
E-mail: info@seymartec.ru
https://seymartec.ru

25.11-26.11 ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ РОССИИ И СНГ: ДОБЫЧА, СТРОИТЕЛЬСТВО И МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ
4-й международный форум
Россия, Москва
Тел.: +7 495 109 9 509
E-mail: AShekurova@vostockcapital.com
www.nonferrousmetals.ru

ДЕКАБРЬ' 2026

04.12 ГОРНОДОБЫВАЮЩАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ, ФОРУМ
Россия, Москва
Тел. :+7495 276 77 88
E-mail: info@creon-group.com
www.creon-conferences.com

ФЕВРАЛЬ' 2027

даты уточняются НЕДЕЛЯ ГОРНЯКА – 2027
Международный научный симпозиум
Россия, Москва, МИСиС (Горный институт)
Тел.: +7 499 230-25-28
E-mail: minersweek@misis.ru
www.misis.ru

08.02-09.02 NEDRA 4.0,
Конгресс по цифровизации и устойчивому развитию горнодобывающей отрасли
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: + 7495 198 63 40
E-mail: nedra4@sbproect.ru
www.nedra4.ru

17.02-18.02 ГОРНОРУДНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ РОССИИ И СНГ: СТРОИТЕЛЬСТВО И МОДЕРНИЗАЦИЯ
7-я профессиональная конференция
Россия, Мурманск
Тел.: +7 495 109 9 509
VPenzova@vostockcapital.com
www.miningrussiaconference.com

МАРТ' 2027

11.03-12.03 TECH MINING СИБИРЬ
6-я Международная конференция, выставка и технический визит
Россия, Красноярск
Тел.: +7495 138-98 97
E-mail: info@techmining.ru
www.siberia.techmining.ru

16+

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ЧЕМПИОНАТ CASE-IN

От дронов до сверхзвуковых струй:
какие решения предложили участники CASE-IN для повышения безопасности добычи алмазов

Студенты ведущих технических вузов России предложили новые подходы к решению одной из самых сложных задач подземной добычи алмазов – ликвидации зависаний горной массы на руднике «Удачный» АК «АЛРОСА» (ПАО). Финалисты направления «Горное дело» XIV сезона Международного инженерного чемпионата CASE-IN, который проводится при поддержке президентской платформы «Россия – страна возможностей», представили проекты, направленные на повышение безопасности и эффективности горных работ.

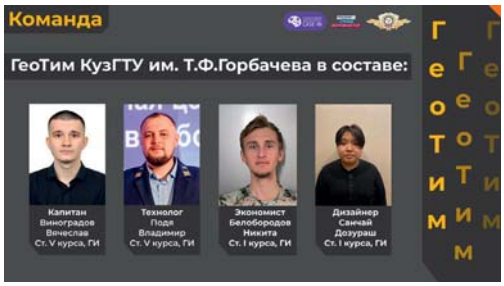
Перед участниками стояла практическая задача: найти способ борьбы с зависаниями горной массы, которые образуются в очистных пространствах. Такие зависания приводят к внеплановым переездам погрузочно-доставочной техники и перерасходу взрывчатых материалов и, что особенно важно, требуют проведения опасных работ по их ликвидации.

Как пояснил эксперт чемпионата, доцент Уральского государственного горного университета **Константин Кокарев**, ежегодно на предприятии фиксируется около 1300 случаев зависаний и каждый из них приводит к остановке производства на участке более чем на четыре часа, увеличивая затраты и создавая дополнительные риски для персонала.





Победителем в направлении «Горное дело» стала команда «Нефритовый забой» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова. Студенты предложили максимально исключить присутствие человека в опасной зоне и использовать для обследования зависаний промышленный дрон Flyability Elios 3 с LiDAR-сканером, способный строить трехмерную модель очистного пространства даже в условиях высокой запыленности. После определения места образования затора к работе подключается дистанционно управляемый роботизированный комплекс Brokk 300, который выполняет разрушение свода без участия людей. Еще одним элементом проекта стала система прогнозирования. Используя данные бурения и внутрискважинной съемки, алгоритмы искусственного интеллекта заранее выявляют участки массива, где вероятность образования зависаний наиболее высока. По расчетам команды, внедрение решения позволит окупить проект менее чем за год.



«Команды-соперники тоже предложили ряд интересных решений. Но большое значение имеет именно подача информации и качество подготовки презентации. Мы хорошо ориентировались в своем материале, рассказывали, а не читали с листа. Эксперты дали нам ценную обратную связь и подсказали, как можно еще улучшить проект», – отметил капитан команды «Нефритовый забой» **Леонид Васильев.**

Второе место заняла команда GeoFox Забайкальского государственного университета. Авторы проекта предложили использовать комбинацию георадара с искусственным интеллектом для поиска дефектов в массиве, а для разрушения заторов – сверхзвуковую струю водорода, которая за доли секунды разрушает свод за счет быстрого расширения газа в порах породы. Несмотря на значительные первоначальные инвестиции, расчеты показали высокую экономическую эффективность такого подхода при длительной эксплуатации.

Бронзовым призером стала команда «Андеграунд» НИТУ МИСИС. Студенты сделали ставку на физические свойства глинистых пород и предложили использовать ультразвуковые установки, вызывающие разжижение глинистых включений и контролируемое разрушение зависаний. Дополнительно команда разработала систему телеметрического сопровождения буровзрывных работ, позволяющую повысить эффективность добычи и сократить эксплуатационные затраты.

Анализ проектов финалистов CASE-IN показал несколько устойчивых тенденций развития горнодобывающей отрасли: так, практически все команды использовали цифровые модели месторождений и технологии искусственного интеллекта для прогнозирования опасных ситуаций, предлагали роботизированные комплексы для выполнения операций в опасных зонах и искали способы перейти от ликвидации последствий к предупреждению возникновения зависаний.

Представленные решения демонстрируют, что современные технологии позволяют существенно повысить безопасность подземной добычи полезных ископаемых. Использование роботизированных комплексов, цифровых моделей и интеллектуального анализа данных помогает сократить простои оборудования, минимизировать участие человека в опасных операциях и сделать работу горных предприятий более эффективной и безопасной.

Материал подготовлен **Командой CASE-IN**

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-32-38

Безлюдная выемка карьерными экскаваторами: алгоритмическое управление и моделирование процесса черпания

А.С. Иванов[1] ✉, О.А. Лукашук[2], Д.С. Стожков[3], А.В. Угольников[3]
[1] ПАО «Сбербанк», г. Москва, Российская Федерация
[2] Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация
[3] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация
✉ waldteufel@yandex.ru

Резюме: Рассмотрены современные подходы к реализации безлюдной экскаваторной выемки с акцентом на снижение влияния человеческого фактора за счёт перехода к управлению на основе данных и цифровых моделей. Цель исследования – разработка и обоснование методического подхода к алгоритмическому управлению процессом черпания и погрузки. В качестве метода использована формализация управления траекторией движения ковша как многокритериальной задачи оптимизации с ограничениями по нагрузкам, геометрии забоя и условиям безопасности, а также моделирование работы системы на основе данных датчиков и цифровой модели забоя. Показано, что использование замкнутого контура управления с обратной связью по нагрузкам и положению рабочего оборудования позволяет стабилизировать параметры цикла, снизить вариативность режимов работы на 15–25% и ограничить пиковые нагрузки на 10–18%. Дополнительно рассмотрены методы адаптации алгоритмов к изменяющимся условиям забоя, включая учёт кусковатости породы и использование телеметрических данных. Установлено, что внедрение виртуальной зоны загрузки и интеграция с карьерной автоматизированной системой управления обеспечивают повышение безопасности и качества погрузки транспортных средств. Полученные результаты показывают, что переход к алгоритмическому управлению на основе цифровых моделей создаёт предпосылки для внедрения обслуживания по фактическому состоянию и дальнейшей цифровой трансформации горного производства.

Ключевые слова: безлюдная выемка, карьерный экскаватор, алгоритмическое управление, цифровая модель забоя, цифровой двойник, Mining 4.0

Для цитирования: Иванов А.С., Лукашук О.А., Стожков Д.С., Угольников А.В. Безлюдная выемка карьерными экскаваторами: алгоритмическое управление и моделирование процесса черпания. *Горная промышленность.* 2026;(5):32–38. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-32-38

Unmanned excavation using open-pit excavators: algorithmic control and bucket path modelling

A.S. Ivanov[1] ✉, O.A. Lukashuk[2], D.S. Stozhkov[3], A.V. Ugol'nikov[3]
[1] Sberbank PJSC, Moscow, Russian Federation
[2] Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation
[3] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation
✉ waldteufel@yandex.ru

Abstract: The paper examines contemporary approaches to unmanned excavation using open-pit excavators, with a focus on reducing the human factor through data-driven and digital-model-based control. The objective is to develop and justify a methodological approach to algorithmic control of the digging and loading cycle. The method involves formalizing bucket path control as a multi-criteria optimization problem subject to constraints on the drive loads, face geometry, and safety requirements, combined with the system simulation based on the sensor data and a digital face model. It is shown that a closed-loop control system with feedback on loads and position of the working equipment stabilizes the cycle parameters, reduces the operating variability by 15–25%, and limits the peak loads by 10–18%. Methods are additionally considered for adapting the algorithms to changing face conditions, including the rock fragmentation analysis and telemetry data. It is established that introduction of a virtual loading zone and integration with the in-pit fleet management system improve safety and quality of loading. The results demonstrate that transition to the algorithmic control based on digital models creates prerequisites for condition-monitored maintenance and further digital transformation of mining operations.

Keywords: unmanned excavation, open-pit excavator, algorithmic control, digital face model, digital twin, Mining 4.0
For citation: Ivanov A.S., Lukashuk O.A., Stozhkov D.S., Ugol'nikov A.V. Unmanned excavation using open-pit excavators: algorithmic control and bucket path modelling. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):32–38. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-32-38

Введение

Открытая разработка полезных ископаемых в последние десятилетия характеризуется устойчивым трендом к цифровизации и автоматизации технологических процессов [1–3]. Ключевое направление развития – переход к безлюдной экскаваторной выемке, при которой управление карьерными экскаваторами передаётся алгоритмическим системам, работающим на основе данных датчиков и цифровых моделей [4; 5].

Традиционная схема эксплуатации карьерных экскаваторов типа ЭКГ основана на управлении машинистом, находящимся в кабине [6; 7]. Параметры цикла черпания и погрузки – глубина внедрения ковша, траектория движения, скорость рабочих органов, режимы загрузки – определяются на основе визуального контроля и субъективного опыта. Такой подход приводит к высокой вариативности рабочих циклов, обусловленной квалификацией и физическим состоянием оператора, запылённостью и условиями освещённости [8–11]. В результате возрастает вероятность перегрузок, динамических ударов и неравномерного распределения нагрузок, что ускоряет износ оборудования и повышает риск отказов.

Концепция Mining 4.0 предполагает интеграцию датчиков, систем мониторинга, аналитических платформ и цифровых двойников в единый контур управления технологическими процессами [1; 2; 12; 13]. Карьерный экскаватор в этой парадигме рассматривается не как изолированная машина, а как элемент распределённой интеллектуальной системы [14; 15]. Ключевой элемент таких систем – цифровая модель забоя, формируемая на основе данных лидаров, 3D-камер, инерциальных и позиционных датчиков [5; 16]. Её использование позволяет перейти от визуального управления к алгоритмическому, при котором параметры цикла черпания определяются на основе формализованных критериев [4; 17].

Несмотря на значительный прогресс в области автоматизации, ряд вопросов остаётся недостаточно исследованным: задачи формализации траектории черпания с учётом кусковатости породы, интеграция алгоритмов управления с системами обслуживания по фактическому состоянию, сопряжение с автоматизированной системой управления горнотранспортным комплексом (АСУ ГТК) [12; 13; 16]. Цель исследования – разработка и обоснование методического подхода к алгоритмическому управлению процессом черпания и погрузки карьерных экскаваторов на основе цифровых моделей.

Материалы и методы

Термин «безлюдная экскаваторная выемка» обозначает режим функционирования карьерных экскаваторов, при котором непосредственное управление циклом черпания и погрузки осуществляется не машинистом, а алгоритмическими системами, работающими на основе данных датчиков и цифровой модели забоя. Принципиальное отличие – перенос ответственности за принятие решений с субъективного опыта оператора на формализованные алгоритмы, обеспечивающие воспроизводимость и стабильность технологических режимов [4; 5].

Для описания таких систем используется представление о нескольких уровнях автоматизации (рис. 1). На нижнем уровне находится традиционный операторо-ориентированный режим [6; 7]. Следующий этап – дистанционное управление, при котором оператор физически удалён от машины, но логика принятия решений сохраняется. Существенное снижение влияния человеческого фактора достигается на уровне полуавтоматического управления, где формирование траектории движения ковша выполняется алгоритмически [4; 5]. Наиболее высокий уровень – частично или полностью автономный режим, при котором человек выполняет функции контроля и реагирования на нештатные ситуации [1; 2].

Методологическая основа исследования – использование многоканальной информации от системы датчиков, установленных на экскаваторе и в его рабочей зоне [12; 13; 15]:

– пространственная информация о поверхности забоя (лидары, 3D-камеры);

– параметры положения и ориентации рабочего оборудования (инерциальные датчики, энкодеры);

– данные о нагрузках приводов (токовые датчики, тензодатчики);

– данные систем позиционирования (GNSS, RTK).

На основе совокупности этих данных формируется цифровая модель забоя – геометрически и физически согласованное описание текущего состояния процесса выемки [13; 16].

Процесс черпания рассматривается как задача формирования рациональной траектории движения ковша в условиях ограничений по нагрузкам, геометрии забоя и требованиям безопасности. Траектория ковша определяется как управляемая функция времени, обеспечивающая минимизацию совокупного критерия эффективности:

$$J = \alpha \cdot E + \beta \cdot \sigma_L + \gamma \cdot T$$

где E – энергозатраты за цикл (интегральная оценка мощности приводов); σ_L – показатель вариативности нагрузок (среднеквадратичное отклонение усилий в приводах); T – длительность цикла черпания; α, β, γ – весовые коэффициенты, нормируемые при оптимизации.

На траекторию накладывается система ограничений: по максимальным усилиям приводов напора, подъёма и поворота; по геометрии забоя; по безопасности (предотвращение столкновений с транспортными средствами) [9; 18].

Практическая реализация осуществляется в дискретном виде: траектория ковша представляется последовательностью состояний, управление реализуется в виде замкнутого контура с обратной связью (рис. 2). На каждом шаге производится оценка текущего состояния системы по данным датчиков и корректировка управляющих воздействий [4; 5].

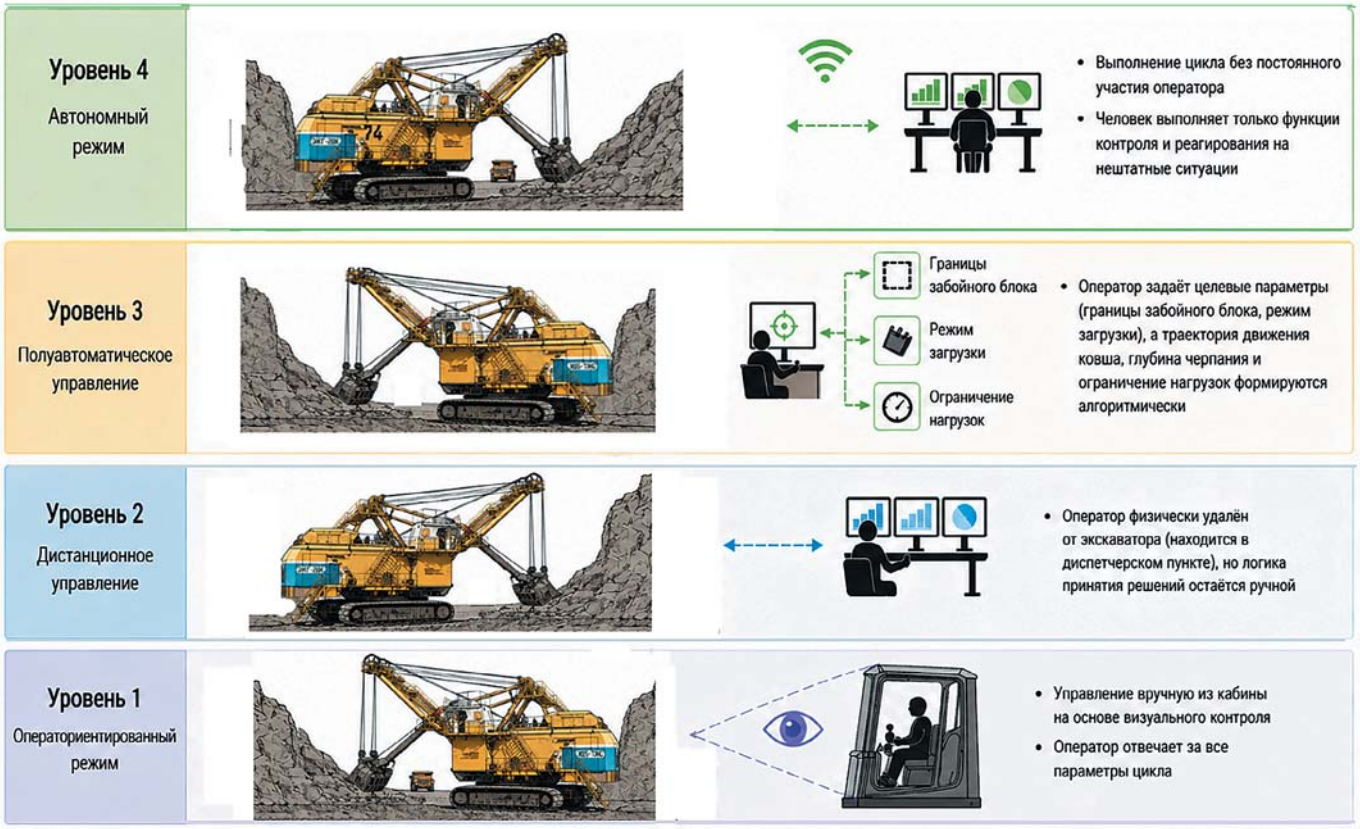


Рис. 1
Уровни автоматизации экскаваторной выемки

Fig. 1
Automation levels of excavator digging

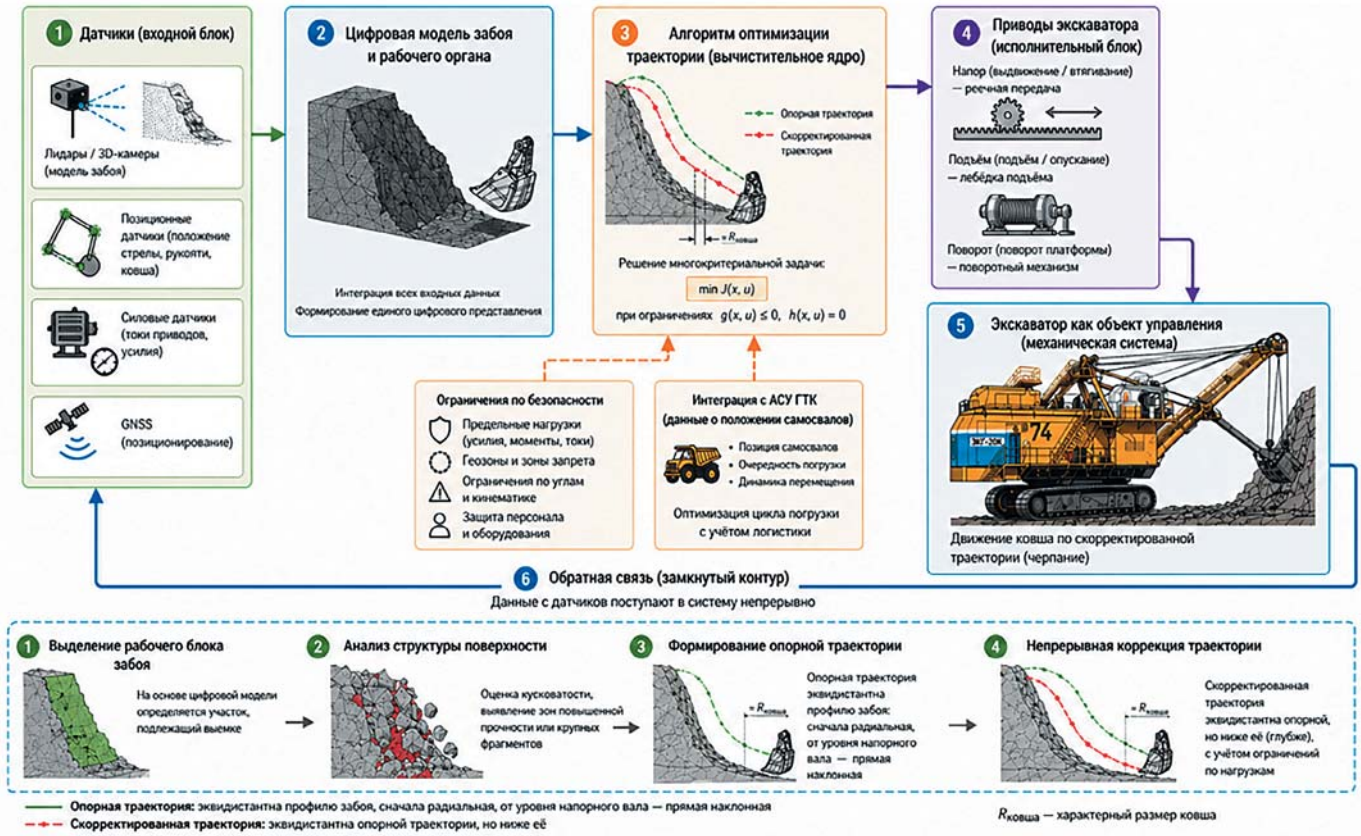


Рис. 2
Архитектура замкнутого контура управления процессом черпания

Fig. 2
Closed-loop control architecture for the digging process

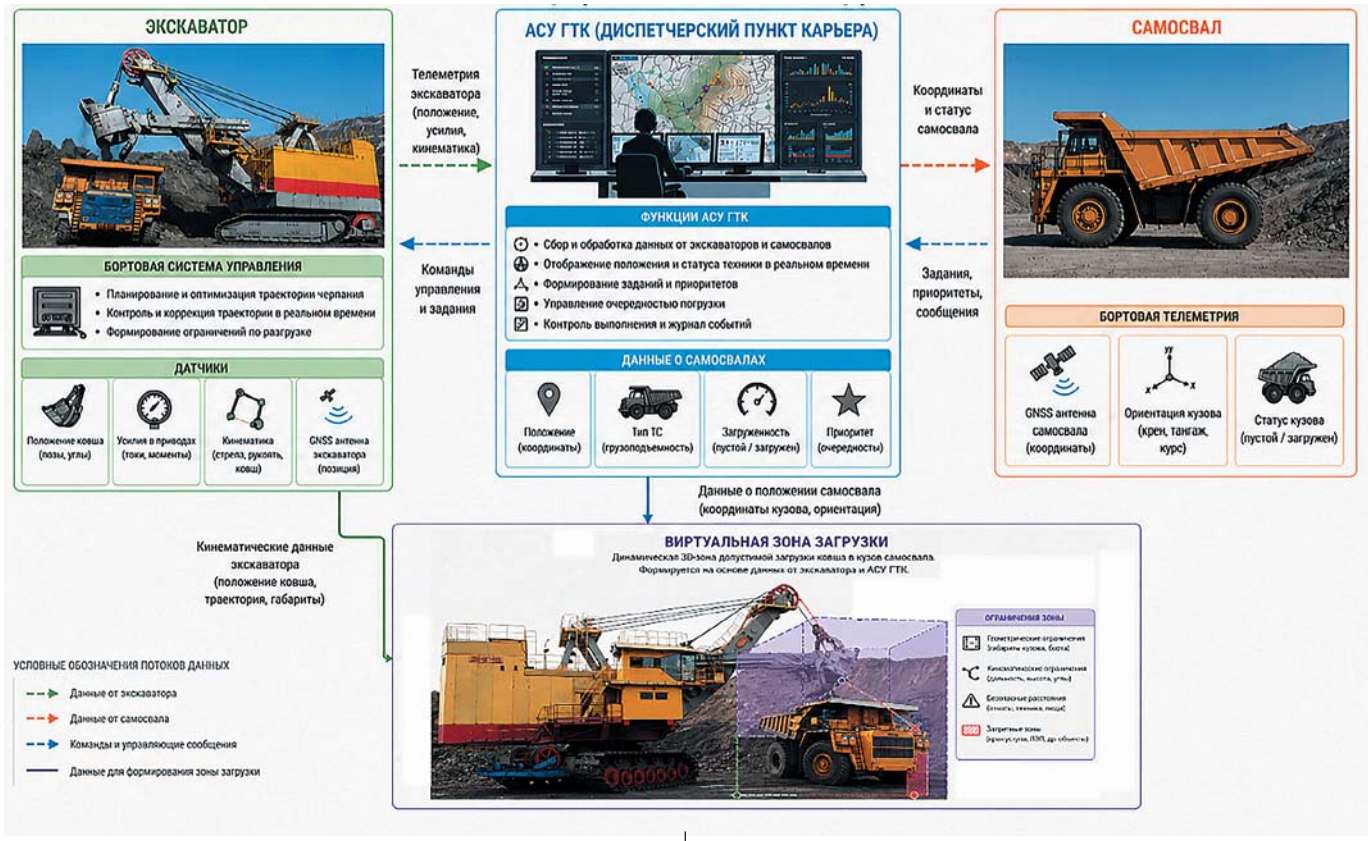


Рис. 3
Схема взаимодействия экскаватора с АСУ ГТК и виртуальной зоной загрузки

Fig. 3
A flowchart showing interaction of an excavator with the fleet management system and virtual loading zone

Алгоритм включает четыре взаимосвязанных этапа:

1. Выделение рабочего блока забоя – на основе цифровой модели определяется участок, подлежащий выемке.

2. Анализ структуры поверхности – оценивается кусковатость, выявляются зоны повышенной прочности или негабарит.

3. Формирование опорной траектории – обеспечивает заданную толщину стружки и допустимый уровень нагрузок.

4. Непрерывная коррекция траектории – при приближении нагрузок к предельным значениям уменьшается глубина внедрения, корректируется скорость или направление движения [8; 9].

Существенный элемент методики – адаптация алгоритмов к изменяющимся условиям забоя на основе телеметрических данных предыдущих циклов [12; 13]. Анализ накопленной информации позволяет уточнять параметры модели (зависимость сопротивления копанию от характеристик породы) и корректировать управляющие параметры при повторной разработке аналогичных участков [15; 16]. В результате формируется адаптивная система, способная подстраиваться под реальные условия эксплуатации без непосредственного участия оператора.

Для этапа погрузки используется метод формирования виртуальной зоны загрузки – допустимого трёхмерного пространства разгрузки ковша в кузов самосвала [4; 14]. Параметры зоны определяются с учётом геометрии ковша, положения транспортного средства (данные GNSS и бортовых датчиков самосвала) и кинематических возможностей экскаватора. При выходе за допустимые границы система переводит процесс в безопасный режим. Схема взаимодействия показана на рис. 3. Интеграция с АСУ ГТК позволяет учитывать динамику движения самосвалов, формировать оптимальные режимы загрузки и координировать работу экскаватора с другими элементами технологической цепи [8].

В качестве основных показателей оценки эффективности рассматриваются: вариативность нагрузок; уровень пиковых усилий; длительность цикла; устойчивость технологических режимов. Дополнительно применяются методы предиктивной аналитики для оценки технического состояния узлов и прогнозирования вероятности отказов [10; 11].

Результаты

Реализация предложенного подхода позволяет перейти от вариативных операторо-ориентированных режимов к воспроизводимым и стабилизированным технологическим циклам. Анализ, основанный на имитационном моделировании (500 циклов черпания с варьированием параметров забоя) и обработке телеметрических данных, позволяет выявить следующие эффекты.

1. **Снижение вариативности рабочих циклов**. В условиях традиционного управления параметры черпания существенно варьируются в зависимости от действий машиниста [6; 7]. В алгоритмическом режиме эти параметры стабилизируются на основе заданных ограничений и целевой функции. По результатам моделирования разброс значений длительности цикла и нагрузок снижается на 15–25%, что обеспечивает более равномерную работу оборудования [4; 5].

2. **Ограничение пиковых нагрузок.** Алгоритм непрерывно контролирует токи приводов, усилия и ускорения рабочего оборудования; при приближении к предельным значениям корректирует траекторию. Это позволяет снизить максимальные значения нагрузок на 10–18% по сравнению

с ручным управлением [9; 18]. Снижение пиковых нагрузок непосредственно влияет на ресурс узлов и агрегатов, уменьшая интенсивность изнашивания.

3. Адаптация к кусковатости и неоднородности забоя. Использование сегментации цифровой модели забоя и учёт кусковатости породы повышают устойчивость процесса черпания. Алгоритм обеспечивает обход участков с повышенной прочностью или изменение параметров внедрения, снижая вероятность скачков нагрузки. В отличие от субъективной визуальной оценки, формализованный анализ поверхности обеспечивает предсказуемое поведение процесса [19].

4. Повышение качества погрузки транспортных средств. Внедрение виртуальной зоны загрузки существенно сокращает вероятность входа ковша в опасную зону и минимизирует риск столкновения с кузовом самосвала. Алгоритмическая коррекция траектории разгрузки обеспечивает более равномерное распределение массы в кузове, снижая вероятность перекосов и локальных перегрузок.

5. Создание предпосылок для обслуживания по фактическому состоянию. Регистрация параметров каждого цикла позволяет формировать подробные профили эксплуатации оборудования. На основе этих данных возможно прогнозирование деградационных процессов и переход от регламентного технического обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию [12; 13].

6. Интеграция в архитектуру карьера. Предложенный подход демонстрирует наибольшую эффективность при интеграции в общую архитектуру АСУ ГТК [20–22]. В этом случае экскаватор функционирует как элемент единой цифровой системы, а управление процессом выемки становится частью глобальной оптимизации технологической цепочки [15; 16].

Обсуждение

Снижение вариативности и пиковых нагрузок имеет принципиальное значение для практики эксплуатации тяжёлых карьерных машин. В ручном режиме даже опытный машинист не всегда способен поддерживать оптимальный режим длительное время, особенно при изменении характеристик забоя [6; 7]. Алгоритмическое управление с непрерывным контролем и коррекцией траектории устраняет этот фактор [4; 5].

Особое значение имеет интеграция управления траекторией черпания с анализом кусковатости и структуры забоя. Использование цифровой модели и алгоритмов сегментации позволяет формализовать оценку свойств породы, обеспечивая более точный выбор параметров внедрения ковша. Предложенный подход ориентирован на алгоритмизацию цикла для тяжёлых карьерных машин, что соответствует тенденциям Mining 4.0 [1–3].

Существенный аспект – влияние алгоритмического управления на техническое обслуживание и ремонт. Стабилизация режимов и снижение пиковых нагрузок уменьшают интенсивность деградационных процессов, а использование предиктивной аналитики позволяет перейти к обслуживанию по фактическому состоянию [11–13].

Практическая реализация сопряжена с рядом ограничений. Технические: требования к точности датчиков; устойчивость каналов связи; вычислительные ресурсы бортовых систем [15; 17]. Организационные: изменение роли машиниста; необходимость дополнительного обучения персонала; адаптация производственных регламентов [6; 7]. Дальнейшее развитие направления связано с совершенствованием адаптивных алгоритмов и расширением применения цифровых двойников [12; 13; 16].

Заключение

Проведённое исследование показывает, что безлюдная экскаваторная выемка карьерными экскаваторами представляет собой реализуемое технологическое направление, ключевым условием которого является переход от операторо-ориентированного управления к алгоритмическому, основанному на данных датчиков и цифровых моделях забоя. Формализация задачи управления траекторией ковша в виде многокритериальной оптимизации с замкнутым контуром обратной связи по нагрузкам обеспечивает стабилизацию технологических режимов: по результатам имитационного моделирования вариативность параметров цикла снижается на 15–25%, а пиковые нагрузки на приводы ограничиваются на 10–18%, что непосредственно уменьшает интенсивность изнашивания и повышает ресурс основных узлов экскаватора.

Существенным элементом предложенной методики является использование цифровой модели забоя и алгоритмов сегментации для формализованного учёта кусковатости и неоднородности породы. В отличие от субъективной визуальной оценки машиниста, этот подход обеспечивает предсказуемое взаимодействие ковша с горным массивом и предотвращает возникновение критических нагрузок, характерных для операторского режима. Внедрение виртуальной зоны загрузки в сочетании с интеграцией в АСУ ГТК повышает безопасность погрузочных операций и согласует работу экскаватора с динамикой транспортного комплекса, превращая машину из изолированной единицы в элемент единой цифровой системы управления карьером.

Дополнительный эффект алгоритмического управления состоит в накоплении детализированных профилей эксплуатации оборудования, что создаёт технологическую основу для перехода от регламентного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию. Вместе с тем практическое внедрение безлюдной выемки определяется не только совершенством алгоритмов, но и надёжностью датчиковой инфраструктуры, устойчивостью каналов передачи данных и организационной готовностью предприятий к трансформации функций машиниста. В целом безлюдная экскаваторная выемка должна рассматриваться как органичный элемент комплексной цифровой трансформации горного производства, дальнейшее развитие которого связано с совершенствованием адаптивных и самообучающихся алгоритмов управления, расширением применения цифровых двойников и углублением интеграции технологических процессов на уровне всего горнотранспортного комплекса.

Список литературы / References

1. Bi L., Wang Z., Wu Z., Zhang Y. A new reform of mining production and management modes under Industry 4.0: Cloud mining mode. *Applied Sciences*. 2022;12(6):2781. https://doi.org/10.3390/app12062781

2. Velikanov V.S., Dyorina N.V., Korotkova A.N., Dyorina K.S. The challenges of Industry 4.0 and the need for new answers in the mining industry. *Izvestiya Uralskogo Gosudarstvennogo Gornogo Universiteta*. 2021;(2):154–166. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-154-166

3. Балашов А.М. Перспективы использования цифровых решений и возможностей «Индустрии 4.0» в производственных процессах предприятий горной промышленности. *Теоретическая экономика*. 2024;(2):46–53. Режим доступа: https://chemintech.ru/ru/nauka/article/80996/view (дата обращения: 19.03.2026).
Balashov A.M. Prospects for the use of digital solutions and the capabilities of industry 4.0 in the production processes of mining enterprises. *Theoretical Economics*. 2024;(2):46–53. (In Russ.) Available at: https://chemintech.ru/ru/nauka/article/80996/view (accessed: 19.03.2026).

4. Chen L., Xie Y., He Y., Ai Y., Tian B., Li L. et al. Autonomous mining through cooperative driving and operations enabled by parallel intelligence. *Communications Engineering*. 2024;3:75. https://doi.org/10.1038/s44172-024-00220-5

5. Fu T., Zhang T., Lv Y., Song X., Li G., Yue H. Digital twin-based excavation trajectory generation of Uncrewed excavators for autonomous mining. *Automation in Construction*. 2023;151:104855. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104855

6. Великанов В.С., Олизаренко В.В. К вопросу ранжирования профессиональных навыков машиниста карьерных экскаваторов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2010;(3):315–319. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2010/3/Velikanov_3_2010.pdf (дата обращения: 19.03.2026).
Velikanov V.S., Olizarenko V.V. The ranging of professional skills of shovel runner. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2010;(3):315–319. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2010/3/Velikanov_3_2010.pdf (accessed: 19.03.2026).

7. Великанов В.С. Тестовые методики и тренажерные средства в системе повышения профессионального мастерства операторов горных машин. *Горный журнал*. 2012;(9):131–133. Режим доступа: https://www.rudmet.ru/journal/949/article/14870/ (дата обращения: 19.03.2026).
Velikanov V.S. Test methodologies and training facilities in the system of professional skill increasing of mining machines' operators. *Gornyi Zhurnal*. 2012;(9):131–133. (In Russ.) Available at: https://www.rudmet.ru/journal/949/article/14870/ (accessed: 19.03.2026).

8. Шишлянников Д.И., Иванов С.Л., Звонарев И.Е., Зверев В.Ю. Повышение эффективности применения выемочных и транспортирующих машин комбайновых комплексов калийных рудников. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(9):116–124. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-116-124
Shishlyannikov D.I., Ivanov S.L., Zvonarev I.E., Zverev V.Yu. Improving efficiency of shearing and hauling machines in longwall potash mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(9):116–124. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-116-124

9. Шешукова Е.И., Шибанов Д.А., Иванов С.Л., Шишкин П.В. Оценка нагрузок приводов рабочего оборудования карьерного экскаватора (часть 2). *Горная промышленность*. 2024;(4):108–114. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-108-114
Sheshukova E.I., Shibanov D.A., Ivanov S.L., Shishkin P.V. Assessment of loads at the working attachment of a mine shovel (Part 2). *Russian Mining Industry*. 2024;(4):108–114. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-108-114

10. Хамидов О.У., Шибанов Д.А., Шишкин П.В., Колпаков В.О. Эффективность применения экскаваторов на карьерах Узбекистана. *Горная промышленность*. 2024;(5):135–142. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-135-142
Khamidov O.U., Shibanov D.A., Shishkin P.V., Kolpakov V.O. Efficiency of excavators application in open pit mines of Uzbekistan. *Russian Mining Industry*. 2024;(5):135–142. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-135-142

11. Ivanov S.L., Shishkin P.V. Integral criterion of mining machines technical condition level at their operation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017;87:022009. https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/2/022009

12. Nobahar P., Xu C., Dowd P., Faradonbeh R.S. Exploring digital twin systems in mining operations: A review. Green and Smart *Mining Engineering*. 2024;1(4):474–492. https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.09.003

13. Miao B., Ge S., Guo Y., Zhou J., Jiang E. Construction of digital twin system for intelligent mining in coal mines. *Journal of Mining Science and Technology*. 2022;7(2):143–153. (In Chinese) https://doi.org/10.19606/j.cnki.jmst.2022.02.001

14. Великанов В.С., Гришин И.А., Акманова З.С., Лукашук О.А., Лукашук А.Д. Современные аспекты создания горнотранспортных машин в условиях цифровой трансформации горных предприятий. *Горная промышленность*. 2024;(5S):28–32. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-28-32
Velikanov V.S., Grishin I.A., Akmanova Z.S., Lukashuk O.A., Lukashuk A.D. Contemporary aspects of designing mining transport machines in the context of digital transformation of mining operations. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):28–32. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-28-32

15. Иванов А.С., Макарова В.В. IT-технологии в проектировании, эксплуатации и ремонте горных машин. *Горная промышленность*. 2026;(2):114–119. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-114-119
Ivanov A.S., Makarova V.V. IT-technologies in design, operation and maintenance of mining machines. *Russian Mining Industry*. 2026;(2):114–119. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-114-119

16. Hazrathosseini A., Afrapoli A.M. The advent of digital twins in surface mining: Its time has finally arrived. *Resources Policy*. 2023;80:103155. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103155

17. Абу-Абед Ф.Н., Наумова Л.Г. IT-технологии в автоматизации технологических процессов в горной промышленности. *Техника и технология горного дела*. 2019;(3):21–35. https://doi.org/10.26730/2618-7434-2019-3-21-35
Abu-Abed F.N., Naumova L.G. IT-technologies in technological process automation in mining. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2019;(3):21–35. (In Russ.) https://doi.org/10.26730/2618-7434-2019-3-21-35

18. Плащинский В.А., Шешукова Е.И., Салимов А.Э., Шибанов Д.А., Иванов С.Л. Численное моделирование процесса копания ковшом экскаватора методом дискретных элементов. *Горная промышленность*. 2025;(4):144–150. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-144-150
Plaschinsky V.A., Sheshukova E.I., Salimov A.E., Shibanov D.A., Ivanov S.L. Numerical simulation of the digging process with an excavator bucket using the discrete element method. *Russian Mining Industry*. 2025;(4):144–150. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-144-150

19. Дремин А.В., Ситдикова С.В., Великанов В.С., Стожков Д.С., Гришин И.А. Анализ кусковатости горных пород в реальном времени с использованием отечественного программно-аппаратного обеспечения. *Горная промышленность*. 2025;(3):118–123. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-118-123

Dremin A.V., Sitdikova S.V., Velikanov V.S., Stozhkov D.S., Grishin I.A. Real-time analysis of particle size distribution of rocks using a domestic software and hardware complex. *Russian Mining Industry*. 2025;(3):118–123. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-118-123

20. Лях Д.Д., Худякова И.Н., Иванов С.Л. Обоснование параметров модуля формования торфяного сырья и энергомассовых характеристик комплекса оборудования по добыче и переработке торфа. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(6):93–108. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_6_0_93
Lyakh D.D., Khudyakova I.N., Ivanov S.L. Justification of peat block-making module parameters and mass/power characteristics for peat production machinery. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(6):93–108. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_6_0_93

21. Zvonarev I.E., Ivanov S.L. Evaluation of losses in transmission of machinery for development of mineral deposits in conditions of variable load. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017;87:022024. https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/2/022024

22. Мякотных А.А., Иванова П.В., Иванов С.Л. К вопросу классификации комплексов добычи торфяного сырья. *Горная промышленность*. 2023;(6):137–142. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-137-142
Myakotnykh A.A., Ivanova P.V., Ivanov S.L. On classification of peat extraction complexes. *Russian Mining Industry*. 2023;(6):137–142. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-137-142

Информация об авторах
Иванов Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, руководитель направления, ПАО «Сбербанк», г. Москва, Российская Федерация; waldteufel@yandex.ru
Лукашук Ольга Анатольевна – кандидат технических наук, заведующий кафедрой подъёмно-транспортных машин и роботов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-4952-0344; e-mail: o.a.lukashuk@urfu.ru
Стожков Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; https://orcid.org/0009-0003-8962-9357; e-mail: Stogkov@mail.ru
Угольников Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-8442-4841; e-mail: ugolnikov@yandex.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 08.05.2026
Поступила после рецензирования: 24.06.2026
Принята к публикации: 29.06.2026

Information about the authors
Aleksey S. Ivanov – Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, Sberbank PJSC, Moscow, Russian Federation; waldteufel@yandex.ru
Olga A. Lukashuk – Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Hoisting and Hauling Machines and Robots, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-4952-0344; e-mail: o.a.lukashuk@urfu.ru
Dmitriy S. Stozhkov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation; https://orcid.org/0009-0003-8962-9357; e-mail: Stogkov@mail.ru
Aleksandr V. Ugol'nikov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Electrical Engineering, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-8442-4841; e-mail: ugolnikov@yandex.ru

Article info
Received: 08.05.2026
Revised: 24.06.2026
Accepted: 29.06.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-39-44

Об особенностях современных технологий информационного обмена при подземной разработке руд

П.Г. Пацкевич ✉, И.И. Айнбиндер, А.А. Меркулов, Е.Д. Якушева
Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация
✉ packevichpg@ipkonran.ru

Резюме: Взаимодействие автономного оборудования при подземной добыче руд основано на технологиях информационного обмена с рядом специфических особенностей и компонентов для обеспечения эффективности, безопасности и устойчивости своего функционирования. Среди направлений цифровой трансформации в среднесрочной перспективе выделяются: 1) дистанционное управление самоходным оборудованием, позволяющим выполнять технологические операции из безопасных зон, что особенно актуально при отработке удароопасных участков и участков с повышенной обводненностью; 2) беспроводные системы связи в подземных условиях с целью реализации проекта «АСУ самоходными БУ»; 3) искусственный интеллект (цифровые помощники) для оптимизации технологических процессов, прогноза аварийных ситуаций, снижения простоев оборудования; 4) создание «цифровых двойников» подземных рудников. В долгосрочной перспективе планируется реализация концепции «умного рудника», которая предусматривает максимальную автоматизацию производственных процессов с минимальным присутствием производственного персонала в опасных зонах. В статье представлены особенности функционирования киберфизических систем. Приведена схема системы интеллектуального соединения и интеграции горнодобывающих машин с информационными и коммуникационными технологиями при роботизации горнотехнических систем, которая представляет собой трехуровневую архитектуру взаимодействия «снизу доверху».

Ключевые слова: цифровая трансформация, киберфизические системы, онтологическое моделирование, информационный обмен

Для цитирования: Пацкевич П.Г., Айнбиндер И.И., Меркулов А.А., Якушева Е.Д. Об особенностях современных технологий информационного обмена при подземной разработке руд. *Горная промышленность.* 2026;(5):39–44. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-39-44

On specific features of modern information exchange technologies in underground ore mining

P.G. Patskevich ✉, I.I. Aynbinder, A.A. Merkulov, E.D. Yakusheva
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
✉ packevichpg@ipkonran.ru

Abstract: Interaction of autonomous equipment in underground ore mining is based on information exchange technologies with a number of specific features and components to ensure the efficiency, safety and sustainability of their operation. The following areas of digital transformation stand out in the medium-term prospective: (1) remote control of mobile equipment that allows technological operations to be performed from safe zones, which is especially important when mining in hazardous areas and areas with increased water content; (2) wireless communication systems in underground conditions in order to implement the project of automated control systems for mobile drilling units; (3) artificial intelligence (digital assistants) for optimizing technological processes, predicting emergency situations, reduction of equipment downtime; (4) creation of "digital twins" of underground mines. In the long term, there are plans to implement the Smart Mine concept, which envisages maximum automation of the production processes with minimal presence of production personnel in the hazardous areas. This article describes operational characteristics of the cyber-physical systems. It presents a diagram of a system for smart connectivity and

integration of information and communication technologies into mining machinery as part of robotization of mining systems, which consists of a three-tier top-to-bottom interaction architecture.

Keywords: digital transformation, cyberphysical systems, ontological modeling, information exchange

For citation: Patskevich P.G., Aynbinder I.I., Merkulov A.A., Yakusheva E.D. On specific features of modern information exchange technologies in underground ore mining. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):39–44. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-39-44

Введение

Концепция преобразования горнодобывающей отрасли в сторону Индустрии 4.0, или «Интеллектуальный рудник», понимается как «интеллектуальное соединение и интеграция горнодобывающих машин (физические компоненты) с информационными и коммуникационными технологиями (киберсистемы) для формирования киберфизических систем, в которых обмен и передача данных и информации происходят через интеграционную платформу, используя промышленный интернет вещей (IoT)»[1] [1; 2]. В соответствии с этой концепцией полностью автоматизированные и роботизированные рудники должны представлять собой высокотехнологичные системы, обладающие рядом специфических особенностей для обеспечения эффективности, безопасности и устойчивости своего функционирования.

Особенности функционирования киберфизических систем

Полностью роботизированная шахта будущего, в которой предполагается, что человеческий контроль будет сведен к минимуму, должна объединить все необходимые элементы в единую «экосистему»:

– *автономные системы управления* с использованием искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения для принятия решений в реальном времени;

– центральную систему мониторинга, способную координировать работу всех роботов, датчиков и машин без вмешательства человека и способность адаптироваться к изменяющимся условиям рудника (например, геологическим сдвигам или поломкам оборудования);

– *робототехнику и автоматизированное оборудование,* к которым относят роботов для бурения, транспортировки, погрузки и выемки породы, способных работать в сложных условиях, обусловленных высокими влажностью, давлением и температурой; беспилотные транспортные средства (например, самосвалы и конвейеры) для перемещения материалов и модульные конструкции оборудования для легкой замены или ремонта;

– *сенсорные и мониторинговые технологии* с сетями датчиков отслеживания состояния окружающей среды (газы, температура, давление, сейсмическая активность), системами компьютерного зрения и лазерного сканирования (LiDAR) для точного картографирования подземного пространства и навигации роботов и постоянным мониторингом состояния оборудования для предотвращения поломок (предиктивное обслуживание);

– *энергетическую автономность* за счет использования возобновляемых источников энергии (например, геотермальной или мобильных АЭС), аккумуляторных систем или автономных генераторов для бесперебойной работы в изолированных условиях;

– *надежные системы связи* (например, на основе оптоволокна, спутников или mesh-сетей) для передачи данных между устройствами и центром управления; защиту от помех, вызванных подземной средой и возможность работы в условиях отсутствия связи с поверхностью (локальная автономия);

– *безопасность* за счет применения систем предотвращения аварий (например, автоматическое отключение при обнаружении опасных газов или обрушений);

– *устойчивость* к экстремальным условиям (коррозии, взрывам, высоким нагрузкам) и программируемые протоколы эвакуации или изоляции опасных зон;

– *экологическую ориентацию*;

– *гибкость и масштабируемость* с возможностью адаптации к разным типам полезных ископаемых (уголь, металлы, редкоземельные элементы) и расширения системы при увеличении объемов добычи или открытии новых участков;

– *интеграцию с внешними системами* с возможностью управлять несколькими объектами, подключения к глобальным цепочкам поставок для автоматической передачи данных о добыче и планировании логистики; совместимостью с программным обеспечением для анализа данных и управления ресурсами (ERP-системы).

Внедрение цифровых технологий в горнодобывающей отрасли традиционно считается одной из самых сложных задач, и новая цифровая модель, использующая онтологический подход, призвана решить эту проблему. В Университете науки и технологий МИСИС создана система, объединяющая все компоненты горнодобывающего предприятия: от отдельного оборудования до управляющего программного обеспечения [3]. Модель также способна давать рекомендации по автоматизации, указывая, какие технологические процессы могут выполняться без непосредственного участия человека. Эта универсальная система может быть применена в любых организациях, где затруднен полный контроль за всеми элементами производства.

Ключевая проблема, которую решает новая разработка, заключается в специфике горнодобывающих производств. В отличие от заводов с замкнутыми и циклично повторяющимися процессами, предприятия по добыче полезных ископаемых представляют собой постоянно меняющиеся системы. Условия их работы зависят от множества природных и технологических факторов, что значительно усложняет внедрение современных цифровых решений.

1 About the Global Mining Guidelines Group. Global Mining Guidelines Group, 2023. Available at: https://gmggroup.org/about/ (accessed:29.04.2025).

Исследователи применили метод онтологического моделирования. Этот подход позволяет описать предприятие как единую систему взаимосвязанных понятий и процессов, представленных в виде структурированной базы знаний. В созданной модели упорядочены все ключевые компоненты производственной системы: технологические процессы, физические объекты, управляющие агенты и информационные потоки. Разработка позволяет описывать предприятие в виде логической модели, понятной как человеку, так и машине, что является необходимым шагом к созданию по-настоящему автономных промышленных систем. Предложенная модель может стать основой для дальнейших разработок в области управления цифровой трансформацией горных предприятий. На ее базе возможно создание полноценных цифровых двойников и интеллектуальных устройств управления в горной промышленности.

Взаимодействие автономного оборудования при подземной добыче руд основано на технологиях информационного обмена с рядом специфических особенностей и компонентов для обеспечения эффективности, безопасности и устойчивости своего функционирования. Существенные компоненты включают в себя датчики и исполнительные механизмы в качестве физических объектов, моделирование процессов, симуляцию (в режиме реального времени), оптимизацию и компьютерные сети в качестве киберэлементов, встроенных в систему, характеризующуюся управлением контекстом и объектными отношениями по всей цепочке создания стоимости и интегрированную с помощью технологий вычислений, связи и управления.

Основные этапы организации и построения элементов системы интеллектуального соединения и интеграции горнодобывающих машин с информационными и коммуникационными технологиями при роботизации горнотехнических систем представляют собой трехуровневую архитектуру взаимодействия «снизу доверху» (рис. 1).

Система имеет структуру, каждый модуль которой позволяет предприятию решать определенный круг задач: модуль базовой функциональности позволяет контролировать местоположение оборудованной техники и ее простои, учитывает расход топлива; модули контроля работы техники следят за производственными показателями, формируют и выдают сменные задания на борт, формируют итоговые отчеты о работе за указанный период; модуль контроля качества руды контролирует перемещение руды от забоя до выдачи руды на поверхность с учетом промежуточных складов / ниш перегрузок / рудоспусков, формирует мнемосхемы движения рудопотока, управляет складами, визуализирует состояние рудоспусков. Кроме того, система включает в себя модули контроля состояния стационарного оборудования, контроля качества дорог, модуль управления технического обслуживания и ремонта, аналитики, контроля эффективности оборудования и операторов.

Телеметрические системы (1-й уровень) обеспечивают формирование первичных данных и выполнение команд исполнительными устройствами, оборудованными датчиками контроля (положения, техсостояния, движения, температуры и т.д.) на уровне механических операций. Датчики, установленные на буровых установках, погрузочно-доставочных, транспортно-заряжающих



Рис. 1
Система интеллектуального соединения и интеграции горнодобывающих машин с информационными и коммуникационными технологиями при роботизации горнотехнических систем

Fig. 1
A system for smart connectivity and integration of information and communication technologies into mining machines for robotization of mining systems

и установках автоматического крепления, собирают информацию о вибрации, температуре, давлении и других параметрах. Кроме того, в систему включены датчики контроля напряженно-деформированного состояния массива (НДС), а именно деформаций, давления, акустической эмиссии, геофоны широкополосные и низкочастотные. Использование искусственного интеллекта (AI) и машинного обучения (ML) позволяет прогнозировать возможные неисправности и проводить профилактическое обслуживание до выхода оборудования из строя.

Управляющие контроллеры (2-й уровень) наделены функциями самостоятельной реализации «рутинных» процедур, сбора первичных данных, формирования TCP IP, приема команд на исполнение. Выполняются контроллерами с использованием программного модуля управления и устанавливаются как на технологическом оборудовании, так и обособленном агрегатном узле. Системы IoT отслеживают уровень метана, содержание пыли, температуру, влажность и движение горных масс. В случае критических изменений системы оповещения мгновенно предупреждают персонал о возможных угрозах, помогая предотвратить аварии и улучшить безопасность персонала.

Главный модуль управления (3-й уровень) включает собственно *Командный модуль* (сервер управления; задачи отложенного времени) и *Блокцентр* (контроллер управления; задачи реального времени). Функционал Командного модуля: интеграция с внешними IT-системами; принятие решений на основании данных от внешних систем и Блокцентра; маршруты работы (оперпланирование); прогноз отказов и прогнозный алгоритм ремонтов; наряды на ремонты; отчеты о работе внутришахтного транспорта. Функционал Блокцентра: сбор данных с управляющих контроллеров; отправка отчетов о техническом состоянии в Командный модуль; прием и передача команд на исполнение от Командного модуля; блокировка при аварийных ситуациях.

Командный модуль осуществляет взаимодействие с сопрягаемыми IT-системами и Базой данных (БД).

Технологии, используемые в системах интеллектуального соединения и интеграции горнодобывающих машин с информационными и коммуникационными технологиями при роботизации горнотехнических систем автоматизации, можно условно разделить на две группы:

– первая группа объединяет технологии, широко используемые в различных индустриях – транспорте, гражданском строительстве и т.д., адаптированные под нужды подземной добычи. К этой группе можно отнести технологии связи (WiFi, LTE, 5G), промышленные протоколы передачи данных, лидары, лазеры, сканеры, камеры, программируемые логические контроллеры и т.д.;

– ко второй группе относятся технологии, разработанные исключительно для применения на подземных предприятиях. При этом технологии, относящиеся ко второй группе, разрабатываются либо в рамках консорциума и/или партнерства, либо в рамках собственных команд разработчиков. Как правило, во вторую группу попадает программное обеспечение, которое может включать не только детерминированные алгоритмы, но и самообучающиеся алгоритмы или алгоритмы с элементами искусственного интеллекта.

С помощью такого построения решаются задачи по выстраиванию маршрутов движения техники, автономному вождению и навигации, а также по автоматической погрузке и выгрузке материала. Для передачи команд используют специализированные подземные WiFi-антенны (neroPOYNT), которые могут обеспечивают связь в радиусе до 800 м на стандартной для WiFi частоте 2,4 ГГц. Для распознавания местоположения и маркировки используют радиочастотные идентификационные метки (neroPIN, neroDUST), которые закрепляют на стенах и регистрируют на схеме подземных выработок рудника. Машина анализирует окружающую среду с помощью видео, радара, лидара и датчиков Bluetooth. Данные обрабатывает специализированный блок дистанционного контроля горного оборудования (cyberHUB) с 3 интегрированными контроллерными системами.

Основными проблемами, стоящими при разработке и реализации решений по роботизации, являются сложности с навигацией (роботизированное оборудование должно самостоятельно строить маршрут в условиях подземных выработок, учитывать препятствия и отслеживать собственные координаты), с доступностью для обслуживания (многие участки недоступны для регулярного обслуживания и замены датчиков, что создаёт проблемы при выходе компонентов из строя) и, наконец, главное – влияние условий в шахте на работу датчиков.

Примером успешной реализации проектов цифровой трансформации подземных рудников стало внедрение интегрированной системы планирования и проектирования горных работ на базе горно-геологической информационной системы – ГГИС в ГМК «Норильский никель» [4; 5]. В 2022 г. ГМК «Норильский никель» вступила в программу индустриальных центров компетенций (ИЦК), созданных под эгидой Правительства РФ и Минцифры, с целью объединить ведущих отраслевых игроков и ИТ-компании для создания новых ИТ-продуктов, которые помогли бы индустрии поддерживать необходимый уровень автоматизации. От лица «Норникеля» Компания «Норсофт» в ИЦК выполняет роль ключевого заказчика по разработке трех систем: ГГИС (Горно-геологическая информационная система) – MAGMA Geo, ГП (Горное планирование) – MAGMA Plan и ДПГР (Диспетчеризация подземных горных работ) MAGMA Control, объединенных сквозной архитектурой в платформу MAGMA. Одна из задач – собрать требования к системам от всех индустриальных участников ИЦК, чтобы продукты своим функционалом широко закрывали отраслевую потребность рынка (Михаил Столяров, руководитель комплексных и специализированных проектов «Норсофт).

На подземных предприятиях используется система ГГИС-Micromine с расширенным функционалом для автоматизированного проектирования очистных и подготовительных работ. Программный комплекс обеспечивает непрерывность передачи данных от создания геологической модели месторождения до формирования проектной документации и управляющих программ для автономных и роботизированных технологических комплексов. Использование трехмерных (объемных) моделей рудных тел позволяет планировать горные работы с высокой точностью, оптимизировать параметры выемочных единиц и прогнозировать качественные показатели продукта. На базе ГГИС создана цифровая платформа для решения геомеханических задач, позволяющая моделировать напряженно-деформированное состояние (НДС) массива горных пород, осуществлять сейсмический мониторинг (ССМ) путем регистрации микросейсмических и сейсмоакустических событий, возникающих в массиве. В настоя-

щее время в рудниках Заполярного филиала Норильского никеля функционируют пять таких систем.

Существенный прогресс достигнут в автоматизации процессов бурения – установки с компьютерным управлением Sandvik DD422; DL421), и крепления – анкероустановщики с программным управлением; машины для нанесения торкретбетона Spraymec с компьютерным контролем процесса.

В рамках цифровизации технологических процессов на Талнахском ГОКе с 2022 г. внедряется автоматизированная система управления паспортом крепления (АСУ ПК) [6]. Система позволяет вести единый Реестр паспортов крепления, выполнять оценку нарушенности массива по методу Бартона, автоматизировать расчет параметров крепи и формирование технической документации [7]. Ключевым преимуществом АСУ ПК является комплексный подход к выбору типов и параметров крепи с учетом горно-геологической и горнотехнической обстановки, на основе чего система автоматически выделяет интервалы крепления и формирует рекомендации по выбору типа и параметров крепи.

Важной функцией является возможность передачи параметров крепления непосредственно на механизированные анкероустановщики, что исключает ошибки, обусловленные человеческим фактором. Предполагается, что по результатам работ по креплению в систему будут загружены фактические показатели установки анкеров (глубина и углы бурения, количество крепящего материала и т.п.), что позволяет выполнять оперативный анализ качества крепления.

В среднесрочной перспективе планируется реализация следующих направлений цифровой трансформации, в том числе и в части коммуникации технологического оборудования, действующего в пределах горнотехнической системы:

– дистанционное управление самоходным оборудованием, позволяющим выполнять технологические операции из безопасных зон, что особенно актуально при отработке удароопасных участков и участков с повышенной обводненностью;

– беспроводные системы связи в подземных условиях с целью реализации проекта «АСУ самоходными БУ»;

– искусственный интеллект (цифровые помощники) для оптимизации технологических процессов, прогноза аварийных ситуаций, снижения простоев оборудования;

– создание «цифровых двойников» подземных рудников.

В долгосрочной перспективе реализация концепции «умного рудника» предусматривает максимальную автоматизацию производственных процессов с минимальным присутствием производственного персонала в опасных зонах.

Заключение

Цифровая трансформация производственных процессов представляет собой комплексную интеграцию информационных технологий во все звенья горного производства. Это принципиально новый подход к организации добычи полезных ископаемых, основанный на сборе и анализе больших объемов данных для принятия оптимальных управленческих и производственных решений.

Список литературы / References

1. Дзансолов И.В., Муштекенов Т.С., Пацкевич П.Г., Айнбиндер И.И. Построение горнотехнических систем при переходе к роботизированным и дистанционно управляемым технологическим процессам на сверхглубоких горизонтах рудников Талнаха. *Горный журнал.* 2025;(6):4–12. https://doi.org/10.17580/gzh.2025.06.01
Dzansolov I.V., Mushtekenov T.S., Patskevich P.G., Ainbinder I.I. Geotechnical systems in transition to remotecontrolled and robotized process technologies in super-deep mines of Talnakh. *Gornyi Zhurnal.* 2025;(6):4–12. (In Russ.). https://doi.org/10.17580/gzh.2025.06.01

2. Mathiak T. *Robotized Inspection*. Available at: https://www.nexgensims.eu/robotized-inspection (accessed: 29.04.2025).

3. Дерябин С.А., Темкин И.О. Онтологическое моделирование и управление цифровой трансформацией архитектуры горно-добывающих предприятий. *Записки Горного института.* 2025;275:130–144. Режим доступа: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16728 (дата обращения: 26.04.2026).
Deryabin S.A., Temkin I.O. Ontological modeling and management of digital transformation of mining enterprises architecture. *Journal of Mining Institute*. 2025;275:130–144. Available at: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16728 (accessed: 26.04.2026).

4. Глибовец М.В., Дзансолов И.В., Марысюк В.П., Кисель А.А. Технологические процессы добычи полезных ископаемых на рудниках Талнахского горно-обогатительного комбината. *Горный журнал.* 2025;(7):58–67. https://doi.org/10.17580/gzh.2025.07.08
Glibovets M.V., Dzansolov I.V., Marysyuk V.P., Kisel A.A. Mineral mining technologies in application at the Talnakh Mining and Processing Plant. *Gornyi Zhurnal*. 2025;(7):58–67. (In Russ.). https://doi.org/10.17580/gzh.2025.07.08

5. Федотов Г.С., Сапронова Н.П. Горно-геологические информационные системы как инструмент цифровой трансформации производственных процессов горнодобывающих предприятий. *Маркшейдерия и недропользование*. 2021;(4):54–59.
Fedotov G.S., Sapronova N.P. Geological and mining information systems as a tool for digital transformation of production processes in mining companies. *Mine Surveying and Subsoil Use*. 2021;(4):54–59. (In Russ.).

6. Марысюк В.П., Кисель А.А., Устинов А.К., Шевченко П.Р. Анализ трансформации технологического процесса крепления горных выработок на рудниках Талнахского горно-обогатительного комбината. *Горный журнал*. 2025;(6):13–19. https://doi.org/10.17580/gzh.2025.06.02
Marysyuk V.P., Kisel A.A., Ustinov A.K., Shevchenko P.R. The analysis of mine support technology transformation in mines of the Talnakh Mining and Processing Plant. *Gornyi Zhurnal*. 2025;(6):13–19. (In Russ.). https://doi.org/10.17580/gzh.2025.06.02

7. Wang Y., Huang J., Wang G. Numerical analysis for mining-induced stress and plastic evolution involving influencing factors: high in situ stress, excavation rate and multilayered heterogeneity. *Engineering Computations*. 2022;39(8):2928–2957. https://doi.org/10.1108/EC-10-2021-0614

Информация об авторах
Пацкевич Петр Геннадьевич – кандидат технических наук, заведующий отделом теории проектирования и геотехнологии комплексного освоения недр, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: packevichpg@ipkonran.ru
Айнбиндер Игорь Израилевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории геотехнологии комплексного освоения месторождений полезных ископаемых, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-1053-1166
Меркулов Александр Алексеевич – доктор технических наук, академик РАЕН, ведущий научный сотрудник лаборатории геотехнологии комплексного освоения месторождений полезных ископаемых, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация
Якушева Екатерина Дмитриевна – ведущий инженер лаборатории геотехнологии комплексного освоения месторождений полезных ископаемых, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация

Информация о статье
Поступила в редакцию: 30.04.2026
Поступила после рецензирования: 22.06.2026
Принята к публикации: 24.06.2026

Information about the authors
Petr G. Patskevich – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Design Theory and Geotechnology of Integrated Subsoil Development, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: packevichpg@ipkonran.ru
Igor I. Aynbinder – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Geotechnology of Complex Development of Mineral Deposits, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-1053-1166
Alexander A. Merkulov – Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Geotechnology of Complex Development of Mineral Deposits, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Ekaterina D. Yakusheva – Lead Engineer of the Laboratory of Geotechnology of Complex Development of Mineral Deposits, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Article info
Received: 30.04.2026
Revised: 22.06.2026
Accepted: 24.06.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-45-53

Цифровой двойник тепловой сети в управлении внутренним спросом на энерготопливо

И.В. Скворцова ✉, Ю.Р. Нурулин, А.А. Ильинский, А.Г. Сомов, О.В. Калинина
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ Inga.V.Skvortsova@yandex.ru

Резюме: Угольная промышленность России при добыче 440 млн т и экспорте 211,2 млн т в 2025 г. остаётся убыточной, поэтому устойчивость внутреннего спроса на энергетический уголь приобретает важное значение. В статье представлена количественная оценка тепловой составляющей внутреннего рынка угля, систематической погрешности действующего нормативного метода планирования топливной потребности теплоснабжения и экономического эффекта перехода к адаптивному прогнозу теплопотребления на основе цифрового двойника тепловой сети и климатических сценариев ИИ-моделирования. По результатам оценки внутренняя потребность в тепловой энергии составила 30,2 млн т у.т., или 50,2 млн т натурального топлива, что соответствует 28,2% внутреннего рынка и 11,3% годовой добычи. Погодная амплитуда спроса на уголь в расчете составила 2,4 млн т при стандартном отклонении, что сопоставимо с эффектом ценовых и логистических факторов. Установлено, что действующий нормативный метод планирования систематически завышает расчётную нагрузку. Средняя абсолютная процентная ошибка нормативного метода составила 8,2% против 4,3% у инерционного. Переход к адаптивному прогнозу на основе цифрового двойника тепловой сети позволит снизить ошибку планирования как минимум вдвое и обеспечит экономию топливных затрат теплоснабжения примерно на 3–6%. Полученные результаты применимы на трёх уровнях: 1) для теплоснабжающих организаций; 2) для угледобывающих компаний; 3) для органов регулирования. Перспективы дальнейших исследований связаны с верификацией модельных коэффициентов на данных опытной эксплуатации системы, расширением панели до муниципального уровня, где различия климатических условий внутри субъекта достигают наибольших значений, и учётом сценариев газификации угледобывающих регионов.

Ключевые слова: энергетический уголь, внутренний рынок; централизованное теплоснабжение, цифровой двойник тепловой сети, адаптивное прогнозирование теплопотребления, градусо-сутки отопительного периода, топливообеспечение, угледобывающий регион, климатические сценарии

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Санкт-Петербургского государственного автономного учреждения «Фонд поддержки научной, научно-технической и инновационной деятельности» в рамках договора №25-РБ-09-28 от 23 декабря 2025 г. «Разработка интеллектуальной системы адаптивного прогноза теплопотребления в городской среде на основе цифрового двойника тепловой сети и климатических сценариев ИИ-моделирования»

Для цитирования: Скворцова И.В., Нурулин Ю.Р., Ильинский А.А., Сомов А.Г., Калинина О.В. Цифровой двойник тепловой сети в управлении внутренним спросом на энерготопливо. *Горная промышленность*. 2026;(5):45–53. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-45-53

A digital twin of the heat supply network in managing domestic energy demand

I.V. Skvortsova✉, Yu.R. Nurulin, A.A. Iliinsky, A.G. Somov, O.V. Kalinina
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ Inga.V.Skvortsova@yandex.ru

Abstract: With its production of 440 million metric tons and exports of 211.2 million metric tons in 2025, Russia's coal industry remains unprofitable; therefore, stability of the domestic demand for thermal coal is of critical importance. This article presents a quantitative assessment of the thermal component in the domestic coal market, as well as a systematic error of the current normative method for planning fuel requirements for heat supply, and the economic benefits of transitioning to adaptive forecasting of heat consumption based on a digital twin of the heating network and AI-simulated climate scenarios. Based on the assessment results, the domestic heat demand amounted to 30.2 million metric tons of coal equivalent, or 50.2 million metric tons of natural coal, which corresponds to 28.2% of the domestic market and 11.3% of the annual production. The weather-related variation in coal demand was calculated to be 2.4 million metric tons with a standard deviation, which is comparable to the

effects of the price and logistical factors. It was found that the current normative planning method systematically overestimates the calculated load. The average absolute percentage error of the normative method was 8.2%, compared to 4.3% for the inertial method. Transition to adaptive forecasting based on a digital twin of the heating network will reduce the planning error by at least twofold and will provide savings in the heating fuel costs of approximately 3–6%. The results obtained are applicable at three levels: (1) for heat supply organizations; (2) for coal mining companies; (3) for regulatory authorities. Further research will focus on verifying the model coefficients using data from the system's pilot operation, expanding the analysis to the municipal level, where climatic variations within a region are most pronounce, and with account of scenarios for provision of natural gas supply to coal-mining regions.

Keywords: thermal coal, domestic market, centralized heat supply, digital twin of the heating network, adaptive forecasting of heat demand, heating degree days, fuel supply, coal-mining region, climate scenarios

Acknowledgements: This research was conducted with the support of the St. Petersburg Foundation for Science, Technology and Innovation under Contract No. 25-RB-09-28 dated December 23, 2025. "Development of a smart system for adaptive forecasting of heat consumption in urban environments based on a digital twin of the heating network and AI-simulated climate scenarios"

For citation: Skvortsova I.V., Nurulin Yu.R., Iliinsky A.A., Somov A.G., Kalinina O.V. A digital twin of the heat supply network in managing domestic energy demand. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):45–53. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-45-53

Введение

Угольная промышленность России в 2023–2025 гг. работает с отрицательной рентабельностью при сохранении физических объёмов производства: добыча в 2025 г. составила 440 млн т (–0,9% к 2024 г.), экспорт вырос на 7,1% – до 211,2 млн т, отгрузка электростанциям – на 1,7%, до 97,0 млн т. Сальдированный убыток отрасли оценивается в 408 млрд руб. против 112,6 млрд руб. годом ранее, доля убыточных предприятий – 66,1%. Сжатие маржи при неизменных объёмах [1] связано с геополитическими ограничениями и удорожанием логистики [2; 3].

Внутренний рынок устойчиво поглощает около 180 млн т в год: в 2023 г. – 181,2 млн т, в том числе электростанции – 89,9 млн т, коксование – 39,6 млн т, население, коммунально-бытовые нужды и агропромышленный комплекс – 26,7 млн т [4; 5]. Около двух третей внутреннего спроса определяются, таким образом, режимом теплоснабжения. Отраслевая литература рассматривает этот сегмент через экологические ограничения и межтопливную конкуренцию [6], тогда как его количественная связь с климатом остаётся вне анализа.

Централизованное теплоснабжение сопоставимо по масштабу с угольной отраслью и хронически убыточно. В 2024 г. отпуск тепловой энергии от источников составил 1309,5 млн Гкал, потери в сетях – 133,8 млн Гкал. При выручке 2470,1 млрд руб. и себестоимости 2736,1 млрд руб. балансовый убыток достиг 266,0 млрд руб. (10,8% выручки), бюджетные компенсации – 196,3 млрд руб., затраты на топливо – 717,7 млрд руб. (26,2% себестоимости). Причины убыточности и механизмы привлечения инвестиций исследованы в работах [7–10].

Планирование топливной потребности опирается на нормативную климатологию – продолжительность и среднюю температуру отопительного периода по СП 131.13330.2020, рассчитанные по ряду 1998–2018 гг. Между тем потепление на территории России идёт со скоростью 0,51 °C за десятилетие, в 2,5 раза быстрее среднепланетарного темпа, а 2025 г. стал вторым по величине аномалии среднегодовой температуры за весь период наблюдений (+1,24 °C). Необходимость пересмотра климатических параметров нормативов обоснована в работах [11; 12].

Технологическим ответом служит переход от нормативного планирования к адаптивному прогнозу теплопотребления. За рубежом разработаны цифровой двойник тепловой сети с идентификацией сопротивлений участков [13], сопоставительный анализ нейросетевых архитектур [14], оценка влияния локализации метеопрогноза [15] и формализация планирования в условиях неопределённости [16]. В отечественной практике созданы системы мониторинга теплопотребления зданий [17], нейросетевые модели прогноза [18], схемы предиктивного моделирования нагрузок [19], исследованы резервы снижения потерь [20; 21]; опыт цифровой трансформации угледобычи обобщён в работах [22–27].

Перечисленные работы рассматривают прогнозирование теплопотребления как задачу управления теплоснабжающей организацией. Количественная оценка того, какая часть внутреннего спроса на энергетический уголь формируется тепловой нагрузкой, насколько она изменчива и что даёт повышение точности её прогноза, не выполнялась, хотя для угледобывающих регионов и моногородов [28–31] она определяет и сбытовую политику угольных компаний, и устойчивость коммунальной инфраструктуры.

Гипотеза исследования: погодная составляющая внутреннего спроса на уголь сопоставима по величине с эффектом ценовых и логистических факторов; нормативный метод планирования даёт систематическое завышение не менее 5%; переход к адаптивному прогнозу на основе цифрового двойника снижает ошибку планирования не менее чем вдвое и обеспечивает экономию топливных затрат теплоснабжения 3–6%.

Цель исследования – количественно оценить тепловую составляющую внутреннего спроса на энергетический уголь, систематическую погрешность нормативного метода планирования и экономический эффект перехода к адаптивному прогнозу теплопотребления на основе цифрового двойника тепловой сети. Задачи: определить объём и изменчивость тепловой составляющей спроса; оценить смещение нормативного метода; сопоставить точность методов планирования; рассчитать эффект внедрения.

Материалы и методы

Информационную базу составили: отчёт Минэнерго России о состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации в 2024 г. (балансы тепловой энергии, расход топлива, удельные расходы, потери, цены и финансовый баланс сектора за 2016–2024 гг. по формам 1-ТЕП, 4-ТЭР, 6-ТП, 1-БМ и данным ГИС ТЭК); приказ Минэкономразвития России от 15.07.2020 №425 (ред. от 19.03.2026) с градусо-сутками отопительного периода за

2019–2025 гг.; СП 131.13330.2020, табл. 3.1; доклады Росгидромета; статистика поставок угля [4; 5].

Панель включает девять субъектов Российской Федерации: восемь регионов угледобывающей специализации (Кемеровская область – Кузбасс, Хакасия, Забайкальский край, Коми, Иркутская, Новосибирская, Челябинская и Сахалинская области) и Санкт-Петербург как контрольное наблюдение с газовой топливной базой. Глубина ряда – семь лет (2019–2025 гг.), число наблюдений – 63.

Градусо-сутки отопительного периода рассчитываются по соотношению

$$\text{ГСОП} = (t_{vn} - t_{ot}) \cdot z_{ot},$$

где t_{vn} – расчётная температура внутреннего воздуха, принятая равной 20 °C; t_{ot} – средняя температура наружного воздуха за отопительный период, °C; z_{ot} – продолжительность отопительного периода, сут. Изменчивость ряда оценена коэффициентом вариации $CV = \sigma/\mu$ и относительным размахом $(X_{max} - X_{min}) / \mu$, систематическое смещение – средней относительной разностью нормативного и фактических значений за семилетний период.

Ретроспективная проверка выполнена на четырёх правилах прогноза: М1 (нормативный) принимает прогноз равным нормативному ГСОП по СП 131.13330.2020 и воспроизводит действующую практику; М2 (инерционный) – равным факту предшествующего года; М3 – скользящее среднее за три года; М4 – среднее за весь ряд. Точность оценена средней абсолютной процентной ошибкой

$$\text{MAPE} = (100 / n) \cdot \Sigma\, |F_i - A_i| / A_i,$$

где F_i – прогнозное; A_i – фактическое значение ГСОП i-го года; n – число наблюдений контрольного периода. Контрольный период – 2022–2025 гг. (36 наблюдений), что обеспечивает всем методам одинаковую обучающую предысторию.

Тепловая составляющая спроса на уголь определена как сумма угля котельных и теплофикационной части угля тепловых электростанций:

$$B_t = B_k + B_e \cdot (Q_e \cdot b_t / B_s),$$

где B_k – расход угля котельными, млн т у.т.; B_e – расход угля тепловыми электростанциями, млн т у.т.; Q_e – отпуск тепловой энергии от тепловых электростанций, млн Гкал; b_t – удельный расход условного топлива на отпущенную теплоту по физическому методу разделения, принятый равным 0,1435 т у.т./Гкал; B_s – суммарный расход топлива тепловыми электростанциями, млн т у.т. Перевод в натуральное топливо выполнен по отношению средних цен угля в натуральных и условных единицах (2245 и 3734 руб/т в 2024 г. по данным ГИС ТЭК), что даёт коэффициент 0,601 т у.т./т.

Экономический эффект внедрения рассчитан для теплоснабжающей организации угледобывающего города по четырём составляющим: сокращение расхода топлива при ведении температурного графика по прогнозу; снижение потерь в сетях за счёт оптимизации режима; сокращение страхового запаса угля и связанного с ним оборотного капитала; замещение внеплановых закупок плановыми поставками:

$$Э = B_n \cdot p \cdot \delta_m + \Delta Q \cdot b_k \cdot p / k + B_n \cdot s \cdot p \cdot (r + \text{h}) + B_n \cdot \Delta v \cdot p \cdot \pi,$$

где B_n – годовой расход натурального топлива, т; p – цена угля, руб/т; δ_m – доля экономии топлива; ΔQ – сокращение потерь в сетях, Гкал; b_k – удельный расход условного топлива котельными, т у.т/Гкал; k – коэффициент перевода в натуральное топливо; s – доля сокращения страхового запаса; r – средневзвешенная стоимость капитала; h – норма потерь при хранении; Δv – сокращение доли внеплановых закупок; π – ценовая премия внеплановой закупки. Инвестиционная привлекательность оценена по простому сроку окупаемости, чистому дисконтированному доходу при ставке 18% и внутренней норме доходности за пятилетний горизонт; устойчивость результата проверена однофакторным анализом чувствительности.

Нормативные параметры эффекта приняты по [13–15; 18–20]: экономия топлива 2,5% (1,5–3,5%), снижение потерь в сетях на 1,0 пп (0,5–1,5), сокращение страхового запаса на 3% годового расхода, снижение доли внеплановых закупок с 4,0 до 1,5% при премии 20%.

Результаты

Динамика централизованного теплоснабжения и положение угля в его топливном балансе приведены в табл. 1. За 2020–2024 гг. отпуск тепловой энергии вырос на 7,2%, расход топлива – на 15,1%, расход угля – на 9,8% при снижении его доли в балансе с 20,0 до 19,0%; расход угля котельными колебался в пределах 5% (12,0–12,6 млн т у.т.), что подтверждает устойчивость коммунального сегмента. Балансовый убыток вырос с 186,0 до 266,0 млрд руб.

Топливная компонента затрат растёт опережающими темпами: при увеличении отпуска на 7,2% расходы на топливо выросли на 57%. При доле топлива в себестоимости 26,2% по стране и 33% в Сибирском федеральном округе сокращение натурального расхода непосредственно уменьшает убыток сектора.

Тепловая составляющая внутреннего спроса на уголь по данным 2024 г. складывается из 12,1 млн т у.т., сожжённых котельными, и теплофикационной части расхода тепловых электростанций. Отпуск теплоты от них (602,9 млн Гкал) при удельном расходе 0,1435 т у.т/Гкал соответствует 27,2% общего расхода топлива этой группой источников; та же доля от расхода угля (66,4 млн т у.т.) даёт 18,1 млн т у.т. Суммарно – 30,2 млн т у.т., или 50,2 млн т натурального топлива: 28,2% внутреннего рынка угля и 11,3% годовой добычи.

Изменчивость климатической основы спроса охарактеризована в табл. 2. Коэффициент вариации градусо-суток за 2019–2025 гг. составляет от 4,2 до 8,3% при среднем 5,7% по угледобывающим регионам, относительный размах – от 11,7 до 24,0%. Нормативное значение по СП 131.13330.2020 превышает среднее фактическое во всех восьми случаях, где определена опорная станция: от 6,8 до 12,3%, в среднем – на 9,6%.

Отношение фактического значения ГСОП к нормативному по всем 56 наблюдениям изменяется в пределах 78,4–105,3% при среднем 91,2%. Колебания синхронны по всем регионам панели, включая контрольное наблюдение, что подтверждает их общеклиматическую природу: ошибка планирования не диверсифицируется между регионами, а суммируется в масштабе страны.

При доле отопления и вентиляции в тепловой нагрузке 85% стандартное отклонение погодной составляющей спроса на уголь равно 2,4 млн т, размах – 6,8 млн т, или 5,5 и 15,2 млрд руб. в ценах 2024 г.

Сопоставительная точность методов планирования приведена в табл. 3. Нормативный метод М1 даёт среднюю абсолютную процентную ошибку 8,2% по панели, инерцион-

Таблица 1
Централизованное теплоснабжение Российской Федерации и место угля в его топливном балансе в 2020–2024 гг.

Table 1
Centralized heat supply in the Russian Federation and the role of coal in its fuel balance, 2020–2024

Показатель	2020	2021	2022	2023	2024
Отпуск тепловой энергии от источников, млн Гкал	1 221,4	1 341,9	1 315,7	1 297,6	1 309,5
в том числе от тепловых электростанций, млн Гкал	530,8	600,0	591,2	590,1	602,9
Потери тепловой энергии в сетях, млн Гкал	95,1	133,6	132,5	130,0	133,8
Потери к отпуску, %*	7,8	10,0	10,1	10,0	10,2
Расход топлива в системах теплоснабжения, млн т у.т.	358,3	393,0	394,1	399,2	412,3
в том числе уголь, млн т у.т.	71,5	73,2	77,0	77,8	78,5
Доля угля в топливном балансе, %*	20,0	18,6	19,5	19,5	19,0
Расход угля котельными, млн т у.т.	12,0	12,6	12,4	12,2	12,1
Средняя цена угля на электростанциях, руб/т**	1 494	1 607	1 800	1 954	2 245
Расчётная выручка сектора, млрд руб.	1 780,4	2 072,1	2 135,8	2 314,4	2 470,1
Расходы на топливо, млрд руб.	457,2	584,4	620,6	672,5	717,7
Балансовый убыток сектора, млрд руб.	–186,0	–206,5	–230,0	–249,2	–266,0
Бюджетные компенсации разницы тарифов, млрд руб.	113,3	136,1	144,6	163,0	196,3

Примечания: * расчёт авторов; ** удельная стоимость сожжённого топлива в натуральных единицах по электростанциям на котельно-печном топливе.
Источник. Отчёт о состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации в 2024 г. (Минэнерго России, 2025), табл. 3, 4, 25, 26, 29, 35–37.
Note. * The authors' calculations; ** Specific cost of the fuel consumed in physical units by power plants that use boiler and furnace fuel.
Source. Report on the condition of the thermal power industry and centralized heat supply in the Russian Federation in 2024 (Russian Ministry of Energy, 2025), Tables 3, 4, 25, 26, 29, 35–37.

Таблица 2
Градусо-сутки отопительного периода в субъектах Российской Федерации в 2019–2025 гг. и их отклонение от нормативного значения, °С·сут

Table 2
Heating degree day in the constituent entities of the Russian Federation in 2019–2025 and their deviation from the regulatory value, °C·day

Субъект Российской Федерации	Опорная станция	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	Среднее	CV, %	Размах, %	Норматив*	Отклонение, %**
Кемеровская область – Кузбасс	Кемерово	5 742	5 256	5 937	6 152	5 862	5 864	5 527	5 763	5,1	15,5	6 361	+10,4
Республика Хакасия	Абакан	5 979	5 235	5 908	6 321	5 840	6 020	5 499	5 829	6,1	18,6	6 250	+7,2
Забайкальский край	Чита	6 417	6 236	6 548	6 986	6 854	7 017	6 794	6 693	4,5	11,7	7 426	+10,9
Республика Коми	Сыктывкар	5 387	5 197	6 260	6 523	5 766	5 918	5 546	5 800	8,2	22,9	6 195	+6,8
Иркутская область	Иркутск	5 691	5 549	5 951	6 115	6 258	6 116	6 039	5 960	4,2	11,9	6 431	+7,9
Новосибирская область	Новосибирск	5 475	4 983	5 776	5 809	5 637	5 772	5 402	5 551	5,3	14,9	6 194	+11,6
Челябинская область	Челябинск	5 341	4 599	5 273	5 366	4 944	5 033	4 593	5 021	6,6	15,4	5 639	+12,3
Сахалинская область***	–	4 919	5 106	4 906	6 180	5 351	5 440	5 180	5 297	8,3	24,0	–	–
г. Санкт-Петербург	Санкт-Петербург	3 770	3 506	4 361	4 342	4 278	4 202	3 828	4 041	8,3	21,2	4 473	+10,7

Примечания: * рассчитан авторами по опорной станции как произведение продолжительности отопительного периода на разность внутренней (20 °С) и средней наружной температуры; ** превышение норматива над средним фактическим значением; *** опорная станция не выделялась ввиду внутрирегиональной дифференциации климата.
Источник. Приказ Минэкономразвития России от 15.07.2020 N°425 (ред. от 19.03.2026), прил. 2, табл. П2-2 – П2-6; СП 131.13330.2020, табл. 3.1.
Note. * Calculated by the authors based on a reference station as the product of the heating period duration times the difference between the indoor (20°C) and an average outdoor temperatures; ** Excess of the regulatory value over the average actual value; *** No reference plant was identified due to intraregional climate variations.
Source. Order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation No. 425 dated July 15, 2020 (as amended on March 19, 2026), Appendix 2, Table p.2-2 – p.2-6; SP 131.13330.2020, Table 3.1.

ный М2 – 4,3%, методы М3 и М4 занимают промежуточное положение (5,4 и 5,1%). Смещение М1 составляет от +7,4 до +12,7% при среднем +10,1%, то есть его ошибка почти целиком объясняется смещением, а не разбросом.

Ни один из методов годового планирования не обеспечивает ошибки ниже 4%: её предел задан природой метеорологической изменчивости. Дальнейшее уточнение достигается переходом к скользящему планированию с обновлением по метеоданным, что и выполняет цифровой двойник тепловой сети.

Таблица 3
Средняя абсолютная процентная ошибка методов планирования годовой потребности в тепловой энергии, контрольный период 2022–2025 гг., %

Table 3
The average absolute percentage error of methods for planning annual thermal energy demand, the reference period of 2022–2025, %

Субъект Российской Федерации	М1 нормативный	М2 инерционный	М3 среднее за 3 года	М4 среднее за ряд	Смещение М1
Кемеровская область – Кузбасс	8,9	3,6	4,9	4,0	+10,6
Республика Хакасия	6,4	6,8	5,1	4,9	+7,4
Забайкальский край	7,4	3,5	4,4	5,1	+11,0
Республика Коми	7,2	6,6	7,9	5,5	+7,4
Иркутская область	4,9	2,1	3,7	4,5	+8,0
Новосибирская область	9,6	3,2	3,9	4,1	+11,8
Челябинская область	13,5	5,4	5,7	5,5	+12,7
г. Санкт-Петербург	7,7	3,4	7,5	6,8	+11,0
В среднем по панели	8,2	4,3	5,4	5,1	+10,1
В среднем по угледобывающим регионам	8,3	4,5	5,1	4,8	+9,8

Примечание. М1 – норматив по СП 131.13330.2020; М2 – факт предшествующего года; М3 – скользящее среднее за три года; М4 – среднее за предшествующий ряд. Смещение М1 – средняя относительная разность нормативного и фактических значений за 2019–2025 гг. Сахалинская область не включена ввиду отсутствия опорной станции.
Note. M1 – the regulatory value as per SP 131.13330.2020; M2 – the actual value for the previous year; M3 – the rolling average over three years; M4 – the average for the previous series. M1 offset – the average relative difference between the regulatory and actual values for 2019–2025. The Sakhalin Oblast is not included due to the absence of a reference station.

Таблица 4
Экономический эффект внедрения адаптивного прогноза теплопотребления на теплоснабжающем предприятии угледобывающего города (отпуск в сеть 3,0 млн Гкал/год, угольное топливо)

Table 4
The economic benefits of implementing adaptive heat consumption forecasting at the heat supply organization of a coal-mining city (3.0 million Gcal supplied to the heating network annually, coal fuel)

Составляющая эффекта	Механизм	База расчёта	Изменение	Эффект, млн руб/год
Прогнозное ведение температурного графика	Отпуск теплоты по прогнозу нагрузки вместо реакции на факт	943,1 тыс. т угля	–2,5 % (–23,6 тыс. т)	52,9
Оптимизация гидравлического и температурного режима сети	Расчёт режима по цифровому двойнику сети	3,0 млн Гкал отпуска	–1,0 пп потерь (–30,0 тыс. Гкал)	21,2
Сокращение страхового складского запаса	Замена резерва на точность прогноза потребности	64 млн руб. оборотного капитала	–3 % расхода (–28,3 тыс. т)	12,4
Замещение внеплановых закупок плановыми	Согласование графика поставок с прогнозом	Премия внеплановой закупки 20 %	Доля 4,0 → 1,5%	10,6
Совокупный валовой эффект	–	2117 млн руб. затрат на топливо	4,6% топливных затрат	97,1
Дополнительные операционные затраты	Сопровождение программного обеспечения, связь, метеоданные, персонал	–	–	–22,0
Чистый годовой эффект	–	–	32 руб./Гкал	75,1

Примечание. Капитальные вложения – 150 млн руб. (цифровая модель сети, телеметрия тепловых пунктов, серверная инфраструктура, интеграция с АСУ ТП). Простой срок окупаемости – 2,0 года, чистый дисконтированный доход за пять лет при ставке 18% – 85 млн руб., внутренняя норма доходности – 41%. Удельный расход 189,0 кг у.т/Гкал и потери 16,8% приняты по Сибирскому федеральному округу, цена угля – 2245 руб/т.
Note. Capital investments of 150 million Rubles. (a digital model of the heating network, telemetry of the heat distribution stations, server infrastructure, integration with the automatic process control system). Simple payback period of 2.0 years; net present value (NPV) over five years at a bank interest of 18% is 85 million Rubles; internal rate of return (IRR) of 1%. Specific consumption of 189.0 kg of coal equivalent per Gcal and losses of 16.8% are assumed for the Siberian Federal District; the price of coal is 2,245 Rubles per metric ton.

Интеллектуальная система адаптивного прогноза построена из трёх уровней. Слой данных объединяет телеметрию тепловых пунктов, топологию сети и паспорта зданий, метеонаблюдения и численный прогноз погоды с горизонтом до десяти суток, дополненный климатическими сценариями ИИ-моделирования. Расчётное ядро образовано цифровым двойником сети, выполняющим гидравлический и тепловой расчёт с идентификацией сопротивлений участков, и ансамблем прогнозных моделей. Решения формируются на оперативном, тактическом и стратегическом горизонтах.

Экономический эффект внедрения рассчитан для теплоснабжающей организации угледобывающего города с отпуском в сеть 3,0 млн Гкал в год (табл. 4). При потерях 16,8% полезный отпуск составляет 2,50 млн Гкал, при удельном расходе 189,0 кг у.т/Гкал расход топлива – 567,0 тыс. т у.т., или 943,1 тыс. т натурального угля, затраты на топливо – 2117 млн руб. при полной себестоимости 6416 млн руб.

Совокупный годовой эффект оценён в 97,1 млн руб. – 4,6% топливных затрат и 32 руб. на 1 Гкал отпущенной теплоты при экономии 33,0 тыс. т топлива (3,5% годового расхода). Наибольший вклад дают прогнозное ведение температурного графика (52,9 млн руб.) и оптимизация режимов сети (21,2 млн руб.), на управление запасом и структурой закупок приходится 23,0 млн руб. Чистый эффект равен 75,1 млн руб., срок окупаемости – 2,0 года, ЧДД за пять лет – 85 млн руб., ВНД – 41%.

Анализ чувствительности показывает, что результат остаётся положительным во всём исследованном диапазо-

Таблица 5
Параметры систем теплоснабжения федеральных округов и потенциал экономии топлива при переходе к адаптивному прогнозу теплопотребления, 2024 г.

Table 5
Parameters of heat supply systems in the Federal Districts and the fuel savings potential upon transition to adaptive heat consumption forecasting, 2024

Федеральный округ	Отпуск в сеть, млн Гкал	Потери, % от отпуска в сеть	Расход топлива на тепло, млн т у.т.	Удельный расход котельных, кг у.т/Гкал	Сети к замене, %	Аварии, ед.	Потенциал экономии, млн т у.т. (млрд руб.)*
Сибирский	199,2	16,8	30,5	189,0	39,1	454	1,14 (5,4)
Уральский	155,5	14,1	22,5	160,0	35,0	705	0,81 (3,9)
Северо-Западный	179,2	10,6	24,8	167,6	31,0	263	0,92 (4,4)
Дальневосточный	79,5	16,1	12,6	195,9	22,8	144	0,47 (2,2)
Итого по четырём округам	613,4	–	90,4	–	–	1 566	3,34 (15,9)
Российская Федерация	1 309,5	13,0	186,8	165,3	30,1	3 645	6,83 (32,5)

Примечание. * рассчитан авторами как сумма сокращения расхода топлива на 2,5% и снижения потерь на 1,0 пп и оценён по средней цене сожжённого топлива 4751 руб/т у.т.; величина отражает технически достижимый максимум при полном охвате систем округа.
Источник. Отчёт о состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации в 2024 г. (Минэнерго России, 2025), табл. 7, 28, 29, 52, 53, 55, 61.
Note. * Calculated by the authors as the sum of a 2.5% reduction in fuel consumption and a 1.0 percentage point reduction in losses, and estimated based on the average price of 4,751 rubles per metric ton of coal equivalent; this figure reflects the technically achievable maximum with full coverage of the district's systems.
Source. Report on the condition of the thermal power industry and centralized heat supply in the Russian Federation in 2024 (Russian Ministry of Energy, 2025), Tables 7, 28, 29, 52, 53, 55, 61.

не параметров. Наибольшее влияние оказывает масштаб системы: при отпуске 2,0 млн Гкал чистый эффект снижается до 42,7 млн руб. (окупаемость 3,5 года), при 4,0 млн Гкал возрастает до 107,4 млн руб. (1,4 года). Далее следуют экономия топлива, цена угля и снижение потерь в сетях.

Масштабирование результата на федеральные округа выполнено в табл. 5. Для округов с преобладанием угольного теплоснабжения потенциал экономии составляет 3,34 млн т у.т., или 15,9 млрд руб. в ценах 2024 г. По стране в целом он оценивается в 6,83 млн т у.т., или 32,5 млрд руб. – 4,5% расходов сектора на топливо и 12,2% его балансового убытка.

Распределение потенциала по округам определяется удельным расходом топлива котельными, уровнем потерь и степенью износа сетей. Сибирский федеральный округ сочетает наибольший удельный расход (189,0 кг у.т/Гкал), высокие потери (16,8%) и максимальную долю сетей, нуждающихся в замене (39,1%), что даёт наибольший потенциал – 1,14 млн т у.т. Округа с наибольшим потенциалом совпадают с регионами основной угледобычи.

Обсуждение результатов

Полученные оценки согласуются с зарубежными результатами по порядку величины. Работы [13–15] подтверждают, что основной резерв точности лежит в оперативном, а не в годовом горизонте, а работа [16] приводит к выводу о сопоставимости стоимости неопределённости спроса со стоимостью капитальных решений. Настоящая работа дополняет их оценкой устойчивости внутреннего спроса на топливо для угледобывающего предприятия.

Практическая значимость результата для угольной отрасли определяется не столько величиной экономии топлива, сколько снижением волатильности отгрузки. Погодная амплитуда спроса в 2,4 млн т при стандартном отклонении и 6,8 млн т при размахе означает, что предприятие, ориентированное на коммунальную энергетику, ежегодно сталкивается с непрогнозируемым изменением заказа в пределах 5–15%. Сокращение ошибки планирования вдвое переводит часть отгрузки из спотового режима в договорный, снижая потребность в оборотном капитале.

Ограничения исследования состоят в следующем. Градусо-сутки публикуются в разрезе субъектов Российской Федерации, тогда как нормативные климатические параметры относятся к отдельным метеостанциям; часть смещения, оцениваемая в 1–2 пп, объясняется этим различием масштабов, а не изменением климата. Коэффициенты эффекта приняты по литературным данным и проверены анализом чувствительности, а не натурным экспериментом. Тепловая составляющая расхода угля электростанциями определена по физическому методу разделения топлива; пропорциональный метод изменяет оценку на 3–5%. Замещение угля газом [6; 31] не учитывалось.

Заключение

Тепловая составляющая внутреннего спроса на энергетический уголь оценена в 30,2 млн т у.т., или 50,2 млн т натурального топлива – 28,2% внутреннего рынка и 11,3% годовой добычи. В отличие от экспортного, этот сегмент определяется метеорологическими условиями отопительного периода и потому поддаётся управлению средствами прогнозирования.

Коэффициент вариации градусо-суток отопительного периода за 2019–2025 гг. по девяти субъектам составляет 4,2–8,3%, относительный размах – 11,7–24,0%. Колебания синхронны по всем регионам панели, вследствие чего ошибка планирования суммируется в масштабе страны. Погодная амплитуда спроса на уголь равна 2,4 млн т при стандартном отклонении и 6,8 млн т при размахе.

Действующий нормативный метод систематически завышает расчётную нагрузку: отношение фактического значения градусо-суток к нормативному составляет 78,4–105,3% при среднем 91,2%, среднее смещение – +10,1%, средняя абсолютная процентная ошибка – 8,2% против 4,3% у инерционного метода. Гипотезы о завышении не менее 5% и о двукратном снижении ошибки при переходе к адаптивным правилам подтверждены.

Экономический эффект внедрения системы адаптивного прогноза теплопотребления на базе цифрового двойника тепловой сети для теплоснабжающей организации угледобывающего города с отпуском 3,0 млн Гкал составляет 97,1 млн руб. в год (4,6% топливных затрат) при экономии 33,0 тыс. т угля. Чистый эффект равен 75,1 млн руб., срок окупаемости вложений в 150 млн руб. – 2,0 года, ЧДД за пять лет – 85 млн руб., ВНД – 41%; гипотеза об экономии

топливных затрат в диапазоне 3–6% подтверждена. Потенциал масштабирования по стране оценён в 6,83 млн т у.т., или 32,5 млрд руб., причём наибольшая его часть сосредоточена в Сибирском федеральном округе.

Результаты применимы на трёх уровнях: для теплоснабжающих организаций рассчитанные эластичности позволяют ранжировать инвестиционные альтернативы; для угледобывающих компаний оценка погодной амплитуды спроса обосновывает переход от спотовых поставок к договорам с корректировкой по прогнозу теплопотребления; для органов регулирования выявленное смещение обосновывает актуализацию климатических параметров схем теплоснабжения.

Перспективы дальнейших исследований связаны с верификацией модельных коэффициентов на данных опытной эксплуатации, расширением панели до муниципального уровня и учётом сценариев газификации.

Список литературы / References

1. Гасанов М.А., Гасанов Э.А., Спицын В.В., Спицына Л.Ю., Кузьмина О.Ю., Коновалова М.Е. Финансовые показатели технологических лидеров угольной промышленности в условиях экономической нестабильности. *Уголь*. 2025;(9):30–35. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-9-30-35
Gasanov M.A., Gasanov E.A., Spitsin V.V., Spitsina L.Yu., Kuzmina O.Yu., Konovalova M.E. Financial indicators of technological leaders in the coal industry in conditions of economic instability. *Ugol'*. 2025;(9):30–35. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-9-30-35

2. Салькина А.Р., Грабоздин Ю.П., Драницына Е.Г., Кузнецова Т.Е., Петухова Е.П. Динамика развития экспортной политики угольной промышленности в России. *Уголь*. 2025;(9):62–66. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-9-62-66
Safina A.R., Grabozdin Yu.P., Dramtsyna E.G., Kuznetsova T.E., Petukhova E.P. The dynamics of the coal industry's export policy in Russia. *Ugol'*. 2025;(9):62–66. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-9-62-66

3. Салькина А.Р., Драницына Е.Г., Кузнецова Т.Е., Ширинкина Е.В. Анализ геополитического влияния на экспортную политику российского угля. *Уголь*. 2025:(9);67–71. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-9-67-71
Salkina A.R., Dramtsyna E.G., Kuznetsova T.E., Shirinkina E.V. Analysis of the geopolitical impact on the export policy of Russian coal. *Ugol'*. 2025:(9);67–71. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-9-67-71

4. Мешков Г.Б., Петренко И.Е., Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности за 2023 год. *Уголь*. 2024;(3):18–29.
Meshkov G.B., Petrenko I.E., Gubanov D.A. Russia's coal industry performance for January–December, 2023. *Ugol'*. 2024;(3):18–29. (In Russ.)

5. Мешков Г.Б., Петренко И.Е., Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за январь–июнь 2024 года. *Уголь*. 2024;(9):5–16.
Meshkov G.B., Petrenko I.E., Gubanov D.A. Russia's coal industry performance for January–June, 2024. *Ugol'*. 2024;(9):5–16. (In Russ.)

6. Сидорова Г.П., Маниковский П.М., Гущина Т.О. Перспективы угольной генерации. *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2024;30(3):38–48. https://doi.org/10.21209/2227-9245-2024-30-3-38-48
Sidorova G.P., Manikovsky P.M., Gushchina T.O. Prospects for coal generation. *Transbaikal State University Journal*. 2024;30(3):38–48. (In Russ.) https://doi.org/10.21209/2227-9245-2024-30-3-38-48

7. Терентьева А.С. Анализ основных проблем централизованного теплоснабжения в России на современном этапе. *Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН*. 2020;(18):253–273. https://doi.org/10.47711/2076-318-2020-253-273
Terentyeva A.S. Analysis of the main district heating issues in Russia at the present stage. *Scientific Proceedings: Institute of Economic Forecasting RAS*. 2020;(18):253–273. (In Russ.) https://doi.org/10.47711/2076-318-2020-253-273

8. Семикашев В.В., Терентьева А.С. Прогноз развития сектора централизованного теплоснабжения до 2030 г. *Проблемы прогнозирования*. 2024;(3):43–55. https://doi.org/10.47711/0868-6351-204-43-55
Semikashev V.V., Terentyeva A.S. Development forecast for the district heating sector to 2030. *Studies on Russian Economic Development*. 2024;35(3):347–356. https://doi.org/10.1134/S1075700724030134

9. Фраймович Д.Ю., Белова Т.Д. Ценовая зона теплоснабжения как эффективный инновационный механизм привлечения инвестиций в регионы. *Beneficium*. 2025;(1):45–55. https://doi.org/10.34680/beneficium.2025.1(54).45-55
Fraymovich D.Yu., Belova T.D. The price zone of heat supply as an effective innovative mechanism for attracting investments to the regions. *Beneficium*. 2025;(1):45–55. (In Russ.) https://doi.org/10.34680/beneficium.2025.1(54).45-55

10. Тюрин А.А. Оценка структуры жилищного фонда России по классам энергоэффективности. *Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН*. 2025;(2):22–37. https://doi.org/10.47711/2076-3182-2025-2-22-37
Tyurin A.A. Evaluation of the housing stock structure of Russia by energy efficiency classes. *Scientific Proceedings: Institute of Economic Forecasting RAS*. 2025;(2):22–37. (In Russ.) https://doi.org/10.47711/2076-3182-2025-2-22-37

11. Страдинь В.Г., Михалевич О.А., Морозов Д.Э. Изменение климата России и его учет в строительных нормативных документах. *Вестник Военного инновационного технополиса «ЭРА»*. 2025;6(4):409–416. Режим доступа: https://sciencejournals.ru/view-article/?j=vestvit&y=2025&v=6&n=4&a=VestVIT2501020Stradin (дата обращения: 19.03.2026).
Stradin V.G., Mikhalevich O.A., Morozov D.E. Climate change in the Russian Federation and its incorporation into regulatory documents for the construction industry. *Vestnik Voennogo Innovatsionnogo Tekhnopolisa "ERA"*. 2025;6(4):409–416. (In Russ.) Available at: https://sciencejournals.ru/view-article/?j=vestvit&y=2025&v=6&n=4&a=VestVIT2501020Stradin (accessed: 19.03.2026).

12. Васильев Г.П., Лысак Т.М., Горнов В.Ф., Колесова М.В., Дмитриев А.Н., Горшков А.С. Анализ изменения значений градусо-суток отопительного периода в городе Москве. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2025;(3):31–39. https://doi.org/10.35211/18154360_2025_3_31
Vasilyev G.P., Lysak T.M., Gornov V.F., Kolesova M.V., Dmitriev A.N., Gorshkov A.S. Analysis of changes in the values of the degree-day heating period in Moscow. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture*. 2025;(3):31–39. (In Russ.) https://doi.org/10.35211/18154360_2025_3_31

13. Zheng X., Shi Z., Wang Y., Zhang H., Tang Z. Digital twin modeling for district heating network based on hydraulic resistance identification and heat load prediction. *Energy*. 2024;288:129726. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129726

14. Frison L., Gölzhäuser S., Bitterling M., Kramer W. Evaluating different artificial neural network forecasting approaches for optimizing district heating network operation. *Energy*. 2024;307:132745. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132745

15. Bergsteinsson H.G., Sørensen M.L., Møller J.K., Madsen H. Localizing weather forecasts for enhanced heat load forecast accuracy in urban district heating systems. *International Journal of Sustainable Energy*. 2024;43(1):2271261. https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2271261

16. Džiuvė V., Lekavičius V. Planning the development of district heating in the face of uncertainty. *Energy*. 2025;335:137894. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137894

17. Колосов М.В., Липовка А.Ю., Липовка Ю.Л. Система мониторинга теплопотребления зданий. Известия Томского политехнического университета. *Инжиниринг георесурсов*. 2024;335(7):206–220. https://doi.org/10.18799/24131830/2024/7/4443
Kolosov M.V., Lipovka A.Yu., Lipovka Yu.L. System for monitoring building heat consumption. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. *Geo Assets Engineering*. 2024;335(7):206–220. (In Russ.) https://doi.org/10.18799/24131830/2024/7/4443

18. Колосов М.В., Липовка А.Ю., Липовка Ю.Л. Нейронная сеть прогнозирования теплового потребления здания. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2026;69(1):77–94. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-77-94
Kolosov M.V., Lipovka A.Yu., Lipovka Yu.L. Neural Network for Predicting Building Heat Consumption. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2026;69(1):77–94. (In Russ.) https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-77-94

19. Зорина Т.Г., Юркевич О.И., Кабанов П.А. Оптимизация тарифной политики в энергетике на основе предиктивного моделирования тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей. *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2025;(3):72–87. https://doi.org/10.25729/esi.2025.39.3.007
Zoryna T.G., Yurkevich O.I., Kabanov P.A. Optimization of tariff policy in the energy sector based on predictive modeling of heat loads using neural networks. *Information and Mathematical Technologies in Science and Management*. 2025;(3):72–87. (In Russ.) https://doi.org/10.25729/esi.2025.39.3.007

20. Банникова С.А., Банников А.В., Козлова М.В. Повышение энергетической эффективности работы тепловых сетей за счет утилизации тепловых потерь. *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2024;(4):22–29. https://doi.org/10.17588/2072-2672.2024.4.022-029
Bannikova S.A., Bannikov A.V., Kozlova M.V. Improvement of energy efficiency of heating networks due to recycling heat losses. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*. 2024;(4):22–29. (In Russ.) https://doi.org/10.17588/2072-2672.2024.4.022-029

21. Никитина В.А., Сулин А.Б., Муравейников С.С., Дмитриев Д.О. Многокритериальная оптимизация утилизатора теплоты с учетом климатического фактора. *Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2025;9(1):46–55. https://doi.org/10.25206/2588-0373-2025-9-1-46-55
Nikitina V.A., Sulin A.B., Muraveinikov S.S., Dmitriev D.O. Multi-criteria optimization of heat recovery unit in terms of the climatic factor. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025;9(1):46–55. (In Russ.) https://doi.org/10.25206/2588-0373-2025-9-1-46-55

22. Урасова Н.Г. Экономическая эффективность цифровой трансформации угледобывающих предприятий: комплексная оценка внедрения интеллектуальных систем управления. *Горная промышленность*. 2025;(6):112–119. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-112-119
Urasova N.G. Economic efficiency of digital transformation of coal mining companies: integrated assessment of implementing smart management systems. *Russian Mining Industry*. 2025;(6):112–119. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-112-119

23. Фомичева Л.М., Пронская О.Н., Белянина И.В., Архангельский А.И., Арзамасова Е.Л. Влияние цифровизации производственных процессов на трансформацию структуры трудовых ресурсов и экономическую эффективность в угольной промышленности. *Горная промышленность*. 2025;(5):137–145. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-137-145
Fomicheva L.M., Pronskaya O.N., Belyanina I.V., Arkhangelskiy A.I., Arzamasova E.L. Effects of digitalization of production processes on the transformation of the labour force structure and economic efficiency in the coal industry. *Russian Mining Industry*. 2025;(5):137–145. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-137-145

24. Харченко К.В., Зубец А.Ж., Разумова Е.В., Москвитина Е.И., Воронова Е.И. Интеграция распределённых облачных вычислений для повышения эффективности угольной добычи и мониторинга горных процессов. *Горная промышленность*. 2025;(2):82–90. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-82-90
Kharchenko K.V., Zubets A.Zh., Razumova E.V., Moskvitina E.I., Voronova E.I. Integration of distributed cloud computing to improve coal mining efficiency and monitoring of mining processes. *Russian Mining Industry*. 2025;(2):82–90. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-82-90

25. Алексеева М.В., Исакова Ю.И. Цифровая трансформация как средство повышения эффективности государственного управления угольной промышленностью. *Уголь*. 2025;(9):56–61. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-9-56-61
Alekseeva M.V., Isakova Yu.I. Digital transformation as a means of improving the efficiency of state management in the coal industry. *Ugol'*. 2025;(9):56–61. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-9-56-61

26. Цатуров В.В. Интеллектуализация управления процессами добычи угольного сырья и производства товарной продукции. *Уголь*. 2025;(9):72–76. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-9-72-76
Tsaturov V.V. Smart management of coal mining and commercial production processes. *Ugol'*. 2025;(9):72–76. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-9-72-76

27. Нарбут В.В., Абдикеев Н.М. Информационная база оценки технологического развития угольной промышленности: проблемы и пути совершенствования. *Уголь*. 2025;(9):36–43. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-9-36-43
Narbut V.V., Abdikeev N.M. Information base for assessing the technological development of the coal industry: challenges and solutions. *Ugol'*. 2025;(9):36–43. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-9-36-43

28. Кузнецов Д.С., Лаженцев В.Н. Развитие арктических горнопромышленных городов Республики Коми. *Проблемы развития территории*. 2025;29(2):10–27. https://doi.org/10.15838/ptd.2025.2.136.2
Kuznetsov D.S., Lazhentsev V.N. Arctic mining cities development of the Komi Republic. *Problems of Territory's Development*. 2025;29(2):10–27. (In Russ.) https://doi.org/10.15838/ptd.2025.2.136.2

29. Шутько Л.Г. Роль угледобычи в обеспечении социо-экологического благополучия населения угледобывающего региона – Кемеровская область – Кузбасс. *Уголь*. 2025;(9):44–48. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-9-44-48
Shutko L.G. The role of coal mining in ensuring social and ecological well-being of the population in a coal-mining region: Kemerovo region – Kuzbass. *Ugol'*. 2025;(9):44–48. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-9-44-48

30. Волков А.А. Сравнительный анализ угольных регионов России: модели развития и возможности диверсификации экономики. *Региональная и отраслевая экономика*. 2025;(5):174–180. https://doi.org/10.47576/2949-1916.2025.5.5.021
Volkov A.A. Comparative analysis of coal regions in Russia: development models and possibilities for economic diversification. *Regional and Sectoral Economy*. 2025;(5):174–180. (In Russ.) https://doi.org/10.47576/2949-1916.2025.5.5.021

31. Губий Е.В. Оценка эффективности когенерационных энергоустановок в Арктике и северных регионах России. *Арктика и Север*. 2025;(58):23–37. https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2025.58.23
Gubiy E.V. Assessing the efficiency of cogeneration power plants in the arctic and northern regions of Russia. *Arctic and North*. 2025;(58):23–37. (In Russ.) https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2025.58.23

Информация об авторах
Скворцова Инга Викторовна – доктор экономических наук, доцент, доцент Высшей школы производственного менеджмента, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-2350-6621; e-mail: Inga.V.Skvortsova@yandex.ru
Нурулин Юрий Рифкатович – доктор технических наук, профессор Высшей школы производственного менеджмента, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-4606-1477; e-mail: yury.nurulin@gmail.com
Ильинский Александр Алексеевич – доктор экономических наук, профессор, профессор Высшей школы производственного менеджмента, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0001-8220-2164; e-mail: alex.ilinsky@bk.ru
Сомов Андрей Георгиевич – кандидат экономических наук, старший преподаватель Высшей школы производственного менеджмента, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; https://orcid.org/0009-0004-2592-9198; e-mail: somovspb@yandex.ru
Калинина Ольга Владимировна – доктор экономических наук, профессор, директор Высшей школы производственного менеджмента, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-4617-2823; e-mail: ovkalinina@spbstu.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 31.07.2026
Поступила после рецензирования: 19.08.2026
Принята к публикации: 19.08.2026

Information about the authors
Inga V. Skvortsova – Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor, Associate Professor of the Graduate School of Industrial Management, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-2350-6621; e-mail: Inga.V.Skvortsova@yandex.ru
Yury R. Nurulin – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Graduate School of Industrial Management, Senior Researcher, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-4606-1477; e-mail: yury.nurulin@gmail.com
Alexander A. Iliinsky – Dr. Sci. (Econ.), Professor, Professor of the Graduate School of Industrial Management, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0001-8220-2164; e-mail: alex.ilinsky@bk.ru
Andrei G. Somov – Cand. Sci. (Econ.), Senior Lecturer of the Graduate School of Industrial Management, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; https://orcid.org/0009-0004-2592-9198; e-mail: somovspb@yandex.ru
Olga V. Kalinina – Dr. Sci. (Econ.), Professor, Director of the Graduate School of Industrial Management, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-4617-2823; e-mail: ovkalinina@spbstu.ru

Article info
Received: 31.07.2026
Revised: 19.08.2026
Accepted: 19.08.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-54-58

Инклюзивное развитие горнопромышленного региона России: на примере Республики Тыва

Г.Ф. Балакина[1], О.Н. Монгуш[2]✉
[1] Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кызыл, Российская Федерация
[2] Тувинский государственный университет, г. Кызыл, Российская Федерация
✉ olga_vlad80@mail.ru

Резюме: Рассматриваются проблемы перспективного развития горного ресурсного региона – Республики Тыва. Определяется понятие инклюзивного развития как обеспечивающего социально справедливое распределение средств для повышения благосостояния, обеспечения высокого уровня жизни, снижения уровня бедности населения на базе использования природных ресурсов в рамках экологических норм безопасности при соблюдении интересов будущих поколений. Определены основные направления политики инклюзивного развития в Республике Тыва. Предлагается разработка в регионе программы инклюзивного развития экономики с включением в нее мер по реиндустриализации на базе новых инвестиционных проектов и стратегических инициатив. Сделан вывод, что к 2035 г. в промышленно-производственной сфере Республики Тыва значимую роль начнет играть «экономика знаний», объединяющая сферы и направления, основанные на достижениях современной науки и производстве новых знаний, потенциал развития которых имеется в регионе. Реализация программы инклюзивного развития Республики Тыва поможет дать адекватный ответ на технологические и экономические вызовы современного развития при первостепенной важности гармонизации социально-экономических процессов, сокращения отставания от российских параметров, решения экологических проблем.

Ключевые слова: инклюзивное развитие, горный регион, ресурсный регион, Республика Тыва, добыча минерального сырья, добывающая промышленность, реиндустриализация

Благодарности: Работа выполнена в рамках исследований по базовому проекту Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН №1023033100464-7-1.5.1.

Для цитирования: Балакина Г.Ф., Монгуш О.Н. Инклюзивное развитие горнопромышленного региона России: на примере Республики Тыва. *Горная промышленность*. 2026;(5):54–58. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-54-58

Inclusive development of a mining region in the Russian Federation: the case of the Republic of Tyva

G.F. Balakina[1], O.N. Mongush[2]✉
[1] Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kyzyl, Russian Federation
[2] Tuva State University, Kyzyl, Russian Federation
✉ olga_vlad80@mail.ru

Abstract: This article examines prospective development of a mining resource region – the Republic of Tyva. It defines inclusive development as ensuring a socially equitable distribution of resources to improve social welfare, ensure a high standard of living, and reduce poverty through the use of natural resources within the framework of environmental safety standards while respecting the interests of the future generations. The key areas are defined for the inclusive development policy in the Republic of Tyva. It is proposed to develop a regional inclusive economic development program that would incorporate reindustrialization measures based on new investment projects and strategic initiatives. A conclusion was made that the 'knowledge-driven economy', which brings together sectors and fields based on achievements of modern science and generation of new knowledge, and for which the region possesses the development potential, will begin to play a significant role in the industrial and manufacturing sector of the Republic of Tyva by 2035. Implementing the Republic of Tyva's inclusive development program will help to provide an adequate response to the technological and economic challenges of modern development, while prioritizing harmonization of social and economic processes, narrowing the gap with the Russian standards, and addressing environmental issues.

Keywords: inclusive development, mining region, resource-producing region, Tyva Republic, mineral mining, mining industry, reindustrialization

Acknowledgements: This article was prepared as part of the research project of the Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (TUVIKOPR SB RAS) No. 1023033100464-7-1.5.1.

For citation: Balakina G.F., Mongush O.N. Inclusive development of a mining region in the Russian Federation: the case of the Republic of Tyva. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):54–58. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-54-58

Введение

Поиск источников экономического роста в условиях снижения темпов экономического развития в связи с исчерпанием потенциала экстенсивного роста привел исследователей регионального развития к появлению феномена инклюзивного развития как новой модели экономического развития. Понятие инклюзивного развития вобрало в себя понятие устойчивого развития при усилении внимания к решению социальных проблем. После 2010–2012 гг. на фоне снижения темпов экономического развития в мировой экономике мировые общественные и финансовые организации: ООН, МВФ, ОЭСР, Европейская комиссия и др. – начали обсуждение темы источников повышения темпов роста экономики. Было определено, что модель развития на базе «экстрактивной» экономики, отличающейся добычей полезных ископаемых без учета экологических проблем и инновационных технологий при сохранении монопольного владения общественным богатством, усилении социального неравенства, бедности и нищеты, исчерпала себя. Определено, что противовесом здесь может стать модель инклюзивного развития экономики. По мнению Д. Аджемоглу и Дж. Робинсон «Инклюзивные институты создают устойчивый долгосрочный рост благосостояния. Экстрактивные институты тоже способны запустить рост, однако он будет неустойчивым и недолгосрочным. Рост при инклюзивных институтах допускает «созидательное разрушение» и тем самым поддерживает технический прогресс и инновации. Экстрактивные институты лишь в весьма ограниченных масштабах способны запустить инновационные процессы» [1, с. 2].

Однако широкое обсуждение данной проблемы не привело к выработке единого мнения на предмет ее сущности. Многие общественные организации по-разному определяют понятие инклюзивной экономики [2, с. 93; 3]. Так, например, ООН основным назначением инклюзивной экономики считает «обеспечение экономического роста, занятости, социального равенства и защиты»; МВФ – «подъем темпов роста и увеличение размера экономики»; ОЭСР – «рост, который является стабильным и всеобъемлющим»; Азиатский банк развития рассматривает инклюзивное развитие как «тип роста, который не только создает новые экономические возможности, но также обеспечивает равный доступ к возможностям, созданным для всех сегментов общества, особенно для бедных»; Европейская комиссия рассматривает инклюзивность как способ «обеспечить высокий уровень занятости, инвестирование в образование, борьбу с бедностью и модернизацию рынков труда…» [2, с. 93]. Исследователями было выработано три подхода к определению инклюзивного развития. Первый подход основан на представлении об «инклюзивности» как «соблюдение справедливости в распределении материальных и нематериальных благ». Второй подход предполагает, что инклюзивное развитие «призвано обеспечить формирование «социальной экономики». Третий подход рассматривает инклюзивное развитие как взаимодействие общества и окружающей среды в интересах будущих поколений [4, с. 6–8]. В.А. Баринова и С.П. Земцов предлагают использовать адаптированную методику расчета индекса инклюзивного развития регионов [5], другие авторы для оценки инклюзивного развития – применять индикаторы развития образования, здравоохранения, безопасности и качества [6].

Под инклюзивным развитием нами понимается модель развития общества как обеспечивающего социально справедливое распределение средств для повышения благосостояния, обеспечения высокого уровня жизни, снижения уровня бедности населения на базе использования природных ресурсов в рамках экологических норм безопасности при соблюдении интересов будущих поколений. То есть инклюзивное развитие интегрирует соотношение традиционных параметров экономического роста и индикаторов социальной и экологической динамики стран и регионов.

Результаты

Территория, в приоритетном развитии которой экономика ориентирована на добычу полезных ископаемых, относится к регионам ресурсного типа. К ресурсным регионам России относится и Республика Тыва – проблемный приграничный регион с преимущественным развитием добывающей промышленности. В Туве производится 79,2% объема промышленного производства и 14,8% объема валового регионального продукта (ВРП) [7, с. 47]. За 2000–2024 гг. доля промышленности в ВРП региона увеличилась с 11,5 до 27% в 2015 г. и 17,7% в 2023 г. (табл. 1).

Таблица 1
Доля промышленности в валовом региональном продукте Республики Тыва в 2000–2023 гг.

Table 1
The share of industry in the Gross Regional Product of the Republic of Tyva, 2000–2023

Показатель	2000	2005	2010	2015	2023
Валовой региональный продукт, млн руб.	3638,7	11662,5	30772,8	42287,3	122532,5
В том числе валовая добавленная стоимость промышленности	416,5	1411,2	4123,6	11417,6	21688,3
Удельный вес промышленности в ВРП, %	11,5	12,1	13,4	27,0	17,7

Составлено по данным: Регионы России. Социально-экономические показатели. 2017: Стат. сб. М.: Росстат; 2017. С. 536–555; Регионы России. Социально-экономические показатели. 2025: Стат. сб. М.: Росстат; 2025. С. 432–440.
Compiled based on data from: Regions of Russia. Social and economic indicators. 2017: Statistical Compilation. Moscow: Rosstat; 2017, pp. 536–555. (In Russ.); Regions of Russia. Social and economic indicators. 2025: Statistical Compilation. Moscow: Rosstat; 2025, pp. 432–440. (In Russ.)

Промышленность Республики Тыва. Развитие промышленного производства Республики Тыва отличается сырьевой специализацией, преобладанием объема производства добывающих отраслей, слабой диверсифицированностью отраслевой структуры, низкой конкурентоспособностью продукции. Рост эффективности производства в регионе сдерживается высокими транспортными затратами, обусловленными территориальной удалённостью республики от транспортных, финансовых и торговых центров, отсутствием железной дороги. Вследствие убыточности значительной части промышленных предприятий источники инвестиций в обновление фондов существенно ограничены [8, с. 25].

Особенностями инклюзивного развития Республики Тыва как ресурсного региона являются:

– слабая зависимость динамики добывающей промышленности от уровня развития обрабатывающих производств в регионе;

– добывающие компании не заинтересованы в социально-экономическом развитии районов освоения природных ресурсов, тратят средства на экологическую безопасность и инфраструктурное развитие в ограниченных объемах. Это может привести к деградации территории добычи после исчерпания запасов;

– зависимость доходов регионального бюджета от конъюнктуры цен на минеральное сырье на мировых рынках;

– замедление темпов реиндустриализации, снижение темпов роста обрабатывающих производств. В регионе слабо развиты переработка и обогащение угля и минерального сырья [9, с. 62–63];

– сдерживание создания новых обрабатывающих производств и инновационного обновления традиционных секторов промышленности, обмена технологиями, инновациями;

– привлечение квалифицированных специалистов из-за пределов региона при ведении добычи вахтовым методом детерминирует использование местных трудовых ресурсов преимущественно на низкоквалифицированных работах с высокой долей использования физического труда;

– низкие средние душевые доходы населения детерминируют высокую долю населения с доходами ниже прожиточного минимума в Туве по сравнению со среднероссийским показателем, которые в 2024 г. составляют соответственно: 20,0 и 7,1% [1].

Наличие в Туве источников уникальных полезных ископаемых дает региону шанс сформировать высокотехнологичный сегмент на основе природных условий и предпосылок. В Туве существует возможность обеспечить сочетание современной сырьевой экономики с экономикой высокотехнологичных производств по переработке сырья. Необходимо сформировать новую модель экономического роста региона на основе принципов реиндустриализации экономики. Под реиндустриализацией экономики региона понимается процесс создания здесь новых и возобновления работы ранее обанкротившихся предприятий на основе модернизации, внедрения инновационных технологий, освоения выпуска новой продукции. В Республике Тыва целесообразна разработка программы инклюзивного развития ее экономики в качестве важного пилотного проекта межрегиональной значимости с включением в нее программы реиндустриализации на базе новых инвестиционных проектов и стратегических инициатив, предусматривающих динамичное развитие региона. Программа должна стать важным элементом системы стратегического планирования.

Направления инклюзивного развития Республики Тыва. При разработке программы инклюзивного развития республики следует учитывать, что целью программы необходимо определить не только динамичный рост валового регионального продукта (ежегодный прирост на уровне 4–5,5% в сопоставимых ценах), но и увеличение удельного веса отраслей реального сектора экономики, в особенности промышленности, в структуре ВРП до 30–40% к 2035 г. на основе стабилизации темпов роста, а также новое качество экономического роста, базирующееся на структурных преобразованиях экономики и технологическом реформировании. Быстрый темп экономического роста необходим для повышения уровня и качества жизни населения, сохранения экологического равновесия, но, чтобы быть стабильным, экономический рост должен охватывать все сектора экономики и большую часть трудоспособного населения Тувы.

Основными разделами программы предусматриваются: создание инновационных производств и продуктов в республике, то есть Тува в перспективе должна значительно повысить уровень инновационной активности – с 6,7% в 2024 г. до 15–18% в 2035 г.; поддержка и развитие действующих отраслей и производств жизнеобеспечения региона; способствование технологическому обновлению устаревших производств при наличии четкой программы их модернизации. Блок экологических задач включает в себя мероприятия по борьбе с ухудшением качества воздуха в населенных пунктах, сохранению лесов и защите их от пожаров, созданию экологически безопасных добывающих производств и предприятий по переработке природного сырья.

Блок задач по социальной направленности и социальным последствиям содержит направления по снижению уровня бедности до среднего по стране на базе динамичного роста доходов, повышению обеспеченности жильем до 25 м^2 на жителя, увеличению средней продолжительности жизни; задачи в области развития образования, здравоохранения, культуры и социального обеспечения. В настоящее время ряд показателей социального развития отстает от среднероссийских показателей. В 2015–2024 гг. в Туве социальные процессы развивались в позитивном направлении. А именно численность населения увеличивалась за счёт высокого естественного прироста, наблюдалось повышение среднедушевых доходов, замедление инфляции, рост розничного товарооборота; росла обеспеченность жильём и социальными услугами (табл. 2).

Ожидаемая продолжительность жизни при рождении увеличилась с 55,16 лет в 2000 г. до 66,74 в 2024 г., рост за 2015–2024 гг. составил 121%. Максимальная продолжительность жизни за рассматриваемый период в Туве – 67,57 лет – отмечена в 2019 г. до наступления пандемии коронавирусной инфекции COVID-19 (см. табл. 2). По РФ ожидаемая продолжительность равняется 73,41 лет (2023 г.), в развитых странах мира 80–82 года. Отставание показателя в Туве на 8–10% от среднего по стране обусловлено высокой смертностью жителей трудоспособного возраста, в особенности мужчин, недостаточным уровнем доходов, профилактической работы и внедрения принципов здорового образа жизни. Увеличение продолжительности жизни в республике происходит на фоне сохранения динамичного роста населения и высокой рождаемости.

1 Регионы России. Социально-экономические показатели. 2025: Стат. сб. М.: Росстат; 2025. С. 212–215.

Таблица 2
Показатели социального развития Республики Тыва за 2000–2024 гг.

Table 2
Indicators of social development in the Republic of Tyva, 2000–2024

Показатели	Динамика по годам						
	2000	2015	2017	2019	2020	2024	2024 в % к 2000
Численность населения, тыс. чел.	306,0	316,0	322,0	327,0	331,5	337,8	110,4
Среднедушевые денежные доходы населения, руб. в месяц	1168	15572	15011	16583	18975	34294	в 29,4 раза
Доля населения с доходами ниже прожиточного минимума, %	77,9	36,9	35,8	34,1	31,7	20,0	25,7
Индекс роста потребительских цен, декабрь к декабрю в %	120,3	111,4	102,7	103,3	105,1	109,7	91,2
Уровень безработицы, %	27,0	18,6	18,3	12,3	18,0	5,1	18,8
Общая площадь жилых помещений, приходящаяся в среднем на 1 жителя, м^2	12,5	13,5	13,9	14,2	14,4	16,4	131,2
Ожидаемая продолжительность жизни при рождении, лет	55,16	63,15	66,29	67,57	66,3	66,74	121,0
Коэффициент естественного прироста (на 1000 чел.)	2,3	13,5	13,2	10,3	10,8	8,2	356,5

Составлено по данным: Регионы России. Социально-экономические показатели. 2020: Стат. сб. М.: Росстат; 2020. С. 44, 76, 80, 203, 239, 279; Регионы России. Социально-экономические показатели. 2025: Стат. сб. М.: Росстат; 2025. С. 75, 78–81, 155, 212–214, 248–250.
Compiled based on data from: Regions of Russia. Social and economic indicators. 2020: Statistical Compilation. Moscow: Rosstat; 2017, pp. 44, 76, 80, 203, 239, 279. (In Russ.); Regions of Russia. Social and economic indicators. 2025: Statistical Compilation. Moscow: Rosstat; 2025, pp. 75, 78–81, 155, 212–214, 248–250. (In Russ.)

За последние 7 лет численность жителей Тувы выросла на 4,9%. Естественный прирост населения здесь оставался одним из самых высоких в России, хотя его показатели несколько снизились.

Среднедушевые доходы жителей за 2015–2024 гг. увеличились в 2,2 раза за счёт расширения производства в отраслях с высокими зарплатами (горнодобывающая промышленность, оборона, финансово-кредитная сфера и др.), масштабных мероприятий по социальной поддержке населения: роста размера социальных выплат – пенсий, пособий, стипендий. Тем не менее,темпы роста доходов недостаточны для сокращения отставания: за рассматриваемые семь лет разрыв со среднероссийским уровнем сократился с 48,5 лишь до 46,4%. Невысокий уровень доходов и заработной платы в сочетании с высоким уровнем рождаемости, многодетных семей, значительным уровнем безработицы детерминирует сохранение высокого уровня бедности, существенно превышающего средний по стране.

Уровень общей безработицы в республике значительно снизился – с 27% в 2000 г., до 18,6% – в 2015 г. и до 5,1% – 2024 г. Общая численность безработных граждан составила в 2024 г. 3,9 тыс. чел. Показатель обеспеченности жильём на душу населения республики увеличился с 13,5 в 2015 г. до 16,4 м2 в 2024 г., или на 9,6%, что достигнуто за счёт значительного увеличения темпов жилищного строительства. С 2015 г. в Туве ежегодно вводилось более 93–110 тыс. м^2 жилья, тогда как в 2005–2010 гг. ввод жилья составлял от 17 до 50 тыс. м^2 в год. Активизацию жилищного строительства и динамичное снижение безработицы, несомненно, можно отнести к складывающимся положительным тенденциям развития региона. Общая площадь жилых помещений на одного жителя Тувы в 2024 г. составляла 91% от норматива (18 м^2) и почти на 44% ниже среднероссийского показателя, равного 29,4 м^2.

Другими словами, хотя социальные процессы в Туве в 2015–2024 гг. характеризуются стабильным снижением уровня безработицы и бедности, увеличением средней продолжительности жизни вследствие роста среднедушевых доходов, создания новых рабочих мест, замедления темпов инфляции, развития предпринимательства, роста объёмов строительства жилья, укрепления материально-технической базы здравоохранения и образования, тем не менее сохраняется отставание от среднероссийских параметров, снижение которого целесообразно предусмотреть в программе инклюзивного развития республики.

В рамках реализации программы необходимо также произвести отбор комплекса инновационных проектов, соответствующих ключевым технологическим разработкам научно-исследовательских подразделений, действующих и законсервированных производств республики. Поддержка традиционных отраслей и производств должна предусматривать реновацию действующих производств, решающих проблемы жизнеобеспечения региона, но не предусматривать консервацию устаревших, малоэффективных и неконкурентоспособных предприятий. В ряде проектов программы целесообразно предусмотреть формирование и совершенствование инфраструктуры реиндустриализации.

В области социальной инфраструктуры предполагается развитие высокотехнологичной медицины, применение инновационных методов и средств в образовании, социальном обеспечении, культуре. Поскольку в современных условиях основным источником экономического роста, фактором, определяющим конкурентоспособность территорий, становится создание и использование знаний, развитие традиционных отраслей будет сопровождаться формированием и развитием элементов новой экономики – экономики знаний. К 2035 г. в промышленно-производственной сфере республики значимую роль начнет играть «экономика знаний», объединяющая сферы и направления, основанные на достижениях современной науки и производстве новых знаний, потенциал развития которых имеется в регионе.

Заключение

На основе реализации программы инклюзивного развития Республики Тыва возможен адекватный ответ на технологические и экономические вызовы современного развития при первостепенной важности гармонизации социально-экономических процессов, сокращения отставания от российских параметров, решения экологических проблем.

Список литературы / References

1. Аджемоглу Д., Робинсон Дж.А. *Почему одни страны богатые, а другие бедные: происхождение власти, процветания и нищеты*. М.: АСТ; 2015. 693 с.

2. Андриевская В.Б. Эффективность государственного управления как необходимая предпосылка инклюзивного роста экономики. *Идеи и идеалы*. 2015;2(1):90–101. Режим доступа: https://ideaidealy.nsuem.ru/storage/uploads/2015/04/Andrievskaya_23_T.2.pdf (дата обращения: 27.04.2026).
Andrievskaya V.B. Public administration efficiency as necessary prerequisite of inclusive growth of economy. *Ideas and Ideals*. 2015;2(1):90–101. (In Russ.) Available at: https://ideaidealy.nsuem.ru/storage/uploads/2015/04/Andrievskaya_23_T.2.pdf (accessed: 27.04.2026).

3. Anand R., Mishra S., Peiris S.J. *Inclusive growth: Measurement and determinants*. Working Paper No. 2013/135. 27 p. https://doi.org/10.5089/9781484323212.001

4. Поподько Г.И., Пыжев А.И. (ред.). *Инклюзивное развитие ресурсных регионов*. Новосибирск: Изд-во ИЭОПП СО РАН; 2024. 410 с. Режим доступа: http://lib.ieie.nsc.ru/docs/2024/022.pdf (дата обращения: 27.04.2026).

5. Баринова В.А., Земцов С.П. Инклюзивный рост и устойчивость регионов России. *Регион: экономика и социология*. 2019;(1):23–46. https://doi.org/10.15372/REG20190102
Barinova V.A., Zemtsov S.P. Inclusive growth and regional resilience in Russia. *Region: Economics and Sociology*. 2019;(1):23–46. (In Russ.) https://doi.org/10.15372/REG20190102

6. Ariza J., Vargas-Prieto A., García-Estévez J. The effects of the mining-energy boom on inclusive development in Colombia. The Extractive Industries and Society. 2020;7(4):1597–1606. https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.10.002

7. Балакина Г.Ф., Монгуш О.Н. Экономический рост в горном регионе: Республика Тыва. *Горная промышленность*. 2025;(3):46–50. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-46-50
Balakina G.F., Mongush O.N. Economic growth in a mountain region: the Republic of Tyva. *Russian Mining Industry*. 2025;(3):46–50. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-46-50

8. Балакина Г.Ф. Проблемы реиндустриализации в Республике Тыва. *Экономика Профессия Бизнес*. 2018;3(3):24–28. https://doi.org/10.14258/201835
Balakina G.F. Problems of reindustrialization in the Republic of Tyva. *Economics Profession Business*. 2018;3(3):24–28. (In Russ.) https://doi.org/10.14258/201835

9. Куликова М.П., Балакина Г.Ф. Проект «Тувинский кокс»: проблемы и перспективы развития угледобычи в Республике Тыва. *Горная промышленность*. 2023;(4):61–64. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-61-64
Kulikova M.P., Balakina G.F. The Coke of Tyva Project: challenges and prospects for the development of coal mining in the Republic of Tyva. *Russian Mining Industry*. 2023;(4):61–64. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-61-64

Информация об авторах
Балакина Галина Федоровна – доктор экономических наук, главный научный сотрудник, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кызыл, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-2387-7190; e-mail: balakina.gal@yandex.ru
Монгуш Ольга Николаевна – кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой бухгалтерского учета, анализа и аудита, Тувинский государственный университет, г. Кызыл, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-4110-6584; e-mail: olga_vlad80@mail.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 30.04.2026
Поступила после рецензирования: 22.06.2026
Принята к публикации: 24.06.2026

Information about the authors
Galina F. Balakina – Dr. Sci. (Econ.), Chief Research Fellow, Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kyzyl, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-2387-7190; e-mail: balakina.gal@yandex.ru
Olga N. Mongush – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Head of the Department of Accounting, Analysis and Audit, Tuva State University, Kyzyl, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-4110-6584; e-mail: olga_vlad80@mail.ru

Article info
Received: 30.04.2026
Revised: 22.06.2026
Accepted: 24.06.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-59-66

Финансовые механизмы реализации зелёных проектов в горнодобывающей промышленности

Ю.А. Крупнов[1] ✉, Ю.Б. Надточий[1], Н.Н. Щепкина[1], Б. Аскарбеков[2]
[1] Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация
[2] Кыргызский экономический университет им. М. Рыскулбекова, г. Бишкек, Кыргызстан
✉ yakrupnov@fa.ru

Резюме: Последние десятилетия горнодобывающая промышленность находится под возрастающим воздействием экологических и экономических вызовов, требующих пересмотра традиционных подходов к финансированию производственного развития и природоохранной деятельности. Данное исследование посвящено финансовым механизмам реализации зелёных проектов в горнодобывающей промышленности как инструмента экологической модернизации, повышения энергоэффективности и снижения экологических рисков. Обосновано, что высокая ресурсная и энергетическая нагрузка, образование отходов, нарушение земель, водопотребление и выбросы загрязняющих веществ требуют перехода от компенсационного природоохранного подхода к проектному финансированию экологических преобразований. Выделены ключевые инструменты: зелёные облигации, ESG-кредиты, субсидии, государственно-частное партнёрство, климатическое финансирование и целевые инвестиции в рекультивацию, водоочистку, переработку отходов и энергоэффективное оборудование. Предложен организационно-экономический подход к оценке зелёных проектов с учётом экологического эффекта, затрат жизненного цикла, инвестиционных рисков и влияния на устойчивость горнодобывающих предприятий.

Ключевые слова: зелёное финансирование, горнодобывающая промышленность, зелёные проекты, ESG-кредиты, зелёные облигации, рекультивация земель, энергоэффективность, экологические риски, экологическая модернизация, государственно-частное партнёрство, климатическое финансирование

Для цитирования: Крупнов Ю.А., Надточий Ю.Б., Щепкина Н.Н., Аскарбеков Б. Финансовые механизмы реализации зелёных проектов в горнодобывающей промышленности. *Горная промышленность.* 2026;(5):59–66. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-59-66

Financial mechanisms for implementing green projects in the mining industry

Yu.A. Krupnov[1] ✉, Yu.B. Nadtochiy[1], N.N. Shchepkina[1], B. Askarbekov[2]
[1] Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation
[2] Kyrgyz Economic University named after M. Ryskulbekov, Bishkek, Kyrgyzstan
✉ yakrupnov@fa.ru

Abstract: This study examines financial mechanisms for implementing green projects in the mining industry as a tool for environmentally responsible modernization, improvement of the energy efficiency and reduction of environmental risks. It is justified that high resource and energy intensity, waste generation, land disturbance, water consumption and emissions of pollutants require a transition from a compensation-based environmental protection approach to project financing of environmental transformation. The key tools identified include the green bonds, ESG loans, subsidies, public-private partnership, climate finance and targeted investments in land reclamation, water treatment, waste recycling and energy-efficient equipment. The article proposes an organizational and economic approach to assessing green projects with account of environmental effects, life-cycle costs, investment risks and their impact on sustainability of mining companies.

Keywords: green finance, mining industry, green projects, ESG loans, green bonds, land reclamation, energy efficiency, environmental risks, environmentally responsible modernization, public-private partnership, climate finance

For citation: Krupnov Yu.A., Nadtochiy Yu.B., Shchepkina N.N., Askarbekov B. Financial mechanisms for implementing green projects in the mining industry. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):59–66. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-59-66

Введение

Горнодобывающая промышленность в современных условиях сталкивается с усилением экологических, технологических и экономических вызовов, что требует пересмотра традиционных подходов к финансированию природоохранной деятельности и производственной модернизации. Добыча полезных ископаемых сопровождается высокой ресурсной и энергетической нагрузкой, образованием отходов, нарушением земель, водопотреблением, выбросами загрязняющих веществ и необходимостью рекультивации территорий. Поэтому экологическая модернизация горнодобывающих предприятий становится не только природоохранной, но и финансово-экономической задачей, связанной с привлечением долгосрочных инвестиций, оценкой экологического эффекта и управлением производственными рисками.

Международные исследования всё чаще рассматривают развитие горнодобывающей промышленности через призму зелёной трансформации. M. Onifade et al. подчёркивают, что «экологические и геологические проблемы, возникающие в результате роста и использования минеральной промышленности, становятся все более очевидными и формируют необходимость «устойчивой добычи» [1]. В своем докладе Всемирный банк впервые проанализировал потенциал глобального потепления различных низкоуглеродных технологий и выявил что «энергетический переход является высокоминералоёмким процессом», поскольку спрос на графит, литий, кобальт и другие виды минерального сырья может существенно возрасти к 2050 г.[1] Одновременно инициатива «Климатически устойчивая добыча полезных ископаемых» (CSM) связывает развитие добычи с необходимостью снижения климатического и экологического следа, развития циркулярной экономики и повышения устойчивости сырьевых цепочек. Следовательно, горнодобывающая отрасль одновременно является поставщиком сырья для зелёной экономики и объектом собственной экологической модернизации.

Одним из ключевых инструментов такой модернизации выступает зелёное финансирование. Согласно принципам зелёных облигаций ICMA, зелёные облигации предназначены для финансирования экологически устойчивых проектов, включая энергоэффективность, предотвращение загрязнения, устойчивое управление природными ресурсами, сохранение биоразнообразия и адаптацию к изменению климата[2].

Национальная методология по зеленому финансированию была разработана в период с марта 2020 г. по май 2021 г. для создания каркаса национальной системы зелёного финансирования, предусматривает классификацию зелёных и адаптационных проектов и подтверждение их экологического эффекта[3]. В то же время российские исследователи подчёркивают роль зелёных финансов в формировании зелёной экономики и достижении целей устойчивого развития. Отдельно отмечается, что ESG-факторы меняют подходы к инвестиционному анализу: наряду с доходностью и риском всё большее значение приобретают экологические и социальные результаты проектов [2].

Наряду с этим вопросы зелёного финансирования проектов горнодобывающей промышленности остаются недостаточно проработанными. В большинстве исследований зелёные финансы рассматриваются в общем контексте устойчивого развития, энергетики, транспорта и инфраструктуры, тогда как специфика горнодобывающих предприятий требует учёта отраслевых экологических рисков.

В комплексе недостаточность разработанности организационно-экономического подхода, отсутствие связи зелёных финансовых инструментов с конкретными производственными и экологическими результатами горнодобывающих предприятий отражают научный разрыв [3–6]. В условиях, где для предприятий горнодобывающей отрасли существенными являются показатели объемов природоохранных затрат и их результативность, такие финансовые механизмы, как зелёные облигации, ESG-кредиты, субсидии, механизмы государственно-частного партнёрства, климатическое финансирование и целевые инвестиции, могут использоваться как инструменты повышения экологической, производственной и финансовой устойчивости. Как следствие, необходимость перехода от компенсационной природоохранной модели к проектному финансированию экологической модернизации горнодобывающей промышленности обусловила актуальность исследования.

Обоснование финансовых механизмов реализации зелёных проектов в горнодобывающей промышленности и разработка организационно-экономического подхода к их оценке с учётом рекультивации, энергоэффективности и снижения экологических рисков – составили цель исследования.

Материалы и методы

Методологическую основу исследования составили системный, финансово-экономический, эколого-экономический и организационно-управленческий подходы. Информационной базой выступили международные и российские документы в сфере зелёного финансирования и ESG-регулирования: принципы ICMA и LMA, методология ВЭБ.РФ, российская таксономия зелёных и адаптационных проектов, таксономии ЕС и Climate Bonds, материалы Всемирного банка, ICMM, GRI, IFRS, ISO, IFC, Принципы Экватора, рекомендации ОЭСР, Московской биржи и Банка России.

Системный подход позволил рассмотреть зелёное финансирование как элемент устойчивого развития горнодобывающих предприятий; финансово-экономический – проанализировать зелёные облигации, ESG-кредиты, субсидии, ГЧП, климатическое финансирование и целевые инвестиции; эколого-экономический – оценить связь природоохранных мероприятий с экологическим эффектом, затратами жизненного цикла и снижением рисков. В исследовании также используются: сравнительный анализ, обобщение источников, контент-анализ нормативных и методических документов, логико-структурное моделирование и экспертно-аналитическая систематизация критериев отбора зелёных проектов.

Результаты

Зелёное финансирование позволяет перейти от фрагментарных природоохранных затрат к проектной моде-

1 World Bank. Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. Washington, DC: World Bank; 2020. Available at: https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099052423172525564 (accessed: 01.05.2026).

2 International Capital Market Association. Green Bond Principles: Voluntary Process Guidelines for Issuing Green Bonds. ICMA; 2025. Available at: https://www.icmagroup.org/sustainable-finance/the-principles-guidelines-and-handbooks/green-bond-principles-gbp/ (accessed: 22.05.2026).

3 ВЭБ.РФ. Методология зелёного финансирования. Национальный компетентностный центр зелёного финансирования. Режим доступа: https://вэб.рф/sustainable-development/green-finance/national-competence-center/ (дата обращения: 26.05.2026).

Таблица 1
Финансовые инструменты реализации экологических проектов в горнодобывающей промышленности

Table 1
Financial instruments for implementing environmental projects in the mining industry

Задача экологической модернизации	**Финансовый механизм**	**Ожидаемый результат**
Рекультивация нарушенных земель	Зелёные облигации, целевые инвестиции	Восстановление земель, снижение накопленного экологического ущерба
Повышение энергоэффективности	ESG-кредиты, льготное финансирование	Снижение энергопотребления и эксплуатационных затрат
Водоочистка и водооборот	ГЧП, субсидии, проектное финансирование	Сокращение сбросов, снижение водных рисков
Переработка отходов добычи и обогащения	Климатическое и циркулярное финансирование	Снижение объёмов размещения отходов, вовлечение вторичных ресурсов
Безопасность хвостохранилищ	Проектное финансирование, страховые и резервные механизмы	Снижение аварийных и экологических рисков
ESG-отчётность и верификация	Зелёные финансовые инструменты с раскрытием информации	Повышение доверия инвесторов и прозрачности проектов

ли экологической модернизации. Для горнодобывающих предприятий это особенно важно, поскольку ключевые экологические проблемы связаны с рекультивацией нарушенных земель, водоочисткой, обращением с отходами добычи и обогащения, снижением выбросов, повышением энергоэффективности и безопасностью хвостохранилищ [7–11]. Инициатива «Климатически устойчивая добыча полезных ископаемых» (CSM) подчёркивает необходимость управления добывающим сектором таким образом, чтобы минимизировать экологический и климатический след[4]. В этом контексте зелёные проекты становятся не только природоохранными, но и инвестиционными решениями, влияющими на устойчивость предприятия.

Согласно Принципам зелёных облигаций ICMA, зелёные облигации направлены на финансирование «экологически обоснованных и устойчивых проектов» (*environmentally sound and sustainable projects*)[5]. В свою очередь, Принципы зелёных кредитов LMA определяют, что ключевым признаком зелёного кредита является использование средств на зелёные проекты[6]. В табл. 1 систематизированы задачи, финансовые механизмы и результаты зелёного финансирования для реализации экологической модернизации горнодобывающих предприятий.

Согласно данным табл. 1 базовая задача зелёного финансирования –обеспечить связь между экологической модернизацией, инвестиционными ресурсами и снижением производственно-экологических рисков. И это формирует основу для систематизации конкретных финансовых инструментов.

Анализ международных и российских практик показал, что основными финансовыми инструментами, применимыми для горнодобывающей промышленности, являются зелёные облигации, зелёные кредиты, ESG-кредиты, субсидии, государственно-частное партнёрство (ГЧП), климатическое финансирование, проектное финансирование, целевые инвестиции и механизмы верификации. Национальная методология зелёного финансирования в России была разработана «для создания каркаса национальной системы зелёного финансирования». Постановление Правительства РФ №1587 закрепляет критерии проектов устойчивого, в том числе зелёного, развития и требования к системе верификации.

Стоит отметить, что в международной практике важную роль играет таксономический подход. Таксономия ЕС задаёт единые критерии отнесения экономической деятельности к экологически устойчивой, что позволяет инвесторам и компаниям снижать риски необоснованного позиционирования проектов как «зелёных» (*greenwashing*)[7]. Таксономия Climate Bonds (таксономия климатических облигаций) применяется для определения видов деятельности, активов и мероприятий, соответствующих климатическим целям[8]. Для горнодобывающей промышленности это означает необходимость не только заявлять проект как «зелёный», но и подтверждать его соответствие критериям экологической результативности. В табл. 2 представлены виды финансовых инструментов для реализации зеленых проектов.

Систематизация инструментов показывает, что зелёное финансирование должно быть встроено в инвестиционный цикл горнодобывающего предприятия: от выбора проекта до оценки его экологического эффекта и раскрытия результатов [8; 12]. Это позволяет перейти к третьей задаче – определению направлений применения зелёного финансирования.

В условиях Индустрии 4.0 трансформация и внедрение зелёного финансирования в горнодобывающую отрасль

4 World Bank. Climate-Smart Mining Initiative. Washington, DC: World Bank. Available at: https://www.worldbank.org/en/programs/climate-smart-mining (accessed: 29.03.2026).

5 International Capital Market Association. Green Bond Principles: Voluntary Process Guidelines for Issuing Green Bonds. ICMA; 2025. Available at: https://www.icmagroup.org/sustainable-finance/the-principles-guidelines-and-handbooks/green-bond-principles-gbp/ (accessed: 22.05.2026).

6 Loan Market Association. Green Loan Principles. LMA; 2025. Available at: https://www.lma.eu.com/sustainable-lending/resources (accessed: 22.05.2026).

7 European Commission. EU Taxonomy for Sustainable Activities. Brussels: European Commission. Available at: https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities_en (accessed: 29.03.2026).

8 Climate Bonds Initiative. Climate Bonds Taxonomy. London: Climate Bonds Initiative. Available at: https://www.climatebonds.net/expertise/taxonomy (accessed: 29.05.2026).

Таблица 2
Финансовые инструменты для реализации зелёных проектов в горнодобывающей промышленности

Table 2
Financial instruments for implementing green projects in the mining industry

Виды финансовых инструментов	Содержание	Возможное применение в горнодобывающей промышленности
Зелёные облигации	Целевой выпуск долговых инструментов под экологические проекты	Рекультивация, водоочистка, энергоэффективность, снижение выбросов
Зелёные кредиты	Кредитование при условии целевого использования средств	Модернизация очистных сооружений, переход на энергоэффективное оборудование
ESG-кредиты	Финансирование с учётом ESG-показателей заёмщика	Снижение экологических рисков, улучшение ESG-рейтинга
Финансирование (субсидии)	Существенная поддержка природоохранных проектов со стороны органов государственной власти	Компенсация части затрат на рекультивацию и модернизацию
ГЧП	Совместное финансирование инфраструктурных экологических проектов	Водооборот, переработка отходов, промышленная инфраструктура
Климатическое финансирование	Поддержка проектов, снижающих углеродный след	Сокращение выбросов, энергосбережение, внедрение ВИЭ
Верификация	Подтверждение соответствия проекта зелёным критериям	Снижение риска формального ESG-позиционирования

Таблица 3
Показатели результативности применения зелёного финансирования

Table 3
Performance indicators of green financing

Направление зелёного проекта	Экологический результат	Экономический результат	Возможные показатели
Рекультивация земель	Восстановление нарушенных территорий	Снижение экологических обязательств	Гектары рекультивированных земель; снижение резервов на экологические обязательства
Энергоэффективность	Снижение потребления энергии и выбросов	Снижение эксплуатационных затрат	кВт·ч/т руды; т CO_2-экв.; экономия затрат
Водоочистка и водооборот	Сокращение сбросов и водозабора	Снижение платежей и водных рисков	Кубические метры повторно используемой воды; снижение сбросов
Переработка отходов	Сокращение объёма размещаемых отходов	Получение вторичного сырья	Доля переработки; объём вовлечённых отходов
Пылегазоочистка	Снижение выбросов загрязняющих веществ	Снижение платежей за НВОС	Тонны загрязняющих веществ; снижение платежей
Безопасность хвостохранилищ	Снижение аварийных рисков	Снижение вероятности внеплановых затрат	Индекс риска; объём инвестиций в безопасность
ESG-отчётность	Повышение прозрачности воздействия	Рост доверия инвесторов	Наличие верификации; раскрытие показателей

должны быть ориентированы на механизмы, которые позволяют связать экологические риски, производственную устойчивость, инвестиционную привлекательность и долгосрочные обязательства. Анализ исследования выявил состав направлений: рекультивация нарушенных земель, повышение энергоэффективности, развитие водоочистки и водооборота, переработка отходов добычи и обогащения, снижение пылегазовых выбросов, повышение безопасности хвостохранилищ, совершенствование ESG-отчётности и верификации экологических результатов. Впоследствии симбиоз данных направлений позволяет связать финансовые инструменты с измеримыми и значимыми для отрасли эффектами (табл. 3).

Стандарт GRI 14: Горнодобывающий сектор 2024 г. всесторонне рассматривает насущную потребность в последовательной, детальной и полной отчетности о широком

Таблица 4
Основные критерии и показатели оценки зелёных проектов в горнодобывающей промышленности

Table 4
The main assessment criteria and indicators for green projects in the mining industry

Виды критериев	Содержание	Пример показателя
Экологический эффект	Снижение негативного воздействия на окружающую среду	Выбросы, сбросы, отходы, рекультивированные земли
Затраты жизненного цикла	CAPEX, OPEX, обслуживание, модернизация, утилизация	TCO проекта
Снижение рисков	Уменьшение экологических, аварийных и регуляторных рисков	Индекс риска, число инцидентов
Производственная устойчивость	Влияние на непрерывность и эффективность производства	Снижение простоев, повышение надёжности
Верифицируемость	Наличие отчётности и подтверждения результата	Независимая верификация, ESG-раскрытие
Инвестиционная реализуемость	Доступность финансового инструмента	Возможность выпуска облигаций, кредита, субсидии

Составлено по данным источников [4–7; 11–14].
Compiled based on data from sources [4–7; 11–14].

спектре воздействия сектора и его вкладе в устойчивое развитие[9]. Это означает, что зелёное финансирование должно сопровождаться системой измеримых показателей, позволяющих подтвердить не только факт вложения средств, но и достигнутый экологический результат. Переход от направлений применения к критериям оценки необходим потому, что не каждый природоохранный проект автоматически является зелёным с инвестиционной точки зрения [2; 3; 5; 7; 13]. Для отбора проектов требуется модель, учитывающая экологический эффект, затраты жизненного цикла, инвестиционные риски и влияние на устойчивость предприятия.

На основе анализа международных стандартов и отраслевой специфики горнодобывающей промышленности предложена система критериев оценки зелёных проектов [1–4; 14]. Она опирается на четыре группы показателей: экологические, финансово-экономические, производственные и управленческие. Раскрытие информации, связанной с изменением климата (IFRS S2), требует раскрытия информации о климатических рисках и возможностях, полезной пользователям финансовой отчётности при принятии решений о предоставлении ресурсов компании[10]. Управление окружающей средой (ISO 14040) закрепляет принципы оценки жизненного цикла, включая постановку цели, инвентаризационный анализ, оценку воздействия и интерпретацию результатов[11]. Следовательно, оценка зелёного проекта должна учитывать не только капитальные затраты, но и эффект на протяжении всего жизненного цикла. Для формализации отбора зелёных проектов предлагается интегральная модель оценки:

$$IGP_j = w_1 E_j + w_2 C_j + w_3 R_j + w_4 P_j + w_5 V_j,$$

где IGP_j – интегральный индекс приоритетности j-го зелёного проекта; E_j – экологический эффект проекта; C_j – экономическая эффективность с учётом затрат жизненного цикла; R_j – снижение экологических и производственных рисков; P_j – влияние проекта на производственную устойчивость предприятия; V_j – уровень верифицируемости и раскрытия ESG-результатов; w_1, …, w_5 – весовые коэффициенты, сумма которых равна 1.

Для практического применения показатели нормируются в диапазоне от 0 до 1. Чем выше значение IGPj, тем выше приоритет проекта для включения в портфель зелёного финансирования. В комплексе показатели измеряются:

– экологический эффект – снижением выбросов, сокращением сбросов, ростом доли переработки отходов или площадью рекультивированных земель;

– экономическая эффективность – снижением TCO, сроком окупаемости и снижением платежей за негативное воздействие;

– риск-компонента – уменьшением вероятности аварий, простоев и штрафных санкций.

Предложенная в табл. 4 система критериев позволяет оценивать зелёные проекты в горнодобывающей промышленности с учётом их комплексного воздействия на экологические, экономические и производственные параметры. В отличие от подхода, основанного исключительно на объёме инвестиций, разработанная система учитывает фактический экологический эффект, затраты жизненного цикла, уровень снижения рисков, влияние на устойчивость производства, возможность подтверждения ESG-результатов и инвестиционную реализуемость проектов. Это обеспечивает более обоснованный выбор приоритетных направлений зелёного финансирования и позволяет сопоставлять проекты по их долгосрочному вкладу в экологическую модернизацию и устойчивое развитие горнодобывающих предприятий.

Обсуждение результатов

Полученные результаты подтверждают, что на сегодняшний день зелёное финансирование на предприятиях

9 Global Reporting Initiative. GRI 14: Mining Sector 2024. Amsterdam: GRI; 2024. Available at: https://www.globalreporting.org/standards/standards-development/sector-standard-for-mining/ (accessed: 12.06.2026).

10 IFRS Foundation. IFRS S2 Climate-related Disclosures. London: IFRS Foundation; 2023. Available at: https://www.ifrs.org/issued-standards/ifrs-sustainability-standards-navigator/ifrs-s2-climate-related-disclosures/ (accessed: 12.06.2026).

11 ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Geneva: International Organization for Standardization; 2006. Available at: https://www.iso.org/standard/37456.html (accessed: 12.06.2026).



Рис. 1
Схема управленческой логики

Fig. 1
The management logic diagram

горнодобывающей отрасли требует масштабной трансформации. Актуальные модели зелёного финансирования практически не учитывают отраслевую специфику, в том числе длительный жизненный цикл месторождений, высокую капиталоёмкость природоохранных мероприятий, экологические риски и зависимость результатов от используемых технологий [1–3].

Существенную роль для горнодобывающих предприятий имеет разграничение зелёных, адаптационных и переходных проектов. В то же время некоторые проекты не способны давать немедленного экологического эффекта, снижая будущие риски и повышая устойчивость производства. В совокупности это соответствует логике исследований, рассматривающих устойчивое развитие, зелёную энергетику и проектную деятельность как инструменты долгосрочной модернизации промышленности [2; 5; 13]. В результате основным условием эффективности внедрения зелёного финансирования является возможность подтверждения достигнутых результатов. Как результат, проекты должны сопровождаться системой критериев, раскрытием показателей, оценкой жизненного цикла и мониторингом экологических и экономических результатов [8; 14].

Практическое использование предложенного подхода предполагает переход от разрозненных природоохранных затрат к управляемому портфелю зелёных проектов. Такие факторы, как: экологическая модернизация, требующая предварительной диагностики зон воздействия, отбор приоритетных проектов, выбор адекватного финансового инструмента, верификация и мониторинг достигнутого эффекта, подтверждают важность подхода, учитывая специфику горнодобывающих предприятий. На рис. 1 проиллюстрирована схема поэтапной трансформации управленческой логики применения зелёного финансирования на предприятиях горнодобывающей промышленности. Согласно данным рисунка трансформация зелёного финансирования должна быть встроена в полный управленческий цикл: от выявления экологических проблем до контроля достигнутых результатов, в результате снижая риск формального ESG-позиционирования и позволяя оценить зелёные проекты как по объёму привлечённых средств, так и по их фактическому экологическому, экономическому и производственному эффекту.

В конечном итоге предложенная схема управленческой логики (рис. 1) позволит консолидировать экологические задачи предприятия с инвестиционными решениями и системой ESG-отчётности. В нынешних условиях внешних ограничений, санкционного давления и трансформации финансовых инструментов в российской практике развитие зелёного финансирования связано не только с экологической повесткой, но и с более широкими задачами устойчивости экономики [7; 8; 12].

Заключение

Проведённое исследование подтвердило, что зелёное финансирование в горнодобывающей промышленности является не только инструментом привлечения капитала, но и механизмом экологической модернизации предприятий. С учётом высокой ресурсной и энергетической нагрузки отрасли приоритетное значение приобретают проекты рекультивации, повышения энергоэффективности, развития водооборота, переработки отходов, снижения выбросов и повышения безопасности производственных объектов.

В работе систематизированы основные финансовые механизмы реализации зелёных проектов и предложен организационно-экономический подход к их оценке. Его основой выступает сопоставление экологического эффекта, затрат жизненного цикла, инвестиционных и производственных рисков, влияния проекта на устойчивость предприятия и возможности подтверждения ESG-результатов.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения предложенного подхода при формировании портфелей зелёных проектов, выборе финансовых инструментов, подготовке инвестиционных решений и совершенствовании ESG-отчётности горнодобывающих предприятий. Реализация данных решений способствует переходу от разрозненных природоохранных затрат к управляемой системе проектного финансирования экологической модернизации и повышению устойчивости горнодобывающей промышленности.

Список литературы / References

1. Onifade M., Zvarivadza T., Adebisi J.A., Said K.O., Dayo-Olupona O., Lawal A.I., Khandelwal M. Advancing toward sustainability: The emergence of green mining technologies and practices. *Green and Smart Mining Engineering*. 2024;1(2):157–174. https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.05.005

2. Голубева Г.Ф., Соловьева Е.Б., Лепехина Ю.А. Экономическая оценка рисков и эффективности внедрения зелёной энергетики в горнодобывающей промышленности. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2025;(4):538–543.
Golubeva G.F., Solovyova E.B., Lepekhina Yu.A. Economic assessment of risks and efficiency of green energy implementation in the mining industry. *Izvestiya Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2025;(4):538–543. (In Russ.)

3. Салгириев Р.Р. Экологические и социально-экономические последствия функционирования горнопромышленного комплекса в условиях устойчивого развития. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2025;(3):57–63.
Salgiriev R.R. Environmental and socioeconomic consequences of the mining and oil and gas sector in the context of sustainable development. *Izvestiya Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2025;(3):57–63. (In Russ.)

4. Варавин Е.В., Козлова М.В., Куур О.В., Пестунова Г.Б. Оценка инвестиционной привлекательности отраслей региона в контексте зеленого развития. *Экономика региона*. 2023;19(2): 494–510. https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2023-2-15
Varavin Ye.V., Kozlova M.V., Kuur O.V., Pestunova G.B. Assessment of investment attractiveness of regional industries in the context of green development. *Economy of Regions*. 2023;19(2): 494–510 (In Russ.) https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2023-2-15

5. Бобылев С.Н., Кирюшин П.А., Кошкина Н.Р. Новые приоритеты для экономики и зеленое финансирование. *Экономическое возрождение России*. 2021;(1):152–166. https://doi.org/10.37930/1990-9780-2021-1-67-152-166
Bobylev S.N., Kiryushin P.A., Koshkina N.R. New priorities for the economy and green finance. *Economic Revival of Russia*. 2021;(1):152–166. (In Russ.) https://doi.org/10.37930/1990-9780-2021-1-67-152-166

6. Джолдошева Т.Ю., Моттаева А.Б. Влияние инновационных элементов инфраструктуры на устойчивое развитие атомной энергетики России. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2025;(4):184–192.
Dzholdosheva T.Yu., Mottaeva A.B. The impact of innovative infrastructure elements on the sustainable development of Russia's nuclear energy industry. *Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*. 2025;(4):184–192. (In Russ.)

7. Федотова М.А., Погодина Т.В., Карпова С.В. Оценка тенденций и перспектив развития экономики России в условиях санкционного давления. *Финансы: теория и практика*. 2025;29(1):6–19. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-1-6-19
Fedotova M.A., Pogodina T.V., Karpova S.V. Assessment of trends and prospects for the development of the Russian economy in the context of sanctions pressure. *Finance: Theory and Practice*. 2025;29(1):6–19. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-1-6-19

8. Музалёв С.В., Абдикеев Н.М., Оболенская Л.В. Совершенствование системы критериев оценки результативности промышленной политики России в условиях санкционного давления. *Финансы: теория и практика*. 2025;29(4):6–18. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-4-6-18
Muzalyov S.V., Abdikeev N.M., Obolenskaya L.V. Improving the system of criteria for evaluating the effectiveness of Russia's industrial policy under sanctions pressure. *Finance: Theory and Practice*. 2025;29(4):6–18. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-4-6-18

9. Моттаева А.Б., Крупнов Ю.А., Моттаева А.Б. Цифровые платформы как драйверы устойчивого экономического развития горных компаний. Горная промышленность. 2026;(1):74–82. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-74-82
Mottaeva A.B., Krupnov Yu.A., Mottaeva A.B. Digital platforms as drivers of sustainable economic development for mining companies. *Russian Mining Industry*. 2026;(1):74–82. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-74-82

10. Мокрышев И.С. Пространственная классификация регионов России по потенциалу распределенной генерации на основе возобновляемых источников энергии. Экономика. *Налоги. Право*. 2025;18(2):107–118. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-2-107-118
Mokryshev I.S. Spatial classification of Russian regions by potential for distributed generation based on renewable energy sources. *Economics, Taxes & Law*. 2025;18(2):107–118. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-2-107-118

11. Прудникова А.А. Международная повестка декарбонизации экономики: взгляд и ответ России. *Экономика. Налоги. Право*. 2025;18(2):129–137. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-2-129-137
Prudnikova A.A. The international economic decarbonization agenda: Russia's view and response. *Economics, Taxes & Law*. 2025;18(2):129–137. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-2-129-137

12. Ручкина Г.Ф. Регулирование оборота цифровых финансов как важной составляющей экономического и технологического суверенитета России. *Банковское право*. 2024;(3):7–15. https://doi.org/10.18572/1812-3945-2024-3-7-15
Ruchkina G.F. Circulation regulation of digital finance as an important component of economic and technological sovereignty of Russia. *Banking Law*. 2024;(3):7–15. (In Russ.) https://doi.org/10.18572/1812-3945-2024-3-7-15

13. Моттаева А.Б., Ульянова С.А., Астафьева О.В. Проектная деятельность как инструмент устойчивого развития горнодобывающих компаний. *Горная промышленность*. 2026;(3):172–178. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-172-178
Mottaeva A.B., Ulyanova S.A., Astafieva O.V. Project activities as a tool for sustainable development of mining companies. *Russian Mining Industry*. 2026;(3):172–178. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-172-178

14. Лосева О.В., Федотова М.А., Абдикеев Н.М. Концептуальная модель оценки стоимости цифровых интеллектуальных активов. *Финансы: теория и практика*. 2023;27(4):118–130. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2023-27-4-118-130
Loseva O.V., Fedotova M.A., Abdikeev N.M. A conceptual model for evaluating digital intellectual assets. *Finance: Theory and Practice*. 2023;27(4):118–130. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2023-27-4-118-130

Информация об авторах
Крупнов Юрий Александрович – доктор экономических наук, профессор кафедры общего и проектного менеджмента факультета «Высшая школа управления», Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-9524-3747; e-mail: yakrupnov@fa.ru
Надточий Юлия Борисовна – кандидат экономических наук, доцент кафедры стратегического и инновационного развития, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0001-8904-4154; e-mail: ybnadtochij@fa.ru
Щепкина Наталья Николаевна – кандидат экономических наук, доцент кафедры стратегического и инновационного развития, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-3250-6212; e-mail: nnshchepkina@fa.ru
Аскарбеков Бакытбек – докторант, Кыргызский экономический университет им. М. Рыскулбекова, г. Бишкек, Кыргызстан; https://orcid.org/0009-0009-9146-5236; e-mail: bakytbek.askarbekov@unisongroup.org

Информация о статье
Поступила в редакцию: 27.05.2026
Поступила после рецензирования: 09.07.2026
Принята к публикации: 21.07.2026

Information about the authors
Yuriy A. Krupnov – Dr. Sci. (Econ.), Professor, Department of General and Project Management, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-9524-3747; e-mail: yakrupnov@fa.ru
Yulia B. Nadtochiy – Cand. Sci. (Educ.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Strategic and Innovative Development, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0001-8880-4131; e-mail: ybnadtochij@fa.ru
Natalia N. Shchepkina – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of Strategic and Innovative Development, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-3250-6212; e-mail: nnshchepkina@fa.ru
Bakytbek Askarbekov – Doctoral Student, Kyrgyz Economic University named after M. Ryskulbekov, Bishkek, Kyrgyzstan; https://orcid.org/0009-0009-9146-5236; e-mail: bakytbek.askarbekov@unisongroup.org

Article info
Received: 27.05.2026
Revised: 09.07.2026
Accepted: 21.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-67-78

Исследование мотивационного механизма в деятельности горнодобывающих предприятий Российской Федерации сегмента критических металлов как фактор повышения качества эффективности производства

Д.С. Лопаткин, Л.Е. Копылова, Т.Н. Шушунова, Н.Н. Гринев, Т.А. Шпилькина ✉
Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация
✉ luk-72@mail.ru

Резюме: В статье представлено исследование мотивации персонала в деятельности горнодобывающих предприятий России. Горнодобывающая отрасль является основой экономической стабильности государств, обладающих ресурсным потенциалом, и критически важна для глобальных цепочек поставок. При наличии собственной ресурсной базы российская промышленность в течение длительного времени сохраняла зависимость от импорта отдельных видов редких металлов и редкоземельной продукции. В условиях санкций такая зависимость становится фактором уязвимости, поэтому развитие добычи и переработки критических металлов является необходимым условием устойчивости технологических процессов. Развитие отрасли невозможно без квалифицированных кадров. Проведенный анализ позволил авторам идентифицировать две основные группы проблем, определяющих низкую эффективность кадрового обеспечения: первая связана с привлечением и удержанием, вторая – с обучением и развитием. Обе группы взаимосвязаны на уровне ошибочных ожиданий кандидатов и их последующей профессиональной деформации. Для диагностики влияния мотивации персонала на показатели эффективности производства авторы предлагают использовать интегральный индекс оценки. Он рассчитывается как взвешенная сумма 10 основных компонентов. Предлагаемый показатель позволяет определить уровень мотивации и принять своевременно управленческие решения. Результаты исследования позволили авторам сделать вывод: преодоление кадрового голода невозможно без формирования ценностного предложения работодателя, где акцент смещается с физической выносливости на интеллектуальное управление сложными системами. Это предполагает массовое внедрение методов поведенческого аудита безопасности, модульного обучения гибридным навыкам, реализации программ двойного наставничества. Экономическая целесообразность таких вложений очевидна: потери от простоя высокопроизводительной техники из-за некомпетентности персонала значительно превышают затраты на образовательные технологии.

Ключевые слова: горнодобывающие предприятия, сегмент критических металлов, эффективность производства, человеческий капитал, квалифицированные кадры, мотивация персонала, цифровые технологии, образовательные технологии, программы двойного наставничества

Для цитирования: Лопаткин Д.С., Копылова Л.Е., Шушунова Т.Н., Гринев Н.Н., Шпилькина Т.А. Исследование мотивационного механизма в деятельности горнодобывающих предприятий Российской Федерации сегмента критических металлов как фактор повышения качества эффективности производства. *Горная промышленность.* 2026;(5):67–78. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-67-78

Research into the motivational mechanism in activities of Russian mining companies in the critical metals segment as a factor in improving the quality of production efficiency

D.S. Lopatkin, L.E. Kopylova, T.N. Shushunova, N.N. Grinev, T.A. Shpilkina ✉
Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation
✉ luk-72@mail.ru

Abstract: This paper presents a research into employee motivation in the mining industry of the Russian Federation. The mining industry is the foundation of economic stability for resource-rich countries and is critical to global supply chains. Despite having its own resource base, Russian industry has long remained dependent on imports of certain types of rare metals and rare-earth products. Given the sanctions, this dependence becomes a vulnerability; therefore, development of mining and processing of

critical metals is a prerequisite for sustainability of technological processes. The industry's development is impossible without skilled workforce. The analysis conducted allowed the authors to identify two main groups of challenges that contribute to the low efficiency of workforce provision: the first is related to recruitment and retention, while the second one concerns training and development. Both groups are interconnected in terms of candidates' unrealistic expectations and subsequent professional deformation of their personalities. The authors propose using a comprehensive evaluation index to assess the impact of employee motivation on the production efficiency indicators. It is calculated as the weighted sum of 10 key components. The proposed index makes it possible to determine the level of motivation and make timely management decisions. The results of the study led the authors to conclude that overcoming the labor shortage is impossible without developing an employer value proposition that shifts the emphasis from physical endurance to the intellectual management of complex systems. This entails the widespread implementation of the behavioral safety audit methods, modular training in hybrid skills, and implementation of dual mentorship programs. The economic viability of such investments is evident as the losses caused by downtime of high-performance equipment due to staff incompetence significantly exceed the costs of educational technologies.

Keywords: mining companies, critical metals segment, production efficiency, human capital, qualified personnel, staff motivation, digital technologies, educational technologies, dual mentorship programs

For citation: Lopatkin D.S., Kopylova L.E., Shushunova T.N., Grinev N.N., Shpilkina T.A. Research into the motivational mechanism in activities of Russian mining companies
in the critical metals segment as a factor in improving the quality of production efficiency. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):67–78. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-67-78

Введение

В современных условиях геополитической напряженности горнодобывающая промышленность перестает рассматриваться исключительно как базовая сырьевая отрасль, она является одной из приоритетных в российской экономике и приобретает в настоящий период важное значение как один из ключевых факторов технологического суверенитета, промышленной безопасности и долгосрочной конкурентоспособности национальной экономики.

Россия обладает значительной минерально-сырьевой базой и имеет длительный исторический опыт в добыче и переработке различных видов полезных ископаемых. В опубликованной Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 г. подчеркивается, что минерально-сырьевой комплекс является основой устойчивого функционирования целого ряда отраслей экономики и важнейшим фактором обеспечения национальной безопасности[1]. В обновленной Стратегии развития минерально-сырьевой базы до 2050 г. акцент также сделан на необходимости воспроизводства запасов стратегических и дефицитных видов минерального сырья, развитии геологоразведочных работ и повышении устойчивости сырьевого обеспечения промышленности[2].

По данным Минприроды России, общие запасы редких металлов в стране оцениваются в 658 млн т, а балансовые запасы редкоземельных металлов – в 28,5 млн т[3], при этом российский рынок характеризуется существенным разрывом между масштабом минерально-сырьевой базы и уровнем ее промышленного освоения: по оценкам Роснедр, Россия занимает одно из ведущих мест в мире по запасам редкоземельных металлов, однако ее доля в мировой добыче пока составляет менее 1%, а переработка редкоземельного сырья остается недостаточно развитой[4].

Минерально-сырьевой комплекс традиционно занимает центральное место в экономике Российской Федерации. Высокая обеспеченность природными ресурсами обусловила формирование экспортно-сырьевой модели экономики, при которой доходы от добычи и экспорта полезных ископаемых выступают одним из ключевых источников бюджетных поступлений и валютной выручки. Согласно аналитическому отчету Mining Market Report 2026[5] объем мирового рынка горнодобывающей промышленности в последние годы стабильно растет. Ожидается, что он увеличится с 2060,57 млрд долл. в 2025 г. до 2163,46 млрд долл. в 2026 г. при среднегодовом темпе роста (CAGR) в 5,0%, а к 2030 г. достигнет 2760,12 млрд долл.[6] (рис. 1).

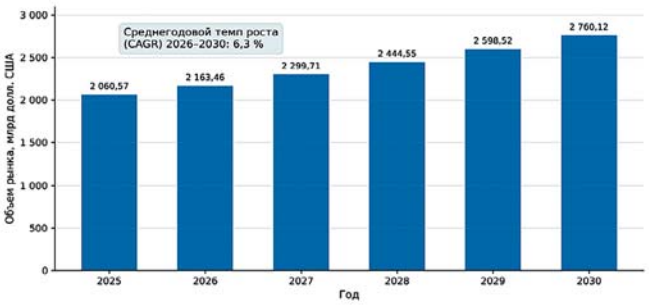


Рис. 1
Динамика объема мирового рынка горнодобывающей промышленности в 2025–2030 гг., млрд долл. США
Источник: составлено по данным The Business Research Company. Mining Market Report 2026. January 2026. 150 p. Available at: https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/mining-global-market-report (accessed: 14.02.2026).

Fig. 1
Changes in the size of the global mining industry market, 2025–2030, in billions of US dollars
Source: compiled based on data from The Business Research Company. Mining Market Report 2026. January 2026. 150 p. Available at: https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/mining-global-market-report (accessed: 14.02.2026).

Рост в прогнозируемый период во многом обусловлен увеличением спроса на критически важные минералы, к которым относят виды минерального сырья, имеющие стратегическое значение для развития высокотехнологичных отраслей, энергетики, ОПК, радиоэлектроники, химической промышленности, транспортного машино-

1 Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 декабря 2018 г. №2914-р. Режим доступа: https://static.government.ru/media/files/WXRSEBj6jnRWNrumRkDakLcqfAzY14VE.pdf (дата обращения: 14.02.2026).

2 Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 года: утвержденная Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 июля 2024 года №1838-р. Режим доступа: https://static.government.ru/media/files/TNB3oQkPRJTmDE3AMaxuTn2KRSHG9X0S.pdf (дата обращения: 14.02.2026).

3 Роснедра сообщили, что РФ занимает 2-е место в мире по запасам редких металлов. Режим доступа: https://minfin.gov.ru/ru/press-center/?id_4=38919-rosnedra_soobshchili_chto_rf_zanimaet_2-e_mesto_v_mire_po_zapasam_redkikh_metallov (дата обращения: 14.02.2026).

4 Там же

5 The Business Research Company. Mining Market Report 2026. January 2026. 150 p. Available at: https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/mining-global-market-report (accessed: 14.02.2026).

6 Ibid.

строения и цифровой инфраструктуры. В международной практике критичность минерального сырья, как правило, определяется сочетанием двух параметров: высокой экономической значимости и повышенного риска нарушения поставок[7].

Критические металлы не имеют универсального и неизменного перечня: состав таких ресурсов зависит от структуры экономики конкретной страны, уровня развития ее промышленности, технологических приоритетов и внешнеэкономической конъюнктуры. Например, в США официальный перечень критически важных минералов включает 50 позиций, среди которых алюминий, сурьма, барит, бериллий, цезий, хром, кобальт, графит, литий, марганец, никель, ниобий, платиновые металлы, редкоземельные элементы, тантал, титан, вольфрам и другие виды минерального сырья, имеющие существенное значение для экономики и национальной безопасности[8].

В российской практике близкий подход отражен в перечне критической промышленной продукции в отрасли металлургии редких и редкоземельных металлов, утвержденном Минпромторгом России на 2024 г. и плановый период 2025–2026 гг. Документ выделяет 4 укрупненные категории: редкие и редкоземельные металлы (РМ и РЗМ), их соединения и сплавы; продукцию высоких переделов; руды и концентраты редких и редкоземельных металлов; сырье и материалы[9].

Недостаточная вовлеченность критических металлов в хозяйственный оборот создает риски для развития высокотехнологичных отраслей. При наличии собственной ресурсной базы российская промышленность в течение длительного времени сохраняла зависимость от импорта отдельных видов редких металлов, редкоземельной продукции и др. В условиях санкционных ограничений, перестройки внешнеторговых связей и роста требований к технологическому суверенитету такая зависимость становится фактором уязвимости. Поэтому развитие российской добычи и переработки критических металлов следует рассматривать как необходимое условие устойчивости технологических процессов.

В условиях усиления санкционного давления, трансформации мировых энергетических рынков и нарастания конкуренции за доступ к критически важным минералам государственная политика России в области освоения минерально-сырьевой базы приобрела выраженный стратегический характер. Среди приоритетных проектов сквозного стратегического характера выделяются: освоение Арктической зоны; вовлечение в разработку труднодоступных и трудноизвлекаемых запасов; расширение добычи критических стратегических металлов; развитие новых экспортных коридоров и др. Дальнейшее развитие России в качестве энергетической сверхдержавы во многом зависит именно от решения данной задачи. Перед государством и руководителями проектов стоят на данный момент совершенно новые задачи управленческого плана, решение которых будет способствовать поступательному, эффективному и безопасному освоению новых месторождений [1].

Материалы и методы

Современные горнодобывающие предприятия образуются вблизи месторождений полезных ископаемых, занимаются их добычей подземным шахтным или карьерным способом и снабжают сырьем металлургическую, химическую, строительную и другие отрасли [2]. Российская промышленность, нацеленная на получение конкурентных преимуществ и технологической независимости в условиях санкций, во многом опирается на продукты горнодобывающей отрасли.

Промышленные проекты развития меднорудной базы, добычи цветных, редких и редкоземельных металлов можно выделить среди значимых проектов развития горнорудной отрасли ввиду необходимости этих компонентов для развития энергетики, машиностроения, транспортной отрасли и др. На территории России в ближайшие 10 лет запланировано к реализации несколько масштабных инициатив, а именно проект по добыче медной руды реализуется на Удоканском месторождении в Каларском округе Забайкальского края. Месторождение является крупнейшим медным месторождением России и одним из крупнейших в мире. Добыча на месторождении стартовала в 2023 г. Запасы месторождения оцениваются примерно в 26 млн т меди, плановый срок эксплуатации месторождения превышает 70 лет. В рамках горно-металлургического комплекса создано более 2 тыс. рабочих мест[10].

Значимый по масштабу проект в Иркутской области реализуется на месторождении «Сухой Лог». Месторождение считается крупнейшим неразработанным месторождением золота в России. Запасы месторождения оцениваются более чем в 1,9 тыс. т золота. По состоянию на 2026 г. ведется подготовка технико-экономического обоснования проекта. По заявлениям недропользователя планируется создание более 2,5 тыс. рабочих мест[11].

Несколько проектов реализуется на Кольском полуострове в Мурманской области: в рамках освоения Колмозерского месторождения будет запущен горно-обогатительный комплекс по переработке сподумента, а также предприятия следующих технологических переделов. В рамках проекта планируется создать не менее 1000 рабочих мест[12]. В рамках освоения месторождения «Федорова тундра» к 2027 г. планируется создать более 1200 новых рабочих мест[13].

Развивать горнодобывающую отрасль можно только при наличии профессиональных и квалифицированных кадров. Следовательно, вопросы кадрового обеспечения горнодобывающих проектов в области критических металлов имеют стратегическое значение ввиду совокупности экономических, технологических, географических и социальных факторов. Итак, кадровый фактор в сфере критических металлов следует рассматривать не как вспомогательный элемент, а как один из базовых ресурсов промышленного развития наряду с минерально-сырьевой базой, инвестициями и технологиями.

Исследования мотивационного механизма в деятель-

7 European Commission. European Critical Raw Materials Act. Available at: https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/green-deal-industrial-plan/european-critical-raw-materials-act_en (accessed: 14.02.2026).

8 U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2025. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2025. Available at: https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025.pdf (accessed: 14.02.2026).

9 Перечень критической промышленной продукции в отрасли металлургии редких и редкоземельных металлов Российской Федерации на 2024 год и плановый период 2025 и 2026 годов: утв. приказом Минпромторга России от 1 ноября 2024 г. №5117. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_509344/ (дата обращения: 14.02.2026).

10 Численность персонала на Удоканском горно-металлургическом комбинате возросла до 2 тыс. человек в 2022 году. Режим доступа: https://udokancopper.ru/press-center/2692/ (дата обращения: 14.02.2026).

11 Министерство промышленности России и ПАО «Полюс» обсудили планы разработки Сухого Лога. Режим доступа: https://www.vnedra.ru/novosti/ministerstvo-promyshlennosti-rossii-i-pao-polyus-obsudili-plany-razrabotki-suhogo-loga-13878/ (дата обращения: 14.02.2026).

12 Роснедра сообщили, что РФ занимает 2-е место в мире по запасам редких металлов. Режим доступа: https://minfin.gov.ru/ru/press-center/?id_4=38919-rosnedra_soobshchili_chto_rf_zanimaet_2-e_mesto_v_mire_po_zapasam_redkikh_metallov (дата обращения: 14.02.2026).

13 Там же.

Таблица 1
Проблемы кадрового обеспечения

Table 1
Challenges in workforce provision

Проблемы	Обстоятельства и причины
1. Недостаток квалифицированных кадров в сфере геологии, горного дела, металлургии и переработки сырья	Это приводит к задержкам старта освоения месторождений и ограничивает возможность формирования полного производственного цикла
2. Современные горнодобывающие проекты являются высокотехнологичными производствами	Освоение месторождений критических металлов требует специалистов в области цифрового моделирования месторождений, АСУ, геоинформационных технологий, обогащения сложных руд, гидрометаллургии, промышленной экологии, промышленной автоматизации и роботизации. Таким образом, отрасль нуждается не только в традиционных горных инженерах, но и в специалистах нового технологического уклада
3. Большинство крупных проектов реализуется в труднодоступных и малонаселенных регионах – в Арктике, Восточной Сибири и на Дальнем Востоке	Для таких проектов характерны дефицит локальных трудовых ресурсов, высокий уровень миграционного оттока населения, сложные климатические условия, ограниченность социальной инфраструктуры
4. Кадровый дефицит напрямую влияет на сроки и стоимость инвестиционных проектов	Недостаток специалистов приводит к увеличению сроков строительства, росту издержек на привлечение персонала, увеличению зависимости от подрядчиков, снижению производительности труда, повышению технологических и производственных рисков

ности горнодобывающих предприятий сегмента критических металлов показали, что его необходимо рассматривать не только как элемент кадровой политики, а как один из ключевых факторов производственной устойчивости, качества и эффективности. Кадровый фактор становится одним из ключевых ограничений реализации инвестиционных программ. Это связано с обстоятельствами, приведенными в табл. 1.

В традиционном понимании мотивация часто сводится к оплате труда, премированию за выполнение плана и набору социальных гарантий. Однако горнодобывающие предприятия сегмента критических металлов работают в зоне пересечения нескольких стратегических процессов: энергетического перехода, технологической модернизации промышленности, геополитической конкуренции за сырьевую базу, роста экологических требований и дефицита квалифицированных кадров. Поэтому мотивационный механизм здесь должен пониматься как комплексная управленческая система, которая связывает интересы работника, предприятия, региона, инвестора и конечного потребителя критического сырья и включает совокупность экономических, организационных, социальных, профессиональных и ценностных стимулов, направленных на формирование у работников заинтересованности в достижении целей предприятия (рис. 2).



Рис. 2
Составляющие мотивационного механизма в управлении персоналом горнодобывающих предприятий
Источник: [2]

Fig. 2
Components of the motivation mechanism in human resources management at mining companies
Source: [2]

Значимость такого подхода усиливается тем, что критические металлы перестали быть исключительно объектом отраслевого интереса горнодобывающих компаний. Они стали условием энергетической и технологической безопасности. Проблема безопасности придает мотивационным исследованиям в сегменте критических металлов особую важность.

На предприятиях, добывающих медно-никелевые, кобальтовые и литиевые руды, ситуация осложняется сочетанным воздействием вредных производственных факторов, таких как пыль, шум, вибрация. Наиболее сильное воздействие на организм работника оказывает вибрация. В.А. Черников и Н.М. Борзенко отмечают, что, по мнению ряда ученых, производственная вибрация способна вызывать физиологические и функциональные изменения систем, органов, отдельно взятых подсистем и ультраструктурных образований клеток организма работника, это выражается усилением общей утомляемости, головной болью, отрицательным воздействием на зрительные и слуховые органы, подавлением двигательной активности и двигательных координаций [3]. Длительное отрицательное воздействие вредных производственных факторов может приводить к инвалидности.

В 2025 г. в РФ «технические инспекторы труда провели более 20 тыс. проверок и выявили свыше 61 тыс. нарушений – на 17,9% больше, чем в 2024 г. В основном нарушения касались обеспечения средствами индивидуальной защиты, обучения и инструктажа по охране труда, а также санитарно-бытового обеспечения. Общее число несчастных случаев на производстве снизилось на 9,4%, количество погибших – на 13%. Наибольшее число смертельных случаев по-прежнему фиксируется в строительстве, обрабатывающих производствах и на транспорте»[14]. Несмотря на снижение несчастных случаев и травматизма в этой отрасли, необходимо постоянно совершенствовать мотивационный механизм сотрудников. То есть мотивация персонала – это не просто желательный элемент корпоративной культуры, а важное условие сохранения жизни и здоровья работников, без которого невозможна никакая производственная эффективность.

Российские компании, работающие в сегменте критиче-

14 В 2025 году технические инспекторы труда выявили свыше 61 тыс. нарушений. Режим доступа: https://www.garant.ru/news/2124853 (дата обращения: 14.02.2026).

ских металлов, накопили значительный опыт построения мотивационных систем. Так, к примеру, «в Мончегорске Мурманской области после масштабной реконструкции перезапущено единственное в России производство высокочистого электролитного кобальта.

Исходя из аналитических материалов журнала Монокль за 2025–2026 гг. и отчетов компании ПАО «ГМК «Норильский никель» следует, что проект, который они запустили, обошелся ей в 5,3 млрд руб. Во многом благодаря этому проекту стране был возвращен доступ к стратегически важному металлу, который играет ключевую роль в развитии высокотехнологичных отраслей экономики. Запуск нового цеха выводит предприятие на уровень, позволяющий России увереннее закрепляться на глобальном рынке редких и высокотехнологичных материалов»[15]. Этот результат был достигнут не только за счет технологических улучшений, но и благодаря совершенствованию системы управления производительностью труда. А подразделение «Норникель Спутник» внедрило автоматизированную подсистему. Консолидация 13 потоков данных из различных учетных систем создала сквозную аналитику, на основе которой выстроена дифференцированная мотивация этого подразделения[16].

Однако одним из самых амбициозных проектов в новой индустриальной политике России «стал Ангаро-Енисейский кластер глубокой переработки цветных, редких и редкоземельных металлов. Он был создан по поручению Президента РФ Владимира Путина и представлен секретарем Совбеза Сергеем Шойгу осенью 2025 г. Изначально заявлялось, что кластер объединит территории 4-х субъектов РФ: *Красноярского края, Иркутской области, Хакасии и Тывы* – и станет площадкой для выстраивания полной технологической цепочки, от добычи руды до выпуска продукции для микроэлектроники, энергетики и беспилотных систем. Но на конгрессе «Редмет-2026» было уточнено, что проект будет носить «экстерриториальный характер», а его ключевая задача – «заставить все механизмы работать в унисон», выступив в роли «центра сборки» для инвесторов, науки и государства» [4].

На Петербургском международном экономическом форуме (ПМЭФ-2026), проходившем в начале июня этого года на сессии по редким и редкоземельным металлам (РМ и РЗМ), была озвучена идея ректора Горного университета Владимира Литвиненко, что РЗМ – это нефть XXI в. Первый вице-премьер Денис Мантуров отметил, что редкоземельные металлы критически важны для высоких технологий, оборонной промышленности, электроники, медицины, зеленой энергетики, ИИ, электромобилей и современных сплавов, а к 2028 г. страна должна получить полную линейку технологий разделения РЗМ, включая среднетяжелую группу на Соликамском магниевом заводе (СМЗ, входит в «Росатом»), и выйти на продукцию высокого передела [5].

Общий объем вложений в Ангаро-Енисейский кластер до 2035 г. оценивается более чем в 700 млрд руб. Подписано уже 9 соглашений с такими компаниями, как «Росатом», «Ростех», «Русал», «Норникель», «Ареал» (бывшая Highland Gold). Так, компания «Ареал» уже приступила к проектированию гидрометаллургического завода по переработке руды Тастыгского месторождения в Тыве. Продукцией предприятия станут чистые соли лития, которые пойдут на производство катодных материалов и систем хранения энергии [5].

Опыт компании ПАО «Полюс», крупнейшего золотодобытчика страны, также имеет важные выводы для сегмента критических металлов, поскольку многие технологические и управленческие решения в золотодобыче применимы к добыче лития, кобальта и редкоземельных элементов. Компания внедряет передовые технологии, развивая компетенции персонала, создавая стандарты, увеличивая объемы производства, инвестируя в геологоразведку и привлекая в отрасль инвестиции[17].

В 2024 г. за счет изменения системы мотивации персонала и внедрения цифровых решений производительность труда в ПАО «Полюс» выросла на 26%[18]. Этот показатель был достигнут благодаря переходу от годовых бонусов к ежеквартальным для производственных рабочих и линейных руководителей, что усилило чувство сопричастности к результатам, а также благодаря трансформации надбавок за профессиональное мастерство в надбавки за выслугу лет, увеличивающиеся каждые два года по заранее определенной шкале[19]. Средняя заработная плата в компании составила в 2024 г. – 227,6 тыс. руб., что больше на 10,4% в сравнении с 2023 г., а в первом полугодии 2025 г. ее размер оценивался на уровне 247,3 тыс. руб.[20].

Международный опыт ведущих компаний сегмента критических металлов дополняет российскую практику своими примерами. Компания Lithium Americas, разрабатывающая литиевое месторождение Такер Пасс в США, в своей кадровой политике делает ставку на инклюзивную культуру, которая, как зафиксировано в документах компании, принимает разнообразие опыта и происхождения и вдохновляет каждого профессионала на достижение наивысшего потенциала в поддерживающей и справедливой рабочей среде [6].

Совпадение личных и корпоративных ценностей помогает формировать общее понимание целей и задач, что усиливает принадлежность к коллективу. Если на предприятии приветствуются инициативность и инновационные идеи выполнения работ, то это ведет к мотивации работников предлагать новые подходы в решении производственных задач, как это осуществляется в одной из ведущих российских компаний – МКПАО «ОК «РУСАЛ». Это ведущая компания мировой алюминиевой отрасли. Она производит металл с низким углеводородным следом и осуществляет полный технологический цикл производства металла. Компания осуществляет свою производственную деятельность не только в России, но и в 14 странах, в том числе в Швеции, Ирландии, Гвинее и ряде других государств на континентах. В МКПАО «ОК «РУСАЛ» трудится более 55 тыс. сотрудников на 45 предприятиях.

Каждый сотрудник компании имеет «возможность максимально реализовать себя, проявить и развить профессиональные и управленческие навыки, подняться по карьерной лестнице. Подтверждение этому – опыт большинства топ-менеджеров РУСАЛа, управляющих директоров заводов, руководителей дирекций, начинавших свою карьеру на позициях рядовых рабочих, мастеров и линейных руководителей»[21]. К корпоративным ценностям РУСАЛа относят визуализированные на рис. 3.

В условиях цифровой трансформации *горнодобывающей отрасли* внедрение цифровых технологий в дея-

15 Официальный сайт ПАО «ГМК «Норильский никель». Режим доступа: https://nornickel.ru/ (дата обращения: 14.02.2026).

16 Там же.

17 Годовой отчет ПАО «Полюс» за 2024 год. М.: Полюс; 2025. 165 с.

18 Там же.

19 Там же.

20 Там же

21 Официальный сайт компании МКПАО «ОК «РУСАЛ». Режим доступа: https://rusal.ru/about/mission-and-values/ (дата обращения: 14.02.2026).

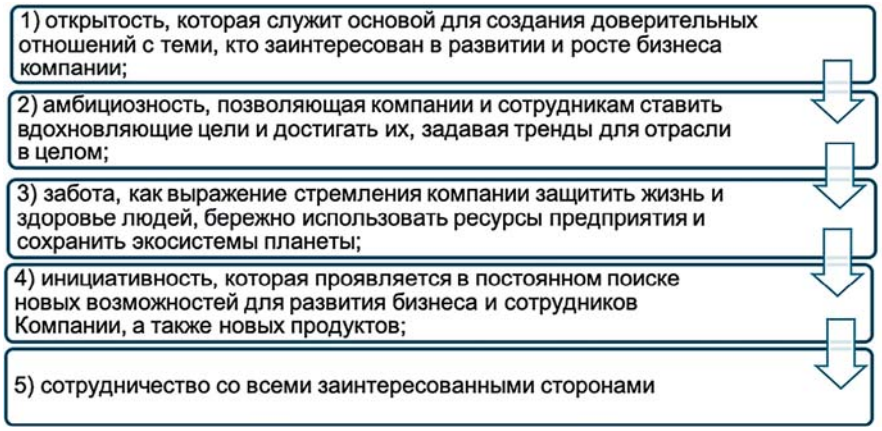


Рис. 3
Корпоративные ценности МКПАО «ОК «РУСАЛ»
Источник: Официальный сайт компании МКПАО «ОК «РУСАЛ». Режим доступа: https://rusal.ru/about/mission-and-values/ (дата обращения: 14.02.2026).

Fig. 3
Corporate values of the United Company Rusal Plc
Source: Official website of the United Company Rusal Plc. Available at: https://rusal.ru/about/mission-and-values/ (accessed: 14.02.2026).

тельность предприятий сегмента критических металлов меняет не только технологическую основу производства, но и саму природу мотивационного механизма. Если в традиционной модели мотивация работников оценивалась преимущественно через опросы, текучесть кадров, дисциплинарные нарушения, выполнение плановых заданий и субъективную оценку руководителя, то в цифровой среде появляется возможность перехода к более точной, динамической и доказательной оценке мотивационного состояния персонала. Это особенно важно для исследуемого сектора горнодобывающих предприятий, поскольку они работают в условиях растущего мирового спроса, технологической сложности, дефицита квалифицированных кадров, а также повышенных требований к безопасности [7].

Результаты и их обсуждение

Коэффициент эффективной мотивации, рассчитываемый как отношение темпа роста производительности труда к темпу роста совокупных затрат на систему мотивации, дает возможность оценить, насколько оправданы инвестиции в человеческий капитал. Его применение к данным компаниям показывает, что при правильной настройке мотивационных систем отдача превышает затраты. Значение коэффициента выше единицы свидетельствует об опережающем росте эффективности.

В системе мотивации искусственный интеллект (ИИ) может использоваться как инструмент управленческой диагностики человеческого капитала. Причем не однократно, а постоянно, связывая данные о поведении работников, результатах труда, обучении, безопасности, коммуникации и производственных отклонениях. Организация экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) отмечает, что ИИ способен повышать производительность, качество рабочих мест и безопасность труда, однако одновременно создает риски потери автономии работников, дискриминации, нарушения приватности и недостаточной прозрачности управленческих решений[22]. Поэтому применение ИИ в оценке мотивации должно строиться не как система скрытого надзора, а как прозрачный инструмент поддержки работника, повышения безопасности и справедливого распределения стимулов.

В качестве материальных стимулов М.М. Столбов отмечает, что «перспективным направлением является внедрение системы корпоративных социальных пакетов с возможностью их постепенного расширения в зависимости от стажа работы и профессиональных достижений сотрудника. Это могут быть дополнительное медицинское страхование, программы корпоративного обучения, компенсация расходов на детский сад или образование детей, корпоративные пенсионные программы. Такие инструменты материального стимулирования создают у работников ощущение стабильности и защищенности, формируют лояльность к компании и мотивируют их к продолжительному сотрудничеству» [7, с. 84].

Эксперты, практики и ученые отмечают, что «в условиях санкций многие предприятия вынуждены оптимизировать свои процессы» [7, с. 84]. В итоге «возникает необходимость быстрой перестройки бизнес-процессов, освоения новых компетенций и технологий, что также является существенным стресс-фактором для персонала» [7, с. 84]. Это приводит к увеличению нагрузки и создает дополнительное давление на сотрудников, которое требует профессиональной поддержки для сохранения психологического здоровья работников. Следовательно, в качестве нематериального стимулирования здесь поможет «внедрение комплексной системы поддержки психологического благополучия» [7, с. 84].

Ключевым специалистам и руководителям среднего звена управления, от эмоционального состояния которых зависит эффективность работы бригад и подразделений, регулярные встречи с профессиональными психологами помогают лучше справиться с неопределенностью и тревожностью, а также сохранить эмоциональную устойчивость в сложных ситуациях. В условиях повышенной нагрузки и неопределенности эффективным инструментом профилактики профессионального выгорания становится внедрение программ управления стрессом [7].

Оценивать мотивацию работников помогают цифровые технологии и ИИ, которые можно объединить в несколько групп данных, каждая из которых уже апробирована на некоторых горнодобывающих предприятиях (рис. 4)[23].

Такая многомерная модель дает возможность увидеть не только итоговый результат труда, но и скрытые факторы снижения мотивации. Если на предприятии по добыче лития одновременно растет число просроченных профилактических работ, снижается активность работников в системе предложений, увеличивается абсентеизм и уменьшается количество сообщений о потенциальных рисках, ИИ может выявить не просто «нарушение дисциплины», а вероятный мотивационный кризис работников участка. В традиционной системе такая проблема часто становится заметной только после аварийного простоя, конфликта или увольнения ключевых специалистов. В AI-модели предприятие получает ранний сигнал: мотивация работ-

22 Обзор профессиональных навыков до 2025 года: Кадры для горнодобывающей промышленности и важнейших полезных ископаемых. Париж: Изд-во ОЭСР; 2025. 132 с.

23 Там же.

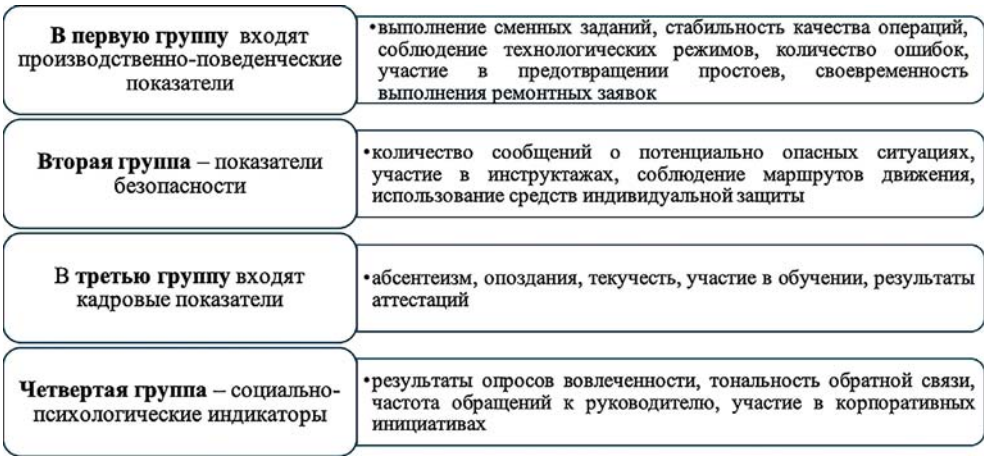


Рис. 4
Группы показателей для оценки мотивации персонала апробированных на некоторых горнодобывающих предприятиях

Fig. 4
Groups of indicators for assessing employee motivation tested at several mining companies

Показатели оценки мотивации	Нормативное значение	Фактическое значение
1. Вовлеченность персонала	0,2	0,14
2. Безопасное поведение	0,2	0,19
3. Владение цифровыми технологиями	0,2	0,10
4. Возможность для обучения и карьерного роста	0,2	0,15
5. Социально-психологический климат в коллективе	0,2	0,10
6. Инновационная активность	0,2	0,11
7. Наличие системы дополнительного медицинского страхования, лечения и реабилитации в санаторном фонде предприятия	0,2	0,15
8. Предоставление социального жилья или содействие в его приобретении на льготных условиях	0,2	0,18
9. Предоставление мест в детских садах и школах для персонала	0,2	0,18
10. Система наставничества	0,2	0,09
Итого	2	1,39

Таблица 2
Пример расчета интегрального показателя

Table 2
An example of calculating the comprehensive index



Рис. 5
Уровни оценки мотивации персонала с помощью интегрального показателя

Fig. 5
Levels of staff motivation assessment using the comprehensive index

ников снижается, потому что они перегружены, не доверяют системе премирования, не видят смысла в профилактической работе или воспринимают цифровой контроль как наказание[24]. Следовательно, ИИ позволяет перейти от реактивного управления персоналом к превентивному управлению мотивацией.

Для диагностики влияния мотивации персонала на показатели эффективности производства в деятельности горнодобывающих предприятий сегмента критических металлов целесообразно использовать интегральный индекс оценки мотивации персонала.

Авторами на основе ряда исследований ([2; 8] и др.) была предложена методика оценки мотивационного механизма для горнодобывающих предприятий с расчетом интегрального показателя. Он рассчитывается как взвешенная сумма 10 основных компонентов (табл. 2). Каждый компонент получает весовой коэффициент, сумма которых равна 2. В идеальном соотношении каждый фактор имеет значение 0,2. Пример расчета интегрального показателя приведен в табл. 2, а на рис. 5 – шкала оценки мотивации персонала с помощью интегрального показателя.

На основании полученных результатов видно, что значение интегрального показателя – 1,39, значит исходя из уровней оценки мотивации – это соответствует третьему уровню – средней системе мотивации.

Международный и российский опыт исследований ведущих горнодобывающих компаний, использующих цифровые технологии, позволяет более точно и своевременно оценивать возникающие в процессе работы разного рода инциденты. Например, связанные травмами на производстве, с падающими предметами, падением с высоты, и другое. Устранение этих рисков остается ключевым приоритетом[25]. Если перенести эту логику на предприятие по добыче никеля или кобальта, система компьютерного зрения и датчики на технике могут фиксировать опасные сближения самосвалов, нарушения маршрутов и отсут-

24 Обзор профессиональных навыков до 2025 года: Кадры для горнодобывающей промышленности и важнейших полезных ископаемых. Париж: Изд-во ОЭСР; 2025. 132 с.

25 Обзор профессиональных навыков до 2025 года: Кадры для горнодобывающей промышленности и важнейших полезных ископаемых. Париж: Изд-во ОЭСР; 2025. 132 с.

Таблица 3
Классификация барьеров привлечения персонала в горной промышленности

Table 3
Classification of barriers to staff recruitment in the mining industry

Кластер проблем	Характеристика барьера	Ключевые детерминанты
1. Имиджево-демографический	Снижение престижа горняцких профессий среди молодёжи, «эффект старения» трудовых коллективов моногородов	Восприятие отрасли как сложной и опасной, разрушение трудовых династий [10]
2. Пространственно-вахтовый	Социальная изоляция при вахтовом методе, разрушение семейных связей, проблемы со здоровьем	Климатические перепады, дефицит «домашнего быта» в вахтовых посёлках [11]
3. Экономико-мотивационный	Выравнивание зарплат горняков и специалистов сферы услуг при несопоставимой тяжести труда	Запаздывающая индексация, утрата компенсаторной функции заработной платы [12, 13]

ствие средств индивидуальной защиты. Если система мотивации с внедренным ИИ служит только для наказаний, она снижает доверие и может демотивировать работников. Но если ИИ применяется как инструмент предупреждения и справедливого поощрения, мотивационный эффект становится положительным[26].

Прогнозирование текучести кадров с помощью цифровых технологий и ИИ представляет собой еще одно направление, где количественные оценки подтверждают экономическую целесообразность инвестиций в мотивационные механизмы. Внедряемые технологии могут анализировать сочетание таких факторов, как сокращение производственной активности, рост пропусков, снижение интереса в обучении, ухудшение результатов опросов, изменение коммуникационного поведения. На этой основе система выявляет группы риска увольнения[27].

Цифровые технологии позволяют усиливать нематериальную мотивацию за счет персонализированного признания, которое часто недооценивается в горнодобывающей отрасли. Однако положительный эффект возникает только при условии понятной системы мотиваторов и стимулов в работе, доверия, прозрачности и участия работников.

Итак, горнодобывающая отрасль представляет собой основу экономической стабильности государств, обладающих значительным ресурсным потенциалом, и критически важна для глобальных цепочек поставок. Несмотря на технологическую модернизацию, внедрение автономной техники и цифровых двойников, человеческий капитал остаётся основным элементом производственной функции. Но в 2020-х годах сектор столкнулся с вызовом, так как квалифицированные рабочие, инженеры и управленцы демонстрируют устойчивое нежелание связывать карьеру с добычей полезных ископаемых. Феномен кадрового голода перестал быть отдельным колебанием и приобрёл черты структурного кризиса, угрожающего не просто темпам роста, а возможности реализации инвестиционных проектов.

Сложность анализа этой проблемы заключается в двойственной природе труда в горной промышленности, где, с одной стороны, работодатель вынужден конкурировать за персонал с более комфортными сферами услуг и технологий. С другой стороны, внутри отрасли происходит поляризация компетенций, так, классические профессии горнорабочего и проходчика насыщаются требованиями цифровой грамотности. Возникает разрыв, описанный как когнитивная пропасть между поколениями сотрудников [9]. Традиционные системы наставничества перестают функционировать там, где компании более активно используют искусственный интеллект. Увлечение этим инструментом имеет двоякое значение. С одной стороны, его применение позволяет оптимизировать процессы, а с другой стороны, сокращение сотрудников во многих компаниях, и согласно экспертной оценке (исходя из аналитических материалов журнала Монокль и ряда других исследований, в том числе и авторов) это примерно 40%, ведет в итоге не к повышению эффективности операционной деятельности, как ожидалось, а наоборот к снижению. Использовать ИИ необходимо с осторожностью, так как не всегда он дает верные результаты и это уже статистика. Именно по этой причине в 2026 г. стал наблюдаться обратный тренд. Руководство ряда компаний, считавших ИИ панацеей, возвращает опытных сотрудников, при этом с предложением более высокой оплаты труда.

Проведенный анализ позволил идентифицировать две основные группы проблем, определяющие низкую эффективность кадрового обеспечения горной отрасли.

Первая группа связана с привлечением и удержанием, вторая – с обучением и развитием, при этом обе группы взаимосвязаны на уровне ошибочных ожиданий кандидатов и их последующей профессиональной деформации. Классификация барьеров привлечения персонала в горной промышленности приведена в табл. 3.

ыКак видно из данных табл. 3, классические инструменты материальной мотивации перестают быть значимым аргументом. Исследования показывают, что уровень заработной платы, ранее служивший основным компенсатором вредных условий, нивелируется ростом доходов в логистике или строительстве, где степень риска и физического истощения значительно ниже [12]. Попытки ребрендинга через корпоративные социальные сети часто не в полной мере достигают цели. Ещё одним препятствием выступает падение престижа инженерных профессий, фиксируемое в отраслевых опросах, где молодёжь все реже рассматривает карьеру, например горного мастера, как жизненную траекторию успеха [10].

Пространственно-вахтовый кластер показывает дополнительную сложность проблемы. Анализируя феномен вахтового труда в Арктике, исследователи приходят к выводу, что уровень социальных рисков для работников недооценён [11]. Психологическая адаптация персонала оказывается выше на тех объектах, где созданы условия домашнего быта. Но создание такой среды требует дополнительных капиталовложений в социальную инфраструктуру, что входит в противоречие с акционерной политикой сокращения издержек.

Экономическая плоскость осложняется тем, что производительность труда на горных предприятиях не демонстрирует устойчивого роста, пропорционального индексации заработных плат, что создаёт у собственников ложное ощущение переплаты за неэффективный труд [13]. Также

26 Там же.
27 Там же.

усугубляет ситуацию трансформация содержания труда. Внедрение автоматизированных систем управления (АСУ) горнотранспортным оборудованием, буровых установок с элементами искусственного интеллекта (ИИ) и предиктивной аналитики технического обслуживания требует от оператора не развитой памяти, а когнитивной выносливости. Это подводит ко второй группе проблем, связанных с обучением.

Традиционная система подготовки кадров, состоящая из звеньев «профильный вуз – техникум – предприятие» зачастую приводила к тому, что, получив теоретическую подготовку и немного практики, студенты приходили на предприятия и перед тем, как приступить к работе по своей специальности (профилю подготовки), вынуждены были получать практические навыки в течение 3–4 мес, и они не могли это время полноценно выполнять свои обязанности. По этой причине в декабре 2022 г. вступили в силу положения Федерального закона от 21 ноября 2022 г. №449-ФЗ[28], которые закрепили полномочия образовательных организаций по созданию в своей структуре учебно-производственных комплексов (УМК), чтобы содействовать студентам и выпускникам в трудоустройстве, в том числе в структурные подразделения образовательных организаций[29].

Кроме этого, на протяжении последних лет учебные планы обновлялись медленнее, чем менялся парк горной техники, а содержание образовательных программ в колледжах по факту отстает от реального производства примерно на 5–7 лет [14]. Фиксируется и кризис института наставничества. Мастера с 20–25 летним стажем, обладающие уникальными знаниями о поведении горного массива, не владеют педагогическими технологиями передачи этих знаний цифровым поколениям. Возникает феномен обнуления авторитета, когда молодой специалист быстрее находит решение сбоя в программном обеспечении техники, чем наставник, что разрушает иерархию производственного обучения [15].

Особую сложность приобретает проблема безопасности, рассматриваемая в когнитивном ключе, например, вводится понятие риск-ориентированного мышления как ключевой компетенции современного горного инженера [16]. Если ранее обучение технике безопасности строилось на заучивании инструкций, то теперь оно требует формирования упреждающего поведения, умения распознавать предвестники катастроф в большом потоке сенсорных данных. Невозможность привить этот навык классическими лекционными методами подтверждается статистикой травматизма среди работников с формально пройдённым инструктажем [17].

В отличие от российских работ, где преобладает проблемно-ориентированный подход, зарубежные исследователи больше внимания уделяют нейрофизиологическим аспектам обучения операторов диспетчерских пунктов и машинистов в условиях сенсорных перегрузок. Когнитивная нагрузка на оператора диспетчерского центра сопоставима с нагрузкой авиадиспетчера, при этом программы подготовки значительно уступают авиационным стандартам [18]. Это свидетельствует о недооценке сложности умственного труда в добывающем секторе.

Отечественная школа, в свою очередь, глубже прорабатывает региональную специфику моногородов. В научной среде эта называется «внутренней миграцией», это когда молодёжь уезжает из ресурсных регионов не из-за низкой зарплаты, а из-за отсутствия комфорта и средового разнообразия, что обесценивает любые попытки корпоративного обучения кадров. Возникает ситуация, известная в литературе как ловушка компетенций, когда предприятие вкладывается в подготовку вахтовика из крупного города, а через 1–2 года получает заявление об увольнении из-за дискомфорта сменного графика, сложных условий и снижения качества жизни.

При этом, как следует из ряда исследований крупнейших горнодобывающих компаний на протяжении последних 10–15 лет, развитие регионов, территориальной инфраструктуры, социального обеспечения населения во многом проводилось силами самих компаний, а не за счет средств бюджетов, что вело к высоким затратам их деятельности [19] и это вдвойне негативным образом отразилось на самих предприятиях и кадровом составе в целом.

В качестве поддержки субъектов РФ и привлечения людей на работу в горнодобывающую отрасль в последнее время стали переходить на форму ГЧП (государственно-частного партнерства), то есть финансирование некоторых проектов, реализуемых в критически важных отраслях, к которой относится горнодобывающая отрасль, государство берет на себя, что позволяет быстрее внедрять новые технологии, в первую очередь цифровые, совершенствовать уровень компетенций персонала, способствовать технологической независимости страны. Эволюция подходов к обучению и удержанию в ответ на технологические вызовы приведена в табл. 4.

Данные табл. 4 подтверждают тезис о том, что человеческий фактор становится не слабым звеном, а ключевым условием технологического перехода, если преодолеть стагнацию педагогических форм. Уровень усвоения аварийных алгоритмов у персонала, прошедшего тренажёрную подготовку с элементами виртуальной реальности, существенно выше, чем у контрольной группы, обучавшейся по плакатам и видеороликам, что подтверждается современными исследованиями в области охраны труда [17]. Но высокая стоимость таких комплексов и отсутствие методологии их внедрения в учебный процесс остаются сдерживающим фактором для большинства добывающих компаний.

Не менее существенного пересмотра требует сам подход к рабочей силе, так, требуемый профиль компетенций меняется от моноспециализации к гибридной квалификации, что требует слома образовательных стандартов, разделяющих горного инженера, маркшейдера и обогатителя. С этим сложно не согласиться, поскольку в условиях действующего карьера размываются границы между профессиями, и управление экскаватором все чаще напоминает управление сложным киберфизическим объектом, требующим навыков программирования, а не только знания пород [11].

Значит стоит вспомнить, что наиболее успешный опыт подготовки был зафиксирован в СССР. Программа обучения специалистов была построена на многопрофильной подготовке, когда инженеры осваивали не только свою непосредственную профессию, но и смежные. Это было нужно не только для получения дополнительных знаний по смежным направлениям, но и профессиональных качеств и компетенций. На данный момент назрела необходимость компилирования советской системы подготовки кадров с наилучшими международными и российскими практиками.

28 О внесении изменений в статьи 27 и 28 Федерального закона «Об образовании в Российской Федерации»: федеральный закон от 21 ноября 2022 г. №449-ФЗ. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_431839/ (дата обращения: 14.02.2026).

29 Там же.

Таблица 4
Эволюция подходов к обучению и удержанию в ответ на технологические вызовы

Table 4
Evolution of approaches to training and retention in response to technological challenges

Технологический вызов	Традиционный подход	Инновационный инструмент
1. Роботизация бурения и крепления	Обучение моторике на устаревших тренажёрах	VR-тренажёры с оценкой психофизиологического состояния [15]
2. Интеллектуализация добычи	Слесарная подготовка широкого профиля	Модульное микрообучение для гибридных квалификаций [14]
3. Цифровые двойники месторождений	Работа с бумажной геологической документацией	Обучение анализу данных для предотвращения обрушений [9]
4. Рост требований к безопасности	Формальное изучение инструкций	Поведенческий аудит безопасности как обучающая платформа [17]
5. Кризис наставничества	Передача опыта «от мастера к ученику»	Двойное наставничество [16]

С позиции экономической теории, все вышеперечисленное является следствием несбалансированной функции инвестирования. Предприятия вкладывают существенные средства в приобретение оборудования с программным управлением, но экономят на рекрутинге и на профессиональных навыках сотрудников. Анализ внедрения цифровых технологий фиксирует феномен технологической опережающей безработицы. Так, новейшая техника простаивает или эксплуатируется в нештатных режимах, так как формально обученный персонал не способен интерпретировать предсказания цифровой модели, страдая от когнитивного разрыва между собственным опытом и машинными рекомендациями. Этот вывод связан с заключениями о необходимости внедрения экосистемного подхода к обучению, где технология поставляется единым пакетом с тренингом и посттренинговым сопровождением.

Попытка синтезировать аналитические выкладки показала, что основной проблемой является асинхронность внутренних коммуникаций бизнес-процессов. Службы эксплуатации закупают технику, службы персонала нанимают людей, а производственное обучение существует отдельно и финансируется по остаточному принципу. Анализ также показывает, что выход из тупика находится не в экстенсивном увеличении квот на целевой набор, а в создании корпоративных фабрик процессов, где обучение неотделимо от производства [11], как это было в советское время. Трансформация института наставничества, переосмысленного как партнёрство опытного работника и молодого IT-специалиста, способна преодолеть цифровой разрыв поколений, но требует перестройки системы мотивации старших мастеров [15].

Депопуляция ресурсных территорий, стимулируемая феноменом «внутренней миграции», несмотря на инвестирование и развитие многих регионов, ведёт к тому, что компании вынуждены рекрутировать персонал за тысячи километров от места добычи, усугубляя вахтовую социальную патологию. В этих условиях ловушка компетенций срабатывает и средства на адаптацию и обучение тратятся, а отдача в виде производительного труда не наступает из-за раннего выбытия работника. Это значит, что стратегия привлечения должна быть связана со стратегией риск-ориентированного мышления, вовлеченности в безопасность на самих ранних этапах работы в должности.

Традиционный подход, трактующий привлечение персонала только как функцию размера заработной платы и наличия соцпакета, становится устаревшей и неактуальной. Современные сотрудники горнодобывающих предприятий, особенно представители молодого поколения, принимают решение о найме на основе уровня заработной платы, оценки качества жизни, технологичности рабочего места, прозрачности карьерных лифтов, выполнения договорных обязательств со стороны работодателей и других аспектов. В последнее время в молодежной среде наметился тренд на работу вахтовым методом, так как им предоставляется все необходимое на этот период и не нужно задумываться о сложных вещах. У работодателей, в свою очередь, возникает зачастую проблема с молодыми специалистами, здесь речь идет о том, что система обучения в профильных и высших учебных заведениях не всегда успевает за темпами цифровизации технологических процессов, оставляя без должного внимания развитие способностей и риск-ориентированного мышления.

Заключение

Выборка аналитических материалов и данных позволила сделать вывод, что преодоление кадрового голода невозможно без формирования ценностного предложения работодателя, где акцент смещается с физической выносливости на интеллектуальное управление сложными системами. То есть это предполагает массовое внедрение методов поведенческого аудита безопасности, модульного обучения гибридным навыкам и профессиям, реализации программ двойного наставничества. Экономическая целесообразность таких вложений очевидна, так как потери от простоя высокопроизводительной техники из-за некомпетентности персонала значительно превышают затраты на образовательные технологии. Следовательно, подводя итоги проведенного исследования, выделим наиболее существенные выводы.

1. Россия обладает значительной минерально-сырьевой базой и имеет длительный исторический опыт в добыче и переработке различных видов полезных ископаемых. В современных условиях геополитической напряженности горнодобывающая промышленность перестает рассматриваться исключительно как базовая сырьевая отрасль, она является одной из приоритетных в российской экономике, и приобретает в настоящий период важное значение как один из ключевых факторов технологического суверенитета, промышленной безопасности и долгосрочной конкурентоспособности национальной экономики.

2. Выборка аналитических материалов и данных позволила сделать вывод, что преодоление кадрового голода невозможно без формирования ценностного предложения работодателя, где акцент смещается с физической выносливости на интеллектуальное управление сложными системами. Экономическая целесообразность таких вложений очевидна, так как потери от простоя высокопроизводительной техники из-за некомпетентности персонала значительно превышают затраты на образовательные технологии. Полагаем, что введение поправок в Федеральный

закон от 21 ноября 2022 №449-ФЗ «О внесении изменений в статьи 27 и 28 Федерального закона «Об образовании в Российской Федерации» по созданию в своей структуре учебно-производственных комплексов, будут способствовать повышению компетенций и практических навыков обучающихся, содействовать выпускникам в трудоустройстве.

3. В традиционном понимании мотивация часто сводится к оплате труда, премированию за выполнение плана и набору социальных гарантий. Однако горнодобывающие предприятия сегмента критических металлов работают в зоне пересечения нескольких стратегических процессов: энергетического перехода, технологической модернизации промышленности, геополитической конкуренции за сырьевую базу, роста экологических требований и дефицита квалифицированных кадров. Следовательно, мотивационный механизм здесь должен пониматься как комплексная управленческая система, которая связывает интересы работника, предприятия, региона, инвестора и конечного потребителя критического сырья и включает совокупность экономических, организационных, социальных, профессиональных и ценностных стимулов, направленных на формирование у работников заинтересованности в достижении целей предприятия.

4. Для диагностики влияния мотивации персонала на показатели эффективности производства в деятельности горнодобывающих предприятий сегмента критических металлов авторами предлагается использовать интегральный индекс оценки мотивации персонала. Расчет с помощью такого показателя позволяет определить уровень мотивации и принять своевременно управленческие решения.

Список литературы / References

1. Фадеев А.М., Череповицын А.Е., Ларичкин Ф.Д. *Стратегическое управление нефтегазовым комплексом в Арктике*. Апатиты: КНЦ РАН; 2019. 289 с. Режим доступа: https://rio.ksc.ru/data/documents/34_fadeev_19.pdf (дата обращения: 14.02.2026).
2. Лопаткин Д.С., Шпилькина Т.А., Артамонова Л.С., Барабанов П.А., Борисова О.В., Гринев Н.Н. и др. *Организация и управление производственным подразделением*. М.: КноРус; 2026. 384 с.
3. Черников В.А., Борзенко Н.М. Влияние вибрации на организм человека и способы ее снижения. В кн.: *Божко А.В. (ред.) Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф., г. Воронеж, 17 марта 2023 г.* Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I; 2023. С. 129–136.
4. Сикамова А. Хозяин редких земель. *Монокль*. 2026;(23):31–35. Режим доступа: https://monocle.ru/monocle/2026/23/khozyain-redkikh-zemel/ (дата обращения: 14.02.2026).
Sikamova A. Master of the rare earths. *Monokl*. 2026;(23):31–35. (In Russ.) Available at: https://monocle.ru/monocle/2026/23/khozyain-redkikh-zemel/ (accessed: 14.02.2026).
5. Сикамова А. ПМЭФ: неоконченная пьеса с непредсказуемым финалом. *Монокль*. 2026;(25):15–18. Режим доступа: https://monocle.ru/monocle/2026/24/pmef-neokonchennaya-pesa-s-nepredskazuyemym-finalom/ (дата обращения: 14.02.2026).
Sikamova A. SPIEF: an unfinished play with an unpredictable ending. *Monokl*. 2026;(25):15–18. (In Russ.) Available at: https://monocle.ru/monocle/2026/24/pmef-neokonchennaya-pesa-s-nepredskazuyemym-finalom/ (accessed: 14.02.2026).
6. Saxby P. Non-financial incentives and their application to enhance motivation and productivity in mining industry employees. *CEPMLP Annual Review*. 2024;21:1. https://doi.org/10.20933/100001307
7. Столбов М.М. Трансформация системы мотивации персонала производственных предприятий в условиях экономической турбулентности: новые подходы и инструменты. *Общество: социология, психология, педагогика*. 2025;(2):80–86. https://doi.org/10.24158/spp.2025.2.7
Stolbov M.M. Transformation of the personnel motivation system of production enterprises in the conditions of economic turbulence: new approaches and tools. *Society: Sociology, Psychology, Pedagogics*. 2025;(2):80–86. (In Russ.) https://doi.org/10.24158/spp.2025.2.7
8. Мишурова И.В. (ред.) *Технологии кадрового менеджмента*. М.; Ростов н/Д: МарТ; 2004. 368 с.
9. Рыльников А.Г., Пыталев И.А. Цифровая трансформация горнодобывающей отрасли: технические решения и технологические вызовы. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2020;(1):470–481. https://doi.org/10.46689/2218-5194-2020-1-1-470-481
Rylnikov A.G., Pytalev I.A. Conditions for ensuring the multifunctional use of subsoil in the interaction of different industries. *Izvestiya Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2020;(1):470–481. (In Russ.) https://doi.org/10.46689/2218-5194-2020-1-1-470-481
10. Зеркина Н.Н. (ред.) *Современное инженерное образование: вызовы и перспективы: материалы национальной науч.-практ. конф., г. Магнитогорск, 7–8 февраля 2022 г.* Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова; 2022. 255 с.
11. Попова О.В. Социальные аспекты нормативно-правового регулирования вахтового труда в северных регионах. *Теория и практика общественного развития*. 2021;(12):104–109. https://doi.org/10.24158/tipor.2021.12.13
Popova O.V. Social aspects of legal regulation of rotational shift work in the northern regions. *Theory and Practice of Social Development*. 2021;(12):104–109. (In Russ.) https://doi.org/10.24158/tipor.2021.12.13
12. Дозорцев О.Е., Омельченко И.Б. Закономерности и особенности механизмов установления заработной платы в местностях с особыми климатическими условиями (на примере Крайнего Севера). *Экономика труда*. 2023;10(10):1619–1632. https://doi.org/10.18334/et.10.10.119307
Dozortsev O.E., Omelchenko I.B. Patterns and characteristics of wage-setting mechanisms in areas with specific climatic conditions: the example of the Far North. *Russian Journal of Labour Economics*. 2023;10(10):1619–1632. (In Russ.) https://doi.org/10.18334/et.10.10.119307

13. Коркина Т.А., Рожков А.А., Довженок А.С. Анализ интеллектуально-инновационного потенциала и мотивации горных инженеров угледобывающих предприятий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(5-1):301–315. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_301
Korkina T.A., Rozhkov A.A., Dovzhenok A.S. Analysis of intellectual and innovative potential and motivation of coal mining engineers. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(5-1):301–315. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_301

14. Верчеба А.А. Подготовка кадров для горно-геологической отрасли России. *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):144–153. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-144-153
Vercheba A.A. Personnel training for the mining and geological sector of Russia. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):144–153. (In Russ.) https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-144-153

15. Крылков М.Ю., Оливетский И.Н. Цифровая трансформация в управлении приводами геолого-разведочной и горной техники. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2020;63(6):35–45. https://doi.org/10.32454/0016-7762-2020-63-6-35-45
Krylkov M.Yu., Olivetskiy I.N. Digital transformations in drive control technology for exploration and mining equipment. *Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration*. 2020;63(6):35–45. (In Russ.) https://doi.org/10.32454/0016-7762-2020-63-6-35-45

16. Григорьева Н.В. Формирование профессионально важных личностных качеств будущего горного инженера в условиях дуального обучения в Кемеровской области – Кузбассе. *Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Гуманитарные и общественные науки*. 2022;6(3):181–188. https://doi.org/10.21603/2542-1840-2022-6-3-181-188
Grigoreva N.V. Developing professionally important personal qualities of a future mining engineer in the conditions of dual training in Kuzbass. *Bulletin of Kemerovo State University. Series: Humanities and Social Sciences*. 2022;6(3):181–188. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2542-1840-2022-6-3-181-188

17. Глебова Е.В., Волохина А.Т., Вихров А.Е. Оценка эффективности управления культурой производственной безопасности в компаниях ТЭК. *Записки Горного института*. 2023;259:68–78. https://doi.org/10.31897/PMI.2023.12
Glebova E.V., Volokhina A.T., Vikhrov A.E. Assessment of the efficiency of occupational safety culture management in fuel and energy companies. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:68–78. https://doi.org/10.31897/PMI.2023.12

18. Hebbar P.A., Vinod S., Shah A.K., Pashilkar A.A., Biswas P. Cognitive load estimation in VR flight simulator. *Journal of Eye Movement Research*. 2022;15(3):1–16. https://doi.org/10.16910/jemr.15.3.11

19. Frolova V., Dolina O., Shpilkina T. Mining enterprises development as a financial source of environmental activities in mining regions. *E3S Web of Conferences*. 2018;41:04027. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184104027

Информация об авторах
Лопаткин Дмитрий Станиславович – кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой менеджмента и маркетинга, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-4260-4710; e-mail: lopatkin.d.s@muctr.ru
Копылова Лариса Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент кафедры менеджмента и маркетинга, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: kopylova.l.e@muctr.ru
Шушунова Татьяна Николаевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и маркетинга, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0001-5702-217X; e-mail: serg-1167@yandex.ru
Гринев Никита Николаевич – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и маркетинга, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-8555-770X; e-mail: grinev.n@yandex.ru
Шпилькина Татьяна Анатольевна – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и маркетинга, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-4591-8125; e-mail: luk-72@mail.ru

Information about the authors
Dmitry S. Lopatkin – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Head of the Management and Marketing Department, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-4260-4710; e-mail: lopatkin.d.s@muctr.ru
Larisa E. Kopylova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Management and Marketing Department, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation; e-mail: kopylova.l.e@muctr.ru
Tatiana N. Shushunova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor Management and Marketing Department, Management and Marketing Department, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0001-5702-217X; e-mail: serg-1167@yandex.ru
Nikita N. Grinev – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Associate Professor Management and Marketing Department, Management and Marketing Department, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-8555-770X; e-mail: grinev.n@yandex.ru
Tatyana A. Shpilkina – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Associate Professor Management and Marketing Department, Management and Marketing Department, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-4591-8125; e-mail: luk-72@mail.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 22.05.2026
Поступила после рецензирования: 23.06.2026
Принята к публикации: 16.07.2026

Article info
Received: 20.05.2026
Revised: 23.06.2026
Accepted: 16.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-79-81

Система трансформации глобальной энергетики: роль углеводородов

О.С. Богданова ✉
Ассоциация «Некоммерческое партнерство «Горнопромышленники России», г. Москва, Российская Федерация
✉ BOS2404@yandex.ru

Резюме: В статье исследуется роль углеводородов в условиях глобального энергоперехода на фоне роста спроса, геополитической нестабильности, санкций и ускоренного развития возобновляемых источников энергии. Автор утверждает, что трансформация энергетики не отменяет стратегического значения органического топлива, но видоизменяет природу конкуренции: смещая акцент с физических объемов на логистику, технологические цепочки, валютные механизмы и способность государства обеспечивать долгосрочную устойчивость. Предложен подход «балансового реализма», при котором сценарии декарбонизации соотносятся с реальными балансами и стоимостью инфраструктуры. Ценность предлагаемого подхода состоит в интеграции ресурсного, технологического, финансового и геополитического анализа, при этом мировая энергетика сохранит смешанный баланс, а углеводороды – системообразующую роль. Стратегическая задача России – использовать ресурсную базу для создания промышленной переработки и логистических альтернатив, не позволяя идеологизированным сценариям энергоперехода разрушать действующую энергетическую основу.

Ключевые слова: нефть, газ, уголь, углеводороды, геополитика, ресурсная база, глобальная энергетика, технологический суверенитет

Для цитирования: Богданова О.С. Система трансформации глобальной энергетики: роль углеводородов. *Горная промышленность.* 2026;(5):79–81. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-79-81

Global energy transition: the role of hydrocarbons

O.S. Bogdanova✉
Association "Non-commercial partnership "Mining Industrialists of Russia", Moscow, Russian Federation
✉ BOS2404@yandex.ru

Abstract: This article examines the role of hydrocarbons in conditions of global energy transition against a backdrop of rising demand, geopolitical instability, sanctions, and accelerated development of the renewable energy sources. The author argues that the energy transition does not cancel out the strategic importance of fossil fuels, but rather alters the nature of competition by shifting the focus from physical volumes to logistics, technology chains, currency mechanisms, and the state's ability to ensure long-term sustainability. A "balance-based realism" approach is proposed, in which decarbonization scenarios are correlated with actual balances and infrastructure costs. The value of the proposed approach lies in integration of the resource, technological, financial, and geopolitical analyses, while the global energy sector will maintain a mixed balance with hydrocarbons retaining their system-defining role.
Russia's strategic objective is to use its resource base to develop industrial processing and logistical alternatives, preventing ideologically driven energy transition scenarios from undermining the existing energy base.

Keywords: oil, gas, coal, hydrocarbons, geopolitics, resource base, global energy sector, technological sovereignty

For citation: Bogdanova O.S. Global energy transition: the role of hydrocarbons. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):79–81. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-79-81

Введение

Мировая энергетика развивается по модели наслоения энергетических укладов, а не моментальной замены одного источника другим. Новые технологии возобновляемых источников энергии (ВИЭ) ускоряют прогресс, но не обнуляют потребность в надежной базовой генерации, которую сегодня обеспечивают углеводороды и уголь. В этой парадигме энергопереход понимается не как отказ, а как трансформация функций: нефть сохраняет ключевое значение в транспорте и глобальной энергетике нефтехимии, газ становится связующим ресурсом между низко- и высокоуглеродными системами, а уголь остается незаменимым в металлургии и базовой энергетике отдельных регионов [1; 2]. Энергетическая политика не может строиться исключительно на рыночных сигналах текущего момента, поскольку проекты имеют длительный инвестиционный цикл и зависят от геологии, технологического суверенитета и международной политики.

Результаты и их обсуждение

Россия занимает второе место в мире по запасам органического топлива, уступая США, и второе – по запасам традиционных углеводородов (после Ирана). Ключевое преимущество российской ресурсной базы – высокая доля природного газа, обладающего лучшими экологическими и энергоэффективными характеристиками по сравнению с углем. При показателе RPR (Reserves-to-Production Ratio) на уровне 44,9 года российские запасы обеспечивают достаточный временной горизонт для технологической перестройки, однако наличие ресурса само по себе

не гарантирует конкурентоспособности. Стратегическое преимущество достигается только через развитую инфраструктуру добычи, переработки и экспорта. Россия должна перейти от механического наращивания добычи к управлению ценностью ресурса через газохимию, СПГ, внутреннюю газификацию и технологические сервисы, избегая разрушительной межтопливной конкуренции между собственными поставщиками.

Несмотря на развитие ВИЭ и экологическую повестку, в период 1985–2024 гг. абсолютные объемы потребления нефти, газа и угля неуклонно росли [3; 4]. ВИЭ развиваются как дополняющий, а не замещающий источник. Рост электрификации, центров обработки данных и промышленности повышает потребность в надежной базовой генерации. В этой системе углеводороды выступают страховым механизмом устойчивости, компенсирующим нестабильность возобновляемых источников. Прогнозы до 2100 г. указывают на возможный рост глобального энергопотребления до 26–36 млрд т н.э. (в 1,8–2,5 раза выше текущего), что требует сохранения и развития всех видов генерации, включая газ, атом, гидроэнергетику и уголь, при одновременном наращивании ВИЭ [5].

Природный газ занимает уникальное положение: он является и топливом, и сырьем для химии, и экспортным товаром, и базой для низкоуглеродных технологий. По сравнению с углем он экологичнее, а по сравнению с ВИЭ – технологически зрелый и управляемый. Для России газовая стратегия должна выходить за рамки трубопроводного экспорта, смещая фокус на СПГ, восточные маршруты, глубокую газохимию, производство удобрений и водородные цепочки. Конкурентное преимущество заключается в связке: «сырье – территория – инженерная школа – внутренний рынок». Однако ужесточение санкций и конкуренция на мировом рынке требуют снижения зависимости от сырьевого экспорта в пользу продукции с высокой добавленной стоимостью.

Сланцевая революция предоставила США рыночный и геополитический рычаг для влияния на ОПЕК+, расширения СПГ-поставок и поддержки долларовой архитектуры энерготорговли[1]. При этом модель сланцевой добычи имеет внутренние ограничения: требует интенсивного капитала, быстрого ввода новых скважин и чувствительна к финансовым условиям. Дальняя перспектива связана с управляемым термоядерным синтезом, однако путь от лабораторных достижений до промышленной энергетики займет десятилетия, что не отменяет текущей роли углеводородов.

Санкционное давление усилило тенденцию к фрагментации финансовой среды, стимулируя страны Глобального Востока и Юга искать альтернативы доллару. Дедолларизация не означает исчезновения доллара, но предполагает диверсификацию расчетов: часть контрактов будет переходить в национальные валюты, встречные поставки и клиринговые механизмы. Для российских поставщиков это создает издержки, связанные со скидками, сложностью платежей и необходимостью выстраивать собственные финансово-логистические механизмы. Соответственно, энергетическая стратегия РФ должна неразрывно включать в себя платежные системы, страхование и правовую защиту контрактов.

Инвестиции в ВИЭ, обгоняющие способность экономики абсорбировать рост тарифов и бюджетных нагрузок, создают инфляционное давление. Стоимость установленной мощности солнечных панелей не равна полной стоимости системы с учетом сетей, накопителей и резервных мощностей. Ускоренная декарбонизация в условиях дорогого капитала и геополитической фрагментации может оказаться дороже декларируемой. Рациональная политика должна быть технологически нейтральной: развивать ВИЭ там, где это экономически эффективно, сохранять газ как переходный ресурс, модернизировать уголь там, где он необходим для надежности, и повышать энергоэффективность.

Сценарий развития России сочетает сильную ресурсную базу с жесткими внешними ограничениями [4]. Наличие запасов газа и нефти (RPR ~45 лет) является временным лагом, который следует использовать для перестройки, а не оправдания инерции. Выиграет не тот, кто добудет больше, а тот, кто сумеет глубже переработать и надежнее доставить продукт. Для газа это означает ставку на СПГ и газохимию, для нефти – углубление переработки, для угля – развитие эффективного экспортного коридора. Параллельно необходимо развивать атомную энергетику (включая малые модульные реакторы), водородные технологии и системы улавливания углерода. Внутренний источник конкурентоспособности – не только ресурс, но и координация экспортной политики и единая энергетическая дипломатия.

Тезис о скором конце эры углеводородов прост, но уязвим для проверки отраслевыми данными. Во-первых, абсолютный мировой спрос на энергию продолжает расти, при этом углеводороды остаются основой энергетики развивающихся экономик[2]. Во-вторых, многие низкоуглеродные технологии (цемент, металлы, химия) не могут существовать без продукции углеводородной переработки. В-третьих, глубокая электрификация транспорта не ликвидирует спрос на полимеры и смазочные материалы, а лишь видоизменяет структуру нефтепереработки. Наконец, экстремально быстрый переход ограничен политической приемлемостью роста цен на энергию и промышленные товары, что возвращает рынок к более дешевым традиционным источникам.

Показатель RPR дисциплинирует прогнозы, указывая на длительность обеспеченности текущей добычи. В глобальном масштабе обеспеченность составляет около 50,7 года, что ставит задачу не только геологоразведки, но и изменения структуры потребления. Для России это означает, что нельзя строить политику, как будто углеводороды уже утратили значение, но также нельзя игнорировать физическую ограниченность запасов. Стратегия должна одновременно продлевать ресурсную базу за счет повышения коэффициента извлечения, развивать переработку и инвестировать в альтернативы.

Нефть, газ, уголь, атом и ВИЭ конкурируют по себестоимости, надежности, экологии и управляемости. Их конкурентные преимущества сегментированы: газ – в маневренной генерации и промышленном тепле, уголь – в дешевой базовой нагрузке и металлургии, нефть – в транспортном секторе и химии, ВИЭ – в распределенной генерации. Перенос успеха одного источника в одном секторе на всю систему является методологической ошибкой. Для России межтопливная конкуренция имеет важное внутреннее измерение: при переориентации на Восток необходимо координировать поставки газа, угля и нефти, чтобы не создавать

1 World Oil Outlook 2050. Vienna: OPEC; 2025. 328 p. Available at: https://www.slideshare.net/slideshow/opec-world-oil-outlook-2050-full-report-2025/281522717 (accessed: 27.05.2026).

2 Statistical Review of World Energy 2025. 74th ed. London: Energy Institute; 2025. 72 p. Available at: https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmgsites/sg/pdf/2025/08/2025-statistical-review-of-world-energy.pdf (accessed: 27.05.2026; Global Energy Review 2025. Paris: IEA; 2025. 42 p. Available at: https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025 (accessed: 27.05.2026); World Energy Outlook 2025. Paris: IEA; 2025. 518 p. Available at: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025 (accessed: 27.05.2026).

Таблица 1
Сводная карта аргументов

Table 1
Summary chart of arguments

Блок	Ключевой тезис	Практическое значение для России
Мировой баланс	Органическое топливо сохраняет доминирующее положение при росте ВИЭ	Не строить стратегию на преждевременном отказе от нефтегазовой и угольной базы
Газ	Россия имеет качественное преимущество за счет крупных запасов природного газа	Развивать СПГ, газохимию, внутреннюю газификацию и восточные рынки
Уголь	Проблемы отрасли связаны прежде всего с тарифами, логистикой, санкциями и валютой	Настраивать тарифы и экспортные коридоры, стимулировать эффективные предприятия
США	Сланцевая добыча является инструментом рыночного и геополитического влияния	Учитывать ценовую конкуренцию и развитие СПГ как долгосрочный фактор
Дедолларизация	Расчеты за энергоресурсы фрагментируются	Создавать платежную, страховую и логистическую инфраструктуру вне уязвимых контуров
Будущие технологии	Термоядерный синтез и новые источники важны, но не заменят базовую энергетику мгновенно	Использовать ресурсный лаг для инвестиций в науку и технологический суверенитет

логистической и ценовой конкуренции между собственными компаниями.

Геополитическая нестабильность обнажила риски избыточной зависимости от одного источника или маршрута. Европа пересмотрела планы, усилив СПГ-направление и диверсификацию; Китай и Индия сохраняют значительные объемы импорта углеводородов, несмотря на развитие ВИЭ; Ближний Восток инвестирует в переработку. В этих условиях российская стратегия должна базироваться на диверсификации рынков, создании резервных маршрутов и развитии собственного флота, чтобы минимизировать риски и обеспечить технологическое обслуживание цепочек поставок.

Ключевые аргументы, представленных рассуждений, и их практическое значение для России систематизированы в табл. 1.

Заключение

Практические выводы и ценность подхода: ценность предлагаемого подхода состоит в интеграции ресурсного, технологического, финансового и геополитического анализа. Мировая энергетика сохранит смешанный баланс, а углеводороды – системообразующую роль на десятилетия вперед.

Ключевые выводы:

1. Газ – центральный ресурс переходной эпохи, ориентированный на глубокую переработку и внутреннее развитие.
2. Уголь требует адресной поддержки и тарифной настройки, увязанной с импортозамещением оборудования.
3. Геополитика и финансы являются неотъемлемой частью энергобаланса: валюты расчетов, страхование и платежные системы сопоставимы по значимости с себестоимостью добычи.
4. Технологический суверенитет (в области СПГ, атома, цифровых систем и термоядерных исследований) становится главным условием долгосрочной энергонезависимости.
5. Стратегическая задача России – использовать ресурсную базу для создания промышленной переработки и логистических альтернатив, не позволив идеологизированным сценариям «энергоперехода» разрушить действующую энергетическую основу.

Главный управленческий смысл заключается в балансовом реализме: Россия обязана использовать текущие преимущества для финансирования будущих технологий, сохраняя роль углеводородов

Список литературы / References

1. Смил В. Энергия и цивилизация. *От первобытности до наших дней*. М.: Эксмо; 2020. 480 с.
2. Грунь В.Д., Лунев В.Г., Рожков А.А., Сарычев А.Е., Скрыль А.И. *Угледобыча в России: история и современность в событиях и лицах*. М.: Редакция журнала «Уголь»; 2024.
3. Бессель В.В. Роль углеводородов в системе трансформации глобальной энергетики [видео лекция]. Открытый лекторий. 25 марта 2025 г. Режим доступа: https://rutube.ru/video/3c67741f7a97e8583a12b120950aeb6d/ (дата обращения: 14.05.2026).
4. Краснянский Г.Л., Сарычев А.Е., Скрыль А.И. *Экономические кризисы и уголь России*. М.: НИТУ МИСИС; 2017. 77 с. Режим доступа: 335 с. https://rosugol.ru/upload/pdf/Сарычев%20block2.pdf (дата обращения: 14.05.2026).
5. Мартынов В.Г., Бессель В.В., Лопатин А.С., Мингалеева Р.Д. Прогнозирование глобального энергопотребления на среднесрочную и долгосрочную перспективы. *Нефтяное хозяйство*. 2022;(8):30–34. https://doi.org/10.24887/0028-2448-2022-8-30-34
Martynov V.G., Bessel V.V., Lopatin A.S., Mingaleeva R.D. Global energy consumption forecasting for the medium and long term perspective. *Neftyanoe Khozyaystvo*. 2022;(8):30–34. (In Russ.) https://doi.org/10.24887/0028-2448-2022-8-30-34

Информация об авторе
Богданова Олеся Сергеевна – кандидат политических наук, помощник Президента, Ассоциация «Некоммерческое партнерство «Горнопромышленники России», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: BOS2404@yandex.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 10.08.2026
Поступила после рецензирования: 17.09.2026
Принята к публикации: 18.09.2026

Information about the author
Olesya S. Bogdanova – Cand. Sci. (Polit.), Assistant to the President, Association “Non-commercial partnership “Mining Industrialists of Russia”, Moscow, Russian Federation; e-mail: BOS2404@yandex.ru

Article info
Received: 10.08.2026
Revised: 17.09.2026
Accepted: 18.09.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-82-89

Методология комплексной оценки эффективности работы предприятий горной промышленности России

Н.Ю. Чернегов[1, 2] ✉, А.В. Овсянникова[3], И.Х. Утакаева[3]
[1] Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Российская Федерация
[2] Московский инновационный университет, г. Москва, Российская Федерация
[3] Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация
✉ chernick@mail.ru

Резюме: Цель исследования – оценка комплексной экономической эффективности работы горных предприятий России, ее значение с позиций хозяйствующих субъектов комплекса, смежных отраслей экономики, государства, общества и природной среды. Выполнено сопоставление трактовок этой категории, сделан вывод об упрощенном подходе к оценке эффективности работы минерально-сырьевого комплекса России с позиций предприятий и экономики страны. Показана взаимосвязь целей развития государства, природной среды, экономических субъектов и общества, для которой недостаточно формальной финансовой оценки. Действующая на практике оценка эффективности приводит к росту затрат и снижению темпов развития экономики страны, поэтому исследование отличает от других разработок системный подход. Он стал методом построения комплекса элементов эффективности. Отражено содержание технологических, экологических, социально-экономических факторов минерально-сырьевого комплекса в сочетании с финансовыми показателями деятельности. Эти составляющие работы горных предприятий России потребовали разработки принципиально нового методологического подхода к комплексной оценке эффективности их деятельности. Учтены также различия в эффективности с позиции предприятий и экономики страны. Разработана система элементов оценки эффективности работы предприятий минерально-сырьевого комплекса РФ. Также смоделированы наиболее значимые параметры, качественно либо количественно характеризующие каждый элемент. Приведена схема интегральной оценки данной совокупности элементов и их индикаторов. Предложенная система элементов оценки эффективности горных предприятий и подход к оценке народнохозяйственной эффективности включают в себя учет наиболее значимых аспектов недропользования – технологический, экологический, социально-экономический финансовый, бюджетный. Сделан вывод о необходимости использования данного подхода в практической деятельности предприятий и национальной экономике.

Ключевые слова: горнодобывающие предприятия, минерально-сырьевой комплекс, полезные ископаемые, отходы горного производства, экологическое благополучие, комплексная оценка эффективности, технологии переработки, минеральное сырье

Для цитирования: Чернегов Н.Ю., Овсянникова А.В., Утакаева И.Х. Методология комплексной оценки эффективности работы предприятий горной промышленности России. *Горная промышленность*. 2026;(5):82–89. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-82-89

Methodology of comprehensive efficiency assessment of Russian mining companies

N.Y. Chernegov[1, 2] ✉, A.V. Ovsyannikova[3], I.Kh. Utakaeva[3]
[1] Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russian Federation
[2] Moscow Innovative University, Moscow, Russian Federation
[3] Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation
✉ chernick@mail.ru

Abstract: The purpose of the study is to assess the integrated economic efficiency of the Russian mining companies, its importance from the perspective of the economic entities of the industry, the related sectors of the economy, the state, the society and the natural environment. A comparison of interpretations of this category has been carried out, and a conclusion has been drawn about a simplified approach to assessing the efficiency of the Russian mineral resource complex from the perspective of the companies and the country's economy. The interrelation between the development goals of the state, the natural environment, the economic entities and the society is shown, for which a formal financial assessment is not sufficient. The currently used efficiency assessment leads to an increase in costs and a decrease in the pace of development of the country's economy, therefore, the study differs from other developments in its system-based approach. This approach has become a method of building a set of the efficiency elements. The content of technological, environmental, social and economic factors of the mineral resource complex is described in combination with its financial performance indicators. These components in operation of the Russian mining companies required the development of a fundamentally new methodological approach to a comprehensive efficiency

assessment of their activities. Differences in the efficiency are also taken into account from the perspective of companies and the country's economy. A system of elements has been developed for evaluating the efficiency of companies in the mineral resource complex of the Russian Federation. The most significant parameters are also modeled that characterize each element qualitatively or quantitatively. A scheme is provided for integrated evaluation of this set of elements and their indicators. The proposed system of elements for assessing the efficiency of mining companies and the approach to assessing national economic efficiency include a consideration of the most significant aspects of subsurface use, i.e. the technological, environmental, socio-economic, financial, budgetary ones. Conclusions are made on the need to use this approach in practical activities of the companies and the national economy.

Keywords: mining companies, mineral resources sector, useful minerals, mining waste, environmental well-being, comprehensive performance evaluation, processing technologies, mineral resources

For citation: Chernegov N.Y., Ovsyannikova A.V., Utakaeva I.Kh. Methodology of comprehensive efficiency assessment of Russian mining companies. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):82–89. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-82-89

Введение

Минерально-сырьевой комплекс (МСК) – важнейшая часть экономики России, основа материального производства. Так, в стоимостном эквиваленте вклад предприятий МСК в развитие национальной экономики составляет 20% ВВП[1]. Без эффективной деятельности горных предприятий не могут работать промышленность, предприятия сопряженных отраслей, другие сектора экономики, жить и трудиться население страны. Комплекс решает ряд стратегически важных задач и, даже несмотря на убытки ряда предприятий МСК, складывающиеся под влиянием комплекса факторов, он обеспечивает продукцией все сектора экономики страны [1].

Эффективность деятельности экономических субъектов различных секторов и экологические показатели состояния территорий во многом определяются природными и технолого-экономическими условиями работы предприятий МСК, разнородными затратами и результатами деятельности комплекса. Наибольшие различия вносятся содержательными технолого-экономическими взаимосвязями между различными секторами экономики, для обеспечения деятельности каждого из которых предприятия горнопромышленного комплекса поставляют свою продукцию. На рис. 1 укрупненно показана зависимость от продукции МСК всех секторов экономики России при создании широкой номенклатуры конечной продукции с высокой добавленной стоимостью.



Рис. 1
Роль минерального сырья в создании всех видов конечной продукции

Fig. 1
The role of mineral resources in the manufacturing of all types of end products

С формальной точки зрения экономические взаимоотношения данного комплекса участников протекают в нормальной экономической среде. Однако конкуренции как противоречию интересов всех элементов хозяйственной системы противостоит их совместная заинтересованность в эффективной работе МСК. Это обусловлено тем, что минерально-сырьевой комплекс является мультипликатором высокой доходности и результативности сферы производства и сферы потребления.

Горные предприятия также потребляют значительный объема материальных, трудовых, финансовых, природных и других видов ресурсов. Поэтому рост текущих и капитальных затрат горных предприятий под влиянием комплекса природных и внешних факторов вызывает мультипликативный ценовой эффект во всей экономике. Это негативно отражается на производственно-технологических и финансовых результатах предприятий МСК, стоимости их конечной продукции, экологическом благополучии регионов страны и ряде макроэкономических показателей экономики страны (рис. 1). В их числе – снижение доходов бюджетов всех уровней, рост уровня цен, снижение объемов производства продукции и др. Поэтому эффективность работы МСК России имеет приоритетное значение для успешной работы предприятий всех отраслей, и со стороны государства должно уделяться особое внимание условиям работы горной промышленности.

Эффективность как таковая и эффективность производства в горной промышленности на практике – содержательно разные категории, поскольку затраты и результаты работы горных предприятий многокомпонентны и неоднородны. Их выражение в стоимостном эквиваленте для расчета эффективности в процентах – опрощение, не учитывающее многих природных, производственно-экономических, социальных процессов и состояния бюджета страны. И этот комплексный показатель требует корректной оценки деятельности горных предприятий для сбалансированного и гармоничного развития экономики России.

Понятия эффективности и эффективности производства появились относительно недавно. В начале XX в. их ввел в оборот итальянский социолог и экономист Вильфредо Патето. Ранее К. Маркс приводил цитату Т.Д. Даннинга о доходности капитала, проводя аналогию с эффективностью производства: «но раз имеется в наличности достаточная прибыль, капитал становится смелым. ... при 300% нет такого преступления, на которое он не рискнул бы, хотя бы под страхом виселицы.» [2, pp. 35–36].

В. Парето утверждал, что эффективность – то состояние системы, при котором ни один показатель не может быть улучшен за счет ухудшения других показателей, должно достигаться максимально полное удовлетворение потреб-

1 Новак: доля ТЭК в ВВП России в 2024 году составила порядка 20%. 30.01.2025. Режим доступа: https://nangs.org/news/economics/novak-dolya-tek-v-vvp-rossii-v-2024-godu-sostavila-poryadka-20#:~:text=МОСКВА%2C%2030%20января.,с%2058%25%20до%2051%25 (дата обращения: 05.10.2025).



Рис. 2
Взаимосвязь природной среды и основных экономических субъектов, заинтересованных в эффективной работе горных предприятий

Fig. 2
Interrelations between the natural environment and the key economic actors with a stake in the efficient operation of mining enterprises

ностей всех участников без ущерба для окружающей среды, то есть с учетом интересов всех участников экономических процессов природы и общества. Такого полностью идеального состояния народнохозяйственного комплекса без ущерба для экологии достичь в практике работы горных предприятий, безусловно, невозможно, однако стремиться к этому следует, поскольку возможность есть, и ученый ее обозначил. Так, эффективность производства В. Парето охарактеризовал как относительный показатель, показывающий превышение результатов работы предприятия над его затратами с учетом условия ограниченности ресурсов. Он считал, что эффективная работа требует максимальной отдачи от средств труда, то есть высокой фондоотдачи и применения наиболее эффективных технологий [3, с. 246]. Примерно тех же взглядов придерживались многие экономисты XX в. Так, П. Самуэльсон и П. Нордхаус считали, что экономическая эффективность – получение максимума возможных благ путем использования имеющихся ресурсов. Чем больше сумма вкладов отдельных экономических субъектов, тем больше общественное благо, в том числе ресурсов природы [4].

В связи с этим рассмотрим интересы экономических субъектов в эффективности работы МСК. Отчасти они противоречат друг другу, однако зависят от стоимости продукции минерально-сырьевого комплекса. В действительности минерально-сырьевой комплекс не может максимально полно и в равной степени эффективно удовлетворить потребности всех субъектов экономики и общества. Конкуренция как противоречие экономических и иных интересов, вмешательство в недра всегда будут иметь место. Цели всех элементов природы, общества и хозяйствующих субъектов также будут отличаться. Поэтому комплексная оценка эффективности – с точки зрения предприятий и национальной экономики требует установления и анализа интересов основных групп субъектов, взаимодействующих с МСК (рис. 2).

Данная система взаимосвязей и взаимозависимостей субъектов национальной экономики, государства, природной среды достаточно сложна, неоднородна и динамична. Так, поставщики горных предприятий являются одновременно потребителями их продукции, а минерально-сырьевой комплекс прямо либо опосредованно взаимодействует со всеми субъектами, а также природной средой. И при оценке эффективности должен быть учтен баланс интересов всех субъектов, а эффективность работы предприятий МСК следует расценивать как экономическую целесообразность. Ее количественное выражение в общепринятой терминологии принято называть экономической эффективностью, методики расчета которой сегодня в подавляющем большинстве случаев учитывают лишь одну сторону работы – финансовые результаты.

Материалы и методы

При оценке эффективности должен быть учтен баланс интересов всех субъектов, и эффективность работы предприятий МСК следует расценивать как экономическую целесообразность. Ее количественное выражение в общепринятой терминологии принято называть экономической эффективностью, методики расчета которой учитывают лишь одну сторону работы – финансовые результаты.

В зависимости от целей анализа результатами и затратами могут быть выбраны различные показатели. Основные показатели эффективности:

– абсолютный экономический эффект (его единицы измерения могут быть разными и могут не сводиться сугубо к денежной оценке)

$$Эа = \text{Результаты} - \text{Затраты};$$

– относительная эффективность

$$Эо = \frac{(\text{Результаты} - \text{Затраты})}{З} * 100\%;$$

– удельная эффективность

$$Эу = \frac{(\text{Затраты} - \text{Результаты})}{Р} * 100\%.$$

В практике работы финансовых служб для оценки финансовой эффективности работы горных предприятий затраты и результаты учитываются только в стоимостном выражении и рассчитываются как показатели рентабельности различных видов. Основные из них:

– рентабельность продукции (предприятия, производства), рассчитываемая как:

$$\mathbf{R}пр = \frac{П}{С\ (пр.затраты)} * 100\%;$$

– рентабельность фондов, рассчитываемая как:

$$\mathbf{R}ф = \frac{Пч}{(\text{Среднегодовая сумма осн.средств и запасов})} * 100\%;$$

– рентабельность продаж, рассчитываемая как:

$$\mathbf{R}продаж = \frac{П}{В\ (Выручка)} * 100\%.$$

Для оценки эффективности использования других активов и сторон деятельности предприятий применяется также расчет и других видов рентабельности.

Результаты

Однако исключительно стоимостное и долевое выражение прибыли и эффективности выхолащивает содержание разнородных затрат и результатов работы предприятий горной промышленности, а также их роли в развитии национальной экономики. Для анализа вклада работы МСК и влияния эффективности работы предприятий комплекса на результаты работы других секторов экономики рассмотрим показатели работы предприятий страны. Основные индикаторы состояния экономики России, актуализирующие вопрос комплексной оценки эффективности работы горных предприятий, состоят в следующем:

1. С 2018 по 2025 г. годовой ВВП России увеличился практически вдвое – в 2025 г. он превысил 200 трлн руб. – наша

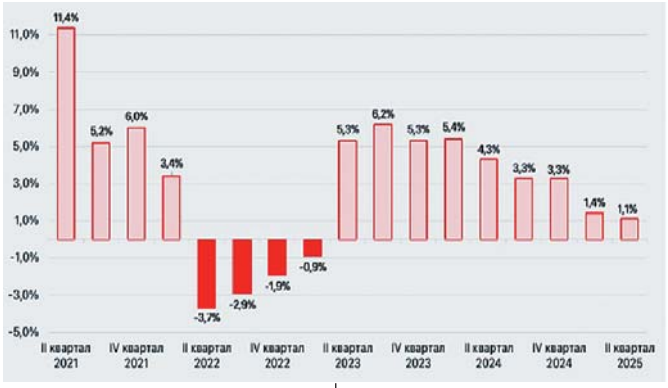


Рис. 3
Динамика значений роста ВВП России в 2021–2025 гг.
Источник: ВВП России во II квартале 2025 года вырос на 1,1% – хуже прогнозов. Режим доступа: https://alfabank.ru/alfa-investor/t/vvp-rossii-vo-ii-kvartale-2025-goda-vyros-na-1-1-huzhe-prognozov/ (дата обращения: 05.10.2025).

Fig. 3
Changes in Russia's GDP growth rates, 2021–2025
Source: Russia's GDP grew by 1.1% in the Q2, 2025, which is below the forecasts. (In Russ.) Available at: https://alfabank.ru/alfa-investor/t/vvp-rossii-vo-ii-kvartale-2025-goda-vyros-na-1-1-huzhe-prognozov/ (accessed: 05.10.2025).

страна по показателю ВВП (по ППС) занимает четвертое место в мире. Однако в 2025 г. темп роста данного показателя существенно сократился – при дефиците бюджета 2,6% рост ВВП составил 1%, хотя 2024 г. экономика страны завершила с тем же показателем на уровне 4,3% (рис. 3).

2. Объем промышленного производства в во втором полугодии 2024 г. и 1-м квартале 2025 г. последовательно снижался, более всего – в добывающей сфере, энергетике и транспорте, то есть секторах, тесно связанных с работой минерально-сырьевого комплекса (табл. 1).

Третий квартал 2025 г. российский бизнес завершил с убытками в объеме 6,52 трлн руб. – убытки увеличились на 11% по отношению к аналогичному периоду 2024 г. Сальдированная прибыль российских предприятий снизилась на 7,7% в сравнении с тем же периодом 2024 г.

Важно то, что наибольшие убытки понесли стратегически значимые для экономики страны предприятия – 68,1% угледобывающих компаний, 54,7% предприятий, обеспечивающих социально-экономическую деятельность страны энергией, газом, паром. Также велика доля (52,9%) убыточных производств в лесозаготовке, добыче нефти (48,1%). Как следствие данных тенденций, до 44% выросла доля убыточных организаций в финансовой и страховой деятельности, а также НИОКР. Кроме того, актуальной стала проблема неплатежей со стороны контрагентов – объем дебиторской задолженности предприятий резко возрос [5]. Рост просроченной задолженности организаций при высокой долговой нагрузке и низких темпах экономического роста повышает риски массовых банкротств и значимость механизмов финансового оздоровления бизнеса [6].

3. Особенность предприятий недропользования состоит в том, что они добывают и перерабатывают сырьё, работая непосредственно в природной среде, оказывая на нее непосредственное и практически всегда вредное воздействие, и экологическая составляющая является одним из важнейших показателей их эффективности. Основные показатели состояния природной среды, в которой работают предприятия МСК, неоднородны. Наряду со снижением выбросов в промышленности, объем отходов, наибольший вес в составе которых занимают отходы предприятий МСК, продолжает расти (рис. 4, 5).

В период 2022–2024 гг. промышленные предприятия страны ежегодно производили и складировали в отвалы

Таблица 1
Динамика объемов промышленного производства в 2024–2025 гг., %

Table 1
Changes in industrial production volumes in 2024–2025, %

Показатели	Период	
	март 2025 – март 2024	1-й квартал 2025 – 1-й квартал 2024
Промпроизводство	0,8	1,1
добывающая промышленность	–4,1	–3,7
обрабатывающая промышленность	4,0	4,7
Розничная торговля	2,2	3,2
продовольственные товары	3,4	4,2
непродовольственные товары	1,0	2,3
Оптовая торговля	–3,0	–2,1
Общественное питание	8,0	7,1
Платные услуги	2,1	2,4
Грузооборот транспорта	-0,3	–0,6
Сельское хозяйство	1,6	1,7
Строительство	2,6	6,9

Источник: Trading Economics. Режим доступа: https://ru.tradingeconomics.com/russia/gdp (дата обращения: 05.10.2025).
Source: Trading Economics. (In Russ.) Available at: https://ru.tradingeconomics.com/russia/gdp (accessed: 05.10.2025).

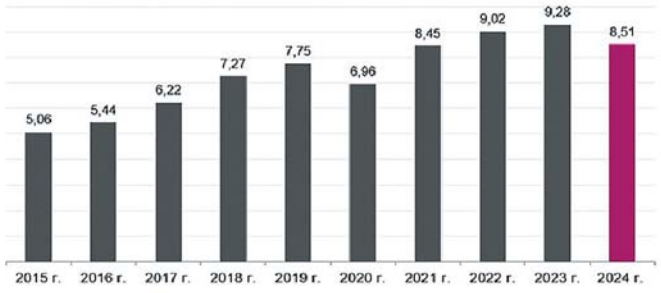


Рис. 4
Динамика объема формирования отходов предприятий России в 2015–2024 г., млрд т

Fig. 4
Changes in waste generation by Russian enterprises in 2015–2024, billion metric tons

около 9,0 млрд т отходов, лишь часть которых были утилизированы либо переработаны. В 2024 г. из общего объема отходов 7,5 млрд т составили отходы горного производства, связанные с образованием отвалов, опасных по содержанию, а утилизировано – не более трети данного объема [5]. Это отражается на качестве жизни населения и противоречит национальным целям России. Положительная динамика 2024 г. снижения объема отходов на 8,5% по сравнению с 2023 г. носит условный характер и частично связана с изменением методики отнесения отходов к побочной продукции. Именно поэтому деятельность МСК требует системного подхода при оценке эффективности работы отдельных предприятий и всего комплекса.

В ряде регионов страны также остаются проблемы с качеством воздуха, загрязнением водоемов – так, в 2022 г. зафиксирован максимальный уровень загрязнения пресных вод. Кроме того, по данным Росгидромет, во многих случаях в пресных водах была существенно превышена ПДК опасных и тяжелых веществ, связанных с деятельностью горнопромышленного комплекса[2].

2 Количество сильных загрязнений рек и озер в России выросло на 9% в 2022 году. ТАСС. 2023. 29 мая. Режим доступа: https://tass.ru/obschestvo/17866915 (дата обращения: 01.10.2025).

Доля природных ресурсов в составе конечной продукции (в среднем по отраслям горной промышленности) – около 3–5% от всего объема извлекаемой горной массы. В результате дисбаланса между целью и средствами в МСК работа предприятий комплекса имеет невысокую эффективность. Привычные методы поиска путей роста эффективности не приносят желаемого эффекта. Именно поэтому финансовые, а также экологические аспекты эффективности работы горных предприятий требуют технологических и организационных инноваций на предприятиях МСК и сопряженных отраслей. Внедрение природоподобных и ресурсосберегающих технологий уже обозначено в качестве приоритетных направлений работы российских предприятий на уровне программных документов государства, однако пока не стало распространенной практикой.

4. В период 2014–2025 гг. проблему обеспечения предприятий МСК необходимым оборудованием и технологиями усугубили внешнеполитические факторы – незаконные ограничительные меры, принявшие системный характер. В сочетании с террористическими актами со стороны недружественных государств в отношении объектов, связанных с хранением, логистикой и переработкой продукции ТЭК, государству и предприятиям комплекса потребовалось искать принципиально новые решения в данной сфере. Во всех случаях они потребовали привлечения либо заимствования ресурсов для разработки и создания новых технологий и оборудования. Однако денежно-кредитная политика Банка России, действовавшая в течение 2022–2025 гг. и не завершившаяся ощутимым снижением ключевой ставки, уже долго не позволяет предприятиям МСК ставить долговременные цели и эффективно использовать заемные ресурсы. Как следствие, это сказалось на снижении объемов промышленного производства в России в 2024–2025 гг. (рис. 5)[3].

В начале 2026 г. под влиянием данных изменений российский бизнес поднял цены на 10–20%[4]. Это стало результатом ценового мультипликативного эффекта, о котором упомянуто выше, – за счет роста производственных затрат предприятий и увеличения налоговой нагрузки, прежде всего в горной промышленности. Начатый в 2025 г. очередной этап налоговой реформы, затронувший в том числе налог на прибыль организаций, проводится без утвержденной концепции и решает преимущественно тактические фискальные задачи [7].

Таким образом, в период 2022–2025 гг. объемные и технолого-экономические показатели работы промышленных предприятий России, в первую очередь добывающих и энергетических компаний, существенно повлияли на эффективность функционирования всей национальной экономики. Это связано с ролью минерального сырья в процессе формирования всей номенклатуры продукции, производимой во всех секторах экономики.

Рассмотрим приоритетность работы предприятий различных отраслей с точки зрения экономики страны – значение материальной базы производства неизменно. Так, доклад И.В. Сталина об итогах первой пятилетки, когда ежегодный рост промышленного производства составлял 22%, содержал обоснованную аргументацию в пользу приоритетного создания целых отраслей экономики и приоритетного развития индустриального сектора. В докладе, в частности, говорилось: «На рентабельность нельзя смотреть торгашески, с точки зрения данной минуты. Рентабельность надо брать с точки зрения общенародного хозяйства в разрезе нескольких лет. Если смотреть на рентабельность в разрезе значения прибыльных отраслей, то мы должны были бы развивать вовсю лишь некоторые отрасли промышленности, дающие наибольшую ренту. Но, во-первых, они не могут быть развиты без оборудования и топлива, которые дает им тяжелая индустрия. Во-вторых, на них невозможно базировать индустриализацию» [8, с. 161–215]. Доклад содержит также много примеров работы в ту пору еще нерентабельных предприятий и отраслей. Однако само создание крупных заводов, освоения угольных месторождений, строительства металлургических комбинатов, ЛЭП, ряда отраслей промышленности позволило стране стать мощной промышленной державой.

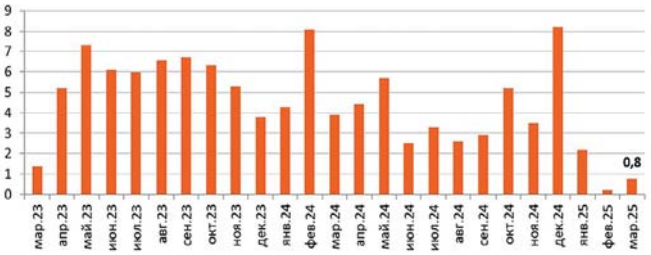


Рис. 5
Динамика промышленного производства в 2023–2025 гг.

Fig. 5
Changes in industrial production in 2023–2025

Такой вклад предприятий промышленного сектора экономики подчеркивает особое значение МСК и смежных производств при оценке эффективности их работы. Их эффективность и влияние на развитие экономики всей страны невозможно высчитать напрямую – необходимо учитывать всю специфику их работы: географию, природные свойства полезных ископаемых, уровень применяемых технологий, цену и ценность минерального сырья, а также многие другие аспекты.

В результате данного анализа установлены ключевые аспекты, определяющие корреляцию параметров работы национальной экономики и минерально-сырьевого комплекса. Наиболее значимыми элементами эффективности предприятий горной промышленности являются:

– финансовые показатели;

– технологические (производственно-технические) параметры;

– бюджетная эффективность, отражающая налоговые поступления от недропользования в бюджеты всех уровней [9; 10];

– социально-экономические показатели;

– экологическая эффективность, влияющая в том числе на инвестиционную привлекательность компаний добывающего и металлургического секторов [11; 12].

Для оценки результативности собственной работы либо части активов и для целей финансовой отчетности экономическую эффективность работы предприятия МСК могут и должны рассчитывать показатели рентабельности различных видов. Однако в современных условиях для оценки эффективности предприятий МСК с позиций национальной экономики необходим комплексный подход. В представленной системе основных элементов экономической эффективности предприятий минерально-сырьевого комплекса отдельные аспекты разделены условно, поскольку данный подход отражает интересы всех субъектов хозяй-

3 ПРОЕКТ ARSAGERA.RU. Режим доступа: bf.arsagera.ru (дата обращения: 01.03.2025).

4 После повышения налогов бизнес нарастил цены. Финмаркет. 2026. 20 января. Режим доступа: https://www.finmarket.ru/main/article/6545644 (дата обращения: 01.03.2025).

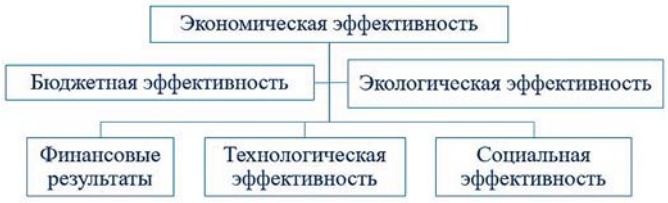


Рис. 6
Элементы комплексной эффективности горных предприятий России

Fig. 6
Components of the integrated efficiency of the Russian mining enterprises

ствования с позиций национальной экономики и самих предприятий МСК (рис. 6).

Если экономическая эффективность предприятий МСК синтезирует именно указанные элементы и их интересы, то каждый из них можно рассчитать при помощи системы ключевых индикаторов для расчета интегрального показателя эффективности. Каждый из них можно оценить по набору индикаторов, свойственных определенному элементу эффективности. В наиболее общем виде система элементов комплексной эффективности и их ключевых индикаторов показана в табл. 2. В практической работе и при построении модели оценки эффективности данную систему необходимо наполнить конкретными показателями – индикаторами и их удельным весом.

Обсуждение результатов

На основе данного подхода для оценки комплексной эффективности предприятий МСК предложен следующий алгоритм:

1. Для каждого элемента комплексной эффективности необходимо разработать соответствующую систему ключевых индикаторов. Для разных предприятий они могут отличаться, а для оценки эффективности работы комплекса в разрезе национальной экономики разработать и обосновать единую систему индикаторов;

2. На основе состава набора индикаторов для каждого элемента следует установить и обосновать удельный вес элементов и их индикаторов;

3. В метрологической модели необходимо обобщить значения каждого элемента оценки экономической эффективности предприятий минерально-сырьевого комплекса для расчета интегрального значения.

При оценке содержания данного подхода следует учитывать сплетение нелинейных и неочевидных связей, далеких от расчета коэффициентов рентабельности. Они состоят в следующем:

1. Различные грани (элементы) комплексной эффективности горных предприятий формально могут противоречить друг другу. Так, получение существенного финансового результата и высокой социальной эффективности, на первый взгляд, находятся в противоречии. Технологическая, бюджетная эффективность для получения наибольшей прибыли – также неочевидные приоритеты для повышения финансовой эффективности. Первая – в силу отвлечения финансовых ресурсов, их стоимости и объема, вторая – по причине ряда ограничений в финансовой и производственной деятельности предприятий МСК.

2. Для различных отраслей горной промышленности, природных условий, регионов, логистики и других факторов комплекс элементов эффективности, их удельный вес может быть различным – как следствие, система индикаторов также окажется разной. Эти показатели необходимо разрабатывать для оценки эффективности работы каждого предприятия МСК – интересы конкретных предприятий МСК и интересы национальной экономики формально также различны. На рис. 1 приведены неразрывные взаимосвязи секторов и субъектов экономики, объединяющие производственно-технологические, организационные и финансовые процессы в народнохозяйственном комплексе государства. Они требуют учета интересов государства для эффективного развития, интересов общества, природной среды и всех экономических субъектов. При снижении стоимости продукции предприятий МСК снижаются производственные затраты и цены в смежных отраслях. Как следствие, горнопромышленный комплекс, крупный потребитель данной продукции, несет меньшие расходы. Если же в качестве приоритетной цели выдвигать финансовую эффективность в форме рентабельности, будущее горной промышленности может быть чревато технологической стагнацией, неспособностью внедрять новые методы освоения месторождений и организации труда, привлекать квалифицированные кадры. Также возрастает риск негативного воздействия на окружающую среду (НВОС), что влечет сегодня высокие штрафные санкции. В связи с указанными факторами при оценке комплексной экономической эффективности горных предприятий необходимо учитывать все аспекты их деятельности, какими бы противоречивыми они не казались. Тем не менее возможна разработка двух моделей расчета

Таблица 2
Система элементов экономической эффективности

Table 2
A system of the economic efficiency components

Ключевые элементы комплексной эффективности	Удельный вес элемента в составе комплексной эффективности	Основные показатели (индикаторы) элемента	Удельный вес / значение показателя	Интегральное значение
1	2	3	4	5
Технологическая (производственная) эффективность	УВтэ	$Iтэ_1$	$УВП_1$	
		$Iтэ_2$	$УВП_2$	
		$Iтэ_3$	$УВП_3$	
		$Iтэ_4$	$УВП_4$	
		$Iтэ_5$	$УВП_5$	
Экологическая эффективность	УВээ	$Iээ_1$	$УВП_1$	
		$Iээ_2$	$УВП_2$	
		$Iээ_3$	$УВП_3$	
		$Iээ_4$	$УВП_4$	
		$Iээ_5$	$УВП_5$	
Социальная эффективность	УВсэ	$Iсэ_1$	$УВП_1$	
		$Iсэ_2$	$УВП_2$	
		$Iсэ_3$	$УВП_3$	
		$Iсэ_4$	$УВП_4$	
		$Iсэ_5$	$УВП_5$	
Финансовые результаты	УВфэ	$Iфэ_1$	$УВП_1$	
		$Iфэ_2$	$УВП_2$	
		$Iфэ_3$	$УВП_3$	
		$Iфэ_4$	$УВП_4$	
		$Iфэ_5$	$УВП_5$	
Бюджетная эффективность	УВбэ	$Iбэ_1$	$УВП_1$	
		$Iбэ_2$	$УВП_2$	
		$Iбэ_3$	$УВП_3$	
		$Iбэ_4$	$УВП_4$	
		$Iбэ_5$	$УВП_5$	

комплексной эффективности – для предприятий МСК и народнохозяйственной эффективности. В последней набор элементов и индикаторов эффективности окажется существенно шире [13–15].

Особого внимания заслуживает критерий результативности работы горных предприятий, которую часто используют в качестве синонима для обозначения эффективности. Однако результативность – степень достижения намеченных целей, и для оценки результативности работы приоритетны стратегическая цель и мера ее достижения. Затраты ресурсов во внимание не принимаются – они учитываются на этапе формулировки цели. Эффективность как отношение запланированных результатов (плановых показателей) к затратам является промежуточным этапом при постановке дерева целей и оценке результативности. По этой причине при обосновании удельного веса элементов эффективности предприятий горной промышленности в разрезе национальной экономики необходимо построение дерева целей и выделение приоритетов на качественном уровне. Опыт формирования системы критериев оценки результативности промышленной политики России показывает, что такие критерии целесообразно задавать в зонально-пороговом виде – с одним, двумя или несколькими пороговыми значениями для каждого показателя [16].

Значимым моментом в реализации подхода является набор индикаторов каждого элемента эффективности. Рассматривая эту категорию традиционным способом – в виде отношения результатов к затратам, можно остановиться на стандартном наборе финансовых показателей. Однако показатели работы предприятий МСК имеют разное качество, и не все из них можно отнести строго к затратам или результатам и на этой основе рассчитать рентабельность. Первая часть из них имеет стоимостное, денежное выражение. Это – себестоимость, выручка, прибыль и другие финансовые показатели, которые отражены в документах финансовой отчетности.

Вторая часть – экономические показатели эффективности, которые обладают разнородным характером. Они имеют разные единицы измерения и отражают эффективность использования отдельных видов ресурсов, а также взаимодействия горных предприятий с природной средой и экономическими субъектами.

Основные качественные показатели, относящиеся к различным элементам эффективности:

– ритмичность, стабильность, непрерывность работы;

– уровень используемых технологий;

– конкурентоспособность и потребительские свойства продукции;

– комплексность освоения недр;

– своевременность и объем расчетов с бюджетами, сотрудниками;

– частные показатели, индикаторы.

Заключение

Комплексное развитие экономики – не только сложное, но и сложенное развитие. Оно складывается из различных аспектов жизни людей, работы предприятий всех секторов экономики, функционирования государства, состояния природной среды, финансового и технологического обеспечения предприятий горной промышленности. Развитие экономики страны и экономических субъектов может быть достигнуто при учете взаимозависимости каждого участника общества и природы и каждого элемента эффективности работы горных предприятий.

Приоритетное развитие для обеспечения всех отраслей экономики сырьем имеют базовые сектора экономики, поставляющие сырье и продукты его переработки. Особую роль играют предприятия горной промышленности, продукция которых обеспечивает условия работы всех секторов. И баланс интересов всех сторон может быть соблюден при учете взаимозависимости общества, государства, экономических субъектов и природы. Поэтому для оценки экономической эффективности предприятий горной промышленности авторам предстоит обосновать систему индикаторов на базе предложенного подхода, а также разработать инструмент – метрологическую модель оценки эффективности их работы. Не менее важно выполнить аналогичную работу для оценки эффективности предприятий МСК в разрезе национальной экономики.

Список литературы / References

1. Ципотан Д. Кризис в угольной отрасли – 2025: предпосылки и меры поддержки. *Добывающая промышленность*. 2025;(4):130–132. Режим доступа: https://dprom.online/mining/kreezees-v-ugolnoyi-otraslee-2025-predposilke/ (дата обращения: 05.10.2025).
   Tsipotan D. The 2025 crisis in the coal industry: causes and support measures. Dobyvayushchaya promyshlennost. 2025;(4):130–132. (In Russ.) Available at: https://dprom.online/mining/kreezees-v-ugolnoyi-otraslee-2025-predposilke/ (accessed: 05.10.2025).
2. Dunning T.J. *Trade's Unions and Strikes: Their Philosophy and Intention*. London; 1860. 52 p. Available at: https://dn790007.ca.archive.org/0/items/tradesunionsstri00dunnrich/tradesunionsstri00dunnrich.pdf (accessed: 05.10.2025).
3. Вильфредо П. *Учебник политической экономии*. 2-е изд. М.: РИОР; ИНФРА-М; 2018. 591 с.
4. Самуэльсон П.А., Нордхаус В.Д. Экономика. 18-е изд. М.: Вильямс; 2010. 1358 с.
5. Ситцевский И. Отходы российской промышленности превысили исторический максимум. *Ведомости*. 2024. 27 августа. Режим доступа: https://www.vedomosti.ru/esg/ecology/articles/2024/08/23/1057624-othodi-rossiiskoi-promishlennosti-previsili-istoricheskii-maksimum (дата обращения: 01.03.2025).
6. Кочетков Е.П. Трансформация теории финансового оздоровления организации в целях повышения реабилитационной эффективности процедур банкротства. *Финансы: теория и практика*. 2024;28(5):187–199. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2024-28-5-187-199
   Kochetkov E.P. Transformation of the theory of financial recovery of the organization as a factor in improving the rehabilitation effectiveness of bankruptcy procedures. *Finance: Theory and Practice*. 2024;28(5):187–199. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2024-28-5-187-199
7. Пансков В.Г. Налоговая реформа - 2025: продолжение следует…. *Экономика. Налоги. Право*. 2025;18(1):18–31. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-1-18-31
   Panskov V.G. Tax reform – 2025: to be continued…. *Economics, Taxes & Law*. 2025;18(1):18–31. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-1-18-31

8. Сталин И.В. *Сочинения*. М.: Гос. изд-во полит. лит.; 1951. Т. 13. 424 с.
9. Юмаев М.М. Налоговая политика в отношении нефтегазового сектора Российской Федерации в условиях структурных изменений мировой экономики. *Экономика. Налоги. Право*. 2023;16(1):152–162. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-1-152-162
Yumaev M.M. Tax policy in the oil and gas sector of the Russian Federation in the context of structural changes in the world economy. *Economics, Taxes & Law*. 2023;16(1):152–162. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-1-152-162
10. Камалетдинов А.Ш., Ксенофонтов А.А. Изменение структуры налоговых поступлений регионов России. *Финансы: теория и практика*. 2024;28(3):31–42. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2024-28-3-31-42
Kamaletdinov A.Sh., Ksenofontov A.A. Changes in the structure of tax revenues of russian regions. *Finance: Theory and Practice*. 2024;28(3):31–42. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2024-28-3-31-42
11. Чернегов Н.Ю., Пекова И.А., Франкевич Ж.А. Взаимосвязь ключевых элементов комплексной эффективности горных предприятий России. *Экономика строительства*. 2025;(6):303–306.
Chernegov N.Y., Pekova I.A., Frankevich Zh.A. Interrelation of key elements of integrated efficiency of Russian mining enterprises. *Construction Economics*. 2025;(6):303–306. (In Russ.)
12. Черникова Л.И., Егорова Д.А., Мелихов К.С., Ященко А.И. Взаимозависимость природоохранной деятельности и инвестиционной привлекательности: финансы российской металлургии. *Финансы: теория и практика*. 2023;27(4):42–53. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2023-27-4-42-53
Chernikova L.I., Egorova D.A., Melikhov K.S., Yashchenko A.I. The interdependence of environmental activities and investment attractiveness: finances of Russian metallurgy. *Finance: Theory and Practice*. 2023;27(4):42–53. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2023-27-4-42-53
13. Кучковская Н.В. Экономическая эффективность цифровой трансформации горнодобывающих предприятий в условиях технологической модернизации и решений Индустрии 4.0. *Горная промышленность*. 2025;(6):88–96. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-88-96
Kuchkovskaya N.V. Economic efficiency of digital transformation of mining companies in conditions of technological modernization and Industry 4.0 solutions. *Russian Mining Industry*. 2025;(6):88–96. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-88-96
14. Харченко К.В., Зубец А.Ж., Москвитина Е.И., Бабаян Л.М., Лаффах А.М. Анализ эффективности внедрения предиктивного обслуживания горнодобывающего оборудования на основе технологий Индустрии 4.0. *Горная промышленность*. 2024;(4):130–138. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-130-138
Kharchenko K.V., Zubets A.Zh., Moskvitina E.I., Babayan L.K., Laffah A.M. Analyzing the efficiency of implementing predictive maintenance of mining equipment based on Industry 4.0 technologies. *Russian Mining Industry*. 2024;(4):130–138. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-130-138
15. Еремин С.Г., Капитанец Ю.В., Зубенко А.В., Бартошевич И.А., Кущёв Н.П. Анализ влияния внедрения автоматизированных систем управления горным производством на эффективность и безопасность работы горнодобывающих предприятий России. *Горная промышленность*. 2024;(5):101–107. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-101-107
Eremin S.G., Kapitanets Yu.V., Zubenko A.V., Bartoshevich I.A., Kushchev N.P. Analyzing the impact of introducing automated mining process control systems on the efficiency and safety of mining enterprises in Russia. *Russian Mining Industry*. 2024;(5):101–107. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-101-107
16. Музалёв С.В., Абдикеев Н.М., Оболенская Л.В. Совершенствование системы критериев оценки результативности промышленной политики России в условиях санкционного давления. *Финансы: теория и практика*. 2025;29(4):6–18. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-4-6-18
Muzalyov S.V., Abdikeev N.M., Obolenskaya L.V. Improving the system of criteria for evaluating the effectiveness of Russia's industrial policy under sanctions pressure. *Finance: Theory and Practice*. 2025;29(4):6–18. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-4-6-18

Информация об авторах
Чернегов Николай Юрьевич – кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики минерально-сырьевого комплекса, Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, г. Москва, Российская Федерация; Московский инновационный университет, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0001-9950-8338; e-mail: chernick@mail.ru
Овсянникова Анна Вячеславовна – кандидат педагогических наук, доцент кафедры математики и анализа данных, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-1716-3100; e-mail: anna_ovsyannikov@bk.ru
Утакаева Ирина Хайрлыевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и анализа данных, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-0201-812X; e-mail: ihutakaeva@fa.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 09.05.2026
Поступила после рецензирования: 22.06.2026
Принята к публикации: 20.07.2026

Information about the authors
Nikolay Y. Chernegov – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Economics of Mineral Resources Sector, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russian Federation; Moscow Innovative University, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0001-9950-8338; e-mail: chernick@mail.ru
Anna V. Ovsyannikova – Cand. Sci. (Educ.), Associate Professor of the Department of Mathematics and Data Analysis, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-1716-3100; e-mail: anna_ovsyannikov@bk.ru
Irina Kh. Utakaeva – Cand. Sci. (Phys.&Math.), Associate Professor of the Department of Mathematics and Data Analysis, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-0201-812X; e-mail: ihutakaeva@fa.ru

Article info
Received: 09.05.2026
Revised: 22.06.2026
Accepted: 20.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-90-98

Возможности эффективной оценки и развития компетенций специалистов в горнодобывающей отрасли

А.А. Ксенофонтов, Н.С. Самойлов, А.А. Хусейнова✉, А.А. Юссуф
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация
✉ aakhusejnova@fa.ru

Резюме: В статье рассматриваются возможности эффективной оценки и развития компетенций специалистов горнодобывающей отрасли в условиях цифровизации, усложнения технологий и роста производственных рисков. Обосновано, что качество человеческого капитала становится ключевым условием промышленной безопасности, технологического суверенитета и устойчивого развития предприятий. На основе системного подхода раскрыта специфика компетенций специалистов горнодобывающей промышленности, включающих профессионально-технические, риск-ориентированные, управленческие, цифровые и поведенческие компоненты. Проанализированы существующие инструменты оценки компетенций и показана необходимость их интеграции с практико-ориентированными методами диагностики и развития персонала. В результате предложена интегративная система оценки и развития компетенций, ориентированная на непрерывное обучение, наставничество, проектную деятельность, развитие лидерства и укрепление культуры безопасности. Сделан вывод, что комплексный компетентностный подход повышает эффективность управления персоналом, снижает производственные риски и способствует росту конкурентоспособности горнодобывающих предприятий.

Ключевые слова: промышленность, горнодобывающая отрасль, человеческий капитал, профессиональные компетенции, компетентностная модель, человеческий фактор, непрерывное обучение, наставничество

Для цитирования: Ксенофонтов А.А., Самойлов Н.С., Хусейнова А.А., Юссуф А.А. Возможности эффективной оценки и развития компетенций специалистов в горнодобывающей отрасли. *Горная промышленность*. 2026;(5):90–98. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-90-98

Opportunities for efficient assessment and competence development of specialists in the mining industry

A.A. Ksenofontov, N.S. Samoylov, A.A. Khuseynova ✉, A.A. Yussuf
Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation
✉ aakhusejnova@fa.ru

Abstract: The article examines the possibilities of efficient assessment and development of competencies of the mining industry specialists against the backdrop of digitalization, increasing technological complexity and growing production risks. The quality of human capital is proved to have become a key precondition for industrial safety, technological sovereignty and sustainable development of companies. Specific features of the competencies of mining industry specialists, including vocational, risk-oriented, managerial, digital and behavioral components, are revealed based on a systems approach. The existing competence assessment tools are analyzed and the need for their integration with practice-oriented methods of personnel testing and development is shown. As a result, an integrative competence assessment and development system is proposed, focused on continuous learning, mentoring, project activities, leadership development and promoting of the safety culture. It is concluded that an integrated competence-based approach increases the efficiency of personnel management, reduces production risks and contributes to enhancing competitiveness of the mining companies.

Keywords: industry, mining industry, human capital, professional competencies, competency model, human factor, continuous training, mentoring

For citation: Ksenofontov A.A., Samoylov N.S., Khuseynova A.A., Yussuf A.A. Opportunities for efficient assessment and competence development of specialists in the mining industry. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):90–98. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-90-98

Введение

Современное развитие мировой экономики характеризуется высокой степенью технологизации, ростом сложности производственных систем и усилением конкуренции за ресурсы, включая человеческий капитал. В условиях трансформации глобальных рынков, усложнения логистических цепочек и повышения значимости устойчивого развития особое место занимает сырьевой сектор, обеспечивающий базу для функционирования обрабатывающих отраслей, энергетики и инфраструктуры. В этом контексте

именно промышленные комплексы, ориентированные на добычу и переработку природных ресурсов, формируют материальный фундамент экономического роста, а их кадровый потенциал становится ключевым фактором устойчивости и технологического суверенитета.

Горно-металлургический комплекс России традиционно относится к числу системообразующих отраслей. Как отмечал Президент РФ Владимир Путин, «горно-металлургический комплекс исторически вносит огромный, стратегический вклад в развитие экономики, транспортной инфраструктуры, в укрепление оборонного, индустриального, энергетического потенциала нашей страны»[1].

В структуре национальной хозяйственной системы горная промышленность представляет собой сложный межотраслевой комплекс. Д.В. Андреев справедливо подчеркивает, что «горная промышленность – это целый комплекс промышленных отраслей по добыче и переработке полезных ископаемых» [1, с. 177]. А.А. Назарматов отмечает, что данная промышленность выступает главным рычагом развития других отраслей экономики, поскольку именно она создает минерально-сырьевую и топливно-энергетическую базы для функционирования обрабатывающей промышленности [2]. Это определяет устойчивый спрос на квалифицированные кадры, способные обеспечивать эффективность производственных процессов на всех стадиях – от геологоразведки до глубокой переработки сырья.

Экономическая значимость горнодобывающего сектора проявляется и в его фискальной роли. Налогообложение добычи полезных ископаемых остаётся одним из опорных источников доходов бюджетной системы: в условиях санкционных ограничений и структурной перестройки рынков сбыта минерального сырья корректировка ставок налога на добычу полезных ископаемых и вывозных пошлин, включая повышение фискальной нагрузки на добычу угля, подчинена задаче обеспечения устойчивых бюджетных поступлений при одновременном стимулировании добычи [3]. В ресурсных регионах именно добывающая промышленность обеспечивает основной объем налоговых поступлений, которые в масштабах страны демонстрируют устойчивую тенденцию к росту – с 30% в общем объеме поступлений в бюджетную систему Российской Федерации в 2010 г. до почти 40% в 2023 г. [4]. Такая динамика свидетельствует о возрастающей зависимости бюджетов различных уровней от эффективности функционирования горнодобывающих предприятий, а значит – от компетентности и профессионализма их персонала.

В условиях усиливающихся внешних ограничений, санкционного давления и технологической конкуренции особое значение приобретает технологический суверенитет в горнодобывающей сфере. Он обеспечивает независимость ключевых производственных процессов от зарубежных технологий, оборудования и сервисов, а обладание собственными технологическими решениями позволяет снижать уязвимость к внешним ограничениям, гарантировать устойчивость добычи стратегических ресурсов и поддерживать долгосрочную конкурентоспособность отрасли [5]. Однако технологический суверенитет немыслим без кадрового суверенитета: способность разрабатывать, внедрять и сопровождать отечественные технологические решения напрямую зависит от уровня профессиональных и управленческих компетенций специалистов. Именно благодаря росту горной добычи расширяются масштабы производства и переработки, что закономерно ведет к усилению потребности в высококвалифицированных кадрах [6]. Следовательно, эффективные системы оценки и развития компетенций персонала становятся стратегическим ресурсом отрасли.

В условиях технологической и цифровой трансформации горнодобывающей отрасли особую актуальность приобретает системный подход к оценке и развитию компетенций специалистов, обеспечивающий устойчивость, безопасность и конкурентоспособность предприятий. Поэтому цель исследования определена как исследование возможностей эффективной оценки и развития компетенций специалистов в горнодобывающей отрасли.

Для достижения этой цели обосновывается роль горнодобывающей отрасли в экономике и показывается ее связь с качеством кадрового потенциала, раскрываются содержание и специфика компетенций специалистов горнодобывающей промышленности, анализируются существующие инструменты оценки компетенций работников, определяются принципы и механизмы формирования и развития профессиональных и надпрофессиональных компетенций в условиях цифровизации и повышенных производственных рисков, а также предлагается система оценки и развития компетенций специалистов горнодобывающей отрасли в условиях цифровизации.

Материалы и методы

В качестве материалов исследования использован комплекс нормативно правовых актов, статистических данных о развитии горнодобывающей отрасли, научных публикаций отечественных и зарубежных авторов, а также существующие концептуальные модели компетенций персонала, систем их оценки и развития. Методологическую основу исследования составляет совокупность общенаучных и специальных методов: системный и институциональный подходы, позволившие рассматривать горнодобывающую отрасль как сложную социотехническую систему, зависящую от качества человеческого капитала; структурно функциональный анализ, обеспечивший выявление взаимосвязей между профессионально техническими, управленческими и «надпрофессиональными» компетенциями специалистов; методы сравнительного и контент анализа, применённые для сопоставления различных компетентностных моделей, инструментов оценки и подходов к развитию персонала; элементы когнитивного моделирования и экспертной оценки, использованные для теоретического обоснования компенсаторных механизмов в распределении компетенций между различными уровнями управленческой иерархии; а также методы концептуального проектирования, позволившие сформировать интегративную систему оценки и развития компетенций специалистов горнодобывающей отрасли в условиях цифровизации и технологического суверенитета.

Результаты

При управлении персоналом горнодобывающего предприятия необходимо учитывать не только цели предприятия, но и цели каждого сотрудника [7]. Это обусловлено тем, что в условиях высокой технологической и производственной сложности результативность организации опирается на включенность работника, его мотивацию к развитию и готовность принимать ответственность за последствия своих действий. Современная концепция развития производства исходит из того, что максимальная производи-

1 Путин отметил вклад горно-металлургического комплекса в развитие экономики РФ. Известия. 2025. 20 июля. Режим доступа: https://iz.ru/1923497/2025-07-20/putin-otmetil-vklad-gorno-metallurgicheskogo-kompleksa-v-razvitie-ekonomiki-rf (дата обращения: 09.03.2026).

тельность, качество и конкурентоспособность достигаются только при активном участии каждого сотрудника в совершенствовании производственного процесса сначала на своем рабочем месте, а затем и на уровне предприятия в целом [8]. Соответственно, системы оценки компетенций не могут ограничиваться формальной фиксацией соответствия квалификационным требованиям, а должны стимулировать субъектную позицию работника, его вовлеченность в процессы улучшения.

Ключевой методологической категорией, лежащей в основе построения таких систем, выступает «компетенция». По мнению Е.М. Неволиной и С.В. Шишкиной, компетенция – это профессиональные требования (квалификация, полномочия и ответственность), «собранные» для решения определенной задачи или реализации конкретной функции [9]. Функция или задача фактически задает границы компетенции. К признакам компетенции относятся:

– наличие четко определенных границ, связанных с конкретной областью деятельности;

– включение не только требований к квалификации, но и установленного объема полномочий;

– фиксация объекта и меры ответственности за выполнение или невыполнение задач.

При этом формирование компетенции рассматривается как организационная задача, то есть ответственность за ее конструкцию, поддержание и развитие несет не индивидуальный работник, а система управления персоналом и в более широком плане – корпоративная стратегия. В условиях цифровизации и технологического усложнения горнодобывающих процессов требования к компетенциям сотрудников значительно расширяются. Как отмечали М. Тепавичарова и соавт., к наиболее востребованным компетенциям сотрудников горнодобывающей промышленности относятся широкий комплекс профессиональных, технических и вычислительных навыков, дополняемый ИТ-компетенциями, офисными умениями и ориентацией на клиента [10].

Эта совокупность обусловлена необходимостью работы с высокотехнологичным оборудованием, автоматизированными системами управления, большими массивами данных и интеграцией производственных процессов с логистическими, коммерческими и сервисными функциями. При этом особую роль приобретают «надпрофессиональные» качества: готовность к постоянному обучению, адаптивность к изменениям, развитый самоменеджмент, мотивация к достижениям, способность к командной работе, коммуникативные и языковые компетенции, креативность, критическое мышление, лидерские и предпринимательские навыки, умение к эффективной самопрезентации и лояльность организации. Именно эти качества обеспечивают устойчивую эффективность в динамичной и рискованной среде отрасли.

С позиции работодателей горнодобывающего сектора к наиболее ценимым навыкам и умениям относятся: устойчивость к стрессу и способность работать в экстремальных условиях; высокая ответственность и дисциплинированность; умение быстро принимать решения в нестандартных ситуациях; способность к командной работе; географическая мобильность; оптимальное сочетание специализации и универсальности; цифровая грамотность; владение иностранными языками и др. Совокупность этих требований отражает специфическую природу горной деятельности, где необходимость соблюдения жестких регламентов сочетается с необходимостью оперативного реагирования на внезапные изменения геологических, технологических и организационных условий.

Горнодобывающая отрасль предъявляет и специфические профессиональные требования: техническая экспертиза, знание норм безопасности и охраны окружающей среды, способность эффективно управлять производственными и экологическими рисками. Отсутствие данных навыков снижает эффективность компании, приводит к потерям, увеличивает вероятность аварий и нарушений промбезопасности. Дополнительным ограничивающим фактором выступает низкая мотивация части сотрудников к развитию управленческих компетенций, недостаточная эффективность действующих систем оценки и развития управленческих навыков, а также ограниченное внимание к стратегическому планированию системы лидерства и развития управленческого потенциала [11]. В совокупности это формирует потребность в переходе от фрагментарных подходов к целостной стратегии развития лидерства и управленческих компетенций в горнодобывающих компаниях.

Обобщенная компетентностная модель специалистов горнодобывающей отрасли строится на преобладании профессионально-технических, риск-ориентированных и поведенческих компетенций, которые обеспечивают безопасное и эффективное функционирование в условиях высокой технологической и производственной опасности (рис. 1). Специфика такой модели заключается в сочетании жестких требований к технической экспертизе, дисциплине и соблюдению норм безопасности с развитыми управленческими, коммуникативными и адаптационными навыками. Это позволяет организациям поддерживать устойчивость и результативность в условиях неопределенности, волатильности рынков, изменения нормативных требований и постоянных технологических инноваций.

С позиции современной теории управления человеческими ресурсами подобные модели рассматриваются как основа для проектирования систем оценки, обучения, карьерного планирования и формирования кадрового резерва.

Процесс формирования профессиональных компетенций коллектива для выполнения трудовых функций целесообразно реализовывать поэтапно (рис. 2).

Такая модель позволяет, с одной стороны, сохранить идею целенаправленного формирования компетенций под конкретные функции и задачи, а с другой – выстроить механизм сопоставления требуемых компетенций с реальным уровнем компетентности работников. Для более детального и обоснованного определения требований к сотрудникам применяются результаты экспертной оценки индивидуальных и профессиональных компетенций, а также данные когнитивного анализа и оценки отклонений. Важнейшим элементом этой модели выступает компенсирующий механизм: если по результатам оценки индивидуальная компетентность работников операционного уровня признается недостаточной, в компетенции руководителей и специалистов могут быть внесены коррективы, усиливающие их ответственность за контроль и поддержку. Это объясняется тем, что отклонения решений и действий работников от требуемых функций, а также отклонения работы оборудования от технического регламента в значительной мере компенсируются за счет упреждающих действий руководителей и специалистов горнодобывающей промышленности [9]. Тем самым структура компетенций на разных уровнях иерархии рассматривается как взаимодополняющая система.

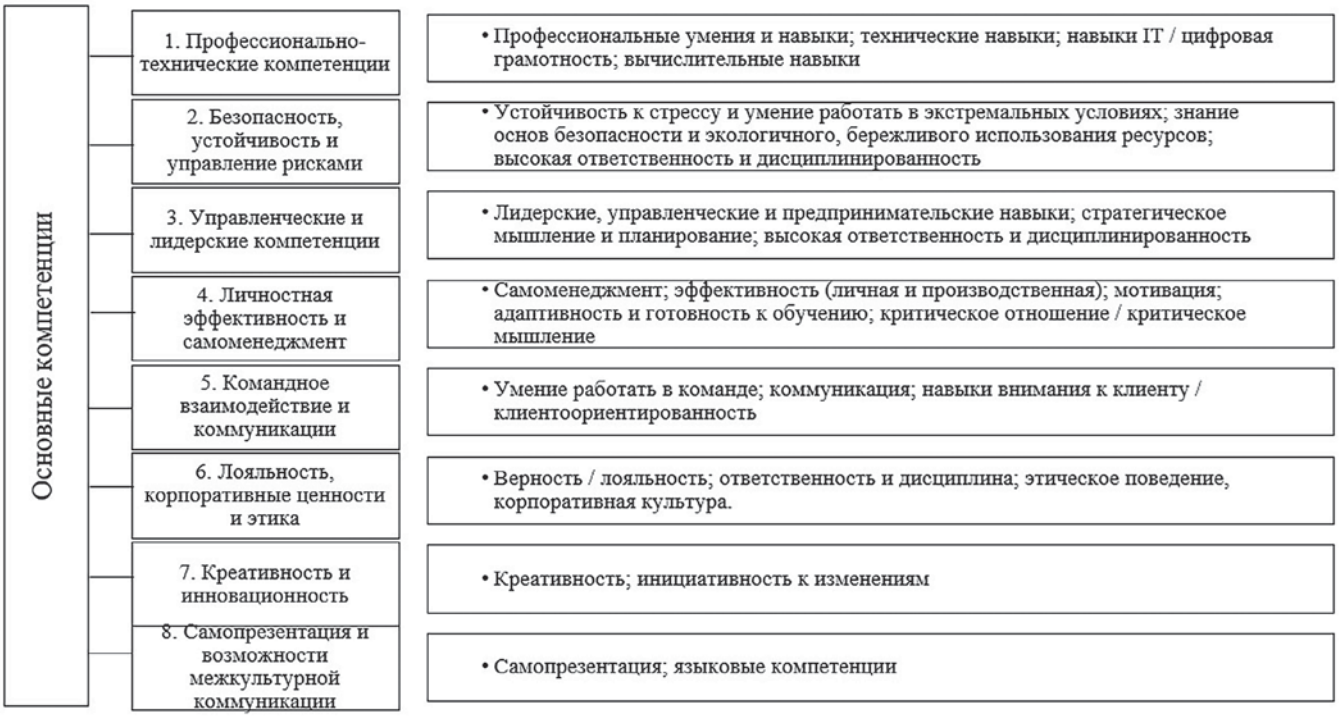


Рис. 1
Обобщенная компетентностная модель специалистов горнодобывающей отрасли

Fig. 1
A generalized competency model for specialists in the mining industry



Рис. 2
Модель формирования профессиональных компетенций коллектива для выполнения трудовых функций
Источник: [12]

Fig. 2
A model of developing the team's professional competencies to perform job functions
Source: [12]

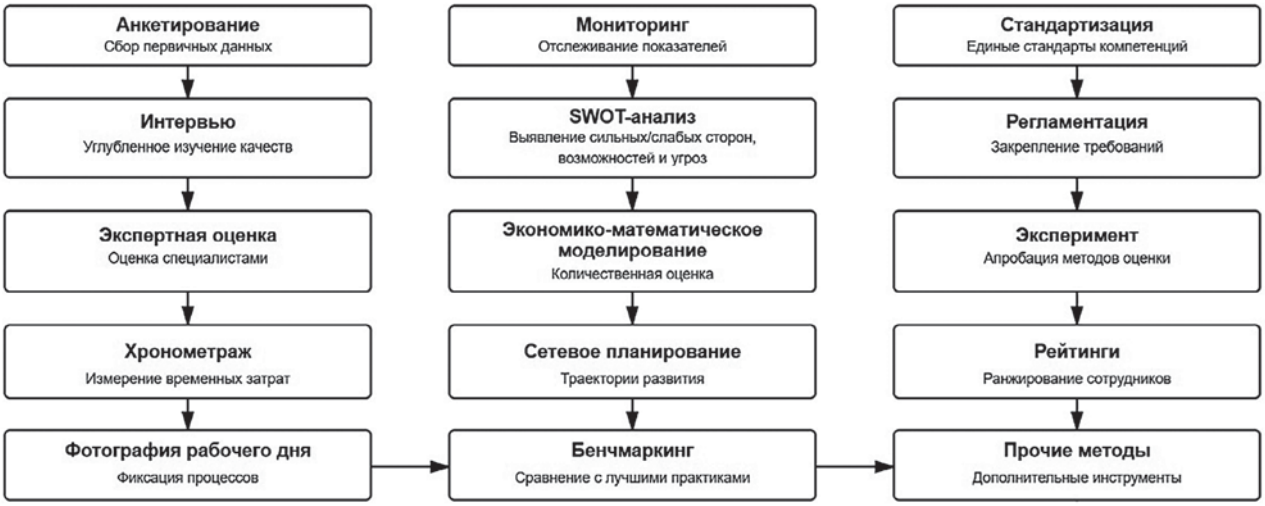


Рис. 3
Сложившаяся на практике система оценки компетенций сотрудников горнодобывающей промышленности

Fig. 3
A system for assessing competencies of employees in the mining industry that has evolved in practice

Рыночная экономика России и высокая динамика происходящих в ней процессов обостряют сложные теоретические и практические проблемы, от решения которых зависят темпы и результаты развития горнодобывающих предприятий, их устойчивость и жизнеспособность. Среди ключевых проблем – оценка эффективности трудовой деятельности работников, во многом определяющих результативность функционирования предприятия как социально-экономической системы как в настоящем, так и в стратегической перспективе. В этой связи особое значение приобретает разработка валидных и надежных инструментов оценки компетенций и потенциала персонала.

По материалам исследования О.А. Лапаевой [13], среди инструментов оценки компетенций сотрудников горнодобывающей промышленности выделяется многоэтапная система (рис. 3), интегрирующая широкий спектр методов: анкетирование, интервью, экспертную оценку, мониторинг производственного поведения и результатов труда, аналитические процедуры и экономико-математическое моделирование.

В систему также включаются методы сетевого планирования и бенчмаркинга, позволяющие сопоставлять показатели развития компетенций с лучшими отраслевыми практиками. Завершающими элементами модели выступают стандартизация и регламентация требований к компетенциям, экспериментальная проверка инструментов и рейтинговая оценка работников, дополняемая иными методами. Это обеспечивает комплексный, многомерный и валидный характер диагностики профессионального потенциала персонала, а также задает основу для управленческих решений в области обучения, продвижения и мотивации.

Подготовка специалистов для горной промышленности требует междисциплинарного подхода, сочетающего фундаментальную инженерно-техническую подготовку с освоением цифровых технологий, навыков работы с геоинформационными системами, автоматизированными комплексами и системами промышленной безопасности. Цифровые компетенции становятся неотъемлемой частью подготовки специалистов: рынок труда требует кадров, владеющих навыками работы в цифровой среде в условиях многозадачности и способных постоянно повышать уровень квалификации и цифровой грамотности, что напрямую влияет на конкурентоспособность отраслей и регионов [14]. Важным условием является практико-ориентированный характер обучения: производственные стажировки, участие в проектной деятельности, активное взаимодействие с предприятиями, выполнение реальных кейсов. Это обеспечивает формирование у молодых специалистов устойчивых профессиональных компетенций, адаптивности, готовности к работе в высокорисковой и технологически сложной производственной среде [15]. В контексте оценки компетенций это означает необходимость тесной связи образовательных результатов с реальными производственными требованиями и ориентацию на оценку практических, а не только теоретических знаний.

Повышение эффективности управления персоналом, формирование мотивации к командной работе, стимулирование интеллектуальной активности персонала, направленной на разработку рациональных «антикризисных» организационных решений и внедрение инноваций, рассматривается как ключевой инструмент преодоления последствий экономического дисбаланса в отрасли [16]. Здесь оценка компетенций выполняет двойную функцию: с одной стороны, она позволяет фиксировать текущий уровень профессионализма, а с другой – служит механизмом выявления зон роста и формирования индивидуальных и групповых траекторий развития.

Исследование О.А. Лапаевой [13] позволяет выделить и традиционные методы повышения эффективности труда работников горнодобывающих предприятий. К ним относятся совершенствование организации труда, оптимизация режимов работы, внедрение систем материального и нематериального стимулирования, повышение квалификации, улучшение условий труда и безопасности, развитие внутренних коммуникаций и др. Важно подчеркнуть, что в современных условиях эти методы требуют дополнения компетентностным подходом: эффективность труда рассматривается не только как результат совокупности организационных мер, но и как производная от структуры, уровня и динамики развития компетенций персонала. Это, в свою очередь, требует интеграции систем оценки компетенций с системами управления эффективностью и производительностью.

Обсуждение результатов

Человеческий капитал выступает ключевым фактором развития горной промышленности, поскольку от уровня профессиональных компетенций, инновационной активности и технологической культуры персонала напрямую зависят эффективность внедрения современных технологий, обеспечение промышленной безопасности и повышение производительности труда [17]. Инвестирование в развитие человеческого капитала способствует устойчивой модернизации горных предприятий, росту их конкурентоспособности и адаптивности к изменениям внешней среды. При этом речь идет не только о формальном обучении, но и о создании условий для непрерывного профессионального и личностного развития, формировании корпоративной культуры, ориентированной на знания и инновации.

Сотрудников горнодобывающих предприятий целесообразно рассматривать как интеллектуальный актив организации, поскольку именно они генерируют знания, технологии, управленческие решения и инновации, которые невозможно полностью воспроизвести или скопировать конкурентами. Человеческий капитал занимает особое место в структуре человеческого потенциала и формируется прежде всего через образование и профессиональную подготовку, оставаясь тесно связанным с интеллектуальным капиталом [18]. Инвестиции в развитие компетенций, мотивации и профессионального опыта работников повышают производительность, качество управленческих и технологических решений, формируют долгосрочные конкурентные преимущества организации, устойчивые к внешним шокам. При этом мотивационные сбои в трудовом процессе способны заметно снижать эффективность принимаемых экономических решений, а их преодоление требует от руководителей развитых компетенций в области поведенческой экономики, социологии и психологии труда [19]. В этом контексте система оценки компетенций выполняет стратегическую функцию: она позволяет идентифицировать носителей критически важных знаний, формировать ядро профессионального сообщества и управлять процессами трансляции опыта внутри организации.

Недостаточное внимание к оценке и развитию компетенций сотрудников в горной промышленности неизбежно ведет к росту производственных рисков, увеличению аварийности, нарушениям требований промышленной безопасности, снижению эффективности использования оборудования и технологий. Это не только подрывает кадровый потенциал предприятия, но и снижает его конкурентоспособность, ограничивает возможности устойчивого технологического развития, усиливает регуляторные и репутационные риски. Опыт смежных высокорисковых отраслей подтверждает, что подготовка квалифицированных кадров и непрерывное профессиональное образование должны рассматриваться как важнейшая составляющая системы обеспечения безопасности и непременное условие устойчивого и бесперебойного функционирования производственных комплексов [20]. Таким образом, отсутствие системного подхода к компетенциям превращается в фактор угрозы как для отдельных предприятий, так и для отрасли в целом.

В условиях цифровизации горнодобывающего производства особую актуальность приобретают разработка и внедрение комплексных систем оценки и развития компетенций специалистов (рис. 4).

Предлагаемая система опирается на интегрированную модель, учитывающую как «жёсткие» профессионально технические навыки (знание технологических процессов, норм безопасности, умение работать с цифровыми и автоматизированными системами), так и широкий спектр «мягких» компетенций. В основе лежит признание, что цифровая трансформация горных предприятий требует не только владения современной техникой и программным обеспечением, но и высокой культуры безопасности,



Рис. 4
Возможности улучшения системы оценки и развития персонала в условиях цифровизации

Fig. 4
Opportunities for improving the personnel assessment and development system in conditions of digital transformation

развитой риск ориентированной управленческой логики, лидерских качеств, личностной эффективности и самоменеджмента в условиях постоянно меняющихся производственных требований.

Особое значение в этой системе приобретают командное взаимодействие и коммуникации в цифровой среде, лояльность к компании, разделение корпоративных ценностей, соблюдение этических норм при работе с данными и автоматизированными системами. Параллельно возрастает роль креативности и инновационности при внедрении цифровых решений в технологические процессы, а также способность к самопрезентации и межкультурной коммуникации, что особенно важно для участия в международных проектах и взаимодействия в распределенных командах. Тем самым компетентностная модель выходит за рамки узкопрофессионального профиля и превращается в многомерную конструкцию, отражающую требования к специалисту как к субъекту сложной социотехнической системы.

Оценка компетенций в рамках предложенной системы строится на сочетании практико-ориентированных методов: выполнение производственных заданий, участие в проектах, аттестации и допуски к видам работ, компьютерный контроль, мониторинг и аудит, экспертная оценка. Это позволяет объективно фиксировать степень готовности специалиста к работе в цифровой среде и оценивать не только декларативные знания, но и реальное поведение в производственных ситуациях. Дополнительными инструментами служат анкетирование, оценочные интервью, самооценка, тестирование, независимая оценка, наблюдение на рабочем месте. Многомерность оценки обеспечивает более полное понимание профессионального потенциала работника, его сильных сторон и зон развития.

Развитие компетенций в данной системе реализуется через наставничество, участие в проектной деятельности, использование тренажёров и симуляторов, производственные стажировки, внутренний и внешний обмен опытом. Дополнительным резервом такой системы становится удержание работников старших возрастных групп: в условиях кадрового дефицита, когда число открытых вакансий превышает численность соискателей, работающие пенсионеры рассматриваются как источник восполнения нехватки персонала, а накопленный ими профессиональный опыт капитализируется через наставничество и передачу знаний молодым специалистам [21]. Это особенно важно для отработки навыков работы с цифровыми системами управления и мониторинга, для формирования устойчивых поведенческих паттернов в условиях повышенных рисков. Перекрестный аудит, анализ и внедрение инновационных технологий, развивающая аттестация, регулярный разбор практических кейсов формируют культуру непрерывного обучения и адаптации к новым цифровым решениям. В результате система оценки и развития компетенций превращается в действенный инструмент не только повышения эффективности и безопасности горнодобывающего производства, но и укрепления технологического суверенитета и конкурентоспособности отрасли.

Заключение

Возможности эффективной оценки и развития компетенций специалистов в горнодобывающей отрасли определяются стратегической значимостью отрасли для экономики, усложнением технологий, ростом рисков, повышением требований к человеческому капиталу и цифровой трансформацией производственных процессов. В этих условиях научно обоснованный и практико-ориентированный подход к компетенциям позволяет рассматривать персонал как ключевой ресурс устойчивого развития, а систему оценки и развития – как центральный механизм управления этим ресурсом.

Разработанная компетентностная модель специалистов горнодобывающей отрасли включает не только требования к профессионально-технической подготовке, знанию технологических процессов и норм промышленной безопасности, но и поведенческие, управленческие и цифровые компетенции, определяющие устойчивость и адаптивность персонала. В модель включены стрессоустойчивость, способность принимать решения в нестандартных ситуациях, готовность к непрерывному обучению, владение ИТ-инструментами и цифровыми системами управления, а также навыки коммуникации и командного взаимодействия.

Применение данной модели в системе управления персоналом создает основу для целостной работы с человеческим капиталом – от подбора и адаптации сотрудников до их оценки, обучения, развития и формирования кадрового резерва. Кластерный подход к компетенциям позволяет разрабатывать дифференцированные профили, стандартизированные процедуры оценки и индивидуальные траектории профессионального роста, повышая прозрачность кадровых решений и снижая риски кадровых ошибок.

Институционализация компетентностной модели в практике горнодобывающих компаний усиливает ее значение как элемента стратегии управления устойчивостью и безопасностью производства. Ориентация на развитие лидерских и управленческих компетенций, поддержку мобильности, баланс специализации и универсальности, а также акцент на корпоративных ценностях, культуре безопасности и этике способствуют формированию гибких и обучающихся организационных структур.

В условиях цифровой трансформации отрасли данная модель становится инструментом интеграции человеческого фактора в технологические изменения, обеспечивая развитие цифровой грамотности, навыков работы с данными и готовности персонала к внедрению новых технологий. В долгосрочной перспективе это создает основу для формирования конкурентоспособного, устойчивого и инновационно восприимчивого человеческого капитала, способствующего повышению эффективности и снижению производственных и экологических рисков.

Список литературы / References

1. Андреев Д.В. Роль горной промышленности в экономике страны. Московский экономический журнал. 2020;(12):175–185.
Andreev D.V. Role of the mining industry in the economy of the country. *Moscow Economic Journal*. 2020;(12):175–185. (In Russ.)
2. Назарматов А.А. Роль горнорудной отрасли в развитии промышленности страны. *Вестник Сургутского государственного университета*. 2021;(1):50–56. https://doi.org/10.34822/2312-3419-2021-1-50-56
Nazarmatov A.A. The role of the mining industry in the country's industrial development. *Surgut State University Journal*. 2021;(1):50–56. (In Russ.) https://doi.org/10.34822/2312-3419-2021-1-50-56

3. Юмаев М.М. Налоговая политика в отношении нефтегазового сектора Российской Федерации в условиях структурных изменений мировой экономики. *Экономика. Налоги. Право*. 2023;16(1):152–162. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-1-152-162
Yumaev M.M. Tax policy in the oil and gas sector of the Russian Federation in the context of structural changes in the world economy. *Economics, Taxes & Law*. 2023;16(1):152–162. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-1-152-162

4. Бурцева И.Г., Тимушев Е.Н. Налоговые доходы ресурсных регионов и оценка влияния горных компаний на экономическое развитие территорий. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2025;(1):143–153. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2025-1-143-153
Burtseva I.G., Timushev E.N. Tax revenues of resource regions and assessment of the impact of mining companies on the economic development of territories. *News of the Ural State Mining University*. 2025;(1):143–153. (In Russ.) https://doi.org/10.21440/2307-2091-2025-1-143-153

5. Крупнов Ю.А., Сильвестров С.Н. Технологический суверенитет и диффузия технологий. *Вестник Института экономики Российской академии наук*. 2024;(2):31–48. https://doi.org/10.52180/2073-6487_2024_2_31_48
Krupnov Y.A., Silvestrov S.N. Technological sovereignty and diffusion of technologies. *Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*. 2024;(2):31–48. (In Russ.) https://doi.org/10.52180/2073-6487_2024_2_31_48

6. Есина Т., Архипова Н. *Работа в горнодобывающей промышленности. HR-Portal. 2014*. 12 января. Режим доступа: https://hr-portal.ru/blog/rabota-v-gornodobyvayushchey-promyshlennosti (дата обращения: 09.03.2026)

7. Чехлатова Е.А. Особенности работы трудового коллектива горнодобывающего предприятия. *Вестник магистратуры*. 2017;(1-1):97–98.
Chekhlatova E.A. Features of the work of the labor collective of a mining enterprise. *Vestnik Magistratury*. 2017;(1-1):97–98. (In Russ.)

8. Савельева Н.Ф. Особенности управления кадрами – трудовым потенциалом предприятия. *Известия ТРТУ*. 2005;(8):155–161.
Savelieva N.F. Features of personnel management – the labor potential of an enterprise. *Izvestiya TRTU*. 2005;(8):155–161. (In Russ.)

9. Неволина Е.М., Шишкина С.В. Развитие компетентности персонала горнодобывающего предприятия как метод обеспечения безопасных условий труда. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(5-1):336–349. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_336
Nevolina E.M.1, Shishkina S.V. Development of mine personnel competences as a method to ensure occupational safety. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(5-1):336–349. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_336

10. Тепавичарова М., Дикова Л., Яворска М., Григашкина С.И. Разработка модели компетенций для управления персоналом в горнодобывающем секторе. *Экономика и управление инновациями*. 2020;(4):66–79. https://doi.org/10.26730/2587-5574-2020-4-66-79
Tepavicharova M., Dikova L., Jaworska M., Grigashkina S.I. Development of a competency model for personnel management in the mining sector. *Economics and Innovation Management*. 2020;(4):66–79. (In Russ.) https://doi.org/10.26730/2587-5574-2020-4-66-79

11. Абдихамитова Д.К., Колыхалов П.И. Актуальные вопросы системы лидерства и развития управленческих компетенций на горнодобывающем предприятии. *Вестник науки*. 2024;5(12-1):16–21. Режим доступа: https://www.вестник-науки.рф/article/20319 (дата обращения: 09.03.2026).
Abdikhamitova D.K., Kolykhalov P.I. Current issues of the leadership system and the development of managerial competencies at the mining company. *Vestnik Nauki*. 2024;5(12-1):16–21. (In Russ.) Available at: https://www.вестник-науки.рф/article/20319 (accessed: 09.03.2026).

12. Шишкина С.В. *Разработка методов обеспечения безопасных условий труда на основе повышения уровня компетенций персонала погрузочно-транспортного предприятия* [дис. … канд. техн. наук]. Новокузнецк; 2019. 134 с.

13. Лапаева О.А. Нормирование трудовой деятельности работников горнодобывающего предприятия: принципы и методы. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2019;(2):146–158. Режим доступа: https://iuggu.ru/download/2019/2-54-2019/19_Lapaeva.pdf (дата обращения: 09.03.2026).
Lapaeva O.A. Performance standards of workers of a mining enterprise: ground rules and methods. *News of the Ural State Mining University*. 2019;(2):146–158. (In Russ.) Available at: https://iuggu.ru/download/2019/2-54-2019/19_Lapaeva.pdf (accessed: 09.03.2026).

14. Жуковская И.Е. Цифровые компетенции как неотъемлемая часть подготовки специалистов в условиях современных вызовов. *Открытое образование*. 2025;29(5):12–21. https://doi.org/10.21686/1818-4243-2025-5-12-21
Zhukovskaya I.E. Digital competences as an integral part of training specialists in the context of modern challenges. *Open Education*. 2025;29(5):12–21. (In Russ.) https://doi.org/10.21686/1818-4243-2025-5-12-21

15. Ганьшина Е.Ю. Какие методы работы с организационными изменениями поколение Z считает наиболее эффективными: взгляд на перспективу. *Мониторинг общественного мнения: экономические и социальные перемены*. 2022;(1):263–281. https://doi.org/10.14515/monitoring.2022.1.1928
Ganshina E.Yu. What gen Z thinks are the most impactful in organizational change management: current practice and perspective. *Monitoring of Public Opinion: Economic and Social Changes*. 2022;(1):263–281. (In Russ.) https://doi.org/10.14515/monitoring.2022.1.1928

16. Болдырева Е.О. Управление персоналом горнодобывающих предприятий. *Вектор экономики*. 2018;(9):45. Режим доступа: https://vectoreconomy.ru/images/publications/2018/9/economicsmanagement/Boldyreva.pdf (дата обращения: 09.03.2026).
Boldyreva E.O. Personnel management of mining enterprises. *Vektor Economy*. 2018;(9):45. (In Russ.) Available at: https://vectoreconomy.ru/images/publications/2018/9/economicsmanagement/Boldyreva.pdf (accessed: 09.03.2026).

17. Эскиндаров М.А., Грузина Ю.М., Харчилава Х.П., Мельничук М.В. Роль человеческого капитала в цифровой экономике на институциональном и региональном уровнях. *Экономика региона*. 2022;18(4):1105–1120. https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2022-4-10
Eskindarov M.A., Gruzina Yu.M., Kharchilava Kh.P., Melnichuk M.V. The role of human capital in the digital economy at the institutional and regional levels. *Economy of Regions*. 2022;18(4):1105–1120. (In Russ.) https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2022-4-10

18. Молчанов И.Н. Образование и профессиональная подготовка как инструменты формирования человеческого капитала. *Экономика. Налоги. Право*. 2023;16(2):108–118. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-2-108-118
Molchanov L.N. Education and professional training as tools for the formation of human capital. *Economics, Taxes & Law*. 2023;16(2):108–118. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-2-108-118

19. Жигун Л.А., Литвинюк А.А. Мотивационные сбои в системе управления персоналом. *Экономика. Налоги. Право*. 2023;16(2):48–58. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-2-48-58
Zhigun L.A., Litvinyuk A.A. Motivational failures in the personnel management system. *Economics, Taxes & Law*. 2023;16(2):48–58. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-2-48-58

20. Землин А.И., Багреева Е.Г., Карпова С.В., Землина О.М. Непрерывное образование как условие повышения эффективности контроля (надзора) на транспорте в условиях санкций. *Экономика. Налоги. Право*. 2024;17(4):53–63. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2024-17-4-53-63
Zemlin A.I., Bagreeva E.G., Karpova S.V., Zemlina O.M. Continuing education as a condition for improving the effectiveness of control (supervision) in transport under sanctions. *Economics, Taxes & Law*. 2024;17(4):53–63. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2024-17-4-53-63

21. Колесникова Ю.С., Полевая М.В., Белогруд И.Н., Жигун Л.А., Чуб А.А. Работающие пенсионеры как резерв восполнения дефицита кадров на рынке труда. *Экономика. Налоги. Право*. 2025;18(3):33-42. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-3-33-42
Kolesnikova Yu.S., Polevaya M.V., Belogrud I.N., Zhigun L.A., Chub A.A. Working pensioners as a reserve for filling the deficit in the labor market. *Economics, Taxes & Law*. 2025;18(3):33–42. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-3-33-42

Информация об авторах
Ксенофонтов Андрей Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общего и проектного менеджмента факультета «Высшая школа управления», Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0009-0007-5356-4837; e-mail: aaksenofontov@fa.ru
Самойлов Никита Станиславович – кандидат экономических наук, ассистент кафедры общего и проектного менеджмента факультета «Высшая школа управления», Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0001-5016-3850; e-mail: nssamojlov@fa.ru
Хусейнова Анастасия Алишеровна – кандидат педагогических наук, преподаватель кафедры общего и проектного менеджмента факультета «Высшая школа управления», Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0009-0003-4434-3566; e-mail: aakhusejnova@fa.ru
Юссуф Анастасия Андреевна – кандидат экономических наук, доцент кафедры общего и проектного менеджмента факультета «Высшая школа управления», Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0001-5276-8781; e-mail: aayussuf@fa.ru

Information about the authors
Andrei A. Ksenofontov – Cand. Sci. (Phys. & Math.), Associate Professor, Head of the Department of General and Project Management, Faculty of Higher School of Management, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0009-0007-5356-4837; e-mail: aaksenofontov@fa.ru
Nikita S. Samoylov – Cand. Sci. (Econ.), Assistant lecturer at the Department of General and Project Management, Faculty of Higher School of Management, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0001-5016-3850; e-mail: nssamojlov@fa.ru
Anastasia A. Khuseynova – Cand. Sci. (Educ.), Lecturer of the Department of General and Project Management, Faculty of Higher School of Management, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0009-0003-4434-3566; e-mail: aakhusejnova@fa.ru
Anastasia A. Yussuf – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of General and Project Management, Faculty of Higher School of Management, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0001-5276-8781; e-mail: aayussuf@fa.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 15.05.2026
Поступила после рецензирования: 23.06.2026
Принята к публикации: 21.07.2026

Article info
Received: 15.05.2026
Revised: 23.06.2026
Accepted: 21.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-99-106

Эконометрическое моделирование финансового риска и кредитного пространства малого и среднего предпринимательства горнодобывающей промышленности

Н.А. Череповская ✉, А.Б. Моттаева, Е.С. Якушова, М.Ю. Алейникова
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация
✉ nacherepovskaya@fa.ru

Резюме: В современных условиях высокой волатильности мировых сырьевых рынков, усиления неопределенности и ужесточения требований финансовой устойчивости предприятий особую актуальность приобретает проблема оценки финансового риска и кредитного пространства субъектов малого и среднего предпринимательства, функционирующих в горнодобывающей промышленности. Статья посвящена эмпирическому исследованию факторов финансового риска и кредитного пространства малых и средних предприятий горнодобывающей промышленности. В исследовании сформирована специализированная отраслевая выборка из 9901 компании и применен комплексный эконометрический подход, учитывающий статистические финансовые показатели и динамические изменения выручки, активов и прибыли. Цель исследования заключается в выявлении наиболее значимых балансовых, операционных и динамических факторов, определяющих уровень финансового риска, вероятность перехода предприятий в категорию высокого риска. Полученные результаты показывают, что для малого и среднего предпринимательства горной промышленности доминирующим фактором риска остается отрицательный собственный капитал: в базовой модели индекса финансового риска его коэффициент составляет 38,816 пункта, а в логит-модели высокого риска отношение шансов равно 15,561. Динамические переменные имеют более точную интерпретацию: в модели оборотного капитала рост выручки связан с ростом индексом финансового риска, тогда как рост прибыли статистически снижает риск. Это означает, что для горнодобывающих предприятий важен не сам факт расширения деятельности, а качество роста: рост продаж без прибыльности и платежного запаса может сопровождаться усилением финансового напряжения.

Ключевые слова: финансовый риск, кредитное пространство, горнодобывающая промышленность, оборотный капитал, рентабельность активов, индекс финансового риска, финансовая устойчивость, логит-модель

Для цитирования: Череповская Н.А., Моттаева А.Б., Якушова Е.С., Алейникова М.Ю. Эконометрическое моделирование финансового риска и кредитного пространства малого и среднего предпринимательства горнодобывающей промышленности. *Горная промышленность.* 2026;(5):99–106. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-99-106

Econometric modeling of financial risks and credit space of small and medium-size mining businesses

N.A. Cherepovskaya ✉, A.B. Mottaeva, E.S. Yakushova, M.Yu. Aleynikova
Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation
✉ nacherepovskaya@fa.ru

Abstract: In current conditions of high volatility of the global commodity markets, increasing uncertainty and stricter requirements for financial stability of companies, the task of assessing the financial risks and credit space of small and medium-size companies operating in the mining industry is becoming particularly relevant. The article is dedicated to an empirical study of the financial risk factors and credit space of small and medium-size mining businesses. The study formed a dedicated industry sampling of 9,901 companies and applied a comprehensive econometric approach that takes into account statistical financial indicators and dynamic changes in revenues, assets and profits. The purpose of the study is to identify the most significant balance sheet, operational and dynamic factors that determine the level of financial risks and the probability of the company's shifting into the high-risk category. The results show that negative equity remains the dominant risk factor for the small and medium-size mining businesses: in the basic financial risk index model their coefficient is 38.816 points, and in the high-risk logit model, the odds ratio is 15.561. The dynamic variables have a more accurate interpretation, i.e. in the working capital model the

revenue growth is associated with an increase in the financial risk index, whereas the profit growth statistically reduces the risks. This means that it is not the expansion itself that is important for mining companies, but the quality of the growth, as the sales growth without profitability and payment margin can be accompanied by an increased financial stress.

Keywords: financial risk, credit space, mining industry, working capital, return on assets, financial risk index, financial stability, logit model

For citation: Cherepovskaya N.A., Mottaeva A.B., Yakushova E.S., Aleynikova M.Yu. Econometric modeling of financial risks and credit space of small and medium-size mining businesses. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):99–106. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-99-106

Введение

Горнодобывающая промышленность характеризуется высокой капиталоёмкостью, значительной зависимостью от ценовой конъюнктуры на минеральное сырье, ограниченным доступом к финансовым ресурсам и повышенной чувствительностью к изменениям макроэкономической среды [1]. В этих условиях технологического суверенитета и ускорения процессов диффузии технологий управление финансовыми рисками становится одним из ключевых факторов обеспечения устойчивого развития предприятий и повышения их инвестиционной привлекательности [2].

В условиях стремительного спроса на редкоземельные металлы и обострения глобального дефицита критического минерального сырья разработка и реализация национальных стратегий развития добывающей отрасли становится важнейшим фактором обеспечения экономической безопасности, технологического суверенитета. Экономический анализ эффективности таких стратегий позволяет оценить их влияние на конкурентоспособность экономики и инвестиционную привлекательность горнодобывающего сектора [3].

Повышение эффективности освоения месторождений полезных ископаемых является одним из приоритетных направлений развития минерально-сырьевого комплекса России, особенно в условиях активного освоения арктических территорий [4].

Обеспечение бюджетной устойчивости как важнейшего элемента финансового суверенитета страны требует укрепления финансовой дисциплины, что проявляется в том числе в ужесточении требований к банковскому кредитованию. Это, в свою очередь, повышает значимость проектного финансирования как эффективного механизма реализации проектов по освоению месторождений полезных ископаемых, обеспечивающего распределение рисков и снижение кредитной нагрузки [5–7].

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных вопросам оценки кредитоспособности и прогнозирования финансового состояния предприятий [8–10], существующие методические подходы [11–13] не всегда учитывают отраслевую специфику деятельности малого и среднего предпринимательства (МСП) в горнодобывающей промышленности. Эконометрическое моделирование предоставляет широкие возможности для количественной оценки взаимосвязей между финансовыми показателями предприятий, характеристиками кредитной среды и вероятностью возникновения финансовых затруднений.

Материалы и методы

Настоящее исследование является логическим продолжением работы, посвящённой оценке межотраслевого влияния металлургического сектора на финансовые результаты добывающих предприятий горной промышленности [14]. В отличие от предыдущего исследования, в настоящей работе основное внимание сосредоточено на эмпирической оценке финансового риска и кредитного пространства малых и средних предприятий горнодобывающей промышленности.

Эмпирической базой исследования на основе пользовательской выгрузки из информационно-аналитической системы СПАРК сформирована специализированная отраслевая выборка объемом 9901 МСП горнодобывающей промышленности. Методология исследования состоит из четырех этапов:

– формирование выборки горнодобывающих предприятий;

– расчет финансовых показателей и их динамики;

– построение производных переменных;

– оценка регрессионных моделей индекса финансового риска (ИФР), вероятности высокого риска, операционной эффективности.

Основной зависимой переменной является ИФР, дополнительно анализируются бинарный индикатор высокого риска, рентабельность активов и логарифм кредитного лимита, что позволяет оценить финансовый риск, операционную эффективность.

Для повышения устойчивости оценок относительные финансовые показатели винзоризированы, линейные модели оценены робастными стандартными ошибками, а логит-модель используется для проверки устойчивости результатов.

Результаты

Описательная статистика и динамические профили

Анализ статистики общей совокупности компаний горнодобывающей промышленности, выполненной при помощи фильтрации по предприятиям добычи угля и торфа, нефти и газа, металлических руд, драгоценных металлов и камней, прочих полезных ископаемых, строительных материалов, карьеров и услуг в области добычи, свидетельствует о неоднородности их финансового состояния. Среднее значение ИФР в горнодобывающей выборке составляет 51,344, а доля компаний высокого риска – 0,4127. Средняя рентабельность активов отрицательна (–0,4735), что указывает на значительную неоднородность финансового состояния внутри отрасли и низкую эффективность использования активов у большей части предприятий. Медианный темп роста выручки 2024 г. к 2023 г. составляет 0,1190, медианный темп роста активов – 0,0023, медианный темп роста прибыли – 0,0000. Эти значения показывают, что средние величины могут быть сильно смещены экстремальными наблюдениями, поэтому в статье основной акцент делается на медианах, профилях и винзоризированных коэффициентах.

Таблица 1
Показатели по категориям риска

Table 1
Indicators split by the risk category

Категория риска	Число компаний	Индекс финансового риска	Рентабельность активов	Долг к активам	Денежные средства к активам	Темп роста 2024/2023		Логарифм кредитного лимита
						выручки	прибыли	
Высокий риск	4 066	75,793	–1,143	4,615	0,1902	1,604	–3,095	13,099
Средний риск	2 992	46,312	–0,1229	1,090	0,2084	1,709	3,201	13,666
Низкий риск	2 795	21,174	0,1904	0,4164	0,2661	1,286	5,545	15,423
Не указано	48	–	0,3581	3,944	0,4473	2,361	4,919	–

Анализ профилей динамики показывает, что наиболее благоприятное финансовое положение характерно для предприятий со сбалансированным ростом, которые демонстрируют минимальное значение индекса риска (35,5), наименьшую долю компаний с высоким риском (16,9%), положительную рентабельность активов и самую низкую долговую нагрузку. Напротив, предприятия с высоким ростом активов без роста выручки характеризуются максимальным уровнем финансового риска (63,8) и наибольшей долей компаний с высоким риском (63,9%), что может свидетельствовать о неэффективном наращивании активов. Следовательно, для горнодобывающих предприятий важна согласованность изменения выручки, активов и прибыли.

Сопоставление групп риска дополнительно подтверждает экономическую содержательность динамики. В группе высокого риска средний ИФР закономерно максимален, рентабельность активов отрицательна, долговая нагрузка выше, а кредитное пространство меньше. При этом темпы роста выручки и активов сами по себе не дают простого линейного вывода: в некоторых рискованных группах рост может быть связан с восстановлением после низкой базы, капиталоемким расширением или бухгалтерским эффектом. Поэтому в регрессиях динамические показатели интерпретируются только совместно с текущими финансовыми коэффициентами (табл. 1).

В результате анализа 9901 предприятия выявлено, что 4066 (41,1%) относятся к категории высокого риска, 2992 (30,2%) – среднего, а 2795 (28,2%) – низкого риска, при этом 48 (0,5%) компаний не имеют устраненной категории риска. Анализ средних значений показателей демонстрирует наличие устойчивых различий между группами. Прежде всего наблюдается закономерное снижение ИФР при переходе от высокой к низкой категории риска, что подтверждает корректность классификации компаний по уровням риска и свидетельствует о высокой информативности используемого индекса.

Коэффициент отношения долга к активам характеризует высокорисковые компании большой долговой нагрузкой (4,615), поэтому использование заемного капитала тесно связано с ростом финансового риска. Отношение денежных средств к активам свидетельствует о более высокой платежеспособности и финансовой устойчивости предприятий с низким уровнем риска (0,2661). Наиболее высокие темпы роста в 2024 г. к 2023 г. наблюдаются у компаний среднего риска (1,709), и у компаний высокого риска (1,605), умеренный темп роста присущ компаниям низкого риска. Соответственно, высокий рост продаж сам по себе не является признаком финансовой устойчивости и может сопровождаться повышенным уровнем риска. В целом можно сделать вывод, что компании с высоким уровнем риска характеризуются отрицательной рентабельностью, высокой долговой нагрузкой, низкой ликвидностью, ухудшением финансовых результатов и меньшими кредитными лимитами. При этом предприятия с низким уровнем риска отличаются более высокой эффективностью деятельности, меньшей зависимостью от заемного капитала, обеспеченностью собственными средствами, устойчивым ростом прибыли и более высоким уровнем кредитоспособности.

Скрининг гипотез

Перед построением итоговых моделей выполнен скрининг гипотез (рис. 1). Его задача – не заменить многофакторный анализ, а показать, какие одиночные признаки имеют наибольшую объясняющую силу по отношению к ИФР. Наиболее сильный одиночный фактор – отрицательный собственный капитал. Его скорректированный коэффициент детерминации в однофакторной проверке составляет около 0,497, что существенно выше других факторов. Далее следуют кредиторская задолженность к активам, чистый оборотный капитал к активам, долговая нагрузка и рентабельность активов. Среди динамических признаков наиболее содержательным является темп роста прибыли: его знак отрицательный, то есть рост прибыли связан со снижением ИФР. Рост активов, напротив, имеет положительную связь с риском в однофакторной постановке, что согласуется с отраслевой логикой капиталоемкого расширения без гарантии устойчивости.

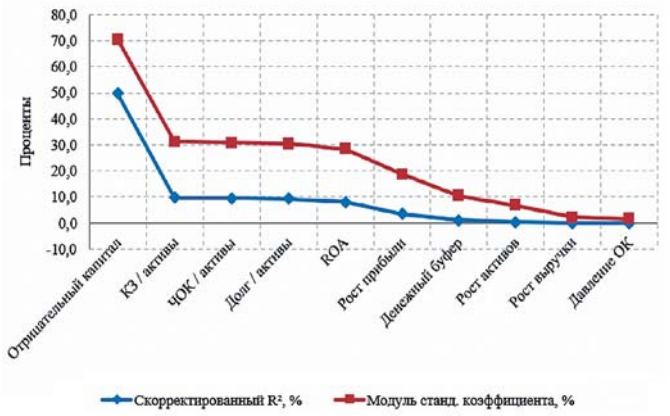


Рис. 1
Скрининг гипотез

Fig. 1
Hypothesis screening

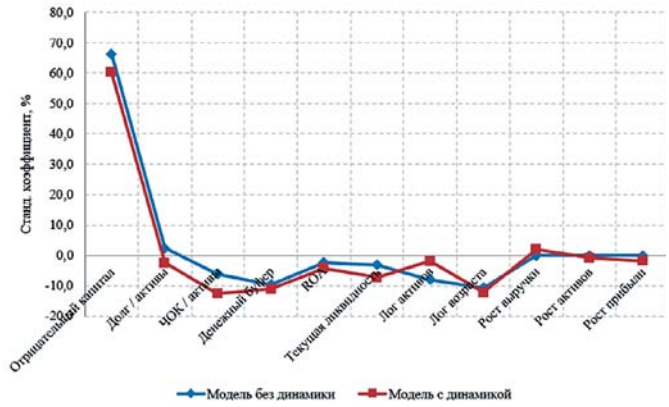


Рис. 2
Сравнительный анализ моделей индекса финансового риска

Fig. 2
A comparative analysis of the financial risk index models

Регрессионные результаты: финансовый риск

Добавление динамических признаков снижает размер модельной выборки, поскольку не по всем компаниям доступны темпы изменения (рис. 2).

Сравнение моделей ИФР без учета и с учетом динамических характеристик показывает устойчивость основных факторов, определяющих уровень финансовой уязвимости предприятий горнодобывающей промышленности. В обеих моделях сильное влияние на устойчивость оказывает наличие отрицательного собственного капитала: 0,6635 – без динамики и 0,6025 – с динамикой, что указывает на ключевую роль потери финансовой устойчивости в формировании высокого уровня риска.

Включение показателей динамики финансового состояния не изменяет направленность основных зависимостей. Показатели ликвидности и обеспеченности оборотными средствами оказывают статистически значимое отрицательное влияние на ИФР – увеличение денежных средств, чистого оборотного капитала и текущей ликвидности связано со снижением финансового риска. Также значимый отрицательный эффект сохраняет возраст предприятия, что свидетельствует о более низком уровне риска у зрелых компаний. При этом показатели динамики выручки, активов и прибыли не демонстрируют статистически значимого влияния на ИФР в рамках рассматриваемых моделей. В целом результаты подтверждают, что фундаментальные характеристики финансовой устойчивости – структуры капитала, ликвидности и наличия собственных источников финансирования оказывают большее влияние на уровень финансового риска предприятий, чем показатели текущей динамики.

Для построения логистической регрессионной модели потребовалась выборка из 2909 наблюдений. В анализ включены модели высокого риска с учетом динамических характеристик. В качестве зависимой переменной использовался бинарный индикатор «Высокий риск» (табл. 2).

Результаты оценки логистической регрессии показывают, что статистически значимое влияние на вероятность отнесения компании к категории высокого риска оказывают лишь отдельные финансовые характеристики. Наиболее существенным фактором является отрицательный собственный капитал (2,745). Отношение шансов составляет 15,561, что свидетельствует о том, что наличие собственного капитала увеличивает вероятность отнесения организации к категории высокого риска более чем в 15 раз по сравнению с компаниями, имеющими положительный собственный капитал.

Статистически значимое отрицательное влияние оказывает показатель отношения денежных средств к активам (–1,641). Отношение шансов, равное 0,193, означает, что увеличение доли денежных средств в активах снижает вероятность высокого риска приблизительно на 80,6%, что подтверждает положительное влияние ликвидности на финансовую устойчивость организации.

Таблица 2
Логит-модель высокого риска

Table 2
The high-risk logit model

Фактор	Коэффициент	Робастная стандартная ошибка	Статистика	Значимость	Отношение шансов
Константа	–0,8940	1,268	–0,7048	0,4809	0,4090
Отрицательный собственный капитал	2,745	0,5081	5,402	0,0000	15,561
Долг к активам	0,3671	0,7720	0,4755	0,6344	1,444
Чистый оборотный капитал к активам	–0,0767	0,4540	–0,1688	0,8659	0,9262
Денежные средства к активам	–1,641	0,5704	–2,876	0,0040	0,1939
Рентабельность активов	–0,1902	0,1150	–1,653	0,0984	0,8268
Текущая ликвидность	–0,0047	0,0049	–0,9448	0,3448	0,9953
Логарифм активов	–0,0289	0,0452	–0,6400	0,5222	0,9715
Логарифм возраста	-0,3681	0,1024	–3,596	0,0003	0,6921
Темп роста выручки 2024/2023	0,0077	0,0123	0,6258	0,5314	1,008
Темп роста активов 2024/2023	–0,0074	0,0077	–0,9665	0,3338	0,9926
Темп роста прибыли 2024/2023	–0,0055	0,0043	–1,290	0,1970	0,9945

Таблица 3
Логистическое моделирование вероятности высокого риска с использованием показателей оборотного капитала, рентабельности и индекса финансового риска

Table 3
A logistic modeling of the high-risk probability using indicators of the working capital, profitability and financial risk index

Фактор	Коэффициент	Робастная стандартная ошибка	Стандартизированный коэффициент	Статистика	Значимость
Оборотный капитал и рентабельность активов (зависимая переменная – рентабельность активов)					
Константа	–0,0369	0,1591	–	–0,2322	0,8164
Дебиторская задолженность к активам	0,0529	0,0381	0,0358	1,389	0,1649
Кредиторская задолженность к активам	0,0172	0,0513	0,0229	0,3341	0,7383
Давление оборотного капитала	–0,0074	0,0021	–0,0669	–3,624	0,0003
Денежные средства к активам	0,2784	0,0907	0,0788	3,069	0,0021
Запасы к активам	–0,0014	0,0412	–0,0007	–0,0328	0,9738
Долг к активам	–0,1710	0,0398	–0,4551	–4,302	0,0000
Логарифм активов	0,0084	0,0077	0,0342	1,089	0,2759
Логарифм возраста	0,0127	0,0133	0,0174	0,9569	0,3386
Темп роста выручки 2024/2023	0,0020	0,0017	0,0255	1,228	0,2196
Темп роста активов 2024/2023	0,0007	0,0007	0,0106	0,8989	0,3687
Темп роста прибыли 2024/2023	0,0041	0,0005	0,1978	7,499	0,0000
Оборотный капитал и индекс финансового риска (зависимая переменная – индекс финансового риска)					
Константа	52,774	7,451	–	7,083	0,0000
Дебиторская задолженность к активам	–4,832	2,706	–0,0522	–1,786	0,0741
Кредиторская задолженность к активам	9,241	3,615	0,1964	2,556	0,0106
Давление оборотного капитала	0,3207	0,1663	0,0460	1,929	0,0538
Денежные средства к активам	–37,798	3,870	–0,1707	–9,767	0,0000
Запасы к активам	1,302	2,752	0,0108	0,4732	0,6361
Долг к активам	8,949	2,189	0,3799	4,088	0,0000
Логарифм активов	–0,4631	0,3297	–0,0300	–1,405	0,1601
Логарифм возраста	–5,272	0,7622	–0,1151	–6,917	0,0000
Темп роста выручки 2024/2023	0,3269	0,0793	0,0655	4,122	0,0000
Темп роста активов 2024/2023	0,0797	0,0520	0,0203	1,533	0,1252
Темп роста прибыли 2024/2023	–0,1259	0,0216	–0,0973	–5,824	0,0000

Значимым фактором является логарифм возраста компании (–0,368). Отношение шансов составляет 0,692, что указывает на снижение вероятности высокого риска по мере увеличения возраста компании. Соответственно, более зрелые компании, с большим жизненным циклом характеризуются меньшей вероятностью попадания в категорию высокого риска.

Остальные объясняющие переменные не являются статистически значимыми, следовательно, в рамках логит-модели отсутствуют основания утверждать, что данные факторы оказывают самостоятельное влияние на вероятность отнесения компании к категории высокого риска.

Таким образом, логит-модель высокого риска подтверждает главный вывод о том, что ключевыми детерминантами высокого риска являются наличие отрицательного собственного капитала, низкая обеспеченность денежными средствами и небольшой возраст компании. Именно эти факторы обладают наибольшей объясняющей способностью при прогнозировании вероятности высокого риска в исследуемой выборке.

Регрессионные модели, которые оценивают влияние показателей оборотного капитала на рентабельность активов (ROA) и ИФР, для моделирования вероятности высокого риска с использованием зависимой переменной рентабельности активов – число наблюдений 2370, для ИФР – число наблюдений 2367 (табл. 3).

Результаты регрессионного анализа показывают, что рентабельность активов статистически значимо повышается при увеличении доли денежных средств в активах (0,0788) и темпа роста прибыли (0,1978). В то же время более высокий уровень долговой нагрузки (–0,4551) и давление оборотного капитала (–0,0669) оказывают отрицательное

Таблица 4
Модель кредитного лимита с динамическими признаками (зависимая переменная – логарифм кредитного лимита)

Table 4
A credit limit model with dynamic attributes (the dependent variable is the credit limit logarithm)

Фактор	Коэффициент	Робастная стандартная ошибка	Стандартизированный коэффициент	Статистика	Значимость
Константа	2,399	0,4174	–	5,747	0,0000
Индекс финансового риска	–0,0416	0,0022	–0,3873	–19,093	0,0000
Рентабельность активов	0,0565	0,1716	0,0195	0,3296	0,7417
Денежные средства к активам	0,5731	0,2396	0,0455	2,393	0,0167
Долг к активам	0,0121	0,0699	0,0081	0,1737	0,8621
Залоговый признак	0,0779	0,1043	0,0131	0,7467	0,4552
Логарифм активов	0,6308	0,0435	0,5523	14,497	0,0000
Логарифм выручки	0,1453	0,0413	0,1288	3,521	0,0004
Логарифм возраста	–0,0536	0,0683	–0,0137	–0,7846	0,4327
Темп роста выручки 2024/2023	–0,0628	0,0226	–0,0708	–2,775	0,0055
Темп роста активов 2024/2023	–0,0198	0,0144	–0,0301	–1,376	0,1689
Темп роста прибыли 2024/2023	–0,0268	0,0048	–0,1288	–5,631	0,0000

влияние на рентабельность активов. Остальные показатели оборотного капитала не продемонстрировали статистически значимой связи. Модель рентабельности активов и оборотного капитала показала, что их рост связан с увеличением денежных средств и прибыли, а высокая долговая нагрузка и давление оборотного капитала оказывают негативное влияние на эффективность использования активов.

Модель индекса финансового риска показывает, что ключевым фактором повышения значения индекса является увеличение доли кредиторской задолженности (0,1964), долговой нагрузки (0,3799) и темпа роста выручки (0,655). Напротив, рост доли денежных средств (–0,1707), возраста предприятий (–0,1151) и темпа роста прибыли (–0,0973) связан со снижением значения индекса финансового риска. Влияние дебиторской задолженности и давления оборотного капитала является погранично значимым, тогда как запасы, размер предприятия и темпы роста активов статистически значимого влияния не оказывают. Модель ИФР позволила сделать выводы, что основными факторами являются увеличение долговой и кредиторской задолженности, а высокая обеспеченность денежными средствами, зрелость компании и рост прибыли способствуют снижению риска.

Модель кредитного лимита с динамическими признаками позволит оценить влияние изменений финансовых показателей предприятия на его кредитный потенциал и определить факторы доступности к заемному финансированию. Модель построена на основе 1288 наблюдений (табл. 4).

Наиболее значимым фактором модели кредитного лимита с динамическими признаками является размер предприятия, логарифм активов оказывает сильное положительное влияние на кредитный лимит (0,5523), что указывает на преимущество более крупных компаний при доступе к заемному финансированию. Положительное влияние имеют также объем выручки (0,1288) и доля денежных средств в активах (0,0455).

Индекс финансового риска оказывает статистически значимое отрицательное влияние на кредитный лимит (–0,3873), что подтверждает ограничение кредитного пространства при ухудшении финансового состояния. Рост выручки и прибыли имеют отрицательные коэффициенты (–0,0708; –0,1288 соответственно). Данный результат может свидетельствовать о том, что кредиторы, учитывая финансовую динамику, будут сдерживать кредитование предприятий с высокой изменчивостью показателей.

Таким образом, кредитное пространство предприятий в большей степени определяется их масштабом, текущей ликвидностью и уровнем финансового риска, при этом краткосрочная динамика роста не всегда приводит к расширению доступа к кредитным ресурсам.

Интерпретация результатов и выводы

Результаты исследования показывают, что ключевым фактором финансового риска в горнодобывающей отрасли остается отрицательный собственный капитал, отражающий накопленные балансовые проблемы. Динамика показателей также имеет существенное значение, поскольку сбалансированный рост связан со снижением риска, а расширение активов без роста выручки повышает его. Давление на оборотный капитал снижает эффективность, а денежный буфер повышает устойчивость. Кредитное пространство определяется сочетанием масштаба предприятия, финансового риска и качества баланса. При этом горнодобывающая отрасль характеризуется высокой неоднородностью, что требует дифференцированного мониторинга отдельных подотраслей с повышенной капиталоёмкостью и волатильностью результатов.

Заключение

Проведенное исследование показало, что ключевыми факторами финансового риска предприятий горнодобывающей промышленности являются отрицательный собственный капитал, несбалансированный рост активов, состояние оборотного капитала и параметры кредитного пространства. Полученные результаты подтверждают необходимость комплексной оценки финансовой неустойчивости с учетом отраслевой специфики и динамически основных финансовых показателей. Предложенный подход может быть использован для совершенствования системы управления финансовыми рисками и принятия обоснованных управленческих решений в горнодобывающем секторе.

Список литературы / References

1. Прудникова А.А. Международная повестка декарбонизации экономики: взгляд и ответ России. *Экономика. Налоги. Право*. 2025;18(2):129–137. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-2-129-137
Prudnikova A.A. The International Economic Decarbonization Agenda: Russia's View and Response. *Economics, Taxes & Law*. 2025;18(2):129–137. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-2-129-137

2. Крупнов Ю.А., Сильвестров С.Н. Технологический суверенитет и диффузия технологий. *Вестник Института экономики Российской академии наук*. 2024;(2):31–48. https://doi.org/10.52180/2073-6487_2024_2_31_48
Krupnov Y.A., Silvestrov S.N. Technological sovereignty and diffusion of technologies. *Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*. 2024;(2):31–48. (In Russ.) https://doi.org/10.52180/2073-6487_2024_2_31_48

3. Будкина Е.С., Грищенко Ю.И., Грищенко А.В. Экономический анализ национальных стратегий развития добычи редкоземельных металлов в условиях глобального дефицита критического минерального сырья. *Горная промышленность*. 2026;(2):222–229. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-222-229
Budkina E.S., Grishchenko Yu.I., Grishchenko A.V. An economic analysis of the national mining strategies for rare earth metals in conditions of the global deficit for critical minerals. *Russian Mining Industry*. 2026;(2):222–229. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-222-229

4. Прокофьев С.Е., Панина О.В., Красюкова Н.Л., Еремин С.Г., Бутова Т.В. Применение свёрточных нейронных сетей для гиперспектральной классификации медно-никелевых руд в арктических условиях. *Горная промышленность*. 2026;(1):114–121. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-114-121
Prokofiev S.E., Panina O.V., Krasyukova N.L., Eremin S.G., Butova T.V. Application of convolutional neural networks for hyperspectral classification of copper-nickel ores in Arctic conditions. *Russian Mining Industry*. 2026;(1):114–121. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-114-121

5. Комарницкая А.Н., Соколов И.А., Солянникова С.П. Бюджетная устойчивость как основа финансового суверенитета страны. *Финансы: теория и практика*. 2026;30(2):6–19. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2026-30-2-6-19
Komarnitskaya A.N., Sokolov I.A., Solyannikova S.P. Budgetary Sustainability as the basis of a country's financial sovereignty. *Finance: Theory and Practice*. 2026;30(2):6–19. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2026-30-2-6-19

6. Ручкина Г.Ф. Регулирование оборота цифровых финансов как важной составляющей экономического и технологического суверенитета России. *Банковское право*. 2024;(3):7–15. https://doi.org/10.18572/1812-3945-2024-3-7-15
Ruchkina G.F. Circulation regulation of digital finance as an important component of economic and technological sovereignty of Russia. *Banking Law*. 2024;(3):7–15. (In Russ.) https://doi.org/10.18572/1812-3945-2024-3-7-15

7. Бондаренко М.П., Попадюк Т.Г., Скрипник О.Б., Борисова О.В. Проектное финансирование освоения месторождений твёрдых полезных ископаемых в условиях ужесточения требований банковского кредитования. *Горная промышленность*. 2026;(2):161–168. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-161-168
Bondarenko M.P., Popadyuk T.G., Skripnik O.B., Borisova O.V. Project financing for development of solid mineral deposits under tightening bank lending requirements. *Russian Mining Industry*. 2026;(2):161–168. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-161-168

8. Панина О.В., Попадюк Н.К., Еремин С.Г., Токмурзин Т.М., Разумова Е.В. Применение технологий BigData для оптимизации производственных процессов в горнодобывающей промышленности России: анализ внедрения и эффективности. *Горная промышленность*. 2024;(6):178–185. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-178-185
Panina O.V., Popadyuk N.K., Eremin S.G., Tokmurzin T.M., Razumova E.V. Application of the BigData technologies to optimize production processes in the Russian mining industry: analysis of implementation and efficiency. *Russian Mining Industry*. 2024;(6):178–185. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-178-185

9. Федотова М.А., Погодина Т.В., Карпова С.В. Оценка тенденций и перспектив развития экономики России в условиях санкционного давления. *Финансы: теория и практика*. 2025;29(1):6–19. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-1-6-19
Fedotova M.A., Pogodina T.V., Karpova S.V. Assessment of trends and prospects for the development of the Russian economy in the context of sanctions pressure. *Finance: Theory and Practice*. 2025;29(1):6–19. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-1-6-19

10. Карпова С.В., Погодина Т.В., Приходько Л.В. Развитие методов продвижения продукции на рынок как фактор улучшения финансового состояния компаний. *Финансы: теория и практика.* 2026;30(3):181–194. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2026-30-3-181-194
Karpova S.V., Pogodina T.V., Prikhodko L.V. Development of marketing methods as a factor in improving companies' financial condition. *Finance: Theory and Practice.* 2026;30(3):181–194. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2026-30-3-181-194

11. Грищенко Ю.И., Грищенко А.В. Методические аспекты оценки развития малого и среднего предпринимательства в странах BRICS. *Экономика. Налоги. Право.* 2026;19(3):118–131. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2026-19-3-118-131
Grishchenko Yu.I., Grishchenko A.V. Methodological aspects of assessing the development of small and medium enterprises in BRICS countries. *Economics, Taxes & Law.* 2026;19(3):118–131. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2026-19-3-118-131

12. Шумская Е.И., Панина О.В., Еремин С.Г., Красюкова Н.Л., Бутова Т.В. Оценка эффективности радарного мониторинга устойчивости бортов карьеров на угольных разрезах Кузбасса. *Горная промышленность.* 2026;(3):79–87. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-79-87
Shumskaya E.I., Panina O.V., Eremin S.G., Krasyukova N.L., Butova T.V. Assessing the efficiency of radar monitoring of pit slope stability in Kuzbass coal mines. *Russian Mining Industry.* 2026;(3):79–87. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192- 2026-3-79-87

13. Кучковская Н.В. Экономическая эффективность цифровой трансформации горнодобывающих предприятий в условиях технологической модернизации и решений Индустрии 4.0. *Горная промышленность.* 2025;(6):88–96. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-88-96
Kuchkovskaya N.V. Economic efficiency of digital transformation of mining companies in conditions of technological modernization and Industry 4.0 solutions. *Russian Mining Industry.* 2025;(6):88–96. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-88-96

14. Череповская Н.А., Худоян А.К. Оценка межотраслевого влияния металлургического сектора на финансовые результаты добывающих предприятий горной промышленности в условиях санкций. *Горная промышленность.* 2026;(2):230–234. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-230-234
Cherepovskaya N.A., Khudoyan A.K. Assessment of the cross-industry impact of the metallurgical sector on the financial results of mining companies under sanctions. *Russian Mining Industry.* 2026;(2):230–234. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-230-234

Информация об авторах
Череповская Наталья Анатольевна – кандидат экономических наук, доцент, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-3828-2536; e-mail: nacherepovskaya@fa.ru
Моттаева Анджела Бахауовна – доктор экономических наук, профессор кафедры стратегического и инновационного развития, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0001-8904-4154; e-mail: abmottaeva@fa.ru
Якушова Елена Сергеевна – кандидат экономических наук, доцент кафедры стратегического и инновационного развития, факультет высшей школы управления, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-4967-2081; e-mail: esyakushova@fa.ru
Алейникова Марина Юрьевна – кандидат экономических наук, доцент, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0001-5810-3123, e-mail: myaleynikova@fa.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 05.06.2026
Поступила после рецензирования: 16.07.2026
Принята к публикации: 22.07.2026

Information about the authors
Natalya A. Cherepovskaya – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-3828-2536; e-mail: nacherepovskaya@fa.ru
Angela B. Mottaeva – Dr. Sci. (Econ.), Professor, Department of Strategic and Innovative Development, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0001-8904-4154; e-mail: abmottaeva@fa.ru
Elena S. Yakushova – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Strategic and Innovation Development, Higher School of Management, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-4967-2081; e-mail: esyakushova@fa.ru
Marina Yu. Aleynikova – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0001-5810-3123; e-mail: myaleynikova@fa.ru

Article info
Received: 05.06.2026
Revised: 16.07.2026
Accepted: 22.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-107-113

Экспресс-диагностика трансмиссионных систем карьерных экскаваторов

А.Э. Салимов ✉, **С.Л. Иванов, Д.А. Шибанов**
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ salimoff.abbas@gmail.com

Резюме: В условиях интенсификации горных работ карьерные экскаваторы ЭКГ-20К Узбекистана и России демонстрируют высокий уровень внеплановых простоев приводов напора и подъема, суммарно составляющих 36–44% общего времени состояния неработоспособности оборудования. Традиционные способы предупредительного технического обслуживания и обслуживания по фактическому состоянию не обеспечивают требуемого уровня готовности. В исследовании предложена система добросовестного технического обслуживания и ремонта карьерных экскаваторов на основе анализа чистоты масла, которая интегрирует адаптированный метод Fine-Kinney с полевой экспресс-диагностикой масла и алгоритмом комплексной оценки технического состояния. Алгоритм оценки автоматизирует коды дефектов и индекс технического состояния. Ключевым признаком технического состояния является соотношение в масле железа, цинка и фосфора, позволяющее прогнозировать отказы с высокой степенью вероятности. Разработанная система включает пятиэтапную процедуру анализа, унифицированную кодировку дефектов и матрицу оценки рисков по ГОСТ. Внедрение предложенной авторами системы добросовестного технического обслуживания и ремонта обеспечивает повышение готовности парка до 0,9 и снижение внеплановых простоев на 20–30% без увеличения затрат, а также повышение срока службы редукторов подъема и напора на 19,7%.

Ключевые слова: карьерный экскаватор, экспресс-диагностика, чистота масла, CM&R, риск отказа, редуктор напора, редуктор подъема, Fine-Kinney, механические примеси, техническое обслуживание, индекс технического состояния

Для цитирования: Салимов А.Э., Иванов С.Л., Шибанов Д.А. Экспресс-диагностика трансмиссионных систем карьерных экскаваторов. *Горная промышленность*. 2026;(5):107–113. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-107-113

Express diagnostics of power transmission systems of mine excavators

A.E. Salimov ✉, **S.L. Ivanov, D.A. Shibanov**
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ salimoff.abbas@gmail.com

Abstract: In conditions of intensified mining operations, the EKG-20K open-pit excavators in Uzbekistan and Russia demonstrate high levels of unscheduled downtime for their pressure and lift drives, accounting for 36–44% of the total equipment downtime. Traditional preventive and predictive maintenance methods fail to provide the required level of availability. This paper proposes a Conscientious Maintenance and Repair concept that integrates an adapted Fine-Kinney method with express field diagnostics of oil and an algorithm for a comprehensive assessment of the technical condition. The integrated algorithm automates the Diagnostic Trouble Codes (DTC) and the Equipment Health Index (EHI). A key indicator of the technical condition is the content of iron, zinc, and phosphorus in the oil, which enables prediction of failures with a high degree of probability. The system includes a five-stage analysis procedure, a unified DTC system, and a risk assessment matrix in accordance with GOST. Implementation of the Conscientious Maintenance and Repair System ensures an increase in the fleet availability up to 0.9 and a reduction in unscheduled downtime by 20–30% without increasing costs, as well as a 19.7% increase in the service life of the lift and thrust gearboxes

Keywords: mining excavator, express diagnostics, oil cleanliness, CM&R, risk of failure, thrust gearbox, lift gearbox, Fine-Kinney, mechanical impurities, maintenance and repair, Equipment Health Index

For citation: Salimov A.E., Ivanov S.L., Shibanov D.A. Express diagnostics of power transmission systems of mine excavators. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):107–113. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-107-113

Введение

Карьерный экскаватор ЭКГ-20К грузоподъемностью 20 м³ является основным средством в технологии горнорудных предприятий Узбекистана и России. Механизмы напора и подъема обеспечивают цикл работы экскаватора «копание-транспортировка-разгрузка-возвращение в исходное положение», где любой отказ создает каскадные последствия: простои транспорта, потенциальные потери объемов эксплуатации, дополнительные материальные и ресурсные потери на внеплановое восстановление отказавшего объекта [1–3].

Статистический анализ работы эксплуатации экскаваторов ЭКГ-20К (20 ед.) за 2025 г. в условиях медных карьеров выявил следующую структуру внеплановых простоев в ремонтах:

– привод напора – 15,2% общего времени недоступности (средняя длительность отказа 16,4 ч);
– привод подъема – 23,8% (средняя длительность 14,8 ч);
– рабочий орган – 19,6%;
– ходовая часть – 12,4%;
– механизм поворота – 9,6%;
– электрооборудование – 8,2%;
– прочее – 11,2%.

Приводы напора и подъема формируют суммарно 36–44% критических отказов, определяющих эффективность работы экскаватора как горнопромышленной системы [1; 4; 5].

Традиционные подходы поддержания в готовности сложных технических объектов, к которым относят карьерные экскаваторы, не позволяют обеспечивать безаварийную работу этих машин. Так, предупредительная стратегия, реализуемая в рамках систем планово-предупредительных ремонтов (Time-Based Maintenance, TBM) с фиксированными интервалами 500/1500/3000/6000 моточасов, не учитывает разнообразие условий функционирования отдельных машин, а также реальные условия эксплуатации центрально-азиатских карьеров, в частности, запыленность атмосферы, которая имеет концентрацию 120–150 мг/м³ кварцевой пыли, и уже через 200 ч работы в масле может содержаться 15–28 мг/кг (ppm) кремния, усугубляя состояние редуктора высокой температурой масла (+65 – +78 °C) при средней температуре окружающей среды +42 °C, сопровождающееся ускоренным окислением и деградацией присадок в 2,1 раза в сравнении с нормальными условиями эксплуатации [2; 6; 7].

Обслуживание по фактическому состоянию (Condition-Based Maintenance, CBM) практически не ориентировано на проведение полевых методов экспресс-диагностики трансмиссии. В то же время лабораторный анализ масла занимает 2–4 дня, что затягивает принятие решений, особенно в случаях предотказного состояния подшипников или зубчатых передач, и может превышать цикл развития отказа, который в этом случае составляет 3–10 дней при усталостном выкрашивании или интенсивном абразивном изнашивании [8–10].

Целью настоящей работы является разработка оперативной диагностики редукторов ЭКГ-20К на основе полевого экспресс-анализа масла, интегрированной с методом оценки рисков Fine-Kinney и алгоритмом комплексной оценки технического состояния. Новизна подхода состоит в адаптации классического метода Fine-Kinney под специфику редукторов карьерных экскаваторов, разработке унифицированной системы кодирования дефектов и связи этой кодировки с единой метрикой готовности (Its – Index of Technical State) в рамках концепции добросовестного технического обслуживания и ремонта (CM&R – Conscientious Maintenance and Repair) [11; 12].

Материалы и методы

Основная гипотеза исследования: риск потенциальной опасности дефекта трансмиссии количественно оценивается как произведение трех безразмерных показателей:

$$R = P_V P_S P_{PS},$$

где P_V – вероятность отказа (0,1–10 баллов); P_S – остаточный ресурс элемента (0,5–10 баллов); P_{PS} – тяжесть последствий (1–100 баллов).

Параметры унифицированы по трем государственным стандартам:

1. ГОСТ Р 58771–2019 Менеджмент риска. Технологии оценки рисков.
2. ГОСТ Р 27.606–2013 Надежность в технике. Техническое обслуживание, ориентированное на безотказность.
3. ГОСТ 27.310–95 Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов [1; 12].

Интерпретация индекса рисков *R* представлена в табл. 1.

Таблица 1
Ранжирование рисков

Table 1
Risk ranking

Интервал *R*	Категория риска	Требуемые действия
$R < 50$	Допустимый	Продолжение текущего режима работы
$50 \le R < 150$	Низкий	Рекомендуется планово-предупредительное ТО
$150 \le R < 300$	Средний	Требуется внеплановое техническое обслуживание
$300 \le R < 600$	Высокий	Необходимо немедленное проведение корректирующего ТО
$R \ge 600$	Недопустимый	Требуется немедленный ремонт или замена элемента

Во время работы редукторов подъема и напора экскаватора возможен долив масла, продукты изнашивания удаляются фильтрами, при этом концентрация продуктов износа определяется начальной и текущей концентрацией этих продуктов в смазочном масле, емкостью картера или масляного бака системы смазывания, интенсивностью поступления продуктов износа и временем функционирования контролируемых объектов после долива масла [13–15].

В качестве ключевого диагностического признака на основании спектрометрического анализа проб масла из ванн редукторов выявлены критичные соотношения элементов (рис. 1):

– железо Fe: 70–320 мг/кг (норма < 20 мг/кг) – интенсивное изнашивание зубчатых передач, подшипников, связанное с абразивным или усталостным выкрашиванием;

– цинк Zn: 5–30 мг/кг (норма 20–40 мг/кг) – свидетельствует о деградации противозадирных присадок ZDDP;

– фосфор P: 5–20 мг/кг (норма 10–25 мг/кг) – обусловлено истощением противозадирного пакета.

Корреляционный анализ ($r = 0,87$, $p < 0,01$) подтвердил за-

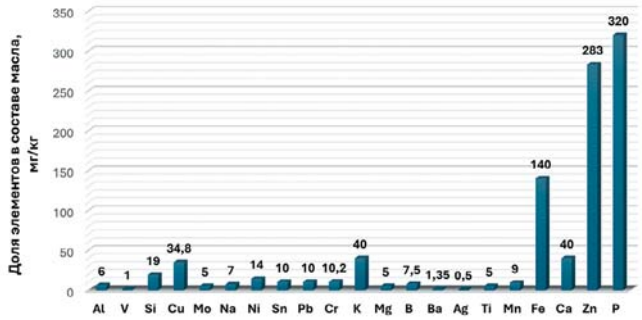


Рис. 1
Усредненный состав масла редуктора экскаватора ЭКГ-20К

Fig. 1
Averaged gear oil composition for the EKG-20K excavator

висимость: рост Fe >70 ppm предсказывает переход в предельное состояние, а интенсивность роста определяет период этого перехода – отказ с вероятностью 89% [9; 16; 17].

Результаты

1. Матричная оценка рисков Fine-Kinney позволяет преобразовать качественные экспертные оценки в числовые баллы по трехмерной матрице (табл. 2–4).

Таблица 2
Шкала P_V
(вероятность отказа)

Table 2
The P_V scale
(failure probability)

Балл	Частота	Пример для ЭКГ-20К
0,1	< 1 раз/10 лет	Сверхредкий отказ муфты
1	1 раз/год	Поломка вала
3	1 раз/квартал	Отказ подшипников
6	1 раз/месяц	Абразивный износ зубчатых колес (Fe > 70 мг/кг)
10	>1 раз/неделя	Протечка сальников

Таблица 3
Шкала P_S
(остаточный ресурс)

Table 3
The P_S scale
(remaining life time)

Балл	Остаточный ресурс%	Диагностический признак
0,5	> 90%	Новый редуктор
1	60–90%	Вибрация < 2,8 мм/с
3	30–60%	Fe 70–160 мг/кг
6,5	10–30%	Fe 160–320 мг/кг
10	< 10%	Fe > 320 мг/кг

Таблица 4
Шкала P_{PS}
(последствия)

Table 4
The P_{PS} scale
(consequences)

Балл	Длительность простоя	Производственные потери*
1	< 1 ч	300–450 м³
6	4–8 ч	1200–2400 м³
15	24 ч	4800–9000 м³
40	3–7 дней	30 000–55 000 м³
100	> 1 недели	Остановка карьера или производственной линии

* определяется для каждого горного предприятия согласно производственному плану.

Расчетный пример для редуктора напора:
– P_V = 6 (6 отказов/год по статистике 2025 г.);
– P_S = 1 (ультразвук 2,4 мм/с, 68% ресурса);
– P_S = 40 (остановка 4 смены, 18 тыс. м³ горной массы);
– R = 6 × 1 × 40 = 240 баллов («Высокий риск». Необходимо немедленное проведение корректирующего ТО) [1].

Одним из значимых проявлений наличия интенсивных деградационных процессов, как это указывалось выше, является анализ масла в ванне редуктора. Регулярный мониторинг состава масла позволяет отслеживать динамику износа и прогнозировать возможные неисправности до их критического развития. Таким образом, помимо общего анализа рисков, для редукторов подъема и напора экскаватора целесообразно регулярно проводить анализ состояния масла в ванне редуктора [18; 19].

2. Пятиэтапная процедура экспресс-анализа масла

Этап 1. Подготовка:
– пробоотборник (заявка на патент №2025120506/04 (048315)), фильтр БЧС-40;
– точка отбора: картер редуктора через осмотровый люк (T = 42–65 °C).

Этап 2. Визуальная оценка представляет собой предварительную органолептическую оценку состояния масла по прозрачности в пробе и экспресс-оценку рабочих свойств работающих масел в полевых условиях методом «масляного пятна» на фильтре, фиксации его на фото с последующим сравнением базовой шкалы классов чистоты (0–17) масла ТАП-15 редукторов напора и подъема. В зависимости от степени деградации масел присваивается код загрязнения от 1 до10.

Этап 3. Получение несгораемой фракции: фильтр с пробой сжигают пропановой горелкой на керамической пластине с последующим взвешиванием золы, если относительная масса золы > 0,05 г/мл, то присваивается код 8–10.

Этап 4. Спектрометрический анализ золы пробы или пробы масла портативным рентгенофлуоресцентным анализатором[1]. Диапазон измерений: Fe, Zn, P, Cu, Al, Si (1–500 ppm), погрешность: ±0,2 ppm, время экспозиции: 120 с (табл. 5).

Таблица 5
Нормативы загрязнителей
(шкала ppm)

Table 5
Standard limits for contaminants (ppm scale)

Элемент	Норма, ppm	Код 4	Код 6	Код 8	Код 10
Fe	< 20	20–70	70–160	160–320	> 320
Zn	20–40	15–20	10–15	5–10	< 5
P	10–25	8–10	5–8	3–5	< 3
Si	< 5	5–15	15–30	> 30	–

Этап 5. Кодировка дефекта.
Формат: Z-XX1-XX2-X3-XX4, где
– Z – привод: 01 – напора, 02 – подъема;
– XX1 – тип проявления дефекта: 1 – масло, 2 – вибрация, 3 – T (температура);
– XX2 – степень отклонения от нормы: код 0–10 (визуальная оценка по базовой шкале загрязнений и/или масса взвешенной золы, и/или шкала ppm);
– X3 – механизм деградации: 1 – изнашивание, наличие абразива, 2 – усталостное выкрашивание, 3 – деградация присадки, старение масла;

1 Рентгенофлуоресцентный анализатор. Detector System. Режим доступа: https://detsys.ru/catalog/obnaruzhiteli-vzryvchatyh-veshhestv/portativnyy_rentgenofluorestsentnyy_analizator_meteksper t/ (дата обращения 04.02.2026).

– XX4 – рекомендуемый перечень мероприятий по недопущению отказа: 0 – не требует внеплановых и плановых действий, 4 – ТО, 6 – ТР (требуется внеплановый ремонт), 8 – КР, 10 – замена (списание) [1; 20; 21].

Пример: по результатам очередного контроля анализа масла в ванне редуктора подъема [22] капельная проба показала процент загрязнения по массе, равный 0,004–0,008, что соответствует среднему показателю загрязнения – требуется очистка или замена масла, Код – 8. Взвешивание золы пробы и соответствующий пересчет показал массу 0,049 г/мг. Масло соответствует 14-му классу чистоты, Код – 6 (требует плановой замены). Спектральный экспресс- анализ золы пробы выявил Fe = 185 ppm, Zn = 12 ppm, что соответствует достаточно загрязненному маслу продуктами изнашивания в виде железа, говорящему об интенсивном изнашивании зубчатых колес и/или усталостном выкрашивании подшипников, Код – 8. Значительное снижение действенности противозадирных присадок по Zn – Код 6. Тогда кодировка дефекта по маслу, для нейтрализации риска более высокого ранга, будет выглядеть так: **02-100-06-1-8.**

3. Детерминированный алгоритм представляет собой специализированный метод комплексной оценки технического состояния оборудования (Index of Technical State, Its или индекс технического состояния, ИТС). Это количественная оценка текущего технического состояния объекта, количественно определяющая его работоспособность в рамках установленных технических требований. Индекс используют для планирования технического обслуживания, ремонтов и замены оборудования, а также для оценки рисков его эксплуатации [23; 24]. В нашем случае оценку технического состояния редукторов подъема и напора экскаватора возможно получить, объединив описанные выше оценки рисков, результаты пятиэтапной процедуры экспресс-анализа масла с результатами контроля вибрации и температуры редуктора или его частей [25–27].

Формула для комплексной оценки редукторов напора и подъема при оценке их состояния по маслу имеет вид:

$$Its = \Sigma\ (Kd\ Vm\ Rf),$$

где *Kd* – код дефекта (2–10); *Vm* – весомость последствий отказа редуктора в целом (0,45) и его элементов: зубчатая передача (0,25), муфта (0,2), вал (0,1); *Rf* – коэффициент риска факторов: пыль (1,2), температура (1,1), эргатика (1,3).

Пусть при работе редуктора была зафиксирована повышенная вибрация, проявляющаяся на одной из зубцовых частот, а повышенная температура зафиксирована в районе муфты.

Назначим пороговые значения готовности *Its*:

– < 400 – зеленая зона (> 95% ресурса);

– 400–1000 – желтая зона (75–95%);

– > 1000 – красная зона (< 75%).

На основании принятых исходных данных индекса технического состояния редуктора по трем указанным параметрам получим:

– масло: *Kd* = 6, *Vm* = 0,45, *Rf* = 1,2; Its_M = 6·0,45·1,2 = 3,24;

– вибрация: *Kd* = 4, *Vm* = 0,25, *Rf* = 1,0; Its_B = 4·0,25·1,0 = 1,0;

– температура: *Kd* = 2, *Vm* = 0,20, *Rf* = 1,1; Its_T = 2·0,2·1,1 = 0,44.

Its = 4,68 (желтая зона, редуктор требует внепланового ремонта (ТР)), код **02-123-06-3-6**.

Для более глубокого и всестороннего анализа оценки состояния редукторов количество контролируемых параметров может быть увеличено, однако следует помнить, что их количество должно быть минимальным и достаточным для решения поставленной задачи. Представляется правильным в рассматриваемом случае ограничиться этими тремя параметрами, учитывая тот факт, что по J. Moubray [28] на ранней стадии проявляются изменения уровня вибрации за 1–9 мес до отказа, появление железа в масле удается обнаружить за 1–6 мес до отказа, а изменение температурного поля фиксируется за 3–12 недель до отказа. Таким образом, имеется и время, и возможность предусмотреть мероприятия технического обслуживания и ремонта для восстановления ресурса объекта.

Обсуждение результатов

Внедрение в практику плановых осмотровых мероприятий экспресс-диагностики масла заметно расширяет информационный фон при оценке состояния редукторов экскаватора, частота таких диагностических процедур, очевидно, способствует более глубокому пониманию происходящих нелинейных деградационных процессов собственно в редукторе и позволяет оперативно принимать своевременные решения по предупреждению отказов. Оперативность реализации восстановительных мероприятий и мероприятий организационного характера благодаря применению кодировки в формате ZXX1-XX2-X3-XX4 и алгоритмизации процедур по оценке индекса технического состояния (алгоритм Its) позволяет оперативно и с минимальными материальными и временными потерями планировать и осуществлять поддержание инспектируемых объектов на заданном уровне работоспособности. Блокчейн неизменяемой истории кодов обеспечивает прозрачность и объективность оценочных суждений о состоянии объекта. Все это выгодно отличает подходы системы технического обслуживания и ремонта от алгоритмов традиционных систем.

В перспективе применение **IoT**-датчиков Fe/Zn позволят онлайн каждые 4 ч с точностью ±2 ppm проводить мониторинг состояния как элементов редуктора, так и состояния масла в его ванне в автоматическом режиме без участия человека в диагностических процедурах непосредственно на машине. А цифровые двойники: CFD-модели масляного потока редукторов позволят заблаговременно оценивать эффективность и своевременность планируемых ремонтно-восстановительных и профилактических мероприятий в режиме симуляции.

Заключение

Предложенный способ экспресс-диагностики трансмиссионных систем карьерных экскаваторов ЭКГ-20К на основе анализа чистоты масла открывает путь к настоящему переходу от предупредительного обслуживания к обслуживанию по техническому состоянию основных механизмов экскаватора, что стройно вписывается в надежностно-центрированную систему RCM (Reliability-Centered Maintenance) или техническое обслуживание, ориентированное на безотказность (ГОСТ Р 27.606–2013). Интеграция в CM&R с расчетом риска по методу Fine-Kinney и кодировкой дефектов позволяет оперативно выявлять критические тенденции – от абразивного загрязнения до деградации присадок – и принимать обоснованные решения по плановому восстановлению ресурса редукторов напора и подъема, снижая тем самым риски аварийных отказов ресурсоопределяющих элементов экскаватора.

Реализация предложенного способа способствует повышению готовности рассматриваемого оборудования

до 0,9, снижая внеплановые простои на 20–30% без роста затрат, повышению срока службы редукторов подъема и напора на 19,7%. Для добросовестного выполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту следует большее внимание уделять диагностике оборудования, для чего требуется четкое планирование процедур, обучение персонала, обеспечение его необходимым эффективным оборудованием при автоматизации передачи данных в соответствующие базы, необходимы систематическое обучение персонала и унификация процедуры на предприятиях при безусловной заинтересованности и ответственности за принимаемые решения на всех уровнях горного предприятия без исключения.

Список литературы / References

1. Салимов А.Э., Иванов С.Л. Оценка эффективности технического обслуживания карьерных экскаваторов по доле ремонтных простоев. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2026;(5):52–65. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2026/5/05_2026_52-65.pdf (дата обращения: 27.03.2026).
Salimov A.E., Ivanov S.L. Evaluation of the efficiency of maintenance of quarry excavators by the share of repair downtime. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2026;(5):52–65. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2026/5/05_2026_52-65.pdf (accessed: 27.03.2026).

2. Хамидов О.У., Шибанов Д.А. Техническое обслуживание и ремонт карьерных экскаваторов по регламенту с учетом фактических условий и режимов их эксплуатации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12-3):152–167. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12-3/152.pdf (дата обращения: 27.03.2026).
Khamidov O.U., Shibanov D.A. Regulated maintenance and repair of quarry excavators considering real-world conditions and operating modes. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(12-3):152–167. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12-3/152.pdf (accessed: 27.03.2026).

3. Баранникова И.В., Мажибрада И. Прогнозирование отказов одноковшовых экскаваторов на основе методов искусственного интеллекта. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(1):37–46. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2017/1/37_46_1_2017.pdf (дата обращения: 27.03.2026).
Barannikova I.V., Mazhibrada I. Predicting the probability of failure of excavators based on artificial intelligence methods. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(1):37–46. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2017/1/37_46_1_2017.pdf (accessed: 27.03.2026).

4. Михайлов А.В., Казаков Ю.А., Козачков Г.С. Особенности размещения модуля измельчения при внутрикарьерной переработке торфяного сырья. *Горная промышленность*. 2024;(5):94–100. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-94-100
Mikhailov A.V., Kazakov Yu.A., Kozachkov G.S. Specific features of a grinding module location in in-pit processing of peat raw materials. *Russian Mining Industry*. 2024;(5):94–100. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-94-100

5. Вакулин Е.А., Заяц А.И., Беклемешев В.А., Ивашкевич В.А., Хажиев В.А., Байкин В.С. Оценка качества расследования и устранения причин отказов оборудования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(S12):116–126. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-64-116-126
Vakulin E.A., Zayats A.I., Beklemeshev V.A., Ivashkevich V.A., Khazhiev V.A., Baikin V.S. Qualitative assessment of equipment failure cause finding and removal. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(S12):116–126. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-64-116-126

6. Кац Б.А. Контроль процессов ТОиР: как добиться эффективности? *Управление производством*. 2009;(5-6):60–64. Режим доступа: https://itm.spb.ru/files/contr_proc_toir.pdf (дата обращения: 12.01.2024).
Kats B.A. Control of maintenance and repair processes: how to achieve efficiency? *Production Management*. 2009;(5-6):60–64. (In Russ.) Available at: https://itm.spb.ru/files/contr_proc_toir.pdf (accessed: 12.01.2024).

7. Антоненко И.Н., Кац Б.А. Анализ рисков и электронный журнал дефектов. *Молочная промышленность*. 2013;(5):30–33.
Antonenko I.N., Kats B.A. Analysis of risks and electronic defects register. Dairy Industry. 2013;(5):30–33. (In Russ.)

8. Родионов Ю.В., Филатов И.С., Воронин Н.В., Никитин Д.В., Остриков В.В., Ломовских А.Е. Метод определения степени износа и необходимости замены трансмиссионного масла в силовых механизмах. *Наука в центральной России*. 2020;(1):80–87. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2020-1-80-87
Rodionov Yu.V., Filatov I.S., Voronin N.V., Nikitin D.V., Ostrikov V.V., Lomovsky A.E. Method for determining the degree of wear and the need to replace transmission oil in power mechanisms. *Science in the central Russia*. 2020;(1):80–87. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2020-1-80-87

9. Иванов А.В., Селезнев М.В. К вопросу о периодичности смены трансмиссионных масел в процессе эксплуатации автомобилей. *Вестник НГИЭИ*. 2016;(10):94–102. Режим доступа: https://yadi.sk/i/gNkegzpB3488Pz (дата обращения: 12.01.2024).
Ivanov A.V., Seleznev M.V. To the question of the frequency of changing transmission oils in the process of operation of automobiles. *Bulletin NGIEI*. 2016;(10):94–102. (In Russ.) Available at: https://yadi.sk/i/gNkegzpB3488Pz (accessed: 12.01.2024).

10. Шишлянников Д.И., Иванов С.Л., Звонарев И.Е., Зверев В.Ю. Повышение эффективности применения выемочных и транспортирующих машин комбайновых комплексов калийных рудников. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(9):116–124. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-116-124
Shishlyannikov D.I., Ivanov S.L., Zvonarev I.E., Zverev V.Yu. Improving efficiency of shearing and hauling machines in longwall potash mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(9):116–124. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-116-124

11. Великанов В.С., Мусонов О.С., Панфилова О.Р., Ильина Е.А., Дёрина Н.В. Инструменты предиктивной аналитики в минимизации отказов горнотранспортного оборудования. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2021;19(4):5–15. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-5-15
Velikanov V.S., Musonov O.S., Panfilova O.R., Ilina E.A., Dyorina N.V. Predictive analytics tools in minimising mining equipment failures. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2021;19(4):5–15. (In Russ.) https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-5-15

12. Dagsuyu C., Oturakci M., Kokangül A. A new approach to Fine-Kinney method and an implementation study. *Alphanumeric Journal*. 2015;3(2):83–92. https://doi.org/10.17093/aj.2015.3.2.5000139953

13. Сергеев К.О. Анализ масла на содержание продуктов износа как метод диагностики технического состояния судового редуктора. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. 2020;(1):13–21. https://doi.org/10.24143/2073-1574-2020-1-13-21
Sergeev K.O. Testing oil for wear products presence as diagnostic method of operational state of marine gearbox unit. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2020;(1):13–21. (In Russ.) https://doi.org/10.24143/2073-1574-2020-1-13-21

14. Авершин А.А., Банник Н.В., Тугай В.В., Джумский А.В. Основные положения системы планово-предупредительных ремонтов в процессе эксплуатации горных машин и оборудования. *Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля*. 2023;(S1):187–192.
Aversh in A.A., Bannik N.V., Tugai V.V., Dzhumsky A.V. The main provisions of the scheduled preventive repairs system in the operation of mining machinery and equipment. *Vestnik Lugansk Vladimir Dahl State University*. 2023;(S1):187–192. (In Russ.)

15. Дрыгин М.Ю. Анализ систем технического обслуживания и ремонта горного оборудования. *Горное оборудование и электромеханика*. 2020;(2):35–43. https://doi.org/10.26730/1816-4528-2020-2-35-43
Drygin M.Yu. Analysis of technical maintenance systems and repair of mining equipment. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2020;(2):35–43. (In Russ.) https://doi.org/10.26730/1816-4528-2020-2-35-43

16. Маньшев Д.А., Селезнев М.В. Результаты оценки показателей качества трансмиссионного масла при эксплуатации. *Вестник НГИЭИ*. 2018;(7):49–58. Режим доступа: https://yadi.sk/i/jLbdGasJ3YzvXb (дата обращения: 15.02.2026).
Man'shev D.A., Seleznev M.V. Results of estimation of quality indicators of transmission oil at operation. *Bulletin NGIEI*. 2018;(7):49–58. (In Russ.) Available at: https://yadi.sk/i/jLbdGasJ3YzvXb (accessed: 15.02.2026).

17. Селезнёв М.В., Евсеев А.А., Котова А.А., Балак Г.М., Потёмкина Е.В. Изменение физико-химических и эксплуатационных свойств трансмиссионного масла в ходе стендовых испытаний. *Нефтепереработка и нефтехимия*. 2025;(3):26–29. https://doi.org/10.24412/0233-5727-2025-3-26-29
Seleznev M.V., Evseev A.A., Kotova A.A., Balak G.M., Potemkina E.V. Changes in the physico-chemical and operational properties of transmission oil during bench tests. *Oil Refining and Petrochemistry*. 2025;(3):26–29. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/0233-5727-2025-3-26-29

18. Кубасов В.Г., Никитин Д.В. Оценка качества трансмиссионных масел в условиях реальной эксплуатации: оптический анализ и корреляция с пробегом транспортного средства. В кн.: *Молодёжная наука для решения актуальных задач АПК: материалы Всероссийского молодёжного научного форума, г. Рязань, 20–21 февраля 2025 г.* Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева; 2025. С. 181–184.

19. Ботян Е.Ю., Николайчук Л.А., Мартемьянова А.Н., Степук Е.И., Пушкарев А.Е. Совершенствование подхода к организации технических ремонтов карьерных автосамосвалов при помощи систем удаленного мониторинга их узлов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12-2):137–152. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12-2/12-2_2025_137-152.pdf (дата обращения: 15.02.2026).
Botyan E.Y., Nikolaichuk L.A., Martemyanova A.N., Stepuk E.I., Pushkarev A.E. Improving the approach to the organization of technical repairs of dump trucks using remote monitoring systems of their nodes. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(12-2):137–152. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12-2/12-2_2025_137-152.pdf (accessed: 15.02.2026).

20. Barjoee S.S., Rodionov V. Comprehensive risk profiling of occupational harmful factors in the ceramic industry: A case study from Iran. *Environmental Science and Pollution Research*. 2026;33(8):3122–3151. https://doi.org/10.1007/s11356-026-37443-2

21. Шешукова Е.И., Шибанов Д.А., Иванов С.Л., Шишкин П.В. Оценка нагрузок приводов рабочего оборудования карьерного экскаватора (часть 2). *Горная промышленность*. 2024;(4):108–114. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-108-114
Sheshukova E.I., Shibanov D.A., Ivanov S.L., Shishkin P.V. Assessment of loads at the working attachment of a mine shovel (Part 2). *Russian Mining Industry*. 2024;(4):108–114. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-108-114

22. Михайлов А.В., Смирнов А.И. Анализ метода выемки торфяного сырья с откоса карьера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2026;(2-1):197–209. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2026/2-1/2-1_2026_197-209.pdf (дата обращения: 15.02.2026).
Mikhailov A. V., Smirnov A. I. Digging method analyzing organogenic materials mining by in-pit method. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2026;(2-1):197–209. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2026/2-1/2-1_2026_197-209.pdf (accessed: 15.02.2026).

23. Высогорец С.П. Разработка методики экспресс-анализа параметра качества изоляционного масла. *Надежность и безопасность энергетики*. 2018;11(1):41–47. https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-1-41-47
Vysogorets S.P. Development of method for quick analysis of isolation oil performance parameters. *Safety and Reliability of Power Industry*. 2018;11(1):41–47. (In Russ.) https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-1-41-47

24. Гаврилюк Е.А., Манцеров С.А. Разработка стратегии обслуживания и ремонта оборудования газотранспортного предприятия на основе индекса технического состояния. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. 2017;(3):121–126.
Gavriliuk E.A., Mantserov S.A. Development of gas-transport equipment maintenance strategy on basis of technical state index. *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*. 2017;(3):121–126. (In Russ.)

25. Поляков С.Ю. Оптимизация периодичности проведения анализов смазочных масел при эксплуатации газоперекачивающих агрегатов. *Автоматизация. Современные технологии*. 2022;76(5):216–219.
Polyakov S.Yu. Optimization of the analysis frequency for lubricating oils during the operation of gas compressor units. *Automation. Modern Technologies*. 2022;76(5):216–219. (In Russ.)

26. Кузнецов А.С., Разяпова Н.Ю., Разливинская С.В. Программно-алгоритмическая поддержка процессов обработки и анализа ИК-спектрограмм смазочных масел. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2024;(12):125. https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.82
Kuznetsov A.S., Razyapova N.Y., Razlivinskaya S.V. Software-algorithmic support of processing and analysis of IR spectrograms of lubricating oils. *International Research Journal*. 2024;(12):125. (In Russ.) https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.82

27. Сафиуллин Р.Н., Парра С.А., Сафиуллин Р.Р., Присяжнюк М.С., Симонова Л.А. Метод построения автоматизированной системы для оценки эффективности функционирования горных машин на основе метода искусственного интеллекта. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2026;(3):115–135. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2026/3/03_2026_115-135.pdf (дата обращения: 15.02.2026).
Safiullin P.N., Parra Z.A., Safiullin R.R., Prisyazhnyuk M.S., Simonova L.A. AI-based automated system design for efficiency evaluation of performance of mining machines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2026;(3):115–135. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2026/3/03_2026_115-135.pdf (accessed: 15.02.2026).

28. Moubray J. *Reliability-centered Maintenance*. 2nd ed. New York: Industrial Press Inc.; 1997. 448 p.

Информация об авторах
Салимов Аббос Эркин угли – аспирант кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: salimoff.abbas@gmail.com
Иванов Сергей Леонидович – доктор технических наук, профессор кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-7014-2464; e-mail: Ivanov_SL@pers.spmi.ru
Шибанов Даниил Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-6203-0219

Information about the authors
Abbos E. Salimov – Postgraduate Student, Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: salimoff.abbas@gmail.com
Sergey L. Ivanov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-7014-2464; e-mail: Ivanov_SL@pers.spmi.ru
Daniil A. Shibanov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-6203-0219

Информация о статье
Поступила в редакцию: 26.05.2026
Поступила после рецензирования: 23.06.2026
Принята к публикации: 16.07.2026

Article info
Received: 26.05.2026
Revised: 23.06.2026
Accepted: 16.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-114-117

Определение основ комплексной оценки освоения месторождений минерального сырья Республики Тыва

В.О. Ооржак ✉
Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кызыл, Российская Федерация
✉ v.oorgak@yandex.ru

Резюме: В статье предложены методические основы комплексной оценки освоения месторождений для условий Республики Тыва – региона с высоким ресурсным потенциалом и выраженными инфраструктурными, экологическими и институциональными ограничениями. Актуальность исследования обусловлена необходимостью сопоставлять объекты недропользования не только по запасам и доходности, но и по транспортной доступности, энергообеспечению, экологической чувствительности и готовности социально-институциональной среды. Цель – сформировать воспроизводимую схему интегральной оценки и ранжирования ресурсных узлов для регионального стратегического планирования. Использованы методы сравнительного анализа, нормирования, экспертного взвешивания, пороговой фильтрации, агрегирования индекса и сценарной проверки. На апробации четырёх ресурсных узлов Тывы показано, что учёт пороговых ограничений меняет приоритет объектов по сравнению с оценкой только по ресурсным и экономическим параметрам. Получены веса пяти блоков критериев, состав базовых индикаторов, формат представления результатов в виде интегрального индекса и карты узких мест. Научная новизна исследования заключается в объединении геологических, инфраструктурных, экономических, экологических и социально-институциональных параметров в единой регионально-ориентированной процедуре с пороговым допуском и сценарной перепроверкой. Предложенная методика может использоваться органами управления и недропользователями как инструмент предварительного отбора и синхронизации решений по недропользованию и инфраструктурному развитию, а также как база для расширения модели на уровень конкретных месторождений.

Ключевые слова: комплексная оценка освоения месторождений, минерально-сырьевая база региона, Республика Тыва, ранжирование ресурсных узлов, интегральный индекс приоритета, многофакторная оценка, инфраструктурные ограничения, экологические ограничения, стратегическое планирование недропользования, пороговые стоп-факторы

Благодарности: Статья выполнена в рамках исследований по базовому проекту Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН №1023033100464-7-1.5.1.

Для цитирования: Ооржак В.О. Определение основ комплексной оценки освоения месторождений минерального сырья Республики Тыва. *Горная промышленность*. 2026;(5):114–117. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-114-117

Defining foundations for a comprehensive assessment of mineral deposit development in the Republic of Tyva

V.O. Oorzhak ✉
Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kyzyl, Russian Federation
✉ v.oorgak@yandex.ru

Abstract: This paper proposes a methodological framework for a comprehensive assessment of deposit development in the Republic of Tyva, a region with a high resource potential and significant infrastructural, environmental, and institutional constraints. This approach is relevant due to the need to compare subsoil use targets not only by reserves and profitability, but also by transport accessibility, energy supply, environmental sensitivity, and availability of the social and institutional environment. The objective is to develop a reproducible framework for integrated assessment and ranking of the resource nodes for the regional strategic planning. Methods of comparative analysis, standardization, expert weight-based survey, threshold filtering, index aggregation, and scenario testing are used. A pilot study of four nodes in Tyva demonstrates that taking threshold constraints into account changes the priority of targets compared to an assessment that is based solely on resource and economic parameters. Weights for five sets of criteria, a composition of basic indicators, and a format for presenting results in the form of an integrated index and a bottleneck map are obtained. The scientific novelty lies in the integration of geological, infrastructural, economic, environmental, social and institutional parameters into a unified regionally-focused procedure with

threshold tolerance and scenario-based verification. The proposed method can be used by regulatory authorities and subsoil users as a tool for preliminary screening and coordination of decisions regarding subsoil use and infrastructure development, as well as a basis for adapting the model to specific deposits.

Keywords: comprehensive assessment of deposit development, regional mineral resource base, Tyva Republic, resource node ranking, integrated priority index, multifactor assessment, infrastructure constraints, environmental constraints, strategic subsoil use planning, threshold stop factors

Acknowledgements: This article was prepared as part of a research project of the Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (TUVIKOPR SB RAS) No. 1023033100464-7-1.5.1.

For citation: Oorzhak V.O. Defining foundations for a comprehensive assessment of mineral deposit development in the Republic of Tyva. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):114–117. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-114-117

Введение

Республика Тыва сочетает значительный минерально-сырьевой потенциал с дефицитом транспортной и энергетической инфраструктуры. В стратегических документах развитие добывающих отраслей рассматривается как фактор экономического роста[1]. Однако реализуемость проектов зависит не только от запасов и конъюнктуры, но и от удалённости, стоимости подключения к сетям, сезонности логистики, экологических ограничений и институциональной готовности территорий [1; 2]. Проблема – отсутствие компактной воспроизводимой схемы, учитывающей одновременно ресурсную обеспеченность, инфраструктурную готовность, экономическую эффективность, экологические и социально-институциональные условия. Цель работы – определить основы комплексной оценки освоения месторождений Тывы и предложить процедуру ранжирования ресурсных узлов для стратегического планирования. Задачи: уточнение критериев, формирование системы нормирования и агрегирования, введение пороговых стоп-факторов, апробация, обсуждение ограничений.

Материалы и методы

Материал исследования – открытые нормативные, аналитические, статистические документы и научные работы по минерально-сырьевой базе Тывы и методам оценки горных проектов[2] [1–6]. Методология основана на принципах многокритериальной оценки, адаптированных к региональному уровню [4–6].

Единица сравнения – ресурсный узел (месторождение или группа объектов с инфраструктурной зоной подготовки). Для Тывы существенная доля затрат и рисков носит внеплощадочный характер (дороги, ЛЭП, логистика, водоснабжение, природоохранные согласования).

Система критериев – пять блоков: ресурсный, инфраструктурный, экономический, экологический, социально-институциональный. Для каждого блока – набор индикаторов, нормируемых в диапазоне от 0 до 1. Показатели положительной направленности нормировались по принципу «чем больше, тем лучше», отрицательной – по обратной шкале.

Взвешивание выполнялось в два шага: веса блоков (экспертные) и внутриблочные веса (в апробации – равные или укрупнённые). Итоговый базовый интегральный индекс I рассчитывался как сумма вкладов пяти блоков. Для повышения воспроизводимости применялась проверка согласованности экспертных оценок и контроль суммы весов.

Отдельным элементом методики является пороговый контур стоп-факторов. Пороговый контур стоп-факторов: три группы ограничений – критический экологический риск, дефицит инфраструктурной мощности (энергия/дорога/вода), институционально-регуляторная неготовность. При срабатывании стоп-фактора проект получает статус «не допущен» или «допущен после доработки» с понижающим коэффициентом.

Для оценки устойчивости – три сценария: базовый (текущая инфраструктура), инфраструктурно-ускоренный, риск-ограниченный. Сценарная проверка не заменяет технико-экономическое обоснование конкретного месторождения, но позволяет оценить чувствительность приоритетов на уровне регионального портфеля.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены рекомендуемые блоки критериев и примеры индикаторов для региональной оценки (ориентация на ранние и средние стадии, данные из открытых источников).

Разработанная и предлагаемая общая схема комплексной оценки представлена на рис. 1. Она включает последовательность операций: сбор данных, нормирование, проверку пороговых ограничений, формирование блоков критериев, взвешивание, агрегирование, ранжирование объектов и сценарную перепроверку. Такая структура позволяет отделить вычислительную часть от управленческих решений и обеспечить повторяемость процедуры при обновлении исходных данных.

Результаты апробационного взвешивания блоков: наибольший вес – ресурсный (0,30), далее инфраструктурный (0,22), экономический (0,20), экологический (0,16), социально-институциональный (0,12). Роль экологического и социального блоков усиливается через пороговый контур.

Пилотная оценка четырёх ресурсных узлов (табл. 2, рис. 2) показала различие между базовым интегральным индексом I и приоритетом P с учётом порогов. Наиболее заметное снижение – у Восточного золоторудного узла (высокий ресурсный потенциал нивелируется инфраструктурными и экологическими ограничениями). Ак-Сугский медно-порфировый узел получает штраф за инфраструктурную капиталоёмкость. Улуг-Хемский угольный узел имеет высокий базовый индекс, но приоритет зависит от логистики и конъюнктуры. Кызыл-Таштыгский полиметаллический узел сохраняет стабильный приоритет (теку-

1 Постановление Правительства Республики Тыва от 24.12.2018 №638 «О Стратегии социально-экономического развития Республики Тыва до 2030 года». Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/55032256 (дата обращения: 26.02.2026); Инвестиционная декларация Республики Тыва (утв. 23.05.2022 №255-РГ). Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/406089350 (дата обращения: 15.01.2026); Красноярскстат. Статистический ежегодник Республики Тыва. 2024, 2025. Режим доступа: https://24.rosstat.gov.ru/folder/45814 (дата обращения: 25.03.2026).

2 Постановление Правительства Республики Тыва от 24.12.2018 №638 «О Стратегии социально-экономического развития Республики Тыва до 2030 года». Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/55032256 (дата обращения: 26.02.2026); Инвестиционная декларация Республики Тыва (утв. 23.05.2022 №255-РГ). Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/406089350 (дата обращения: 15.01.2026); Красноярскстат. Статистический ежегодник Республики Тыва. 2024, 2025. Режим доступа: https://24.rosstat.gov.ru/folder/45814 (дата обращения: 25.03.2026)..

Таблица 1
Рекомендуемые блоки критериев и базовые индикаторы комплексной оценки

Table 1
Recommended criterion blocks and baseline indicators for comprehensive assessment

Блок критериев	Примеры индикаторов	Направленность	Комментарий
Ресурсный	Запасы и ресурсы; степень геологической изученности; качество руды / сырья; вариативность сырьевой базы	Положительная	Описывает стратегическую значимость и зрелость геологической информации
Инфраструктурный	Транспортное плечо; доступ к электросетям; наличие воды; сезонность логистики; близость производственной базы	Смешанная	Ключевой для Тывы блок, влияет на сроки и стоимость запуска
Экономический	Ориентировочная капиталоемкость; операционные затраты; добавленная стоимость; налоговый эффект; устойчивость к ценовым колебаниям	Смешанная	Оценивается укрупненно на ранней стадии, уточняется на стадии ТЭО
Экологический	Чувствительность экосистем; водные ограничения; отходы и хвосты; риск превышения нормативов; сложность рекультивации	Отрицательная / пороговая	Часть параметров учитывается как стоп-факторы, а не только линейным штрафом
Социально-институциональный	Кадровая доступность; институциональная готовность; социальные эффекты; налоги; согласованность с территориальным планированием	Смешанная	Определяет реализуемость и скорость прохождения подготовительных процедур

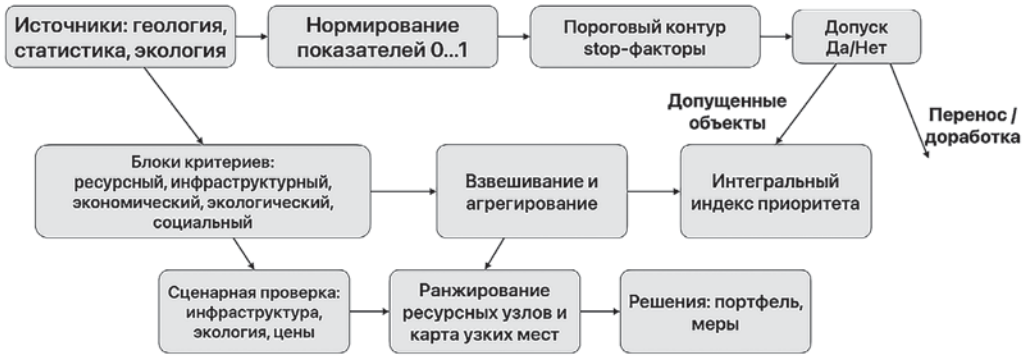


Рис. 1
Схема комплексной оценки освоения месторождений минерального сырья региона

Fig. 1
A flowchart for comprehensive assessment of the regional mineral deposit development

Таблица 2
Результаты пилотного ранжирования ресурсных узлов Республики Тыва

Table 2
Pilot ranking results for the resource nodes of the Republic of Tyva

Ресурсный узел	I, базовый индекс	P, приоритет	Доминирующий ограничивающий блок	Рекомендуемая мера
Кызыл-Таштыгский полиметаллический узел	0,638	0,678	Нет критического порога в пилотной оценке	Поддержание темпа и адресная модернизация обеспечивающей инфраструктуры
Улуг-Хемский угольный узел	0,652	0,636	Транспортная логистика и рыночная волатильность	Сценарное планирование логистики и диверсификация продуктовой линейки
Ак-Сугский медно-порфировый узел	0,668	0,561	Инфраструктурная капиталоемкость и сроки подключения	Приоритетная подготовка сетей и транспортного обеспечения
Восточный золоторудный узел	0,551	0,419	Экологические и инфраструктурные ограничения	Дополнительные изыскания, экологическое обоснование и поэтапный ввод

щая готовность выше).

Практическим результатом методики является не только ранжирование, но и формирование карты узких мест. Для каждого узла фиксируется доминирующий блок ограничений, определяющий набор управленческих мер: инфраструктурное сопровождение, дополнительная геологоразведка, пересмотр технологической схемы, экологическое дообоснование или институциональная подготовка территории. Такой формат удобен для согласования действий региональных органов власти, инвесторов и инфраструктурных компаний.

Предложенная схема подтверждает гипотезу: ранжирование только по запасам и доходности переоценивает часть проектов, не учитывая «цену доступа» к ресурсам. Введение инфраструктурного, экологического блоков и пороговых факторов приближает результаты к управленческой реальности региона [1–3].

Методически важно разделение двух типов решений: стратегическая значимость объекта для долгосрочного развития и приоритет действий в кратко- и среднесрочном горизонте. Объект с высоким ресурсным потенциалом, но низким текущим приоритетом из-за отсутствия энергоснабжения или экологической чувствительности не отвергается, а требует пакета подготовительных мер.

Сравнение с международными исследованиями показывает согласованность с многокритериальными подходами

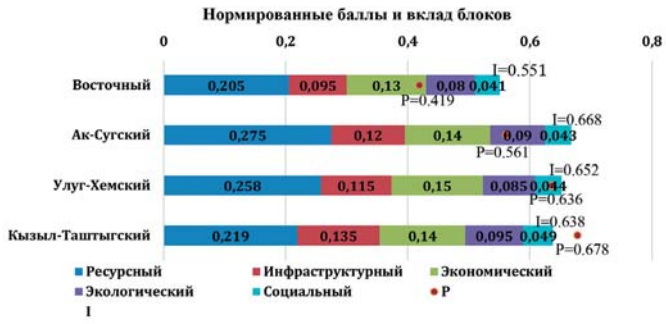


Рис. 2
Сопоставление базового индекса I и приоритета P с учетом пороговых ограничений

Fig. 2
A comparison of baseline index I and priority P with account of the threshold constraints

в горной отрасли [4–6]. Региональный уровень требует более грубой, но прозрачной параметризации из-за неполноты данных на ранних стадиях.

Ограничения: неоднородность исходных данных, зависимость весов от состава экспертов, условный характер апробации. Интегральный индекс не заменяет ТЭО и не предназначен для прямого расчёта эффективности конкретного недропользователя.

Практическое применение – в трёх контурах: региональное стратегическое планирование; формирование портфеля проектов и очередности инфраструктурного обеспечения; межведомственная координация природоохранных, транспортных и энергетических решений.

Перспективы дальнейших исследований: детализация внутриблочных показателей (вода, кадры, технологические и экологические риски), интеграция ГИС, переход к адаптивным весам по сценариям, калибровка порогов на основе фактической истории проектов в Сибири и Туве.

Заключение

По результатам исследования:

– определены основы комплексной оценки освоения месторождений Тывы как многофакторной регионально-ориентированной процедуры, объединяющей ресурсные, инфраструктурные, экономические, экологические и социально-институциональные критерии;

– предложена воспроизводимая схема: нормирование, блочное взвешивание, пороговый контур стоп-факторов, расчёт интегрального индекса, сценарная перепроверка ранжирования;

– показано, что учёт пороговых ограничений существенно влияет на очередность освоения ресурсных узлов и позволяет перейти от абстрактного ранга к конкретным мерам подготовки территории;

– методика может использоваться как инструмент предварительного отбора и синхронизации решений по недропользованию и инфраструктурному развитию, а также как база для расширения модели на уровень конкретных месторождений.

Список литературы / References

1. Ойдуп Т.М. Этапы промышленного освоения минерально-сырьевого комплекса Республики Тыва. *Горная промышленность*. 2024;(6):48–51. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-48-51
Oydup T.M. Commercial development stages of complex mineral resources in the Tyva Republic. *Russian Mining Industry*. 2024;(6):48–51. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-48-51
2. Ооржак В.О. Геолого-экономическая оценка перспектив освоения и рисков развития месторождений золота в Республике Тыва. *Горная промышленность*. 2025;(5):119–123. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-119-123
Oorzhak V.O. Geological and economic assessment of the development prospects and risks of developing gold deposits in the Republic of Tyva. *Russian Mining Industry*. 2025;(5):119–123. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-119-123
3. Лебедев Н.И. *Минеральные ресурсы Тувы: обзор и анализ полезных ископаемых*. Кызыл: ТувИКОПР СО РАН; 2012. 284 с. Режим доступа: https://www.geokniga.org/books/8734 (дата обращения: 27.04.2026).
4. Kamel A., Elwageeh M., Bonduà S., Elkarmoty M. Evaluation of mining projects subjected to economic uncertainties using the Monte Carlo simulation and the binomial tree method: Case study in a phosphate mine in Egypt. *Resources Policy*. 2023;80:103266. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103266
5. Yu H., Zahidi I., Fai C.M., Madsen D.Ø. Preliminary evaluation of mining area sustainability using multi-criteria decision-making methods. *Environmental Sciences Europe*. 2025;37(1):93. https://doi.org/10.1186/s12302-025-01132-7
6. Namin F.S., Ghadi A., Saki F. A literature review of Multi Criteria Decision-Making (MCDM) towards mining method selection (MMS). *Resources Policy*. 2022;77:102676. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102676

Информация об авторе
Ооржак Валерий Окпан-оолович – кандидат экономических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кызыл, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-2985-0722; e-mail: v.oorgak@yandex.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 13.05.2026
Поступила после рецензирования: 23.06.2026
Принята к публикации: 02.07.2026

Information about the author
Valery O. Oorzhak – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Leading Researcher, Tuvan Institute for Integrated Exploration of Natural Resources, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kyzyl, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-2985-0722; e-mail: v.oorgak@yandex.ru

Article info
Received: 13.05.2026
Revised: 23.06.2026
Accepted: 02.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-118-126

Теоретико-методологические основы проактивного управления операционной эффективностью горнодобывающих предприятий

Ю.В. Забайкин[1]✉, Е.В. Красавина[2], Лютягин[3,4], Е.В. Новикова[2], Д.А. Лунькин[3]
[1] Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация
[2] Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, г. Москва, Российская Федерация
[3] Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Российская Федерация
[4] ООО «Ансгар», г. Москва, Российская Федерация
✉ 89264154444@yandex.ru

Резюме: Исследованы теоретико-методологические основы проактивного управления операционной эффективностью горнодобывающих предприятий в парадигме «Индустрия 4.0». Актуальность задана расхождением двух процессов: физический объём валовой добавленной стоимости добычи в 2025 г. снизился на 1,7%, горно-геологические условия ухудшаются измеримо (коэффициент вскрыши ПАО «Полюс» вырос за год с 1,5 до 2,4 м³/т, себестоимость добычи угля – с 2234 до 3400 руб/т), тогда как коэффициент использования производительности карьерных экскаваторов держится на уровне 0,45–0,49 против 0,80–0,90 в рекордные месяцы. Гипотеза: в киберфизическом производстве издержки измерения перестают быть экзогенным параметром и становятся проектируемой переменной, что смещает конфигурацию внутрифирменного контроля. Цель – обосновать концептуальную модель, соединяющую неинвазивный мониторинг в реальном времени, динамическое нормирование труда и минимизацию внутрифирменных транзакционных издержек. Методы: сравнительный анализ, контент-анализ отчётности, декомпозиционный анализ фонда времени, теоретическое моделирование. Предложена четырёхуровневая архитектура замкнутого кибернетического контура; издержки контроля разложены на измерение, мониторинг и принуждение к исполнению; введены коэффициент наблюдаемости контура и резерв проактивности. Показано, что выборочное фотохронометражное наблюдение выявляет в среднем 1,6% потерь рабочего времени против 14,0% при непрерывной регистрации того же объекта.

Ключевые слова: горнодобывающее предприятие, проактивное управление, операционная эффективность, киберфизические системы, цифровой двойник, транзакционные издержки, неинвазивный мониторинг, динамическое нормирование труда, общая эффективность оборудования, Индустрия 4.0

Для цитирования: Забайкин Ю.В., Красавина Е.В., Лютягин Д.В., Новикова Е.В., Лунькин Д.А. Теоретико-методологические основы проактивного управления операционной эффективностью горнодобывающих предприятий. *Горная промышленность*. 2026;(5):118–126. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-118-126

Theoretical and methodological foundations of proactive operational efficiency management in mining companies

Yu.V. Zabaikin[1]✉, E.V. Krasavina[2], D.V. Lyutyagin[3,4], E.V. Novikova[2], D.A. Lunkin[3]
[1] National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation
[2] Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation
[3] Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russian Federation
[4] LLC ANSGAR, Moscow, Russian Federation
✉ 89264154444@yandex.ru

Abstract: The study justifies theoretical and methodological foundations of proactive operational efficiency management in mining companies within the Industry 4.0 paradigm. Its relevance is explained by a divergence between the following two processes. The physical volume of the gross value added in the Russian mining industry declined by 1.7% in 2025 with the mining and geological conditions deteriorating measurably, e.g. the stripping ratio at the Polyus Group rose from 1.5 to 2.4 m³/t in a single year, while the coal production cost grew from 2,234 to 3,400 Rubles per tonne. At the same time, the utilization capacity factor of the open-pit excavators remains at 0.45–0.49 against 0.80–0.90 in the record-high months. A hypothesis is made that in the cyber-physical production the measurement costs cease to be an exogenous parameter and become a design variable,

which shifts the whole configuration of the in-company control. The objective is to justify a conceptual model combining non-invasive real-time monitoring, dynamic labour rate setting and minimisation of the in-house transaction costs. The methods used include comparative analysis, content analysis of corporate reporting, decomposition of the equipment time fund and theoretical modelling. A four-level closed cybernetic control loop is proposed; control costs are decomposed into measurement, monitoring and enforcement; an observability index and a proactivity reserve are introduced. It is demonstrated that the selective photochronometry detects on average 1.6% of working time losses against 14.0% when recorded continuously at the same facility.

Keywords: mining company, proactive management, operational efficiency, cyber-physical systems, digital twin, transaction costs, non-invasive monitoring, dynamic labour rate setting, overall equipment efficiency, Industry 4.0

For citation: Zabaikin Yu.V., Krasavina E.V., Lyutyagin D.V., Novikova E.V., Lunkin D.A. Theoretical and methodological foundations of proactive operational efficiency management in mining companies. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):118–126. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-118-126

Введение

Добывающая промышленность даёт около 12% валовой добавленной стоимости страны, но в 2024 г. её добавленная стоимость в текущих ценах достигла 22 455 млрд руб. при физическом объёме 99,5% к предыдущему году, а в 2025 г. физический объём снизился ещё на 1,7%. Горно-геологические условия ухудшаются измеримо: у ПАО «Полюс» коэффициент вскрыши вырос за год с 1,5 до 2,4 м³/т, содержание золота на Олимпиаде упало на 35%, денежная себестоимость – с 383 до 739 долл. за унцию; выход железорудного концентрата за пять лет снизился с 32,5 до 31,7%; себестоимость добычи угля выросла с 2234 руб/т в 2023 г. до 3400 руб/т в 2025 г. при убытке сегмента около 360 млрд руб. и 71% убыточных предприятий. Кроме капитальных вложений и сокращения затрат есть третий резерв – в самом контуре управления.

Нормирование труда и планово-предупредительный ремонт предполагают условия, стабильные настолько, чтобы норму и межремонтный интервал задать заранее; в горном деле это допущение ломается о стохастичность условий, распределённость подвижных активов и жёсткую сцепку переделов. Коэффициент использования производительности карьерных экскаваторов держится на уровне 0,45–0,49 против 0,80–0,90 в рекордные месяцы [1], очистных комбайнов – около 50%. Разрыв объясняет наблюдение на промышленном предприятии Урала: фотохронометраж дал 1,6% потерь рабочего времени ремонтников, непрерывное видеонаблюдение – 14,0% [2]. Дискретное наблюдение не видит коротких потерь, и управление получает картину, очищенную от того, чем должно управлять.

Цифровой контур отрасли перекошен: интернет вещей используют 10,8% организаций добычи против 8,7% по экономике, технологии искусственного интеллекта – 2,1% против 4,8% [3]; цифровые технологии применяют все компании, но 81% – фрагментарно. Научная проблема – разрыв между детерминированными моделями управления и стохастической средой, закрываемый не отчётностью, а сменой принципа наблюдения. Цель работы – обосновать концептуальную модель проактивного управления операционной эффективностью горнодобывающего предприятия, соединяющую неинвазивный мониторинг в реальном времени, динамическое распределение ресурсов и минимизацию внутрифирменных транзакционных издержек. Гипотезы: непрерывная регистрация параметров оборудования переводит контур управления из реактивного режима в предиктивный, а единый информационный контур снижает внутрифирменные транзакционные издержки.

Теоретические аспекты управления факторами производства

Экономическая теория объясняет фирму экономией на издержках рыночной координации [4], но цену самой иерархии Коуз оставил за скобками. Алчиан и Демсец вывели из дороговизны наблюдения предельного продукта фигуру надсмотрщика, чья функция сводится к измерению [5]; Барзель показал, что чем дороже измерить атрибут блага, тем больше ценности рассеивается [6]; Дженсен и Меклинг разложили агентские издержки на мониторинг, гарантии и остаточные потери [7]. Общая посылка: стоимость измерения задана извне. Горное предприятие по Уильямсону предельно специфично по активам, частоте транзакций и неопределённости [8], но цена иерархии здесь высока физически: наблюдение за рассредоточенным подвижным объектом дискретно, запаздывает и стоит времени наблюдателя.

Модель различает три компоненты издержек контроля: издержки измерения T1 – перевод физического события в учётную запись (традиционный ответ – выборочный хронометраж); издержки мониторинга T2 – снятие асимметрии информации о состоянии активов и ходе заданий; издержки принуждения к исполнению T3 – проверяемость факта работы, без которой остаётся пространство оппортунизма: микропростои, приписки, работа «на диспетчера». Ключевой тезис: в киберфизическом производстве издержки измерения из экзогенного параметра становятся проектируемой переменной; меняется не интенсивность контроля, а его себестоимость. Инженерная традиция – архитектура киберфизических систем «Индустрии 4.0» [9], цифровой двойник, показатель OEE Накадзимы [10] – сводит смысл мониторинга к экономии на ремонтах; экономическая принимает издержки измерения как данность: работы о транзакционных издержках в цифровой экономике рассуждают о платформах [11; 12], цифровой мониторинг труда изучается в рамке алгоритмического контроля [13]. Приложений транзакционной оптики к промышленному IoT-мониторингу в литературе не обнаружено; этот разрыв статья и закрывает.

Материалы и методы

Работа теоретическая: вклад состоит в построении концептуальной модели и формализации условия её применимости. Эмпирическая база: статистика Росстата и ЕМИСС по разделу B ОКВЭД; статистика цифровизации ИСИЭЗ НИУ ВШЭ [3]; материалы Минэнерго России, ЦДУ ТЭК и Ростехнадзора; корпоративная отчётность по про-

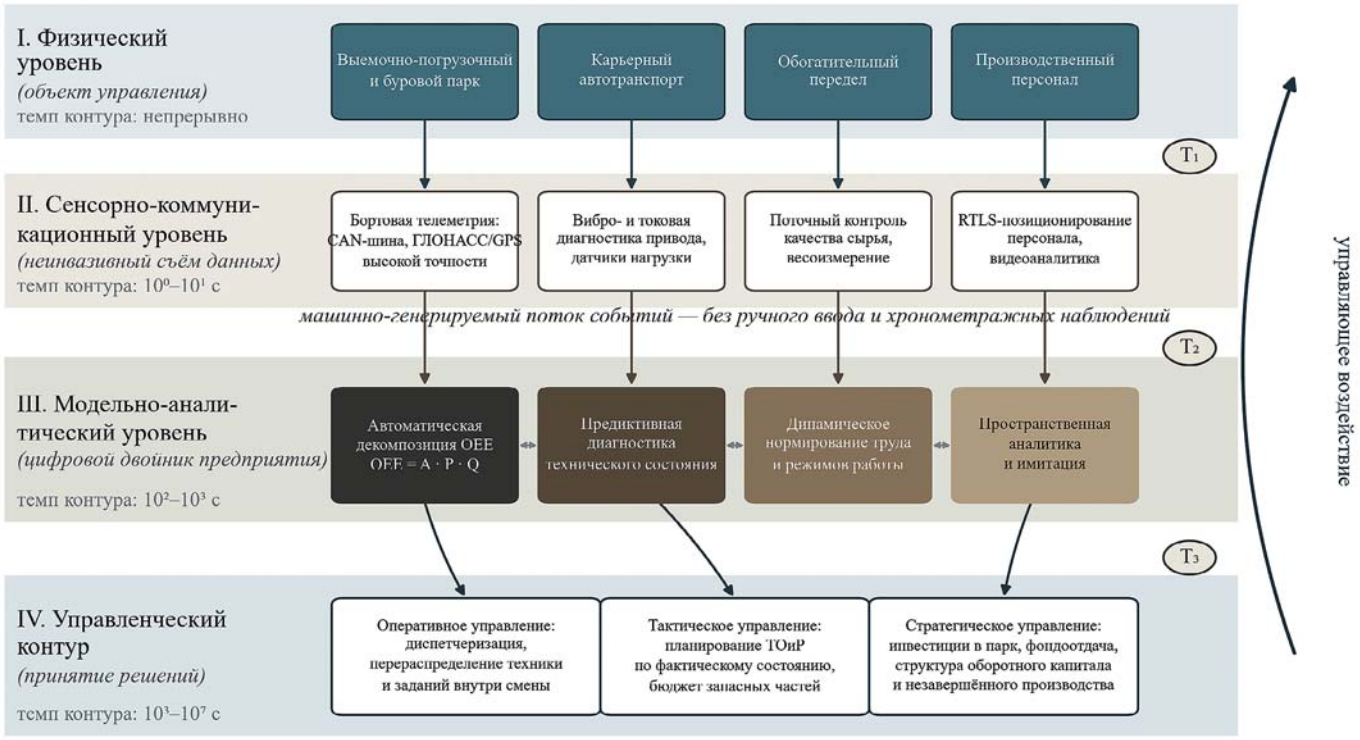


Рис. 1
Архитектура замкнутого кибернетического контура проактивного управления операционной эффективностью горнодобывающего предприятия:
T_1 – точка сокращения издержек измерения: выборочное наблюдение замещается сплошной регистрацией;
T_2 – точка сокращения издержек мониторинга: снимается асимметрия информации о состоянии активов и ходе исполнения заданий;
T_3 – точка сокращения издержек принуждения к исполнению: верифицируемость факта работы сужает пространство оппортунизма

Fig. 1
Architecture of the closed-loop cybernetic system for proactive management of a mining company's operational efficiency:
T_1 – a point to cut the measurement costs: selective monitoring is replaced by continuous recording;
T_2 – a point to cut the monitoring costs: information asymmetry is removed regarding the status of assets and the progress of task execution;
T_3 – a point to cut the enforcement costs: the ability to verify work performance reduces the scope for opportunism

ектам цифровизации; федеральные нормы и правила промышленной безопасности[1], методические рекомендации по нормированию труда[2], единые нормы выработки на открытые горные работы; руководство Министерства энергетики США по эксплуатации и обслуживанию [14] и обзоры по предиктивному обслуживанию и цифровым двойникам в горном деле [15; 16]. Методы – сравнительный анализ, контент-анализ корпоративных раскрытий, декомпозиция фонда времени, теоретическое моделирование; аппарат – OEE, коэффициент наблюдаемости, резерв проактивности. Ограничения: эффекты внедрений не аудированы, величины разных обследований сопоставимы условно, статистика фиксирует применение технологии, а не глубину её встроенности в управление.

Методологические основы концепции проактивного управления

Архитектура (рис. 1) разводит уровни управления по темпу обращения: физический (техника, транспорт, обогащение, персонал); сенсорно-коммуникационный, снимающий состояние без участия человека; модельно-аналитический – цифровой двойник, превращающий поток событий в оценки [16; 17]; управленческий с внутрисменным, ремонтно-тактическим и инвестиционным горизонтами. Между уровнями нет ручного ввода: отчётность не составляется, а вычисляется, и это меняет её экономическую природу.

Закон необходимого разнообразия [18] даёт условие по времени: контур компенсирует возмущение, когда его запаздывание меньше характерного времени возмущения:

$$\tau_к < \tau_в, \quad (1)$$

где $\tau_к$ – характерное запаздывание контура управления от возникновения события до управляющего воздействия, с; $\tau_в$ – характерное время возмущения, с.

Отношение этих величин свёрнуто в резерв проактивности

$$П = 1 - \tau_к / \tau_в, \quad (2)$$

где $П$ – резерв проактивности, доли ед. При $П > 0$ контур успевает вмешаться, пока возмущение ещё действует; при $П \le 0$ возмущение отрабатывается постфактум, и управление сводится к учёту уже понесённых потерь.

Возмущения длительностью в минуты невидимы для суточного контура не потому, что плохо измеряются, а пото-

1 Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах»: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020 №507: зарегистрирован в Министерстве юстиции Российской Федерации 18.12.2020, рег. №61587. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_372172/ (дата обращения: 21.07.2026).

2 Об утверждении методических рекомендаций по разработке систем нормирования труда в государственных (муниципальных) учреждениях: приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 30.09.2013 №504. Режим доступа: https://mintrud.gov.ru/docs/mintrud/orders/145 (дата обращения: 21.07.2026).

Таблица 1
Индикаторы состояния и цифровизации добывающей промышленности Российской Федерации, 2022–2025 гг.

Table 1
Indicators of the state and digitalization of the mining industry in the Russian Federation, 2022–2025

Показатель		2022	2023	2024	2025
1	Индекс физического объёма валовой добавленной стоимости добычи полезных ископаемых, % к предыдущему году	100,9	98,2	99,5	98,3*
2	Валовая добавленная стоимость добычи полезных ископаемых в текущих ценах, млрд руб.	18 968,6	18 703,7	22 455,0	18 647,6*
3	Доля добычи полезных ископаемых в валовой добавленной стоимости экономики, %	13,3	11,8	12,1	9,5*
4	Выход железорудного концентрата на 1 т сырой руды, %	32,1	31,7	31,3	31,7
5	Затраты организаций добычи полезных ископаемых на цифровые технологии, млрд руб.	81,3	89,9	107,5	–**
6	Доля отрасли в затратах организаций экономики на цифровые технологии, %	2,17	2,22	2,05	–**

Примечание: строки 1–3 – данные Росстата; строка 4 – расчёт авторов по данным Росстата (коды ОКПД2 07.10.10.110 и 07.10.10.130), колебания в 0,2–0,4 пп трендом не являются; строки 5–6 – расчёты ИСИЭЗ НИУ ВШЭ [3] по кругу крупных и средних организаций, строка 6 – отношение затрат раздела B к затратам всех видов деятельности; * первая оценка; ** данные не опубликованы.
Note: Rows 1–3 – Rosstat data; Row 4 – authors' calculation based on Rosstat data (OKPD2 codes 07.10.10.110 and 07.10.10.130), fluctuations within 0.2–0.4 percentage points are not a trend; Rows 5–6 – calculations by the Institute for Statistical Studies and Economics of Knowledge, HSE University [3] for large and medium-sized companies, Row 6 – the ratio of the costs in Section B to the costs of all types of activities; * preliminary estimate; ** data not published.

му, что лежат ниже его разрешающей способности; предел физический, а не организационный.

Показатель общей эффективности оборудования [10] записывается произведением

$$\text{OEE} = A \cdot P \cdot Q, \quad (3)$$

где A – коэффициент готовности; P – коэффициент производительности; Q – коэффициент качества.

В обрабатывающей промышленности эталоном считают около 85% [19]; для карьерного экскаватора расчёт по календарному фонду даёт 37% при готовности 0,50, производительности 0,85 и качестве 0,87, по загруженному времени – 44% [19]; на разрезе Soma в Турции – 17–40% у самосвалов и 13–28% у экскаваторов [20]. Показатель по сменным рапортам наследует пороки выборки: рапорт заполняет заинтересованное лицо, а короткие остановки в него не попадают. Машинный расчёт меняет статус показателя; сдвиг фиксирует коэффициент наблюдаемости контура

$$K_{\text{н}} = T_{\text{рег}} / T_{\text{кал}} \cdot 100\ \%, \quad (4)$$

где $K_{\text{н}}$ – коэффициент наблюдаемости, %; $T_{\text{рег}}$ – время, по которому имеется машинная запись состояния объекта, ч; $T_{\text{кал}}$ – календарный фонд времени, ч.

При ручном учёте $K_{\text{н}}$ ограничен долей времени, покрытой наблюдением, – отсюда разрыв между 1,6 и 14,0% выявленных потерь; при сплошной телеметрии $K_{\text{н}}$ стремится к 100%, и OEE из отчётной оценки становится управляющим сигналом.

Хронометраж – выборочное оценивание с нормативной ценой точности: для элементов операции до одной минуты нужно 20–60 замеров, для операций свыше десяти минут – 4–8[3]; ошибка нормы убывает как $\sigma/\sqrt{n}$, затраты растут линейно по n. Телеметрия делает n равным числу всех рабочих циклов парка при почти нулевых предельных затратах, и норма из точки превращается в условное распределение

$$\tau_{\text{ц}} = f(x) + \varepsilon,\ x = (L,\ i,\ k_{\text{д}},\ q_{\text{з}},\ s), \quad (5)$$

где $\tau_{\text{ц}}$ – длительность рабочего цикла, с; L – плечо откатки, м; i – приведённый уклон трассы, ‰; $k_{\text{д}}$ – характеристика состояния дорожного покрытия; $q_{\text{з}}$ – характеристика забоя, включая крепость, кусковатость и обводнённость; s – сменно-суточные условия; ε – случайная составляющая.

Факт сопоставляется не со средней нормой, а с нормой, обусловленной условиями смены; иначе премиальная система вознаграждает за лёгкий наряд и штрафует за тяжёлый: оппортунизм порождён конструкцией измерителя.

Результаты

Индикаторы отрасли и её цифрового контура сведены в табл. 1: физический объём добавленной стоимости добычи третий год подряд не растёт, доля отрасли в добавленной стоимости экономики сжалась с 13,3 до 9,5%. Затраты на цифровые технологии выросли с 81,3 до 107,5 млрд руб. за три года, но доля отрасли в общероссийских затратах на цифровизацию не сдвинулась (2,17, 2,22 и 2,05%).

Глубина проникновения технологий в 2024 г. показана в табл. 2 (цифровые двойники – 2,2% против 1,5% – есть только в срезе 2023 г. и не включены). Там, где технология обслуживает физический и сенсорный слой, добыча опережает экономику (ПО управления производством, RFID, интернет вещей); там, где нужен аналитический слой, отстаёт: по искусственному интеллекту разрыв более чем двукратный, по анализу больших данных – почти двукратный.

Отрасль научилась ставить датчики раньше и плотнее прочих, а извлекать из показаний решения – нет: 44,3% расходов на цифровые технологии уходит на программное обеспечение против 36,3% по экономике, на обучение сотрудников – 0,1%. Насколько велика невидимая для управления часть, показано в табл. 3.

Структура сменного фонда времени одного объекта (табл. 3, строка 1) показательна тем, что три метода применены к одной группе работников [2]: фотохронометраж дал 1,6% потерь, видеонаблюдение – 14,0%, система датчиков – 0,0%, поскольку относит всё неразличимое к отдыху (37,6% против 10–11% у других методов). Датчик без модельного слоя переносит потери в другую графу, а не обнаруживает их: недостроен именно модельно-аналитический уровень (табл. 2).

3 Об утверждении методических рекомендаций по разработке систем нормирования труда в государственных (муниципальных) учреждениях: приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 30.09.2013 №504. Режим доступа: https://mintrud.gov.ru/docs/mintrud/orders/145 (дата обращения: 21.07.2026).

Таблица 2
Использование цифровых технологий организациями добычи полезных ископаемых в сопоставлении со средним уровнем по экономике Российской Федерации в 2024 г.

Table 2
Utilization of digital technologies by mining companies as compared to the average level for the Russian economy in 2024

Технология	Добыча полезных ископаемых, %	В среднем по экономике, %	Отношение, раз	Отклонение, пп
RFID-технологии	15,5	9,1	1,70	+6,4
ПО для управления автоматизированным производством и технологическими процессами	18,8	11,3	1,66	+7,5
Интернет вещей	10,8	8,7	1,24	+2,1
Технологии сбора, обработки и анализа больших данных	6,8	8,6	0,79	−1,8
в том числе анализ больших данных	2,7	5,3	0,51	−2,6
Цифровые платформы	17,0	21,8	0,78	−4,8
Облачные сервисы	14,2	19,5	0,73	−5,3
Технологии искусственного интеллекта	2,1	4,8	0,44	−2,7

Примечание: рассчитано по данным ИСИЭЗ НИУ ВШЭ [3] (табл. 13.2 и 14.5).
Note: calculated based on data from the Institute for Statistical Studies and Economics of Knowledge, HSE University [3] (tables 13.2 and 14.5).

Таблица 3
Использование фонда времени горного оборудования и персонала: факт, потенциал и разрешающая способность методов наблюдения

Table 3
Utilization of mining equipment and personnel: actual figures, potential, and the resolution of monitoring methods

Объект и показатель	Зарегистрированное значение	Сопоставление: эталон, потенциал или иной метод наблюдения	Метод получения данных; источник
Потери рабочего времени ремонтников цеха промышленного предприятия (Урал)	1,6% (среднее за две смены; 3,1 и 0,0% по дням)	14,0% при сплошном видеонаблюдении того же контингента; носимые датчики – 0,0%; разрыв 8,75 раза	Разовый фотохронометраж против непрерывной видеофиксации [2]
Коэффициент использования производительности экскаватора с ковшом 18–20 м³ (разрезы и ГОКи России)	0,45–0,49 (430–510 тыс. м³/мес)	Техническая производительность 874–1134 тыс. м³/мес; рекордные месяцы 0,80–0,90 (700–1020 тыс. м³/мес)	Статистика месячной выработки парка [1]
Коэффициент использования добычного оборудования подземной угледобычи РФ, 2024 г.	50% – очистные комбайны; 70% – механизированные крепи	–	Оценка Минэнерго России, методика не раскрыта*
Коэффициент технической готовности экскаватора ЭКГ с ковшом 20 м³ (ГОК)	0,75	0,90 – потенциал при устранении аварийности и нормализации сроков ремонта	Наблюдение за двумя машинами в течение года [21]
Аварийные простои ключевых узлов экскаватора, % календарного фонда	9,0	3,3–3,8 (24–27 ч/мес) – величина, закладываемая в планы предприятий	Пооперационный учёт восстановления по узлам [21]
Затраты времени на ТОиР экскаватора, ч/мес	136	82 – план комбината; 70 – норматив сервисной компании	Факт против плана за январь – апрель [21]
Время у забоя за смену, подземная добыча (платиновый рудник, ЮАР)	≈7 ч	10 ч – номинальная смена; путь к забою 30–40 мин, на удалённых горизонтах до 2 ч	Сменные графики, интервью, наблюдение [22]

Примечание: * доклад Минэнерго России о реализации в 2025 г. Программы развития угольной промышленности России до 2035 г. (https://minenergo.gov.ru/upload2/iblock/5ad/Doklal-ME-v-MER-o-khode-realizatsii-v-2025-godu-PRUP_2035_28.05.2026_DI_10265_12.pdf); строка 1 – не горное производство, наблюдения разнесены во времени; строка 2 – использование производительности, а не времени; строки 4–6 – два экскаватора одного комбината, 0,90 и 3,3–3,8% – расчётно-нормативные величины.
Note: * report of the Ministry of Energy of Russia on the implementation of the Russian Coal Industry Development Program until 2035 in 2025 (https://minenergo.gov.ru/upload2/iblock/5ad/Doklal-ME-v-MER-o-khode-realizatsii-v-2025-godu-PRUP_2035_28.05.2026_DI_10265_12.pdf); Row 1 is not a mining operation, the observations were taken at different times; Row 2 – utilization capacity factor, not utilization over time; Rows 4–6 – two excavators at the same plant, 0.90 and 3.3–3.8% are calculated and normative values.

На технике тот же разрыв виден в каскаде потерь (табл. 3, строки 4–6): из 720 ч месячного фонда экскаватора ЭКГ плановое обслуживание по нормативу забирает 70 ч [21], превышение факта над нормативом – ещё 66,5 ч, аварийные отказы – 65 ч; готовность 0,75 при потенциале 0,90. В средней программе ТОиР реактивный ремонт занимает свыше 55% работ, у лучших предприятий – менее 10% при доле обслуживания по состоянию 45–55% (табл. 5) [14], что подтверждают и оценки для горного оборудования [15; 23].

Документированные внедрения собраны в табл. 4. Подтверждёнными считаются величины, раскрытые компаниями; оценки поставщиков (ЕВРАЗ КГОК, «Кузбассра-

Таблица 4
Документированные внедрения киберфизических систем управления на горнодобывающих предприятиях Российской Федерации и зафиксированные эффекты

Table 4
Documented implementations of the cyber-physical control systems at mining operations in the Russian Federation and the recorded effects

Предприятие, решение; год и масштаб внедрения	Зафиксированный эффект	Экономическая оценка
«Металлоинвест», Лебединский и Михайловский ГОКи – «цифровой карьер»: диспетчеризация ГТК, цифровое управление бурением (к апрелю 2024 г.; два ГОКа; вложения более 330 млн руб.)	Производительность ГТК +11%; буровых станков не менее +20%	Накопленный эффект более 1,5 млрд руб. (обе величины – нижние границы)
ЕВРАЗ – портфель цифровой трансформации: диспетчеризация, ИИ-советчики, удалённое управление агрегатами (2024 г.; более 100 проектов, свыше 100 тыс. измеряемых показателей)	Около 60% эффекта дали инициативы с применением ИИ	Подтверждённый эффект 5,8 млрд руб. за год по группе, включая металлургический передел
ЕВРАЗ КГОК – модуль «Геометаллургия» (ГК «Цифра») (май 2026 г.; карьерный ГТК комбината)	Оптимизация маршрутов техники: +8% производительности	Не раскрыта; величина заявлена поставщиком
УК «Кузбассразрезуголь» – АСУ ГТК «Карьер» (ВИСТ Групп / ГК «Цифра») (2021 г. – Бачатский разрез; к 2022 г. – 6 разрезов, свыше 1000 единиц техники)	Загрузка самосвалов +10%, производительность единицы техники +3–4%; по данным поставщика – аварийные простои до −50%, нагрузка фабрики до +5%	1,8 млрд руб. от опции контроля загрузки самосвалов (оценка поставщика)
Распадская угольная компания (ЕВРАЗ) – «Шахта GO»: аналитика перемещений персонала под землёй (пилот 2020–2021 гг.; 5 шахт в 2022 г.)	17% сотрудников опаздывали на смену; удовлетворённость доставкой +10%	Вложений не потребовалось: имеющееся оборудование позиционирования
«Норникель», Заполярный дивизион – беспилотные шахтные самосвалы на руднике «Скалистый»; позиционирование персонала (самосвалы – с 2021 г., 2 машины, горизонт 850 м, откатка свыше 3 км; позиционирование – 2024 г., 5 рудников)	+1,5 ч работы в сутки и 4–6 дополнительных циклов; объём горной массы +1%	21 тыс. т в год при базе 2,1 млн т; денежный эффект не раскрыт
«Северсталь», Яковлевский ГОК – компьютерное зрение для контроля состояния рудоспусков (I полугодие 2025 г.; подземный рудник)	Предотвращено 19,3 ч простоев	2,9 млн руб. за полугодие
Разрез «Изыхский» (Хакасия) – два роботизированных самосвала БЕЛАЗ-7513R (испытания с 2018–2019 гг.; 2 × 130 т, участок 1350 м)	Сменная норма выработки превышена на 20%	Не раскрыта
АО «Апатит» (ФосАгро), Кировский рудник – дистанционное управление буровыми установками Simba M6S (2021 г.; один оператор ведёт бурение на шести машинах)	Производительность труда на руднике +20%	Не раскрыта

Источник: составлено авторами по корпоративным раскрытиям и отраслевым публикациям 2019–2026 гг.
Source: compiled by the authors based on corporate disclosures and industry publications from 2019–2026.

зрезуголь») не аудированы; эффект ЕВРАЗа получен по группе целиком, включая металлургию; финансирование ИТ «Норникеля» в 2024 г. (8,7 млрд руб. на 119 проектов) характеризует затраты, а не эффект; отбор смещён к успешным проектам. Показателен кейс без вложений: «Шахта GO» на уже установленном оборудовании позиционирования выявила, что 17% сотрудников опаздывали на смену.

Свойства трёх контуров управления сопоставлены в табл. 5; величины из разных обследований сопоставимы условно.

Граница между контурами качественная. Проактивный контур меняет разрешающую способность: обновление данных о местоположении в многофункциональной системе безопасности угольной шахты ограничено пятью секундами при разрешении около трёх метров (табл. 5) – на четыре-пять порядков быстрее сменного рапорта. Удельные затраты на ТОиР падают с 18 долл. на л. с. в год при реактивном ремонте до 13, 9 и 6 при планово-предупредительном, по состоянию и надёжностно-ориентированном, а доминирующие издержки контроля смещаются от принуждения к измерению и далее к верификации моделей.

Обсуждение результатов

Материал разводит три компоненты издержек контроля по наблюдаемым следам. Издержки измерения падают там, где выборку замещает сплошная регистрация: разрыв 1,6 и 14,0% – прямая мера ценности, рассеивавшейся из-за дороговизны измерения [6]. Издержки мониторинга падают вместе с асимметрией информации о состоянии активов: управляющий перестаёт узнавать об отказе от отказа

Таблица 5
Сопоставление контуров управления операционной эффективностью горнодобывающего предприятия: реактивный, планово-предупредительный и проактивный

Table 5
A comparison of the control loops for operational efficiency in mining companies: reactive, schedule preventive, and proactive

Критерий сопоставления	Реактивный контур	Планово-предупредительный контур	Проактивный контур
Шаг регистрации и запаздывание воздействия	Шаг – момент отказа, запаздывание – длительность неплановой остановки	Шаг – межремонтный интервал (в модельном карьере на ТОиР отведено 50 из 350 плановых суток)	Секунды: обновление данных о местоположении в МФСБ угольной шахты не более 5 с, разрешение до (3 ± 1) м (базовый метод RSSI – ±20 м)
Доля в программе ТОиР: промышленность США / постоянно лучшие предприятия, %	более 55 / менее 10	31 / 25–35	12 / 45–55
Удельные затраты на ТОиР, долл. на 1 л. с установленной мощности в год	18	13	9 – обслуживание по состоянию; 6 – надёжностно-ориентированное ТОиР
Приростный эффект по затратам и готовности	База сопоставления; неплановые простои не бюджетируются	Экономия 12–18% затрат на ТОиР относительно реактивного контура	Экономия 8–12% относительно планово-предупредительного, суммарно свыше 30–40%; простои −35…45%, затраты −25…30%, выпуск +20…25% (DOE); готовность +10…20% (Deloitte)
Доминирующие транзакционные издержки контроля	Принуждение к исполнению: установление ответственного и разбор отказа	Измерение: наблюдение выборочно и дискретно (1,6% потерь по фотохронометражу против 14,0% при видеонаблюдении)	Измерение капитализировано в инфраструктуру, предельные издержки наблюдения близки к нулю; вес смещается к верификации моделей

Источник: структура программы ТОиР, удельные затраты и приростная экономия – [14, гл. 5]; оценки готовности оборудования – материалы Deloitte по предиктивному обслуживанию; период обновления данных о местоположении персонала – п. 22 приказа Ростехнадзора от 08.12.2020 N°507.
Source: the structure of a maintenance program, unit costs, and incremental savings – [14, Ch. 5]; equipment availability assessments – Deloitte materials on predictive maintenance; the update interval of personnel location data – Clause 22 of Rostechnadzor Order No.507 dated December 8, 2020.

[14]. Издержки принуждения падают последними: когда факт работы верифицируем, исчезает не только приписка, но и слой процедур её проверки – логика Alchian и Demsetz [5] с обратным знаком.

Инвестиции компаний в цифровизацию не превышают 2% выручки при фрагментарности у 81%: собственная ИТ-инфраструктура специфична по предприятию и технологическому поколению, а специфичность, по Williamson, порождает риск вымогательства [8]. Сервисная модель делает расход делимым и обратимым и снижает не столько стоимость цифровизации, сколько цену ошибки при входе, что решающе для убыточных предприятий угольного сегмента.

Результаты продолжают работы о транзакционных издержках в цифровой экономике [11; 12], перенося фокус на внутрифирменный уровень [24]; исследования алгоритмического контроля [13] и метаанализ электронного мониторинга производительности [25] напоминают об обратной стороне удешевления наблюдения, не изученной в горной отрасли. Модель объяснительная, а не прогностическая; дальнейшая работа – прямое измерение издержек контроля до и после перехода к сплошной регистрации и проверка условия (1) на данных диспетчерских систем.

Заключение

Исследование достраивает транзакционную теорию там, где она обрывалась: в киберфизическом производстве издержки измерения становятся проектируемой переменной, и меняется не интенсивность контроля, а его себестоимость. Условие работоспособности контура формализовано через характерные времена: резерв проактивности $П = 1 - \tau_к/\tau_в$ разделяет режимы, а короткие потери невидимы для суточного контура из-за физического предела разрешающей способности, поэтому сменный рапорт нужно не улучшать, а замещать.

Коэффициент наблюдаемости Кн связывает инженерный показатель с экономическим: при сплошной регистрации OEE становится управляющим сигналом, а норма из точки – условным распределением, что снимает встроенный источник оппортунизма. Документированные внедрения подтверждают направление без аудированной величины эффекта, а асимметрия цифрового контура указывает узкое место – способность превращать данные в решения. Управлять в стохастической среде нужно не средним, а распределением, и не отклонением от плана, а запаздыванием контура.

Список литературы / References

1. Журавлев А.Г., Глебов И.А., Черепанов В.А. Поиск резервов повышения производительности экскаваторно-автомобильных комплексов с применением компьютерного моделирования. *Горная промышленность*. 2023;(6):148–154. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-148-154
Zhuravlev A.G., Glebov I.A., Cherepanov V.A. Searching for reserves to increase productivity of excavator-automobile complexes using computer simulation. *Russian Mining Industry*. 2023;(6):148–154. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-148-154

2. Долженко Р.А., Малышев Д.С. Цифровизация подходов к организации и нормированию труда на промышленном предприятии. *Вестник Омского университета. Серия: Экономика*. 2021;19(4):54–66. https://doi.org/10.24147/1812-3988.2021.19(4).54-66
Dolzhenko R.A., Malyshev D.S. Digitalization of approaches to labor organization and rationing in the industrial enterprise. *Herald of Omsk University. Series "Economics"*. 2021;19(4):54–66. (In Russ.) https://doi.org/10.24147/1812-3988.2021.19(4).54-66

3. Абашкин В.Л., Абдрахманова Г.И., Бочаров М.Я., Вишневский К.О., Гохберг Л.М., Демидкина О.В. и др. *Индикаторы цифровой экономики: 2026*. М.: ИСИЭЗ ВШЭ; 2026. 304 с. Режим доступа: https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/1122445658.pdf (дата обращения: 21.02.2026).

4. Coase R.H. The nature of the firm. *Economica*. 1937;4(16):386–405. https://doi.org/10.1111/j.1468-0335.1937.tb00002.x

5. Alchian A.A., Demsetz H. Production, information costs, and economic organization. American Economic Association. 1972;62(5):777–795. Режим доступа: https://www.aeaweb.org/aer/top20/62.5.777-795.pdf (дата обращения: 21.02.2026).

6. Barzel Y. Measurement cost and the organization of markets. *The Journal of Law and Economics*. 1982;25(1):27–48. https://doi.org/10.1086/467005

7. Jensen M.C., Meckling W.H. Theory of the firm: Managerial behavior, agency costs and ownership structure. *Journal of Financial Economics*. 1976;3(4):305–360. https://doi.org/10.1016/0304-405X(76)90026-X

8. Williamson O.E. Transaction-cost economics: the governance of contractual relations. *The Journal of Law and Economics*. 1979;22(2):233–261. https://doi.org/10.1086/466942

9. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*. 2015;3:18–23. https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001

10. Nakajima S. *Introduction to TPM: Total productive maintenance*. Cambridge, MA: Productivity Press; 1988. 129 p.

11. Nagle F., Seamans R., Tadelis S. Transaction cost economics in the digital economy: A research agenda. Strategic *Organization*. 2025;23(2):351–365. https://doi.org/10.1177/14761270241228674

12. Avdasheva S.B., Geliskhanov I.Z. Transaction cost economics: Lessons from past reforms and potential for the digital economy. *Russian Journal of Economics*. 2025;11(3):237–268. https://doi.org/10.32609/j.ruje.11.156897

13. Cram W.A., Wiener M., Tarafdar M., Benlian A. Examining the impact of algorithmic control on uber drivers' technostress. *Journal of Management Information Systems*. 2022;39(2):426–453. https://doi.org/10.1080/07421222.2022.2063556

14. Sullivan G.P., Pugh R., Melendez A.P., Hunt W.D. *Operations & Maintenance Best Practices: A Guide to Achieving Operational Efficiency. Release* 3.0. Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory; 2010. 321 p. Available at: https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/04/f74/omguide_complete_w-eo-disclaimer.pdf (accessed: 21.07.2026).

15. Rojas L., Peña Á., Garcia J. AI-driven predictive maintenance in mining: a systematic literature review on fault detection, digital twins, and intelligent asset management. *Applied Sciences*. 2025;15(6):3337. https://doi.org/10.3390/app15063337

16. van Eyk L., Heyns P.S. A framework to define, design and construct digital twins in the mining industry. *Computers & Industrial Engineering*. 2025;200:110805. https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110805

17. Клебанов А.Ф., Еремкин И.В., Габусу П.А. Цифровые двойники процессов управления высокоавтоматизированными горнотранспортными комплексами. *Горная промышленность*. 2025;(4):61–70. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-61-70
Klebanov A.F., Eremkin I.V., Gabusu P.A. Digital twins of control processes for highly automated mining transport complexes. *Russian Mining Industry*. 2025;(4):61–70. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-61-70

18. Ashby W.R. *An introduction to cybernetics*. New York: John Wiley & Sons; 1956. 295 p.

19. Elevli S., Elevli B. Performance Measurement of Mining Equipments by Utilizing OEE. *Acta Montanistica Slovaca*. 2010;15(2):95–101. Available at: https://actamont.tuke.sk/pdf/2010/n2/1elevli.pdf (accessed: 21.07.2026).

20. Toraman S. Evaluation of overall equipment effectiveness (OEE) for mining equipment (shovel-truck): A case study Manisa-Soma (Turkey) open pit mine. *Journal of Scientific Reports-A*. 2024;(056):45–55. https://doi.org/10.59313/jsr-a.1433960

21. Шибанов Д.А., Иванов С.Л., Емельянов А.А., Пумпур Е.В. Оценка показателей работоспособности карьерных экскаваторов в реальных условиях эксплуатации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(10):86–94. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94
Shibanov D.A., Ivanov S.L., Yemelyanov A.A., Pumpur E.V. Evaluation of working efficiency of open pit shovels in real operating conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(10):86–94. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94

22. Pelders J.L., Magweregwede F., Rupprecht S.M. Optimization of shift cycles in the South African mining sector. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2021;121(8):427–436. https://doi.org/10.17159/2411-9717/1428/2021

23. Харченко К.В., Зубец А.Ж., Москвитина Е.И., Бабаян Л.М., Лаффах А.М. Анализ эффективности внедрения предиктивного обслуживания горнодобывающего оборудования на основе технологий Индустрии 4.0. *Горная промышленность*. 2024;(4):130–138. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-130-138
Kharchenko K.V., Zubets A.Zh., Moskvitina E.I., Babayan L.K., Laffah A.M. Analyzing the efficiency of implementing predictive maintenance of mining equipment based on Industry 4.0 technologies. *Russian Mining Industry*. 2024;(4):130–138. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-130-138

24. Meng X., Gong X. Digital transformation and innovation output of manufacturing companies – An analysis of the mediating role of internal and external transaction costs. *PLoS ONE*. 2024;19(1):e0296876. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0296876

25. Ravid D.M., White J.C., Tomczak D.L., Miles A.F., Behrend T.S. A meta-analysis of the effects of electronic performance monitoring on work outcomes. *Personnel Psychology*. 2023;76(1):5–40. https://doi.org/10.1111/peps.12514

Информация об авторах
Забайкин Юрий Васильевич – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: 89264154444@yandex.ru
Красавина Екатерина Валерьевна – доктор социологических наук, доцент, профессор кафедры политического анализа и социально-психологических процессов, Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, г. Москва, Российская Федерация
Лютягин Дмитрий Владимирович – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры производственного и финансового менеджмента, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Российская Федерация; научный руководитель ООО «Ансгар», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: lyutyagindv@mgri.ru
Новикова Екатерина Владимировна – кандидат экономических наук, доцент базовой кафедры Торгово-промышленной палаты Российской Федерации «Управление человеческими ресурсами», Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-5347-108X; e-mail: katek_ev@mail.ru
Лунькин Дмитрий Александрович – кандидат экономических наук, доцент кафедры гуманитарных наук, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-4553-006X; e-mail: rabotalun@yandex.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 04.06.2026
Поступила после рецензирования: 22.07.2026
Принята к публикации: 28.07.2026

Information about the authors
Yury V. Zabaikin – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation of Technological Processes, National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russian Federation; e-mail: 89264154444@yandex.ru
Ekaterina V. Krasavina – Dr. Sci. (Sociol.), Associate Professor, Professor of the Department of Political Analysis and Socio-Psychological Processes, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation
Dmitry V. Lyutyagin – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Production and Financial Management, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russian Federation; scientific supervisor LLC ANSGAR, Moscow, Russian Federation; e-mail: lyutyagindv@mgri.ru
Ekaterina V. Novikova – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Basic Department of the Chamber of Commerce and Industry of the Russian Federation “Human Resources Management”, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-5347-108X; e-mail: katek_ev@mail.ru
Dmitriy A. Lunkin – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Humanities, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-4553-006X; e-mail: rabotalun@yandex.ru

Article info
Received: 04.06.2026
Revised: 22.07.2026
Accepted: 28.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-127-134

Роботизация буровзрывных работ на открытых горных работах: автоматизация технологического цикла, точность бурения и управление качеством взрывной подготовки горной массы

И.В. Самарин ✉
Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация
✉ ivs@gubkin.ru

Резюме: Буровзрывные работы – базовый передел открытых горных работ, определяющий гранулометрический состав горной массы и через него издержки экскавации, транспортирования и переработки; на отбойку приходится 20–35% себестоимости добычи, а буровзрывным способом отбивают до 90% скального объёма. Ручные операции порождают разброс точности бурения, перерасход взрывчатых веществ, повышенный выход негабарита, сейсмику и риски для персонала. В статье систематизированы направления роботизации буровзрывных работ по пяти технологическим переделам – бурение, проектирование сетки и паспорта, заряжание, взрывание, диагностика дробления – и введена единая пятиуровневая шкала зрелости автоматизации (ручной → механизированный → автоматизированный → роботизированный → автономный). Предложен интегральный показатель эффективности роботизации с весами переделов, нормированными по их вкладу в эффекты. Прогноз гранулометрии выполнен по модели Кузнецова–Раммлера и функции Свебрека; на модельном блоке (диаметр скважин 250 мм) показано смещение медианы куска с 420 до 350 мм и снижение выхода негабарита с 7,8 до 2,9%. Обобщены отраслевые эффекты автоматизации: сокращение отклонения скважин на 50–75%, негабарита – на 40–65%, удельного расхода взрывчатых веществ – на 5–12%, рост производительности бурения на 10–20%, снижение сейсмики на 15–30%. Матрица «передел × эффект» ранжирует вклад переделов, а роботизация опасных операций заряжания и бурения снижает травматизм, убирая персонал с взрываемого блока. Для типового и целевого сценариев интегральный показатель составил 56 и 88%. Обозначены барьеры внедрения и дорожная карта роботизации буровзрывных работ в контуре автоматизированной системы управления технологическим процессом и цифрового двойника карьера.

Ключевые слова: буровзрывные работы, открытые горные работы, роботизация, автономный буровой станок, точность бурения, гранулометрический состав, модель Кузнецова–Раммлера, функция Свебрека, электронное инициирование, удельный расход взрывчатых веществ, выход негабарита, цифровой двойник карьера

Для цитирования: Самарин И.В. Роботизация буровзрывных работ на открытых горных работах: автоматизация технологического цикла, точность бурения и управление качеством взрывной подготовки горной массы. *Горная промышленность*. 2026;(5):127–134. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-127-134

Autonomous drilling and blasting operations in open-pit mining: automation of the process cycle, drilling accuracy and management of blast fragmentation of rocks

I.V. Samarin ✉
National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation
✉ ivs@gubkin.ru

Abstract: Drilling and blasting is a basic stage of open-pit mining that governs the particle-size distribution in the muck pile and, consequently, the costs of excavation, haulage and processing. Blasting accounts for 20–35% of the mining cost and up to 90% of the rock breaking by volume. Manual operations cause drilling inaccuracy, excessive consumption of explosives, an increased

oversize yield, higher seismicity and risks to personnel. The paper systematizes directions of drilling and blasting robotization across the following five process stages: drilling, pattern and charge design, charging, initiation and fragmentation diagnostics. It also introduces a unified five-level automation-maturity scale, i.e. manual → mechanized → automated → robotic → autonomous operations. An integral robotization efficiency index is proposed, with process weights normalized by their contribution to the effects. Fragmentation forecast is made using the Kuznetsov–Rammler model and the Swebrec function. The median fragment size shifts from 420 to 350 mm and the oversize yield drops from 7.8 to 2.9% for a model block (250 mm hole diameter). Industry effects of automation are generalized including a 50–75% reduction in the hole deviation, a 40–65% drop in oversize, a 5–12% decrease in the specific explosive consumption, a 10–20% gain in the drilling productivity and a 15–30% reduction in seismicity. In the typical and target scenarios the integral index equals 56% and 88%. Implementation barriers and a roadmap for drilling and blasting robotization within the process-control system and the digital twin of the pit are outlined.

Keywords: drilling and blasting, open-pit mining, robotization, autonomous drill rig, drilling accuracy, particle size distribution, Kuznetsov–Rammler model, Swebrec function, electronic initiation, specific explosive consumption, oversize yield, digital twin of open-pit mine

For citation: Samarin I.V. Autonomous drilling and blasting operations in open-pit mining: automation of the process cycle, drilling accuracy and management of blast fragmentation of rocks. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):127–134. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-127-134

Введение

Буровзрывные работы (БВР) – базовый, «нулевой» передел открытых горных работ: именно взрыв формирует гранулометрический состав горной массы, от которого зависит вся последующая цепочка «экскавация → транспорт → дробление → переработка». На открытых работах буровзрывным способом отбивают до 90% скального объёма [1], а доля затрат на отбойку в себестоимости добычи в зависимости от крепости пород достигает 20–35% [2]. Качество взрыва предопределяет и издержки смежных переделов: рост средневзвешенного куска взорванной массы с 350 до 550 мм снижает производительность карьерного экскаватора (на примере WK-35 в паре с автосамосвалом CAT 793D) в 1,5 раза – с 15000 до 8500 м³ за смену, а доля некондиционных кусков крупнее 1 м³ растёт с 3,5 до 8% [3]. Отсюда логика mine-to-mill: параметры БВР следует оптимизировать не по локальной стоимости бурения и взрывчатых веществ (ВВ), а по интегральной стоимости всего цикла [4].

Ручная и полумеханизированная организация БВР – источник системной вариативности. Ошибки ручной разметки и наведения станка дают разброс глубины и наклона скважин, недобур и перебур, смещение фактической сетки от проектной; результат – перерасход ВВ, локальные зоны переизмельчения и одновременно выход негабарита (нормативно 1–5% [2]), повышенная сейсмика и риск для персонала на заряжаемом блоке. Именно эти потери и адресует роботизация.

Механизм влияния прозрачен: недобур оставляет в подошве уступа порог и «стаканы», перебур увеличивает переизмельчение и расход ВВ, а смещение скважины от проектной сетки нарушает взаимодействие соседних зарядов и рождает локальный негабарит. Поскольку энергозатраты на дробление и измельчение руды на фабрике монотонно растут с крупностью питания, «недоработанный» взрыв оплачивается дважды – на экскавации и в переработке [2; 4]. Спутниковые (GNSS) и инерциальные системы навигации станка, автоматическое выдерживание глубины и угла и контроль недобура/перебура снимают эту вариативность в самом источнике [5; 6].

Направления роботизации БВР складываются в пять переделов. Первый – бурение: переход к автономным и дистанционно управляемым станкам с высокоточным позиционированием (спутниковым и инерциальным), интеллектуальной адаптацией режима к крепости массива и автоматическим контролем недобура / перебура [5; 6]. Роботизация бурения и транспорта уже снижает травматизм и убирает человека с опасного уступа [7; 8]. Второй – проектирование: САПР БВР автоматически строит сетку скважин и паспорт заряжания по 3D-модели блока и данным о трещиноватости, увязывая их с прогнозом дробления [9]. Третий – заряжание: смесительно-зарядные машины с элементами автоматизации и дистанционного управления и применение эмульсионных ВВ [10]. Четвёртый – взрывание: электронные системы инициирования с программируемым замедлением; точность отработки интервала у них 0,02% против до 20% у неэлектрических средств, что позволяет управлять сейсмикой и расширять сетку, снижая удельный расход [11; 12]. Пятый – диагностика дробления: машинное зрение и нейросети (архитектуры типа U-Net), оценивающие кусковатость в реальном времени и удерживающие негабарит на уровне не более 3% [13; 14].

Сквозной слой – цифровое моделирование взрыва и прогноз гранулометрии. Классической основой служит модель Кузнецова–Раммлера [9; 15; 16], расширяемая функцией Свебрека, которая тремя параметрами описывает распределение с коэффициентом детерминации выше 0,995 [17]; современные работы соединяют эмпирические модели с цифровой обработкой изображений – WipFrag, Split-Desktop [18] – и вероятностными распределениями Вейбулла [19]. Всё это интегрируется в автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУ ТП) горного производства, «цифровой рудник» и цифровые двойники технологических комплексов [8; 20; 21].

Несмотря на обилие частных решений, в литературе нет единой шкалы зрелости роботизации именно БВР и интегрального критерия, сводящего разнородные эффекты переделов. Цель работы – систематизировать уровни автоматизации БВР по переделам, предложить интегральный показатель эффективности роботизации и на модельном примере показать сдвиг гранулометрии и ключевых показателей при переходе от ручных БВР к автоматизированным.

Материалы и методы

Информационную базу составили 21 рецензируемая публикация (ВАК / RSCI / Scopus) 2017–2025 гг. по автоматизации и роботизации БВР, автономным буровым станкам, цифровому проектированию и моделированию взрыва, АСУ ТП горного производства, а также отраслевые данные опытно-промышленной эксплуатации. Методический аппарат включает три компонента.

Первый – пятиуровневая шкала зрелости автоматизации, применяемая единообразно к каждому из пяти переделов БВР (бурение, проектирование, заряжание, взрывание, диагностика дробления): уровень 1 – ручной, 2 – механизированный, 3 – автоматизированный, 4 – роботизированный, 5 – автономный (табл. 1). Признак уровня – доля функций, выполняемых без участия оператора, и наличие обратной связи по данным.

Второй – интегральный показатель эффективности роботизации БВР, сводящий уровни переделов с весами:

$$I\text{роб} = (\Sigma\, w_i \cdot L_i) / (5 \cdot \Sigma\, w_i) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где L_i – уровень автоматизации i-го передела (от 1 до 5); w_i – вес передела; 5 – максимальный уровень шкалы. Суммирование ведётся по пяти переделам. Веса приняты пропорциональными суммарному вкладу передела в эффекты – нормированным суммам строк матрицы «передел × эффект» (табл. 5): w = {0,21; 0,21; 0,18; 0,20; 0,20}. Показатель нормирован на 100% и допускает сравнение объектов и сценариев (расчёт авторов)

Третий – прогноз гранулометрии. Медианный размер куска оценивается по формуле Кузнецова:

$$x_{50} = A \cdot q^{-0.8} \cdot Q_з(1/6) \cdot (115 / e)^{0{\cdot}6_{33}}, \quad (2)$$

где A – порода-фактор (индекс взрываемости), 7–13; q – удельный расход ВВ, кг/м³; $Qз$ – масса заряда в скважине, кг; e – относительная работоспособность ВВ (для граммонита/ANFO e = 100).

Суммарный выход по крупности описывается распределением Розина–Раммлера, а «хвосты» и связь с дроблением уточняются функцией Свебрека:

$$P(x) = 1 - \exp[-\ln 2 \cdot (x / x50)^n];$$
$$P\text{св}(x) = 1 / (1 + [\ln(x_{max}/x) / \ln(x_{max}/x_{50})]^b), \quad (3)$$

где $P(x)$ – суммарный проход по крупности, доля; x – размер куска, мм; n – индекс равномерности дробления; xmax – максимальный размер куска, мм; b – параметр волнистости функции Свебрека. Выход негабарита вычисляется как $1 - P(xн)$ при пороге $xн$ = 1000 мм.

Модельный (демонстрационный) блок для расчётного примера: скальные породы средней крепости, диаметр скважин 250 мм, эмульсионное ВВ. Сравниваются два сценария – «ручные БВР» и «после автоматизации»; варьируются сетка, удельный расход и отклонение скважин (табл. 4). Все величины расчётного примера получены моделированием и помечены как расчёт авторов; отраслевые эффекты (табл. 3) приведены диапазонами со ссылками на источники. Значения n и b приняты в характерных для карьеров пределах [15–17; 19].

Результаты

Систематизация уровней (табл. 1) показывает, что по БВР большинство отечественных карьеров находятся между уровнями 2 и 3: бурение и заряжание механизированы, проектирование частично автоматизировано, а взрывание и диагностика дробления автоматизированы фрагментарно. Полностью автономный режим (уровень 5) сегодня реализуется преимущественно на буровом переделе – в опытно-промышленной эксплуатации автономных станков с высокоточным позиционированием, где наведение става доводится до дециметрового уровня, а горизонтирование мачты – примерно до одного градуса [5; 8].

Сопоставление конкретных технологий (табл. 2) выявляет разную зрелость: автономные буровые станки и САПР БВР достигли промышленного внедрения, электронное инициирование и смесительно-зарядная техника – тиражирования, тогда как сквозное цифровое моделирование взрыва и нейросетевая диагностика гранулометрии пока находятся на стадии опытно-промышленной эксплуатации [9–11; 13 14].

Прогноз гранулометрии по (2)–(3) для модельного блока даёт наглядную картину сдвига распределения (рис. 1). При ручных БВР расчётная медиана x_{50} = 420 мм,

Таблица 1
Уровни автоматизации и роботизации буровзрывных работ по технологическим переделам

Table 1
Automation and robotization maturity levels of drilling and blasting operations by the processes stage

Уровень	Определение и признак	Человек в контуре	Типичные средства
1	Ручной: разметка, наведение и контроль вручную	Полностью	Рулетка, визирная разметка
2	Механизированный: машины с ручным управлением	Постоянно	Буровой станок, смесительно-зарядная машина, локальная контрольно-измерительная система
3	Автоматизированный: автоматизация операций, оператор надзирает	Надзор	САПР БВР, GNSS-навигация станка
4	Роботизированный: дистанционное / полуавтономное ведение	Дистанционно	Телеуправление, автозаряжание
5	Автономный: самостоятельная работа с обратной связью	Вне контура	Автономный станок, цифровой двойник

Систематизация выполнена по [5–11; 20].
The classification is based on [5–11; 20].

Таблица 2
Сопоставление технологий и средств роботизации буровзрывных работ

Table 2
Comparison of robotization technologies and tools for drilling and blasting operations

Технология	Функция в цикле БВР	Точность / ключевой эффект	Интеграция с АСУ ТП	Зрелость
Автономный буровой станок	Высокоточное бурение сетки	Наведение ~0,1 м; контроль недобура	Высокая	Внедрение
САПР БВР	Проект сетки и паспорта заряжания	Сетка и заряд по 3D-модели блока	Высокая	Внедрение
Цифровое моделирование взрыва	Прогноз гранулометрии	Кузнецова–Раммлера / Свебрека, $R^2 > 0{,}995$	Средняя	Опытно-промышленная эксплуатация
Смесительно-зарядная техника	Механизир. и дистанц. заряжание	Дозирование эмульсионных взрывчатых веществ, дистанционный пуск	Средняя	Тиражирование
Электронное инициирование	Управление замедлениями	Точность 0,02%; шаг 1 мс	Высокая	Тиражирование
Машинное зрение / нейросети	Диагностика кусковатости	Негабарит ≤ 3% онлайн (U-Net)	Средняя	Опытно-промышленная эксплуатация

Обобщено авторами по [5; 9–11; 13; 14; 17].
Summarized by the authors based on [5; 9–11; 13; 14; 17].

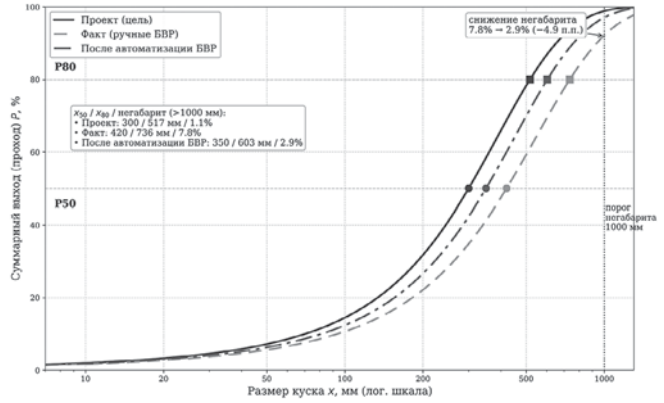


Рис. 1
Кумулятивные кривые гранулометрического состава взорванной горной массы (Кузнецова–Раммлера/ Свебрека): проект, факт, после автоматизации; отметки P50/P80 и порог негабарита

Fig. 1
Cumulative particle size distribution curves of the rocks in the muck pile (Kuznetsov–Rammler/ Swebrec): design, actual, upon introduction of automation; P50/P80 marks and the oversize threshold level

x_{80} = 736 мм, выход негабарита (>1000 мм) – 7,8%; переход к автоматизированному контуру (уплотнение и выравнивание сетки, снижение отклонения скважин, корректировка замедлений) смещает кривую влево: x_{50} = 350 мм, x_{80} = 603 мм, негабарит – 2,9%, приближаясь к проектной кривой (x_{50} = 300 мм, негабарит 1,1%). Автоматизация «съедает» около 4,9 процентного пункта негабарита – эффект, прямо конвертируемый в производительность экскавации [3].

Обобщённые по литературе и отраслевым данным эффекты сведены в табл. 3. Наибольший разброс – по точности бурения (сокращение отклонения скважин на 50–75%) и негабариту (снижение на 40–65%); удельный расход ВВ снижается умеренно (5–12%), но с мультипликативным эффектом ниже по цепочке; производительность бурения растёт на 10–20%, сейсмика снижается на 15–30% [3; 8; 11; 13; 14]. Пересчёт на экскавацию показателен: по зависимости [3], сокращение средневзвешенного куска в модели с 420 до 350 мм возвращает один-два «ковшовых» цикла и заметно повышает сменную производительность погрузки, тогда как обратный дрейф к 500–550 мм обрушает её в полтора раза.

Таблица 3
Экономико-технологические эффекты направлений автоматизации буровзрывных работ

Table 3
Technological and economic effects of various directions in automation of the drilling and blasting operations

Направление	Показатель	Эффект, диапазон	Обобщено по источникам, *n*
Высокоточное бурение	Отклонение скважин	−50…−75%	*n* = 3 [5; 6; 8]
Проектирование и инициирование	Удельный расход ВВ	−5…−12%	*n* = 3 [1; 11; 12]
Управление дроблением	Выход негабарита	−40…−65%	*n* = 4 [3; 13–15]
Автономное бурение	Производительность бурения	+10…+20%	*n* = 2 [5; 8]
Электронное инициирование	Сейсмика (PPV)	−15…−30%	*n* = 2 [11; 12]
Роботизация опасных операций	Травматизм персонала	Существенно ↓	*n* = 2 [7; 8]
Комплекс роботизации БВР	Окупаемость	18–36 мес.	Расчёт авторов [8; 21]

Примечание: диапазоны обобщены по указанным источникам; *n* – число обобщённых публикаций; окупаемость – оценка авторов по отраслевым данным.
Note: the ranges are summarized based on the cited sources; *n* represents the number of publications summarized; the payback period is the authors' estimate based on the industry data.

Таблица 4
Параметры расчётного примера прогноза гранулометрического состава (модельный расчёт)

Table 4
Parameters for an example calculation of the particle size distribution (a model analysis)

Параметр	До: ручные БВР	После автоматизации
Диаметр скважин, мм	250	250
Сетка (a × b), м	7,0 × 7,0	6,5 × 7,0
Удельный расход q, кг/м³	0,82	0,74
Отклонение скважин, м	0,45	0,12
Медиана x_{50} (P50), мм	420	350
x_{80} (P80), мм	736	603
Выход негабарита >1000 мм, %	7,8	2,9

Примечание: расчёт по формулам (2)–(3) для модельного блока; удельный расход снижен при одновременном выравнивании сетки и уменьшении отклонения скважин.
Note: the calculation uses equations (2)–(3) for the model block; the specific consumption is reduced with simultaneous grid alignment and a decrease in the borehole deviation.

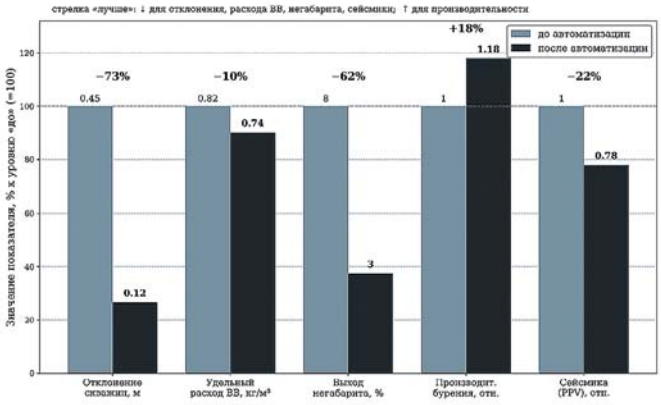


Рис. 2
Эффекты автоматизации БВР: показатели «до/после» (нормировка к уровню «до» = 100), с подписью процента изменения

Fig. 2
Effects of blasting automation: the 'before/after' KPIs (normalized to the 'before' level = 100), with the percentage-change labels

Таблица 5
Матрица «передел БВР × эффект автоматизации», баллы 0–5

Table 5
The 'drilling-and-blasting stage × automation effect' matrix, scores 0–5

Передел	Точность / качество	Расход ВВ	Безопасность / сейсмика	Производительность	Себестоимость	Всего
Бурение	5	3	4	5	4	21
Проектирование	4	5	3	4	5	21
Заряжание	3	4	5	3	3	18
Взрывание	4	4	5	3	4	20
Диагностика дробления	5	4	3	4	4	20
Итого по эффекту	21	20	20	19	20	100

Примечание: экспертная балльная оценка авторов (0 – влияния нет, 5 – максимальное); суммы строк использованы как веса wi в формуле (1).
Note: an expert scoring of the authors (0 = no impact, 5 = maximum impact); the totals of the rows are used as the wi weights in Equation (1).

Параметры модельного примера (табл. 4) и сравнение показателей «до/после» (рис. 2) конкретизируют эти диапазоны. Отклонение скважин в модели снижено с 0,45 до 0,12 м (−73%), удельный расход – с 0,82 до 0,74 кг/м³ (−10%), негабарит – с 8,0 до 3,0% (−62%), производительность бурения повышена на 18%, относительная сейсмика (PPV) снижена на 22%. Разнонаправленность показателей (для одних «лучше» – меньше, для производительности – больше) подчёркивает необходимость сводного критерия.

Матрица «передел × эффект» (табл. 5, рис. 3) ранжирует вклад переделов. Наибольшую суммарную значимость набирают бурение и проектирование (по 21 баллу из 25): точность позиционирования и оптимизация сетки/паспорта влияют сразу на качество, расход ВВ, производительность и себестоимость. Заряжание сильнее всего сказывается на безопасности (роботизация убирает персонал с блока [7]), взрывание – на сейсмике и качестве через электронное инициирование [11; 12], а диагностика дробления замыкает контур обратной связи, обеспечивая точность управления [13; 14].

Подстановка нормированных весов и характерных уровней в выражение (1) даёт интегральный показатель: для типичного карьера (уровни переделов 3-3-2-3-3) Iроб ≈ 56%,

Таблица 6
Барьеры и факторы внедрения роботизации буровзрывных работ

Table 6
Barriers and drivers for adopting autonomous drilling and blasting operations

Группа	Барьер / фактор	Влияние
Технологические	Разнородность парка станков и ВВ; надёжность связи на уступе	Среднее
Экономические	Высокие капвложения; окупаемость 18–36 мес	Высокое
Кадровые	Дефицит операторов роботизированных комплексов	Среднее
Нормативно-правовые	Нет регламентов для автономной техники в опасной зоне	Высокое
Данные и ИТ	Качество и связность данных для АСУ ТП и цифрового двойника	Высокое

Примечание: систематизация авторов по [7; 8; 20; 21]; «влияние» – экспертная качественная оценка сдерживающего фактора.
Note: classification of the authors based on [7; 8; 20; 21]; 'impact' is an expert qualitative assessment of a constraining factor.

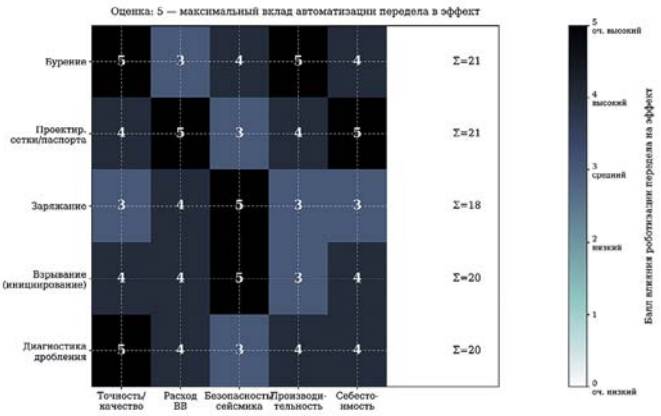


Рис. 3
Тепловая карта «передел БВР × эффект автоматизации» (баллы 0–5) с суммами по строкам

Fig. 3
A heat map of the blasting stage × automation effect (scores 0–5) with the row totals

а для целевого роботизированного сценария (5-5-4-4-4) – *I*роб ≈ 88% (расчёт авторов). Разрыв около 32 процентных пунктов локализует резерв: наибольший прирост даёт подтягивание заряжания (с уровня 2 до 4) и перевод бурения и проектирования в автономный режим.

Барьеры внедрения (табл. 6) остаются преимущественно внесистемными по отношению к самой технике. Ключевые – экономические (капиталоёмкость, окупаемость 18–36 мес), кадровые и нормативные (отсутствие регламентов для автономной техники в опасной зоне), а также «данные»: качество и связность данных бурения, взрыва и диагностики определяют работоспособность цифровых двойников и АСУ ТП [20; 21].

Отмечается, что на низких уровнях автоматизации (телеуправление, уровни 1–3) производительность временно снижается на 20–25% и лишь полностью автономный режим даёт устойчивый прирост [8].

Заключение

1. БВР – определяющий передел открытых горных работ: буровзрывным способом отбивают до 90% скального объёма, на отбойку приходится 20–35% себестоимости, а качество дробления транслируется вниз по цепочке – рост среднего куска с 350 до 550 мм снижает производительность экскаватора в 1,5 раза. Это делает роботизацию БВР приоритетной точкой цифровой трансформации горного производства.

2. Предложены единая пятиуровневая шкала автоматизации по пяти переделам (бурение, проектирование, заряжание, взрывание, диагностика) и интегральный показатель *I*роб с весами, нормированными по вкладу переделов. Для типичного карьера *I*роб ≈ 56%, для целевого роботизированного сценария – ≈ 88% (расчёт авторов); резерв сосредоточен в заряжании и переводе бурения/проектирования в автономный режим.

3. Модельный прогноз по Кузнецову–Раммлеру и Свебреку показал, что переход к автоматизированному контуру смещает x_{50} с 420 до 350 мм и снижает негабарит с 7,8 до 2,9% (–4,9 пп) (расчёт авторов). Обобщённые отраслевые эффекты: отклонение скважин −50…−75%, негабарит −40…−65%, удельный расход ВВ −5…−12%, производительность бурения +10…+20%, сейсмика −15…−30%.

4. Наибольшую отдачу даёт связка «высокоточное бурение + автоматическое проектирование сетки + электронное инициирование + нейросетевая диагностика дробления», замкнутая обратной связью в АСУ ТП и цифровом двойнике. Дорожная карта: 1) оснащение станков высокоточным позиционированием и контролем недобура/перебура; 2) автоматизация паспорта и сетки по 3D-модели блока; 3) роботизация заряжания; 4) переход на электронное инициирование; 5) онлайн-диагностика гранулометрии и замыкание контура mine-to-mill.

5. Ограничения – капиталоёмкость, окупаемость 18–36 мес, дефицит регламентов для автономной техники и требования к качеству данных; на этапе телеуправления возможно временное снижение производительности на 20–25%. Дальнейшие исследования – калибровка весов Iроб по фактическим данным и валидация прогноза гранулометрии на промышленных блоках.

Список литературы / References

1. Афанасьев П.И. Методологические основы взрывного разрушения горных пород при разработке месторождений открытым способом. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12):28–41. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12/12_2025_28-41.pdf (дата обращения: 22.03.2026).
Afanasev P.I. Methodological framework for rock blasting in open pit mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(12):28–41. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12/12_2025_28-41.pdf (accessed: 22.03.2026).

2. Вохмин С.А., Курчин Г.С., Шевнина Е.В., Кирсанов А.К., Костылев С.С. Прогнозирование гранулометрического состава отбитой горной массы при отработке месторождений открытым способом. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2020;(1):14–24. https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-1-14-24
Vokhmin S.A., Kurchin G.S., Shevnina E.V., Kirsanov A.K., Kostylev S.S. Granulometric composition predicting models after explosion in open-pit mining. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Gornyy Zhurnal*. 2020;(1):14–24. (In Russ.) https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-1-14-24

3. Маринин М.А., Рахманов Р.А., Аленичев И.А., Афанасьев П.И., Сушкова В.И. Изучение влияния гранулометрического состава взорванной горной массы на производительность экскаватора WK-35. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(6):111–125. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_6_0_111
Marinin M.A., Rakhmanov R.A., Alenichev I.A., Afanasyev P.I., Sushkova V.I. Effect of grain size distribution of blasted rock on WK-35 shovel performance. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(6):111–125. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_6_0_111

4. Маринин М.А., Маринина О.А., Рахманов Р.А. Методический подход к оценке влияния гранулометрического состава взорванной горной массы на стоимость горных работ. *Горный журнал*. 2023;(9):28–34. https://doi.org/10.17580/gzh.2023.09.04
Marinin M.A., Marinina O.A., Rakhmanov R.A. Methodological approach to assessing influence of blasted rock fragmentation on mining costs. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(9):28–34. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2023.09.04

5. Шигин А.О., Гилёв А.В., Шигина А.А. Автоматизация шарошечного бурения взрывных скважин на карьерах. *Горный журнал*. 2017;(2):82–86. https://doi.org/10.17580/gzh.2017.02.16
Shigin A.O., Gilyov A.V., Shigina A.A. Automation of rotary blasthole drilling in open pit mines. *Gornyi Zhurnal*. 2017;(2):82–86. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2017.02.16

6. Никитенко М.С., Худоногов Д.Ю., Кизилов С.А. Альтернативные подходы к определению положения техники на горно-добывающих предприятиях. *Записки Горного института*. 2025;275:167–178. Режим доступа: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16718 (дата обращения: 22.03.2026).
Nikitenko M.S., Khudonogov D.Y., Kizilov S.A. Alternative frameworks for equipment positioning in mining operations. *Journal of Mining Institute*. 2025;275:167–178. Available at: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16718 (accessed: 22.03.2026).

7. Чещин Д.О., Плохих В.В. Автоматизация в горной промышленности и ударная машина для роботизированного комплекса. *Проблемы недропользования*. 2022;(1):46–54. https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.01.046
Cheshchin D.O., Plokhikh V.V. Automation in the mining industry and impact machine for a robotic complex. *Problems of Subsoil Use*. 2022;(1):46–54. (In Russ.) https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.01.046

8. Коваленко В.С., Зырянов И.В. Автоматизация и роботизация горного производства – современный этап перехода к высокопроизводительному и безопасному ведению открытых горных работ. *Горная промышленность*. 2025;(5):124–130. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-124-130
Kovalenko V.S., Zyryanov I.V. Automation and robotization of mining production: the current stage of transition to high-performance and safe surface mining. *Russian Mining Industry*. 2025;(5):124–130. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-124-130

9. Маринин М.А. Расчет параметров буровзрывных работ на заданный гранулометрический состав взорванной горной массы при открытой разработке месторождений полезных ископаемых. *Горный журнал*. 2025;(3):79–86. https://doi.org/10.17580/gzh.2025.03.11
Marinin M.A. Drill&blast design for preset grain-size composition of broken rocks in open pit mineral mining. *Gornyi Zhurnal*. 2025;(3):79–86. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2025.03.11

10. Сахапова Т.С., Проценко К.Ю., Тихонова Е.А., Ипатова М.А. Обзор зарубежных производителей смесительно-зарядной техники для открытых горных работ. *Горная промышленность*. 2022;(3):79–83. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-79-83
Sakhapova T.S., Protsenko K.Yu., Tikhonova E.A., Ipatova M.A. Overview of foreign manufacturers of mixing and charging equipment for surface mining. *Russian Mining Industry*. 2022;(3):79–83. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-79-83

11. Жуликов В.В., Князев К.А., Назаров С.С. Обоснование эффективности взрывных работ с использованием электронных систем в сравнении с неэлектрическими средствами инициирования. *Горная промышленность*. 2022;(5):64–68. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-64-68
Zhulikov V.V., Knyazev K.A., Nazarov S.S. Justification of blasting efficiency using electronic systems in comparison with non-electric primers. *Russian Mining Industry*. 2022;(5):64–68. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-64-68

12. Шер Е.Н. Моделирование разрушения горных пород сближенными шпуровыми зарядами при контурном взрывании. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2023;(5):70–77. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230508
Sher E.N. Modeling rock fracture in closely spaced perimeter blasting. *Journal of Mining Science*. 2023;59(5):763–769. https://doi.org/10.1134/S1062739123050083

13. Дремин А.В., Ситдикова С.В., Великанов В.С., Стожков Д.С., Гришин И.А. Анализ кусковатости горных пород в реальном времени с использованием отечественного программно-аппаратного обеспечения. *Горная промышленность*. 2025;(3):118–123. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-118-123
Dremin A.V., Sitdikova S.V., Velikanov V.S., Stozhkov D.S., Grishin I.A. Real-time analysis of particle size distribution of rocks using a domestic software and hardware complex. *Russian Mining Industry*. 2025;(3):118–123. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-118-123

14. Великанов В.С., Дремин А.В., Чернухин С.А., Ломовцева Н.В. Технологии нейронных сетей в интеллектуальном анализе данных гранулометрического состава взорванных пород. *Горная промышленность*. 2024;(4):90–94. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-90-94
Velikanov V.S., Dremin A.V., Chernukhin S.A., Lomovtseva N.V. Neural network technologies in mining data on particle size distribution of muck pile rocks. *Russian Mining Industry*. 2024;(4):90–94. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-90-94

15. Маринин М.А., Афанасьев П.И., Сушкова В.И., Устименко К.Д., Ахметов А.Р. Опыт применения модели Кузнецова-Раммлера при описании распределения грансостава взорванной горной массы. Г*орный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):96–109. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_96
Marinin M.A., Afanasyev P.I., Sushkova V.I., Ustimenko K.D., Akhmetov A.R. The experience of using the Kuz-Ram model in describing of grain size distribution of blasted rock mass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):96–109. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_96

16. Ракишев Б.Р., Орынбай А.А., Ауэзова А.М., Куттыбаев А.Е. Гранулометрический состав взорванных пород при различных условиях взрывания. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(8):83–94. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-83-94
Rakishev B.R., Orynbay A.A., Auezova A.M., Kuttybaev A.E. Grain size composition of broken rocks under different conditions of blasting. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(8):83–94. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-83-94

17. Ouchterlony F. The Swebrec© function: linking fragmentation by blasting and crushing. *Mining Technology: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section A*. 2005;114(1):29–44. https://doi.org/10.1179/037178405X44539

18. Саадун А., Фредж М., Букарм Р., Хаджи Р. Анализ дробления с использованием цифровой обработки изображений и эмпирической модели (KuzRam): сравнительное исследование. *Записки Горного института*. 2022;257:822–832. https://doi.org/10.31897/PMI.2022.84
Saadoun A., Fredj M., Boukarm R., Hadji R. Fragmentation analysis using digital image processing and empirical model (KuzRam): a comparative study. *Journal of Mining Institute*. 2022;257:822–832. https://doi.org/10.31897/PMI.2022.84

19. Гаврилкович Э.Г., Оника С.Г., Гец А.К., Жуков С.А. Гранулометрический состав кусков взорванной горной массы и его вероятностное распределение в условиях карьера природного камня. *Горный журнал*. 2022;(4):52–56. https://doi.org/10.17580/gzh.2022.04.08
Gavrilkovich E.G., Onika S.G., Gets A.K., Zhukov S.A. Fragment size distribution and its probability distribution in blasted rock mass in a natural stone quarry. *Gornyi Zhurnal*. (In Russ.) 2022;(4):52–56. https://doi.org/10.17580/gzh.2022.04.08

20. Клебанов А.Ф., Еремкин И.В., Габусу П.А. Цифровые двойники процессов управления высокоавтоматизированными горнотранспортными комплексами. *Горная промышленность*. 2025;(4):61–70. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-61-70
Klebanov A.F., Eremkin I.V., Gabusu P.A. Digital twins of control processes for highly automated mining transport complexes. *Russian Mining Industry*. 2025;(4):61–70. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-61-70

21. Жданеев О.В., Власова И.М. Вызовы и приоритеты цифровой трансформации угольной отрасли. *Уголь*. 2023;(1):62–69. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-1-62-69
Zhdaneev O.V., Vlasova I.M. Digital transformation of the coal industry. *Ugol'*. 2023;(1):62–69. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-1-62-69

Информация об авторе
Самарин Илья Вадимович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-2430-5311; e-mail: ivs@gubkin.ru

Information about the author
Ilya V. Samarin – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Automation of Technological Processes, National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-2430-5311; e-mail: ivs@gubkin.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 12.06.2026
Поступила после рецензирования: 22.07.2026
Принята к публикации: 27.07.2026

Article info
Received: 12.06.2026
Revised: 22.07.2026
Accepted: 27.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-135-141

Эффективное крепление подземных горных выработок как фактор снижения последствий геодинамических явлений

А.И. Конурин ✉
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация
✉ konurin@misd.ru

Резюме: В статье представлена сравнительная оценка систем крепления подземных горных выработок в удароопасных и высоконапряженных условиях методом конечных элементов. Актуальность работы обусловлена тем, что при динамических проявлениях горного давления отказ выработки определяется не только прочностью отдельных элементов, но и работоспособностью системы «массив – крепь – удержание поверхности» в целом. Цель исследования – сопоставить пять вариантов крепления по единой расчетной схеме при одинаковых исходных условиях. Использована пространственная конечно-элементная модель арочной выработки с учетом упругопластического поведения массива по критерию Мора–Кулона, исходного напряженного состояния и трех расчетных сценариев: базового высоконапряженного состояния, ослабленной приконтурной зоны и эквивалентного динамического воздействия. Сопоставление выполнено по смещениям кровли и бортов, объему пластической зоны, напряжениям в элементах крепи, протяженности зоны нарушения сцепления и интегральному показателю эффективности. Установлено, что комбинированная система с энергопоглощающими анкерами и фиброармированным торкретбетоном обеспечивает наибольшее снижение смещений и поврежденности приконтурного массива. Базовая система без специальных энергопоглощающих элементов показала наибольшую чувствительность к ослаблению приконтурной зоны и импульсному воздействию. Практическая значимость работы заключается в возможности использовать предложенную расчетную схему при предварительном выборе крепи для выработок в удароопасных массивах и при постановке детальных проектных расчетов. Научная новизна состоит в сопоставлении пяти систем крепления по единому набору количественных критериев в рамках одной расчетной постановки.

Ключевые слова: горный удар, подземная выработка, система крепления, энергопоглощающая крепь, анкерная крепь, торкретбетон, численное моделирование, метод конечных элементов, устойчивость выработок

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда №25-27-00034.

Для цитирования: Конурин А.И. Эффективное крепление подземных горных выработок как фактор снижения последствий геодинамических явлений. *Горная промышленность.* 2026;(5):135–141. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-135-141

Efficient underground mine support as a factor in reducing consequences of rock bursts

A.I. Konurin ✉
Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
✉ konurin@misd.ru

Abstract: The paper presents a finite element study aimed at a comparative assessment of support systems for underground excavations in burst-prone and highly stressed rock masses. The problem is relevant because failure of an underground opening under dynamic ground pressure is controlled not only by the strength of individual support elements, but also by the performance of the entire rock mass-support-surface retention system. The purpose of the study is to compare five support designs within a unified numerical framework under identical initial conditions. A three-dimensional finite element model of an arched excavation was used. The rock mass was described using an elastoplastic Mohr-Coulomb model, and three calculation scenarios were considered, i.e. the base high-stress state, a weakened near-contour zone, and an equivalent dynamic loading case. The support designs were compared by the roof and wall displacements, plastic zone size, stresses in the support elements, contact degradation length, and an integral efficiency index. The results show that the combined system consisting of energy-absorbing bolts and fibre-reinforced shotcrete provides the greatest reduction in displacements and damage of the surrounding rock mass. The base support system without special energy-absorbing elements is the most sensitive to weakening of the border zone and impulse loading. The proposed approach can be used for preliminary selection of support in burst-prone excavations and for execution of detailed design calculations. The novelty of the study lies in comparing five support systems using a unified set of quantitative criteria within one numerical model.

Keywords: rock burst, underground excavation, support system, energy-absorbing support, rock bolts, shotcrete, numerical modeling, finite element method, excavation stability

Acknowledgements: The study was supported by grant No.25-27-00034 of the Russian Science Foundation.

For citation: Konurin A.I. Efficient underground mine support as a factor in reducing consequences of rock bursts. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):135–141. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-135-141

Введение

Освоение глубоких горизонтов месторождений полезных ископаемых сопровождается усложнением геомеханической обстановки, ростом действующих напряжений и повышением вероятности динамических проявлений горного давления. В этих условиях устойчивость подземных выработок определяется способностью системы крепления ограничивать разрушение приконтурного массива, удерживать нарушенную породу и снижать последствия горного удара.

Для удароопасных и высоконапряженных условий недостаточно оценивать только статическую несущую способность отдельных элементов крепи [1; 2]. В современной литературе развивается системный подход, при котором объектом проектирования является совокупность элементов «массив – крепь – удержание поверхности», а критериями эффективности служат прочность, деформируемость, энергоемкость и совместная работа элементов [3; 4].

Поведение энергопоглощающих анкеров, в том числе конусных анкеров и анкеров типа D-Bolt, предназначенных для работы при больших перемещениях и импульсном нагружении, рассмотрено в работах [5–7]. Методические вопросы динамических испытаний и сопоставления систем крепления освещены в работах [8; 9]. В отечественной литературе подходы к геомеханическому обоснованию работ в удароопасных условиях и выбору анкерной или податливой крепи представлены в работах [10–12], а применение расчетных комплексов для обоснования параметров крепления показано в работах [13; 14].

Объектом исследования является система крепления подземной горной выработки в удароопасном или высоконапряженном массиве. Предметом исследования является влияние конструктивного типа крепления на напряженно-деформированное состояние приконтурной зоны и работоспособность выработки при различных расчетных сценариях.

Целью работы является сравнительная оценка вариантов крепления подземной выработки методом конечных элементов по единой системе показателей. Рабочая гипотеза заключается в том, что комбинированные и податливые системы крепления обеспечивают большее снижение смещений контура и объема пластической зоны по сравнению с базовой системой при одинаковых исходных условиях.

Для достижения поставленной цели сформирована единая расчетная постановка, заданы пять вариантов крепления B1–B5, рассмотрены три сценария нагружения и ослабления приконтурной зоны, выполнено сопоставление вариантов по количественным критериям и дана инженерная интерпретация области их рационального применения.

Материалы и методы

Численное исследование выполнено в программном комплексе ANSYS. Расчетная схема включает два последовательных этапа: статический расчет и нестационарный расчет динамического отклика. На первом этапе формировалось исходное напряженно-деформированное состояние массива и выработки с установленной крепью. На втором этапе к той же модели прикладывалось эквивалентное динамическое воздействие в виде кратковременного импульса нагрузки. Для массива принята упругопластическая модель Мора–Кулона; для нарушенных участков при необходимости может быть использована модель трещиноватого массива (Jointed Rock). Для контактов «анкер – раствор» и «раствор – порода» применена модель когезионной зоны разрушения, реализованная через контактные пары с возможностью отрыва. Такой подход позволяет учитывать начальную жесткую связь, достижение пикового сцепления, постпиковое разупрочнение и развитие зоны нарушения сцепления. Анкеры моделировались как стержневые элементы, элементы поверхностного удержания – как оболочечные элементы для сетки и слоя торкретбетона. Параметры контакта задавались по билинейному закону «напряжение – относительное смещение» с последующим снижением жесткости и прочности после достижения предельного состояния, что соответствует современным представлениям о работе полностью закрепленных анкеров [15].

В качестве типизированного объекта для постановки расчетов приняты глубокие горизонты Таштагольского месторождения. По опубликованным данным в не тронутом очистными работами массиве глубоких горизонтов действуют повышенные горизонтальные напряжения, а максимальное главное горизонтальное напряжение может достигать 2,8–3,0γH при вертикальной составляющей, близкой к весу налегающих пород [16]. В работе принят базовый расчетный уровень, соответствующий горизонту –350 м и глубине порядка H = 890 м. Для модельного эксперимента принято арочное сечение выработки шириной B = 4,5 м и высотой h = 4,0 м. Плотность массива принята равной 2,8 т/м^3, что соответствует удельному весу $\gamma \approx 27{,}5$ кН/м^3; при таких условиях исходное вертикальное напряжение составляет $\sigma_v \approx 24{,}5$ МПа. Длина закрепленного расчетного фрагмента по оси выработки принята равной 6,3 м, что обеспечивает размещение девяти рядов крепления при шаге 0,7 м. Сопоставление вариантов выполняется по среднему ряду анкеров. Модуль деформации массива принят равным 70 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,25.

В качестве сравниваемых решений приняты пять вариантов крепления, отражающих распространенные и перспективные инженерные подходы для удароопасных условий [11–13]. B1 используется как базовая система без специальных энергопоглощающих элементов. B2 и B3 проверяют влияние податливости анкеров и совместной работы армирования с поверхностным удержанием при импульсном воздействии [5–9; 17; 18]. B4 характеризует повышение надежности контакта «анкер – раствор – порода» за счет улучшенного анкерующего состава [19; 20]. B5 представляет специализированное решение для нарушенных, коррозионно-активных или комбинированно нагруженных зон [21–26]. Во всех вариантах геометрия расчетной

Таблица 1
Варианты крепи, принятые для сравнительного моделирования

Table 1
Support designs used in the comparative modeling

Вариант	Анкерное армирование	Поверхностное удержание	Контакт «анкер – раствор –порода»	Расчетный смысл варианта
В1	Стальные стержневые анкеры: L = 2,4 м; d = 22 мм; шаг по контуру и по оси выработки 0,7 м; E = 200 ГПа; предел текучести 500 МПа	Обычный торкретбетон h = 50 мм; E = 25 ГПа	Базовые значения K_n, K_t, Tmax, τmax, G_c	Базовая система для сравнения
В2	Энергопоглощающие стальные анкеры с геометрией В1; E = 200 ГПа; предельное перемещение 150–220 мм; энергоемкость 25–60 кДж на анкер	Обычный торкретбетон h = 50 мм; E = 25 ГПа	Как в В1	Вклад податливых анкеров при импульсном воздействии
В3	Энергопоглощающие анкеры как в В2	Фиброармированный торкретбетон h = 50 мм; E = 30 ГПа; повышенная остаточная прочность оболочечного слоя	Как в В1	Совместный эффект податливых анкеров и усиленного поверхностного удержания
В4	Стальные стержневые анкеры как в В1	Обычный торкретбетон h = 50 мм; E = 25 ГПа	Улучшенный анкерующий состав: K_n и K_t +20 %, T_{max} и τ_{max} +25 %, G_c +25 % относительно В1	Влияние качества анкерования и устойчивости контактной зоны
В5	Стеклопластиковые анкеры: L = 2,4 м; d = 22 мм; шаг 0,7 м; E = 45 ГПа; расчетная прочность на растяжение 600 МПа	Как в В3	Как в В1	Специализированное решение для нарушенных и коррозионно-активных зон

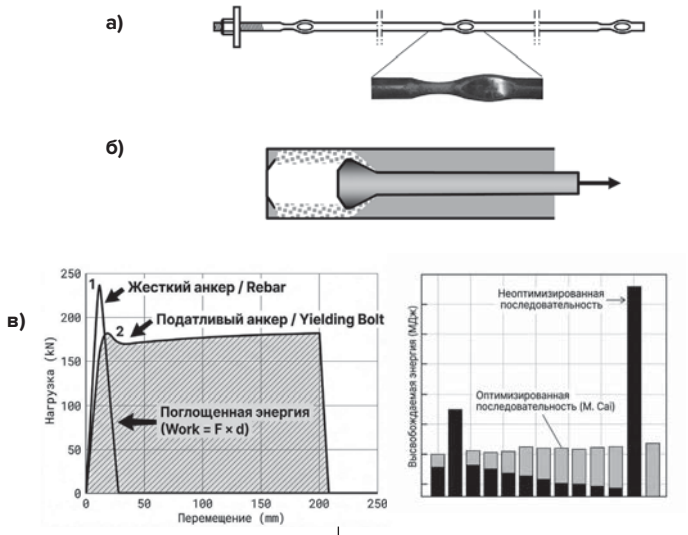


Рис. 1
Энергопоглощающие элементы: а – анкер типа D-Bolt; б – конусный анкер; в – принцип действия

Fig. 1
Energy absorbing elements: а – D-Bolt rock bolt; б – cone bolt; в – operating principle

области, характеристики массива и граничные условия остаются одинаковыми; изменяются только параметры системы крепления. Основные характеристики вариантов приведены в табл. 1, примеры специальных энергопоглощающих элементов – на рис. 1.

Для проверки устойчивости вариантов крепления использованы три расчетных сценария. Сценарий С1 соответствует базовому высоконапряженному состоянию массива с вертикальным напряжением $\sigma_v \approx 24{,}5$ МПа и соотношением главных напряжений $\sigma_1{:}\sigma_2{:}\sigma_3 \approx 2{,}5{:}1{,}3{:}1$. Сценарий С2 вводит ослабленную приконтурную зону толщиной 0,5 м со снижением с, φ и E на 30%, что позволяет оценить чувствительность систем крепления к нарушенной зоне у контура выработки. Сценарий С3 моделирует эквивалентное динамическое воздействие в виде кратковременного полусинусоидального импульса, задаваемого как дополнительное нормальное давление на контур выработки по закону $p(t) = p_0 \cdot \sin(\pi t/T)$ при $0 \le t \le T$ и $p(t) = 0$ при $t > T$. Приняты амплитуда импульса p0 = 5 МПа, длительность T = 0,02 с, общее время переходного расчета 0,05 с, начальный шаг по времени $1{\cdot}10^{-4}$ с, максимальный шаг $5{\cdot}10^{-4}$ с и коэффициент демпфирования 0,05. Во всех сценариях сохраняются одинаковыми геометрия модели и характеристики вариантов крепи.

Сопоставление вариантов В1–В5 выполняется по набору количественных показателей, отражающих реакцию массива и работу элементов крепи. В качестве основных выходных параметров приняты: максимальное смещение кровли uк, мм; сближение бортов uб, мм; объем пластической зоны $V_{пл}$, м^3; максимальное напряжение в анкерах $\sigma_{анк}$, МПа; протяженность зоны нарушения сцепления $L_{отс}$, м, характеризующая устойчивость контакта «анкер – раствор – порода».

Для сводного ранжирования вариантов используется безразмерный интегральный показатель эффективности $I_{эфф}$:

$$I_{эфф} = w_1\Delta^* + w_2P^* + w_3\Sigma^* + w_4D^*,$$

где Δ* – нормированный показатель деформативности контура; P* – нормированный показатель поврежденности приконтурного массива; Σ* – нормированный показатель загрузки элементов крепи; D^* – нормированный показатель нарушения сцепления в системе «анкер – раствор – порода».

В настоящем модельном эксперименте при отсутствии априорно обоснованного приоритета между критериями приняты равные веса:

$$w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 0.25.$$

Нормированные составляющие определяются по формулам:

$$\Delta^* = \frac{\left(\frac{u_k}{u_{k,\max}} + \frac{u_b}{u_{b,\max}} + \frac{u_p}{u_{p,\max}}\right)}{m};$$

$$P^* = \frac{V_{pl}}{V_{pl,\max}};$$

$$\Sigma^* = \frac{\sigma_{ank}}{\sigma_{ank,\max}};$$

$$D^* = \frac{L_{отс}}{L_{отс,\max}}.$$

Все максимальные значения в знаменателе обозначены индексом max и принимаются в пределах одного и того же расчетного сценария С1, С2 или С3, что обеспечивает корректное сопоставление вариантов В1–В5 при одинаковых внешних условиях. Чем меньше значение $I_{эфф}$, тем выше интегральная эффективность системы крепления. Показатель $I_{эфф}$ является вспомогательным критерием второго уровня: основные инженерные выводы должны подтверждаться прямыми расчетными параметрами, а интегральный показатель используется для компактного ранжирования вариантов в сводных диаграммах и таблице результатов.

Результаты

На первом этапе получены результаты расчета для сценария С1, используемого в качестве базового для последующего сопоставления вариантов В1–В5. Расчетная схема модели и характерное распределение напряжений вокруг закрепленной выработки приведены на рис. 2. В базовом состоянии наибольшая концентрация напряжений формируется в приконтурной зоне кровли и бортов, а развитие пластических деформаций зависит от исходного поля напряжений, жесткости крепи и способности поверхностного удержания ограничивать раскрытие нарушений.

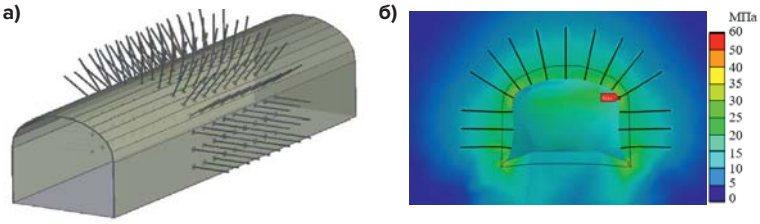


Рис. 2
Геометрическая модель закрепленной выработки (а) и базовое распределение напряжений вокруг выработки (б)

Fig. 2
Calculation scheme of the model (a) and initial stress distribution around the excavation (б)

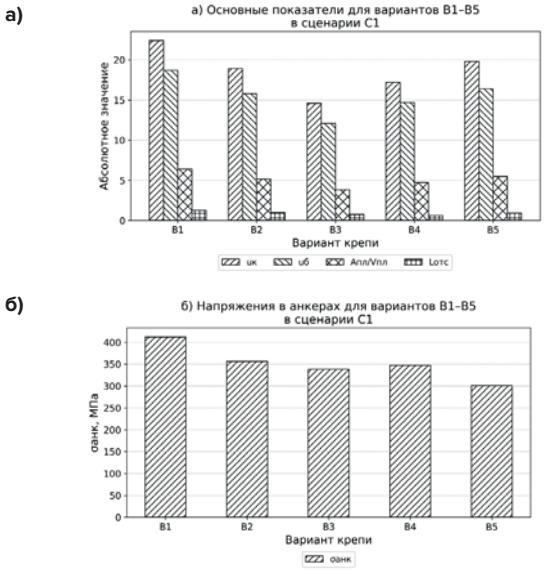


Рис. 3
Сравнительные диаграммы абсолютных значений основных показателей (а) и напряжений в анкерах (б) для вариантов В1–В5 в базовом сценарии С1

Fig. 3
Comparative charts of absolute values of the key indicators (a) and stresses in rock bolts (б) for the V1–V5 support designs in the C1 base scenario

В базовом сценарии С1 переход от системы В1 к системам с повышенной податливостью и поверхностным удержанием приводит к снижению деформаций и поврежденности приконтурного массива. Для варианта В1 максимальное смещение кровли составляет 22,4 мм, сближение бортов – 18,7 мм, объем пластической зоны – 6,40 м^3. Этот вариант принят в качестве эталонного уровня для сопоставления остальных систем крепления. Сравнительные диаграммы абсолютных значений основных показателей приведены на рис. 3.

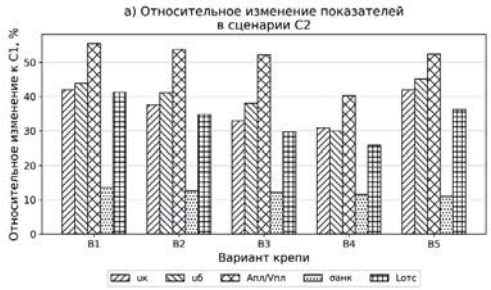
Наиболее выраженный эффект в сценарии С1 получен для комбинированной системы В3: по сравнению с В1 смещение кровли уменьшается на 34,8%, сближение бортов – на 35,3%, объем пластической зоны – на 39,8%, а протяженность зоны нарушения сцепления – на 41,3%. Вариант В4 уступает В3 по величине смещений, но обеспечивает минимальную длину зоны нарушения сцепления $L_{отс}$ = 0,62 м, что подтверждает его преимущество при необходимости повысить надежность контакта «анкер – раствор – порода». Вариант В5 снижает максимальные напряжения в анкерах до 301 МПа, однако по деформационным показателям остается ближе к базовой системе; поэтому его следует рассматривать как специализированное, а не универсально оптимальное решение, из-за низкой прочности таких анкеров на срез.

Сценарий С2 характеризует работу систем крепления при наличии ослабленной приконтурной зоны толщиной 0,5 м. Ухудшение свойств приконтурного массива приводит к росту деформаций по всем вариантам: для базовой системы В1 смещение кровли возрастает до 31,8 мм, сближение бортов – до 26,9 мм, объем пластической зоны – до 9,95 м^3, а протяженность зоны нарушения сцепления – до 1,78 м. Относительное изменение ключевых показателей и интегральный показатель эффективности приведены на рис. 4.

Наилучшее интегральное значение в сценарии С2 сохраняет вариант В3 ($I_{эфф}$ = 0,638), что связано с совместной работой энергопоглощающих анкеров и фиброармированного торкретбетона. По сравнению с В1 этот вариант снижает смещение кровли на 39,0%, сближение бортов – на 37,9%, объем пластической зоны – на 41,1%. Вариант В4 имеет близкую интегральную оценку ($I_{эфф}$ = 0,660) и демонстрирует минимальную протяженность зоны нарушения сцепления – 0,78 м; поэтому он рационален в условиях, где главным ограничивающим фактором является устойчивость контактной зоны, а не только общая деформируемость контура.

Сценарий С3 отражает действие кратковременного эквивалентного динамического импульса и является наиболее показательным для оценки работоспособности крепи в удароопасных условиях. В базовом варианте В1 отмечается максимальный рост деформаций: смещение кровли

а)



б)

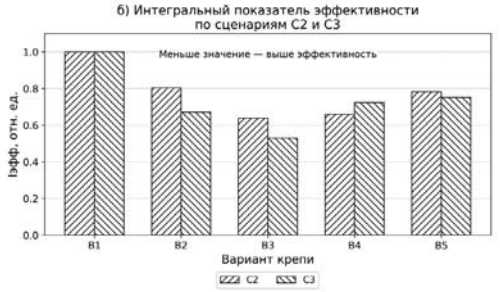


Рис. 4
Относительное изменение ключевых показателей по сценарию С2 (а) и интегральный показатель эффективности для вариантов В1–В5 по сценариям С2 и С3 (б)

Fig. 4
Relative changes in key indicators for the C2 scenario (a) and integral efficiency index for the V1–V5 support designs under the C2 and C3 scenarios (б)

достигает 35,4 мм, сближение бортов – 29,6 мм, объем пластической зоны – 10,84 м^3, а длина зоны нарушения сцепления – 2,05 м. Эти значения подтверждают недостаточность жесткой базовой системы при импульсном нагружении.

Наиболее устойчивую реакцию на динамическое воздействие демонстрирует вариант В3: относительно В1 смещение кровли уменьшается на 49,7%, сближение бортов – на 49,0%, объем пластической зоны – на 52,8%, напряжения в анкерах – на 28,7%, а зона нарушения сцепления – на 57,1%. Вариант В2 также заметно эффективнее базовой системы (Iэфф = 0,670) благодаря податливой работе анкеров, однако отсутствие усиленного слоя торкретбетона ограничивает его способность сдерживать развитие пластической зоны. Варианты В4 и В5 в динамическом сценарии уступают В2 и В3 по деформационным критериям, что указывает на решающую роль согласованной работы армирования с поверхностным удержанием. Сводные количественные результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2
Сводные количественные результаты моделирования

Table 2
Summary quantitative results of the numerical modeling

Сценарий	Вариант крепи	$u_к$, мм	$u_б$, мм	$V_{пл}$, м^3	$\sigma_{анк}$, МПа	$L_{отс}$, м	$I_{эфф}$
С1	В1	22,4	18,7	6,40	412	1,26	1,000
С1	В2	18,9	15,8	5,15	356	0,98	0,823
С1	В3	14,6	12,1	3,85	338	0,74	0,665
С1	В4	17,2	14,7	4,72	347	0,62	0,712
С1	В5	19,8	16,4	5,48	301	0,91	0,797
С2	В1	31,8	26,9	9,95	468	1,78	1,000
С2	В2	26,0	22,3	7,92	401	1,32	0,804
С2	В3	19,4	16,7	5,86	379	0,96	0,638
С2	В4	22,5	19,1	6,62	387	0,78	0,660
С2	В5	28,1	23,8	8,35	334	1,24	0,783
С3	В1	35,4	29,6	10,84	492	2,05	1,000
С3	В2	24,1	20,4	7,18	372	1,18	0,670
С3	В3	17,8	15,1	5,12	351	0,88	0,530
С3	В4	27,9	23,5	8,24	431	0,96	0,724
С3	В5	29,8	25,0	8,97	318	1,42	0,752

Обсуждение результатов

Расчетная оценка показывает, что эффективность крепи в удароопасных условиях определяется не максимальной прочностью одного элемента, а согласованной работой системы «массив – анкерное армирование – удержание поверхности – контактная зона». Во всех трех сценариях наилучшее интегральное ранжирование получает вариант В3, сочетающий энергопоглощающие анкеры и фиброармированный торкретбетон. Такой результат согласуется с представлениями о необходимости перехода от чисто прочностной логики к оценке деформативности, энергоемкости и остаточной работоспособности системы крепления.

Преимущество В3 связано с взаимодополняющей работой элементов. Энергопоглощающие анкеры воспринимают часть импульсной энергии и допускают контролируемые перемещения без немедленной потери несущей способности; армированный фиброволокном торкретбетон ограничивает раскрытие приконтурных нарушений и удерживает фрагментированный массив; повышенная жесткость поверхностного удержания уменьшает развитие пластической зоны. Поэтому В3 дает не только меньшие смещения, но и более благоприятное перераспределение напряжений между массивом и крепью.

Базовый вариант В1 во всех сценариях сохраняет наибольшие значения смещений, поврежденности и зоны нарушения сцепления. Вариант В2 эффективен при динамическом воздействии, но уступает В3 из-за менее развитого поверхностного удержания. Вариант В4 показывает преимущество по устойчивости контакта, особенно в сценарии С2, однако не обеспечивает максимального снижения смещений. Вариант В5 снижает напряжения в анкерах за счет меньшего модуля упругости, но при принятой расчетной постановке не является оптимальным по общесистемной устойчивости; его рационально рассматривать для коррозионно-активных, нарушенных или специальных условий эксплуатации. Следовательно, ранжирование вариантов можно представить следующим образом: В3 – наиболее эффективная система по совокупности критериев; В2 – рациональная динамически податливая система; В4 – вариант для условий, где критична надежность анкерующего состава и контактной зоны; В5 – специализированное решение; В1 – базовый вариант, недостаточный для наиболее неблагоприятных удароопасных условий.

Результаты работы носят сравнительный характер и справедливы для принятой пространственной расчетной постановки. При интерпретации результатов необходимо учитывать ограничения, связанные со способом задания эквивалентного динамического воздействия, идеализацией массива и упрощенным описанием контакта «анкер – раствор – порода». В статье не рассматриваются явно заданная природная трещиноватость, долговременная деградация свойств материалов, влияние подземных вод и изменение параметров крепи во времени. Эти факторы должны быть учтены на

следующем этапе исследования или при переходе к детальному проектному моделированию.

Полученные зависимости и сравнительные оценки могут быть использованы при предварительном выборе системы крепления для подземных выработок в удароопасных и высоконапряженных массивах, а также при постановке детальных проектных расчетов. Результаты могут служить основанием для уточнения программы шахтных наблюдений и выбора вариантов крепи для последующей натурной проверки.

Дальнейшее развитие работы целесообразно связать с уточнением параметров контакта «анкер – раствор – порода» по данным лабораторных или шахтных испытаний, а также с расширением расчетной схемы на случаи выраженной трещиноватости, тектонической нарушенности и неоднородного напряженного состояния массива. Отдельный интерес представляет переход к более детальному динамическому расчету и натурной калибровке модели по данным инструментальных наблюдений в выработках.

Заключение

В работе выполнена сравнительная оценка пяти вариантов крепления подземной выработки в удароопасных условиях методом конечных элементов. Показано, что для инженерного выбора рациональной системы крепления необходимо оценивать не отдельный элемент, а систему «массив – крепь – удержание поверхности» по совокупности количественных критериев: смещениям кровли и бортов, объему пластической зоны, напряжениям в элементах крепи, протяженности зоны нарушения сцепления и интегральному показателю эффективности.

Наиболее эффективным по совокупности критериев является вариант B3, включающий энергопоглощающие анкеры и фиброармированный торкретбетон. В базовом сценарии он снижает смещение кровли и сближение бортов более чем на треть по сравнению с вариантом B1, а в динамическом сценарии C3 обеспечивает почти двукратное уменьшение основных показателей деформирования и поврежденности. Вариант B2 рационален при необходимости повысить податливость крепи при импульсном нагружении; вариант B4 целесообразен при повышенных требованиях к надежности контакта «анкер – раствор – порода»; вариант B5 следует рассматривать как специализированное решение для нарушенных и одновременно коррозионно-активных зон.

Список литературы / References

1. Cai M. Principles of rock support in burst-prone ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2013;36:46–56. https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.02.003
2. Morissette P., Hadjigeorgiou J. Ground support design for dynamic loading conditions: A quantitative data-driven approach based on rockburst case studies. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019;11(5):909–919. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.03.002
3. Li C.C., Stjern G., Myrvang A. A review on the performance of conventional and energy-absorbing rockbolts. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2014;6(4):315–327. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.12.008
4. Sharifzadeh M., Lou J., Crompton B. Dynamic performance of energy-absorbing rockbolts based on laboratory test results. Part I: Evolution, deformation mechanisms, dynamic performance and classification. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020;105:103510. https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103510
5. Li C.C. A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2010;47(3):396–404. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.01.005
6. Li C.C. Performance of D-bolts under static loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2012;45(2):183–192. https://doi.org/10.1007/s00603-011-0198-6
7. Li C.C., Doucet C. Performance of D-Bolts under dynamic loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2012;45(2):193–204. https://doi.org/10.1007/s00603-011-0202-1
8. Shirzadegan S., Nordlund E., Zhang P. Large scale dynamic testing of rock support system at Kiirunavaara underground mine. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016;49(7):2773–2794. https://doi.org/10.1007/s00603-016-0939-7
9. Li C.C., Hadjigeorgiou J., Mikula P., Knox G., Darlington B., Royer R. et al. Performance of identical rockbolts tested on four dynamic testing rigs employing the direct impact method. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021;13(4):745–754. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.003
10. Семенова И.Э., Аветисян И.М. Развитие концепции геомеханического обоснования горных работ в удароопасных условиях. *Горный журнал*. 2022;(1):28–33. https://doi.org/10.17580/gzh.2022.01.05
Semenova I.E., Avetisyan I.M. Geomechanical foundation for mining in rockburst-hazardous conditions: Concept development. *Gornyi Zhurnal*. 2022;(1):28–33. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2022.01.05
11. Еременко В.А., Лушников В.Н. Методика выбора «динамической» крепи выработок для месторождений склонных и опасных по горным ударам. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(12):5–12. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-5-12
Eremenko V.A., Lushnikov V.N. Procedure for selecting dynamic ground support for rockbursting mining conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(12):5–12. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-5-12
12. Лушников В.Н., Еременко В.А., Сэнди М.П., Косырева М.А. Выбор анкерной крепи для выработок, пройденных в шахтах, склонных к горным ударам. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017;(3):86–95. Режим доступа: https://www.sibran.ru/upload/iblock/43d/43dcd4f95575c7a675b718804254904e.pdf (дата обращения: 15.03.2026).
Louchnikov V.N., Eremenko V.A., Sandy M.P., Kosyreva M.A. Support design for mines exposed to rockburst hazard. *Journal of Mining Science*. 2017;53(3):504–512. https://doi.org/10.1134/S1062739117032439

13. Бушков В.К., Шеметов Р.С. Определение устойчивости и обоснование систем крепления горных выработок при переходе к отработке Олимпиадинского месторождения подземным способом. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(9):40–54. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-40-54
Bushkov V.K., Shemetov R.S. Stability estimation and justification of support systems in transition to underground mining in the Olimpiada deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(9):40–54. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-40-54

14. Косырева М.А., Еременко В.А., Горбунова Н.Н., Терешин А.А. Расчет параметров крепи выработок с использованием программы Unwedge на рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(8):57–64. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-57-64
Kosyreva M.A., Eremenko V.A., Gorbunova N.N., Tereshin A.A. Support design using unwedge software for mines of Nornickel's polar division. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(8):57–64. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-57-64

15. Kong C., Xiao M., Yuan Q., Zhan S. A numerical model for fully grouted rock bolts considering the nonlinearities of the bolt and the bolt-grout interface. *Computers and Geotechnics*. 2023;160:105522. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105522

16. Еременко А.А., Конурин А.И., Христолюбов Е.А., Штирц В.А. Определение напряжений в массиве горных пород в районе подготовительных и нарезных выработок на удароопасных железорудных месторождениях. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2020;7(1):57–63. https://doi.org/10.15372/FPVGN2020070109
Eremenko A.A., Konurin A.I., Khristolyubov E.A., Shtirts V.A. Determination of stresses in the rock mass in the area of preparatory and access workings in rockburst-hazardous iron ore deposits. *Journal of Fundamental and Applied Mining Science*. 2020;7(1):57–63. (In Russ.) https://doi.org/10.15372/FPVGN2020070109

17. Saw H., Villaescusa E., Windsor C.R., Thompson A.G. Laboratory testing of steel fibre reinforced shotcrete. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013;57:167–171. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.08.008

18. Kim H.J., Li K., Akdag S., Zhang C., Oh J., Jiang P. et al. Thin spray-on liners (TSLs) as surface support in underground mining: A review. *Construction and Building Materials*. 2025;470:140432. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140432

19. Li Y., Ahmed A., Li D. Mechanical behaviour of fiber-reinforced grout in rock bolt reinforcement. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2024;16(2):437–453. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.06.016

20. Liu H.-L., Li X.-A., Wang L.-C., Li L.-P., Zhou Z.-Q., Liu Z.-Q., Gong L. Study on the anchoring properties of new water glass-modified alkali-activated portland cement materials. *Construction and Building Materials*. 2024;450:138628. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138628

21. Li X., Aziz N., Mirzaghorbanali A., Nemcik J. Behavior of fiber glass bolts, rock bolts and cable bolts in shear. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016;49(7):2723–2735. https://doi.org/10.1007/s00603-015-0907-7

22. Gregor P., Mirzaghorbanali A., McDougall K., Aziz N., Jodeiri B. Shear behaviour of fibreglass rock bolts for various pretension loads. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2023;56(11):8083–8113. https://doi.org/10.1007/s00603-023-03474-1

23. Ma H., Bai X., Han J., Hao Z., Yan N., Dong X. Experimental study on the mechanical properties of GFRP bolts: Insights from failure modes and adhesion strength of the rod-grout interface. *Case Studies in Construction Materials*. 2025;23:e05103. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05103

24. Неугомонов С.С., Волков П.В., Жирнов А.А. Крепление слабоустойчивых пород усиленной комбинированной крепью на основе фрикционных анкеров типа СЗА. *Горный журнал*. 2018;(2):31–34. https://doi.org/10.17580/gzh.2018.02.04
Neugomonov S.S., Volkov P.V., Zhirnov A.A. Tunnel support in weak rocks using self-fastening rock bolts SZA. Gornyi Zhurnal. 2018;(2):31–34. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2018.02.04

25. Wang B., Guo X., Jin H., Li F., Song Y. Experimental study on degradation behaviors of rock bolt under the coupled effect of stress and corrosion. *Construction and Building Materials*. 2019;214:37–48. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.335

26. Hu Y., Zheng M., Feng W., Tong J., Wang Y., Wang Q. et al. Interface bond degradation and damage characteristics of full-length grouted rock bolt in tunnels with high temperature. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023;15(10):2639–2657. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.04.018

Информация об авторе
Конурин Антон Игоревич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-3373-2382; e-mail: konurin@misd.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 30.05.2026
Поступила после рецензирования: 22.06.2026
Принята к публикации: 08.07.2026

Information about the author
Anton I. Konurin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Chinakal Institute of Mining of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-3373-2382; e-mail: konurin@misd.ru

Article info
Received: 30.05.2026
Revised: 22.06.2026
Accepted: 08.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-142-146

Повышение энергоэффективности процесса рудоподготовки на основе анализа энергопотребления мельниц полусамоизмельчения

Р.В. Клюев ✉
Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация
✉ kluev-roman@rambler.ru

Резюме: В условиях истощения легкодоступных запасов руд и роста тарифов на энергоносители повышение энергоэффективности горно-обогатительных предприятий становится критически важной задачей. Наибольшим потенциалом для оптимизации энергоэффективности обладают процессы рудоподготовки, в частности, работа мельниц полусамоизмельчения, которые являются основными потребителями электроэнергии. Цель исследования – провести анализ фактического энергопотребления мельниц полусамоизмельчения на примере Кочкарского золоторудного месторождения для разработки практических рекомендаций по снижению удельных затрат. В исследовании применен комплексный подход, сочетающий метод Бонда для расчета индекса работоспособности руды, прямые замеры электрических параметров (ток, напряжение, мощность) анализаторами AR5 и ПКК-57, а также статистическую обработку данных с использованием Python и MathCAD. Определено, что средний удельный расход электроэнергии составляет 1,01 кВт·ч/т, однако выявлена слабая корреляция между производительностью и активной мощностью. Установлено, что краткосрочные остановки подачи руды не приводят к пропорциональной экономии. Практическая значимость работы заключается в обосновании необходимости перехода к адаптивным системам управления и цифровым двойникам, что позволит сократить удельные энергозатраты на 10–15% и повысить стабильность технологического процесса.

Ключевые слова: энергоэффективность, мельница полусамоизмельчения, энергетический аудит, удельный расход электроэнергии, метод Бонда, золоторудное месторождение, оптимизация технологических режимов

Для цитирования: Клюев Р.В. Повышение энергоэффективности процесса рудоподготовки на основе анализа энергопотребления мельниц полусамоизмельчения. *Горная промышленность.* 2026;(5):142–146. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-142-146

Improving energy efficiency of the ore preparation process based on analyzing energy consumption of semi-autogenous grinding mills

R.V. Klyuev ✉
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation
✉ kluev-roman@rambler.ru

Abstract: In conditions when easily accessible ore reserves are depleting and the energy tariffs are rising, improving the energy efficiency of mining and processing plants is becoming a critical task. Ore preparation processes, particularly operation of semi-autogenous grinding mills, which are major electricity consumers, hold the greatest optimization potential. The aim of this work is to analyze the actual energy consumption of a semi-autogenous grinding mill at the Kochkar gold ore deposit to develop practical recommendations for reducing specific energy costs. The study employs a comprehensive approach combining the Bond method for calculating the ore work index, direct measurements of electrical parameters (current, voltage, power) using AR5 and PKK-57 analyzers, and processing of statistical data using Python and MathCAD. The key results show that the average work index is 1.01 kWh/t; however, a weak correlation between the throughput and active power was identified. It was found that short-term interruptions in the ore feed fail to produce proportional energy savings. The practical significance of this work lies in justifying the need of transition to adaptive control systems and digital twins, which could reduce specific energy consumption by 10–15% and enhance the stability of the technological process.

Keywords: energy efficiency, semi-autogenous grinding mill, energy audit, specific energy consumption, Bond's method, gold ore deposit, optimization of process parameters

For citation: Klyuev R.V. Improving energy efficiency of the ore preparation process based on analyzing energy consumption of semi-autogenous grinding mills. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):142–146. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-142-146

Введение

На фоне глобального дефицита природных ресурсов и истощения разведанных запасов руд на первый план выходит проблема рационального использования каждого этапа производственной цепочки – от вскрышных работ до финальной переработки концентрата [1; 2]. В этих условиях особое значение приобретает комплексный энергетический аудит ключевых агрегатов горно-обогатительных комбинатов. Основная цель таких проверок – поиск резервов для сокращения доли топливно-энергетических расходов в конечной себестоимости готовой продукции [3–5]. В рамках стратегии технологической независимости России приоритетное внимание уделяется снижению энергоёмкости предприятий золотодобывающей отрасли. Наибольший потенциал для оптимизации здесь сосредоточен в работе измельчительного оборудования, в частности, мельниц шаровых (МШР) и полусамоизмельчения (МПСИ), которые являются основными потребителями электроэнергии на фабриках.

Однако проведения стандартных замеров мощности на мельницах сегодня уже недостаточно. Современный подход к энергосбережению требует внедрения интеллектуальных систем мониторинга в реальном времени, которые учитывают не только потребляемую мощность, но и загрузку рудой, износ футеровки, скорость вращения барабана и даже гранулометрический состав пульпы [6].

Ключевой задачей является переход от разовых энергетических обследований к постоянной адаптивной настройке режимов работы. Например, изменение частоты вращения МПСИ в зависимости от твердости поступающей руды может дать экономию до 10–15% без потери производительности. Параллельно с этим активно внедряются технологии рекуперации тепла от приводов мельниц и использование более эффективных смазочных материалов, снижающих механические потери в подшипниковых узлах [7; 8].

Кроме того, в условиях импортозамещения остро стоит вопрос модернизации электроприводов. Замена устаревших асинхронных двигателей на синхронные с постоянными магнитами или на приводы с регулируемой скоростью позволяет не только сгладить пиковые нагрузки в энергосистеме предприятия, но и повысить ресурс работы самого оборудования.

В перспективе именно комплексный подход – сочетание цифрового двойника мельницы, прогнозной аналитики износа и динамического управления загрузкой – станет тем инструментом, который позволит золотодобытчикам не просто выживать в условиях роста тарифов, а существенно наращивать производства за счет экономии энергоресурсов.

Материалы и методы

Для количественной оценки энергопотребления мельничного оборудования был применен алгоритм Бонда. Согласно этому алгоритму между расходом электроэнергии и величиной свежеобразованной межфазной границы твёрдой фазы существует прямое пропорциональное соотношение [9; 10].

Различные симуляторы учитывают не только индекс Бонда, но и характер траекторий загрузки, распределение напряжений и гидравлические режимы. Тем не менее даже в таких гибридных подходах Wi остаётся отправной точкой для первичной прикидки энергозатрат.

Таким образом, применяемая на обследовании процедура расчёта по Бонду не сводится к формальной подстановке в формулу – это многофакторный аналитический инструмент, который увязывает минералогические особенности сырья с реальной динамикой работы оборудования. Его использование позволяет объективно оценить энергоэффективность существующего цикла и обоснованно подойти к выбору режимов при модернизации фабрики.

Характеристика объекта исследования. Более чем вековая отработка рассматриваемого Кочкарского золоторудного месторождения в России обеспечила солидный задел в изучении его минералогии и технологических параметров [11; 12]. Рудная залежь здесь представлена преимущественно метасоматическими образованиями (в среде горняков их традиционно именуют «табашками»), которые неоднородно пропитаны прожилковым кварцем, несущим вкрапленность пирита и арсенопирита.

Прежние изыскания подтверждают, что в геологическом строении Кочкарского золоторудного узла участвуют породы, существенно различающиеся по вещественному составу. В пределах самого месторождения рудные интервалы характеризуются неоднородным внутренним строением и представлены разновидностями с отличающимися текстурно-структурными признаками. Учитывая эту неоднородность, при формировании актуальной технологической схемы был выполнен детальный анализ минералогических особенностей и обогатительных характеристик образцов из тех рудных тел, которые вовлечены в эксплуатацию на современном этапе [13; 14].

При этом оценка перерабатываемого сырья проводилась дифференцированно: отдельному изучению подверглись пробы, относящиеся как к категории кондиционных (балансовых) руд, пригодных для рентабельной переработки, так и к некондиционным (забалансовым) запасам. Такой раздельный подход продиктован необходимостью не только определить границы экономической целесообразности, но и выявить потенциальные технологические риски, связанные с присутствием трудноизвлекаемого золота или вредных примесей в каждой из групп. Результаты этих испытаний лягут в основу корректировки режимов дробления, измельчения и флотации, что позволит минимизировать потери ценного компонента и обеспечить стабильность показателей извлечения даже при переменчивом качестве поступающей рудной массы.

Краткая характеристика мельниц полусамоизмельчения. Главная особенность работы МПСИ – дозированная добавка мелющих тел (не более 10% объёма), тогда как основное разрушение породы происходит за счёт взаимного соударения кусков руды. Такая схема полусамоизмельчения даёт тройной выигрыш: снижает энергопотребление на стадии подготовки класса 300–100 мкм по сравнению с классической связкой «дробилка + шаровая мельница», сокращает число единиц оборудования и затраты на его обслуживание, а также сразу выдаёт водно-рудную пульпу, удобную для флотации или цианирования, без лишнего пыления. В итоге это решение обеспечивает надёжную основу для высокопроизводительной переработки больших объёмов сырья с выходом на финальные обогатительные операции.

Результаты

В рамках работы сформирован подход к организации энергетического аудита стадии рудоподготовки, где ключевую роль играют мельницы полусамоизмельчения. Предложена последовательная схема обработки экспери-

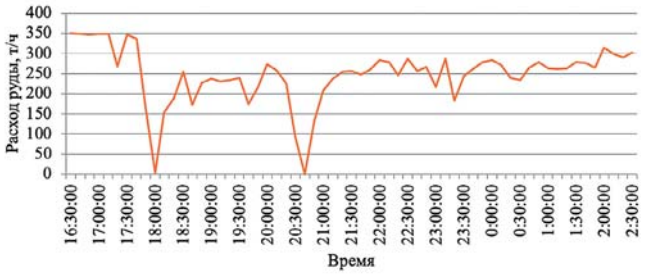


Рис. 1
Изменение производительности мельницы полусамоизмельчения по руде в рабочем режиме

Fig. 1
Changes in ore throughput of a semi-autogenous grinding mill in the operating mode

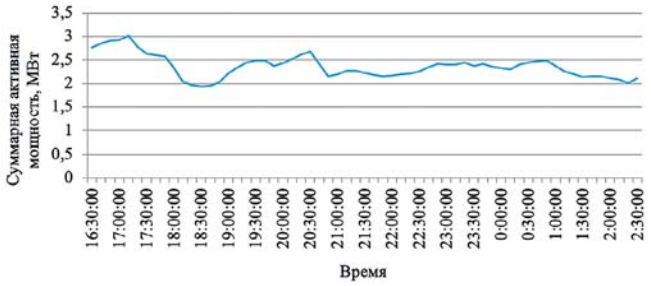


Рис. 2
Динамика изменения активной мощности мельницы полусамоизмельчения

Fig. 2
Dynamics of changes in the active power of a semi-autogenous grinding mill

ментальных данных, полученных по репрезентативным массивам замеров как электрических величин (ток, напряжение, мощность), так и технологических показателей (производительность, крупность питания и разгрузки, плотность пульпы) [15; 16].

Замеры энергопотребления выполнялись в распределительном устройстве напряжением 6 кВ. От данного РУ запитаны все основные технологические переделы, однако в числе наиболее затратных по электроэнергии агрегатов выделяются две мельницы полусамоизмельчения МПСИ 7,0×5,2. Каждая из этих машин характеризуется одинаковыми номинальными электрическими параметрами: установленная мощность принимается равной расчётной и составляет 4000 кВт, а рабочий ток в номинальном режиме достигает 467 А. Такие величины предопределяют необходимость тщательного контроля именно этих присоединений, поскольку даже незначительное отклонение режима их работы даёт наибольшую абсолютную погрешность в общем балансе фабрики.

Измерения на указанных ячейках проводились с целью фиксации фактических нагрузочных профилей в течение полного рабочего цикла – от пусковых операций до установившегося режима и останова. При этом регистрировались не только средние значения мощности и тока, но и пиковые броски, возникающие при загрузке свежей рудой и перераспределении мелющих тел внутри барабана. Сопоставление полученных осциллограмм с паспортными данными позволило оценить степень загрузки каждого трансформатора и кабельной линии, а также выявить рассогласование между активной мощностью, потребляемой приводным двигателем, и фактической механической работой на валу мельницы.

В дальнейшем эти данные были интегрированы в общий энергетический паспорт участка, где отдельно выделены затраты на холостой ход, технологически необходимую загрузку и потери в подводящих сетях. Полученные распределения легли в основу расчёта удельных показателей на тонну переработанной руды, что позволило дифференцированно подойти к нормированию энергозатрат для каждой из двух мельниц и обосновать возможные корректировки режимов их эксплуатации в зависимости от твёрдости поступающего сырья.

На рис. 1 представлен временной ход объёма перерабатываемой руды в интервале с 16:30 до 2:30, построенный по данным, зафиксированным автоматизированной системой коммерческого учёта электроэнергии (АСКУЭ). Из приведённой кривой отчётливо видно, что подача материала на мельницу дважды кратковременно прекращалась – с 17:55 по 18:05 и с 20:35 по 20:45, причём каждый перерыв длился ровно по 10 минут. Для сопоставления на рис. 2 размещён график изменения активной мощности того же агрегата МПСИ, синхронизированный по тем же временным меткам.

Если наложить графики друг на друга, становится заметно, что остановки подачи руды далеко не всегда сопровождаются пропорциональным падением электрической нагрузки. В первом случае (17:55–18:05) мощность снизилась незначительно, так как мельница продолжала перемалывать оставшуюся в барабане массу, тогда как во втором промежутке (20:35–20:45) последовало более глубокое проседание активной мощности – это указывает на то, что к тому моменту объём внутрибарабанного материала был существенно меньше, и агрегат частично работал вхолостую. Подобное расхождение свидетельствует о том, что простои системы подачи не всегда эквивалентны пропорциональной экономии электроэнергии, поскольку основная масса энергозатрат приходится на поддержание вращения тяжёлого барабана с загрузкой.

На основе этого анализа можно предложить следующий практический вывод: для повышения энергоэффективности целесообразно при краткосрочных остановках дозатора переводить двигатель в режим пониженной частоты вращения или использовать накопительный бункер-буфер, который сглаживал бы перерывы в питании. Кроме того, выявленные провалы дают повод пересмотреть алгоритм работы системы АСКУЭ, добавив в неё событийную логику – автоматическую маркировку временных участков с отсутствием подачи, чтобы при последующей обработке данных эти интервалы исключались из расчёта средних удельных показателей, не искажая реальную картину энергопотребления в штатном режиме.

Обсуждение результатов

В ходе энергетического обследования узла измельчения Кочкарского золоторудного месторождения был выполнен комплексный анализ работы мельницы полусамоизмельчения МПСИ 7000×5200. Замеры электрических параметров в распределительном устройстве 6 кВ и синхронизация их с данными о производительности позволили выявить ключевые закономерности энергопотребления.

Установлено, что подача руды на мельницу характеризуется неритмичностью, с двумя задокументированными

10-минутными остановками. Анализ показал слабую корреляцию между массовым расходом сырья и активной мощностью агрегата (коэффициент корреляции ~0,25). Это указывает на то, что основная доля энергозатрат приходится на поддержание вращения тяжелого барабана и работу вспомогательного оборудования, а не на процесс измельчения как таковой. Среднее значение удельного расхода электроэнергии, рассчитанное после исключения периодов простоев, составило 1,01 кВт·ч/т, при этом разброс значений от 0,67 до 2,84 кВт·ч/т свидетельствует о высокой чувствительности показателя к изменению крупности и вещественного состава руды.

Полученные результаты подтверждают, что традиционные подходы к нормированию энергозатрат, основанные только на производительности, являются недостаточно точными. Выявленная инерционность процесса требует пересмотра стратегии управления: краткосрочные остановки питателя не приводят к пропорциональной экономии электроэнергии, но создают нестабильность, которая искажает общую картину энергопотребления. Для повышения эффективности предлагается использовать частотное регулирование для снижения оборотов в периоды недогрузки и внедрение систем прогнозной аналитики на основе машинного обучения. Такой подход позволит не только снизить удельный расход энергии на 10–15%, но и перейти от разовых аудитов к системе непрерывного мониторинга и адаптивной настройки режимов.

Заключение

По итогам проведённого наблюдения и обработки зарегистрированных массивов данных можно заключить следующее:

1. В интервале мониторинга с 16:30 до 2:30 зафиксирована неритмичность поступления руды на питание мельницы МПСИ 7,0×5,2 – две полных остановки подачи продолжительностью по 10 мин каждая (в 17:55–18:05 и 20:35–20:45).

2. Связь между массовым расходом сырья и активной мощностью агрегата выражена слабо (коэффициент корреляции около 0,25). Это объясняется, во первых, инерционностью процесса – даже при обрыве питания двигатель продолжает нести нагрузку, связанную с домолом остаточной руды; во вторых, тем, что измеряемая мощность включает расход на вспомогательное оборудование участка (шаровые мельницы, насосы и др.), а не только на привод МПСИ.

3. Усреднённое значение удельного расхода электроэнергии на тонну измельчённого материала, рассчитанное после исключения интервалов простоев, составляет 1,01 кВт·ч/т. При этом размах колебаний показателя от 0,67 до 2,84 кВт·ч/т указывает на чувствительность удельных затрат к изменению крупности питания и вещественного состава руды, что требует регулярной корректировки режима.

4. Применяемый частотный преобразователь ПЧ SB57 4250Н обеспечивает управляемый разгон и торможение синхронного двигателя, переходные характеристики подтверждают его надежность и позволяют гибко изменять скорость вращения при изменении условий загрузки.

5. Для повышения энергоэффективности первоочередное внимание следует уделять сокращению длительности холостых ходов и оптимизации загрузки мелющими телами, а полученное значение 1,01 кВт·ч/т предлагается использовать в качестве отправной точки для дальнейших нормативных расчётов и сравнения при смене сорта руды.

Список литературы / References

1. Vidayev I.G., Martyushev N.V., Ivashutenko A.S., Bogdan A.M. The resource efficiency assessment technique for the foundry production. *Advanced Materials Research*. 2014;880:141–145. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.880.141
2. Ardashkin I.B., Yakovlev A.N., Martyushev N.V. Evaluation of the resource efficiency of foundry technologies: methodological aspect. *Advanced Materials Research*. 2014;1040:912–916. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.912
3. Golik V.I., Hasheva Z.M., Galachieva S.V. Diversification of the economic foundations of depressive mining region. *The Social Sciences*. 2015;10(6):746–749. Available at: https://makhillpublications.co/view-article/1818-5800/sscience.2015.746.749 (accessed: 09.03.2026).
4. Malozyomov B.V., Golik V.I., Brigida V., Kukartsev V.V., Tynchenko Y.A., Boyko A.A., Tynchenko S.V. Substantiation of drilling parameters for undermined drainage boreholes for increasing methane production from unconventional coal-gas collectors. *Energies*. 2023;16(11):4276. https://doi.org/10.3390/en16114276
5. Ковальский Е.Р., Конгар-Сюрюн Ч.Б. Снижение потерь полезного ископаемого при разработке калийных пластов на больших глубинах. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2025;17(4):1852–1862. https://doi.org/10.21177/1998-4502-2025-17-4-1852-1862
Kovalsky E.R., Kongar-Syuryun Ch.B. Reduction of mineral losses in the development of potash seams at great depth. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025;17(4):1852–1862. (In Russ.) https://doi.org/10.21177/1998-4502-2025-17-4-1852-1862
6. Баловцев С.В., Меркулова А.М. Комплексная оценка надежности зданий, сооружений и технических устройств горных предприятий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(3):170–181. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_3_0_170
Balovtsev S.V., Merkulova A.M. Comprehensive assessment of buildings, structures and technical devices reliability of mining enterprises. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(3):170–181. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_3_0_170

7. Zhao X., Yang Y., Sun F., Wang B., Zuo Y., Li M. et al. Enrichment mechanism and exploration and development technologies of high coal rank coalbed methane in south Qinshui Basin, Shanxi Province. *Petroleum Exploration and Development*. 2016;43(2):332–339. https://doi.org/10.1016/S1876-3804(16)30039-8

8. Шадрунова И.В., Колодежная Е.В., Горлова О.Е. Разработка технологии сухого обогащения флюоритовых руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(2):43–57. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_2_0_43
Shadrunova I.V., Kolodezhna E.V., Gorlova O.E. Dry processing technology for fluorite ore. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(2):43–57. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_2_0_43

9. Malozyomov B.V., Martyushev N.V., Sorokova S.N., Efremenkov E.A., Qi M. Mathematical modeling of mechanical forces and power balance in electromechanical energy converter. *Mathematics*. 2023;11(10):2394. https://doi.org/10.3390/math11102394

10. Wang M., Wang X., Liu W. A novel technology of molybdenum extraction from low grade Ni–Mo ore. *Hydrometallurgy*. 2009;97(1-2):126–130. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.12.004

11. Евдокимов С.И., Клыкова К.Ю., Рубаева Ия.О., Стадник Д.А. Технология использования чернового концентрата в качестве минералов-носителей. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(3):568–580. https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-3-568-580
Evdokimov S.I., Klykova K.Yu., Rubayeva I.O., Stadnik D.A. Technology of using rough concentrate as carrier minerals. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(3):568–580. (In Russ.). https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-3-568-580

12. Клюев Р.В. Обоснование решений по совершенствованию вентиляторных установок и подъемных машин на основе оценки энергоэффективности их работы в условиях реконструкции рудника «Молибден». *Горные науки и технологии*. 2025;10(1):84–94. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-10-362
Klyuev R.V. Assessment of energy efficiency improvement strategies for ventilation and hoisting systems during the reconstruction of the Molibden mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(1):84–94. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-10-362

13. Жуков И.А., Голиков Н.С., Мартюшев Н.В. Рационализация конструкции секции скребкового конвейера средствами автоматизированного метода анализа прочностных характеристик. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2022;14(1):142–150. https://doi.org/10.21177/1998-4502-2022-14-1-142-150
Zhukov I.A., Golikov N.S., Martyushev N.V. Design rationalization of the scraper conveyor section by means of an automated method of strength characteristics analysis. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022;14(1):142–150. (In Russ.). https://doi.org/10.21177/1998-4502-2022-14-1-142-150

14. Malyukova L.S., Martyushev N.V., Tynchenko V.V., Kondratiev V.V., Bukhtoyarov V.V., Konyukhov V.Y. et al. Circular mining wastes management for sustainable production of camellia sinensis (L.) O. Kuntze. *Sustainability*. 2023;15(15):11671. https://doi.org/10.3390/su151511671

15. Клюев Р.В. Разработка методики планирования эксперимента для исследования параметров мельниц горно-обогатительного комбината. *Горная промышленность*. 2024;(5S):105–109. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-105-109
Klyuev R.V. Development of a methodology for planning an experiment to study the parameters of mills at a mining and processing plant. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):105–109. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-105-109

16. Клюев Р.В. Анализ технологических и энергетических параметров шаровых мельниц. *Горная промышленность*. 2024;(6):107–110. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-107-110
Klyuev R.V. Analysis of technological and energy parameters of ball mills. *Russian Mining Industry*. 2024;(6):107– 110. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-107-110

Информация об авторе
Клюев Роман Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры автоматики и управления, Московский политехнический университет, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-3777-7203; e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Information about the author
Roman V. Klyuev – Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department Automation and Control, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-3777-7203; e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 05.06.2026
Поступила после рецензирования: 01.07.2026
Принята к публикации: 06.07.2026

Article info
Received: 05.06.2026
Revised: 01.07.2026
Accepted: 06.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-147-151

Оценка физико-механических и физико-технических свойств вскрышных пород Эльгинского каменноугольного месторождения

Д.В. Хосоев ✉, А.М. Бураков, В.В. Киселев, А.Д. Никифорова, Е.Л. Алькова
Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация
✉ hosoev70@mail.ru

Резюме: В статье представлены общие сведения об Эльгинском каменноугольном месторождении, Северо-Западный участок которого отрабатывается в настоящее время с использованием буровзрывных технологий. Приведены геолого-минералогические характеристики четвертичных отложений и коренных углевмещающих пород. Отмечается необходимость исследования физико-механических и физико-технических свойств вскрышных пород. В табличной форме изложены значения физико-механических и физико-технических свойств коренных пород месторождения, а также результаты проведенных авторами экспериментов по их определению. Отмечается низкая склонность пород к размоканию, налипанию и примерзанию. Обозначены основные типы коренных пород месторождения с разделением их на отдельные группы. Приведен минералогический и литологический состав коренных пород Ундытканской и Нерюнгриканской свит месторождения. Подчеркивается необходимость предварительного рыхления пород при ведении вскрышных работ.

Ключевые слова: коренные породы, вскрышные породы, четвертичные отложения, предел прочности, угол внутреннего трения

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №FWRS-2026-0052, регистрационный номер в ЕГИСУ НИОКТР 126021217278-1) с использованием приборной базы Центра коллективного пользования ФИЦ Якутского научного центра СО РАН.

Для цитирования: Хосоев Д.В., Бураков А.М., Киселев В.В., Никифорова А.Д., Алькова Е.Л. Оценка физико-механических и физико-технических свойств вскрышных пород Эльгинского каменноугольного месторождения. *Горная промышленность*. 2026;(5):147–151. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-147-151

Assessment of the physical, mechanical and engineering properties of overburden rocks in the Elga coal deposit

D.V. Hosoev ✉, A.M. Burakov, V.V. Kiselev, A.D. Nikiforova, E.L. Alkova
N.V. Chersky Institute of Mining of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
✉ hosoev70@mail.ru

Abstract: The article presents general information about the Elga coal deposit, which north-western part is currently mined using drilling and blasting methods. Geological and mineralogical characteristics are presented for the Quaternary sediments and the coal-bearing host rocks. The need to study the physical, mechanical and engineering properties of the overburden rocks is noted. The values of the physical, mechanical and engineering properties of the host rocks at the deposit are presented as tables, as well as the results of tests performed by the authors to determine these properties. The rocks are reported to have a low tendency to slaking, sticking, or adfreezing. The main types of the host rocks at the deposit are identified and classified into separate groups. The mineralogical and lithological composition of the host rocks of the Undytkan and Neryungri suites at the deposit is presented. The article emphasizes the need for preliminary loosening of the soils during the overburden removal operations.

Keywords: host rocks, overburden, Quaternary sediments, tensile strength, angle of internal friction

Acknowledgements: The study was carried out within the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Topic No. FWRS-2026-0052, EGISU R&D No.126021217277-1) using the equipment of the Shared Research Center of the Yakutsk Federal Research Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Hosoev D.V., Burakov A.M., Kiselev V.V., Nikiforova A.D., Alkova E.L. Assessment of the physical, mechanical and engineering properties of overburden rocks in the Elga coal deposit. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):147–151. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-147-151

Введение

В настоящее время высокими темпами идет разработка крупнейшего в России и одного из самых масштабных в мире Эльгинского месторождения высококачественного коксующегося угля (ЭКМ), которое находится в Республике Саха (Якутия) вблизи границ Амурской области и Хабаровского края. К юго-востоку от месторождения находятся уникальные для Якутии озера: Большое Токо и Малое Токо.

Горно-геологические условия залегания месторождения, благоприятны для открытой разработки, а его запасы превышают 2,2 млрд тонн.

Месторождение открыто в 1966 г., активная промышленная добыча ведется с 2011 г.

Климат района резко континентальный, характеризуется длительной, до 7 месяцев, холодной зимой и коротким, зачастую жарким летом. Среднегодовая температура воздуха –11 °С с колебаниями от –61 °С (декабрь-январь) до +36 °С (июль). Температура многолетнемерзлых пород колеблется в пределах от 0 до –3 °С, при средней температуре –1 °С. Коренные вмещающие породы характеризуются низкой влажностью 1–2% [1–3].

Цели и задачи

Степень разрабатываемости вскрышных пород Эльгинского месторождения оценивается комплексом параметров и характеристик, их физико-механических и физико-технических свойств, определяющих обоснование и выбор рациональной технологии и средств механизации ведения вскрышных работ по всему комплексу технологических процессов, включающих бурение, взрывание, экскавацию, транспортировку и др.

Важное значение имеет также изучение множества геологических факторов, формирующих основные свойства пород, определяющих их разрабатываемость, а также устойчивость бортов разреза.

В этих целях были проведены следующие исследования:

– оценка показателей физико-механических свойств коренных углевмещающих пород Северо-Западного участка (СЗУ) ЭКМ;

– оценка показателей физико-технических свойств коренных углевмещающих пород СЗУ ЭКМ.

Результаты

Породы СЗУ ЭКМ по инженерно-геологическим свойствам относятся к двум генетическим типам. К первому относятся четвертичные рыхлые образования, ко второму – коренные углевмещающие породы.

Четвертичные отложения имеют повсеместное распространение и представлены элювиальными, делювиальными, аллювиальными, озерными, болотными и ледниковыми образованиями. Преимущественное распространение имеют элювиально-делювиальные отложения мощностью от 1–3 м на крутых склонах и водоразделах и до 8–10 м у их подножий, их средняя мощность составляет 3,5 м. Они представлены: до 40% – супесями, до 25% – обломками, до 20% – щебенкой, до 10% – суглинками и до 5% – песками[1].

Промышленная угленосность СЗУ ЭКМ связана с отложениями Ундытканской, Нерюнгриканской свит. Нижняя граница пород Ундытканской свиты проходит по почве пачки конгломератов, ее мощность изменяется с северо-запада на юго-восток от 20–30 м до 90–120 м. Выше залегает толща чередующихся пачек серых и зеленовато-серых песчаников мелкозернистых, среднезернистых, крупнозернистых и темно-серых алевролитов, к которым приурочены угольные пласты. Гравелиты пользуются подчиненным развитием. В целом по разрезу отмечается уменьшение гранулометрического состава пород снизу вверх.

Песчаники Ундытканской свиты имеют кварц-полевошпатовый состав. Содержание кварца составляет 30–45%, полевых шпатов – 35–45%, обломков эффузивных пород – до 12%. Цементирующий материал – гидрослюдисто-хлоритовый и карбонатно-хлоритовый. Песчаники отличаются низкой сортировкой, высокой окатанностью зерен и слоистостью.

Конгломераты по составу полимиктовые. Хорошо и среднеокатанные галечники и валуны представлены архейскими и мезозойскими кристаллическими (гнейсы) и изверженными (граниты, кварцевые порфиры) породами. Заполнителем служит слабосцементированный песчано-глинистый материал.

Алевролиты имеют слоистый полимиктовый, полевошпат-кварцевый состав. Цемент хлорит-гидрослюдистый, преимущественно базальный.

Нижняя граница Нерюнгриканской свиты – почва мощной пачки песчаников, содержащей в основании прослои и линзы конгломератов и гравелитов. Верхней границей является кровля мощного угольного пласта Н15, сложенная базальными конгломератами Ундытканской свиты. Общая мощность отложений Нерюнгриканской свиты составляет 220 м. Песчаники свиты по составу кварц-полевошпатовые с содержанием кварца до 30–45 %, полевых шпатов 40–60% и обломков эффузивных пород до 5–10%. Содержание биотита составляет до 5%. Цемент гидрослюдо-хлоритовый и хлоритово-карбонатный. Обломочный материал характеризуется низкой сортировкой и окатанностью.

Алевролиты этой свиты крупнозернистые и мелкозернистые, имеют кварц-полевошпатовый состав с содержанием кварца до 45–50%. Цемент хлорит-гидрослюдистый, базально-поровый. В породах развита слоистость, сортировка и окатанность обломочного геоматериала невысокая.

Аргиллиты представляют собой дисперсно-чещуйчатую гидрослюдисто-хлоритовую массу с примесью очень мелких обломков кварца, полевых шпатов, биотита, карбонатов и витринизированных растительных остатков[2].

Процентное соотношение основных литологических разностей коренных пород по обеим свитам представлено в табл. 1.

Данные табл. 1 свидетельствуют, что коренные породы обеих свит в основном представлены разнозернистыми песчаниками от 70,1 до 72,6%, алевролитами и аргиллитами от 11,5 до 17%, а конгломератами от 2,8 до 7,6%.

При обосновании и выборе рациональной технологии и техники ведения буровых, взрывных и экскавационных работ, а также основных параметров технологических процессов, как уже говорилось, требуется наличие данных по физико-механическим и физико-техническим свойствам вскрышных пород. К основным показателям следует отнести объемную массу d_m, влажность v_p, пределы прочности

1 Отчет о результатах детальной разведки Северо-Западного участка Эльгинского каменноугольного месторождения в Токинском районе Южно-Якутского бассейна за 1991–1996 гг.: в 3-х т. Т. 1. Кн. 2.

2 Технический проект разработки Эльгинского месторождения каменного угля ООО «Эльгауголь». Вторая очередь, производственная мощность 45000 тыс. т. Проектная документация. Кемерово; 2020. С. 205.

Таблица 1
Литологический состав пород Нерюнгриканской и Ундытканской свит Северо-Западного участка Эльгинского каменноугольного месторождения

Table 1
Lithological composition of the Neryungri and Undytkan suites in the north-western part of the Elga coal deposit

Свита	Мощность, м	Литологические типы пород, %				
		Конгломераты	Песчаники			Алевролиты, аргиллиты
			крупнозернистые	среднезернистые	мелкозернистые	
Ундытканская	500	7,6	18,4	30,9	20,8	11,5
Нерюнгриканская	220	2,8	14,6	28,9	29,1	17,1

Таблица 2
Усредненные характеристики физико-механических свойств коренных пород Эльгинского каменноугольного месторождения

Table 2
Averaged physical and mechanical properties of host rocks at the Elga coal deposit

Литотип пород	Объемная масса, т/м³	Прочность на сжатие, МПа	Влажность, %	Угол внутреннего трения, %	Сцепление, МПа	Коэффициент крепости
Алевролиты	2,59	66,0	1,13	30,2	19,2	1–14
Песчаники мелкозернистые	2,59	69,2	0,8	29,8	19,8	3–13
Песчаники среднезернистые	2,56	68,6	0,72	30,9	19,5	3–13
Песчаники крупнозернистые	2,57	65,2	0,67	30,1	18,4	3–9
Конгломераты	2,57	45,2	0,58	30,1	18,4	2–10
Породные прослои	2,36	31,3	1,82	30,8	8,9	1–14
Угли	1,38	0,4–10,1	1,72	31,8	1,7	0,73–1,0

Таблица 3
Усредненные характеристики физико-технических свойств вскрышных пород Эльгинского каменноугольного месторождения

Table 3
Averaged physical and engineering properties of overburden at the Elga coal deposit

Литотип пород	Плотность действительная, т/м³	Пористость, %	Акустическая жесткость, т/м · с	Категория буримости
Алевролиты	2,72	2,6	10	4–7
Песчаники мелкозернистые	2,7	2,63	10,7	6–8
Песчаники среднезернистые	2,7	2,6	10,4	6–8
Песчаники крупнозернистые	2,7	2,62	11,1	6–8
Конгломераты	2,72	2,61	11,5	4–9
Породные прослои	2,65	7,8	5,43	4–8
Угли	1,59	4,2	2,38	4–5

при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$, сцепление С и угол внутреннего трения φ[3].

В результате выполненных исследований выявлено, что четвертичные отложения характеризуются в естественном состоянии невысокими показателями прочности и плотности, только в замерзшем состоянии требующими предварительного рыхления при экскавации. В пределах СЗУ объем этих пород незначителен (около 1,6% от общего объема вскрыши), поэтому разработка таких пород не представляет каких-либо технологических осложнений. Только в логах, долинах ручьев и рек, в летний период при оттайке породы теряют связность, затрудняя продвижение горной техники[4].

Ранее проведенные исследования, включающие в том числе обобщение опыта работы разрезов криолитозоны, позволили определить комплекс физико-механических и физико-технических свойств пород, достаточный и необходимый для оценки условий разрабатываемости СЗУ ЭКМ. Характеристики физико-механических и физико-технических свойств пород СЗУ ЭКМ приведены в (табл. *2*, *3*).

3 ГОСТ 21153.2–84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии (с изм. №1, 2). Взамен ГОСТ 21153.2-75; утв. постановлением Гос. ком. СССР по Управлению качеством продукции и стандартам от 19.06.84, №1973; введ. 1986-07-01.

4 Обосновать концепцию разработки Эльгинского каменноугольного месторождения открыто-подземным способом, отвечающую требованиям охраны окружающей среды, экономичности и эффективности горного производства: НИР (прилож.): 0-92-11 / Рос. акад. наук. Сиб. отд-ние, инст. горн. дела Севера, рук. В.Л. Яковлев; испол. С.Н. Петров [и др.]. Якутск; 1993. 200 с. (фондодержатель ИГДС СО РАН).

Таблица 4
Результаты экспериментальных исследований по определению физико-механических свойств коренных пород Эльгинского каменноугольного месторождения

Table 4
Results of experimental studies to assess the physical and mechanical properties of host rocks at the Elga coal deposit

Литотипы пород	Прочность на сжатие, МПа	Плотность, т/м³	Водопоглощение, %	Влажность, %
Результаты Института горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН				
Песчаники мелкозернистые	68,1	2,78	2,7	1,6
Песчаники среднезернистые	70,4	2,73	3,3	1,5
Результаты сторонних организаций				
Песчаники мелкозернистые	69,2	2,7	3,0	0,8
Песчаники среднезернистые	68,6	2,7	3,0	0,72

Анализ данных, приведенных в табл. 2, свидетельствует, что коренные породы СЗУ ЭКМ относятся ко второй группе полускальных средней прочности. Породы вскрыши характеризуются как скальные крепкие абразивные. Наиболее абразивными являются конгломераты, алевролиты и песчаники, относящие к IV и V классам абразивности. Их коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протодьяконова варьирует от 6 до 8 (при среднем значении 7). Таким образом, при ведении вскрышных работ требуется их предварительное рыхление с применением БВР. Породы вскрыши имеют значительный запас прочности и классифицируются как весьма устойчивые. В связи с высокой степенью литификации эти породы обладают низким пылеобразованием при разрушении, не вызывая высокую запыленность при производстве буровых, взрывных работ и формировании отвалов. Также они не склонны к размоканию и, как следствие, налипанию и примерзанию к металлическим предметам [4; 5].

Сравнительный анализ данных табл. 3 позволяет сделать вывод о незначительном расхождении значений действительной плотности (от 2,7 до 2,72 т/м³), пористости (от 2,6 до 2,64%) и акустической жесткости (от 9,4 до 11,5 км т/м³. с) у разных литотипов вмещающих пород[5].

В Институте горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН с использованием стандартных методик были проведены эксперименты по оценке физико-механических свойств коренных пород СЗУ ЭКМ мелкозернистых и среднезернистых песчаников [6]. Предел прочности на одноосное сжатие выполнен в соответствии с ГОСТ 21153.2–84 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии». Плотность, влажность и водопоглощение горных пород, определяли в соответствии с ГОСТ 5180–84 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик».

Результаты исследований приведены в табл. 4, где также для сравнения представлены аналогичные данные из отчётов сторонних организаций (НИОГР, ГГП «Южякутгеология, ВНП «Экология»).

Заключение

Основные результаты проведенных исследований, отраженных в статье, заключаются в следующем:

– приведены геолого-минералогические характеристики четвертичных отложений СЗУ ЭКМ;

– обозначены основные типы коренных вмещающих пород;

– сделан анализ физико-механических, физико-технических свойств вскрышных пород;

– изложены результаты экспериментов, проведенных Институтом горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН.

Также можно отметить, что проведенными исследованиями выявлено, что вскрышные полускальные породы СЗУ ЭКМ относятся ко второй группе, что подтверждает необходимость их предварительного буровзрывного рыхления при ведении вскрышных работ с используемой в настоящее время технологией. Коренные породы месторождения характеризуются как скальные, крепкие и абразивные. Коэффициент их крепости по шкале проф. М.М. Протодьяконова варьирует от 6 до 8 (при среднем значении 7), имеют значительный запас прочности и классифицируются как весьма устойчивые. Есть основание утверждать, что они не склонны к высокому пылеобразованию при разрушении, облегчая тем самым пылеподавление при производстве буровых и взрывных работ, а также формировании отвалов. Кроме этого, они также не склонны к размоканию и, как следствие, к налипанию и примерзанию к металлическим поверхностям.

5 Отчет о научно-исследовательской работе №1094157000 Исследовать плотностные, прочностные, абразивные и акустические свойства для оценки разрабатываемости вскрышных пород Северо-Западного участка Эльгинского месторождения южно-якутского бассейна. НИОГР. Челябинск; 1996

Список литературы / References

1. Пинигин Д.Д. На Эльгинском месторождении. *Наука и техника в Якутии.* 2020;(2):14–16. https://doi.org/10.24412/1728-516X-2020-2-14-26
Pinigin D.D. At the Elga deposit. *Nauka i Tekhnika v Yakutii.* 2020;(2):14–16. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/1728-516X-2020-2-14-26

2. Хосоев Д.В., Ермаков С.А. Оценка технологий разработки Эльгинского угольного месторождения. *Уголь*. 2009;(11):9–11.
Khosoev D.V., Ermakov S.A. Estimation of technologies of development a coal deposit of Elginskoe. *Ugol'*. 2009;(11):9–11. (In Russ.)

3. Хосоев Д.В., Киселев В.В., Бураков А.М. Область эффективного применения карьерных комбайнов на Эльгинском каменноугольном месторождении по критерию прочностных свойств вмещающих пород. *Горная промышленность*. 2025;(5):74–78. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-74-78
Hosoev D.V., Kiselev V.V., Burakov A.M. The area for efficient application of surface miners at the Elga coal deposit based on the strength properties of the surrounding rocks. *Russian Mining Industry*. 2025;(5):74–78. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-74-78

4. Хосоев Д.В., Панишев С.В., Максимов М.С. Инженерно-геокриологические условия Эльгинского месторождения. *Горная промышленность*. 2021;(2):96–100. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-2-96-100
Hosoev D.V., Panishev S.V., Maksimov M.S. Engineering and Geocryological Conditions of the Elginsky Deposit. *Russian Mining Industry*. 2021;(2):96–100. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-2-96-100

5. Хосоев Д.В. Оценка горнотехнических условий Эльгинского месторождения с позиции применения горных комбайнов. *Горная промышленность*. 2016;(6):81–83.
Khosoev D.V. Estimating the mining conditions of the Elga coal deposit with the view of the KSM-type surface miner application. *Russian Mining Industry*. 2016;(6):81–83. (In Russ.)

6. Панишев С.В., Хосоев Д.В., Матвеев А.И. Повышение эффективности разработки вскрышных пород и углей Эльгинского месторождения Якутии путем их разупрочнения с использованием поверхностно-активных веществ. *Горная промышленность*. 2021;(1):98–104. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-1-98-104
Panishev S.V., Hosoev D.V., Matveev A.I. Enhancing Efficiency of Overburden Removal and Coal Mining at Elginsky Coal Deposit in Yakutia by their Softening with Surfactants. *Russian Mining Industry*. 2021;(1):98–104. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-1-98-104

Информация об авторах
Хосоев Доржо Владимирович – младший научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-1466-8509; e-mail: hosoev70@mail.ru
Бураков Александр Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация
Киселев Валерий Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация
Никифорова Агафья Дмитриевна – инженер, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация
Алькова Елена Леонидовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация

Информация о статье
Поступила в редакцию: 03.05.2026
Поступила после рецензирования: 22.06.2026
Принята к публикации: 23.06.2026

Information about the authors
Dorzho V. Hosoev – Junior Research, N.V. Chersky Institute of Mining of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-1466-8509; e-mail: hosoev70@mail.ru
Alexander M. Burakov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, N.V. Chersky Institute of Mining of the North of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
Valery V. Kiselev – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, N.V. Chersky Institute of Mining of the North of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
Agafya D. Nikiforova – Engineer, N.V. Chersky Institute of Mining of the North of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
Elena L. Alkova – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, N.V. Chersky Institute of Mining of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

Article info
Received: 03.05.2026
Revised: 22.06.2026
Accepted: 23.06.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-152-158

Выявление критических смещений и деформаций на объектах недропользования по временным рядам ГНСС-наблюдений

П.А. Докукин, А.А. Поддубский, Р.В. Шевчук, А.И. Маневич ✉, М.В. Алешин
Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Российская Федерация
✉ ai.manevich@yandex.ru

Резюме: В статье рассмотрены подходы к геодеформационному анализу (выявлению критических смещений и деформаций) на объектах недропользования по временным рядам ГНСС-наблюдений. Показано, что для оценки устойчивости горнотехнических объектов недостаточно ограничиваться только анализом абсолютных смещений отдельных пунктов, поскольку одинаковые по величине перемещения могут соответствовать различным стадиям деформационного процесса. На основе анализа отечественных и зарубежных публикаций, а также нормативно-методических документов рассмотрены существующие подходы к интерпретации скоростей смещений, допустимых деформаций и уровней опасности. Особое внимание уделено переходу от оценки кинематики отдельных пунктов к анализу пространственного деформационного поля. В качестве информативных параметров предложено использовать главные оси деформации, дилатацию и максимальные сдвиговые деформации, совместный анализ которых позволяет выявлять участки растяжения, сжатия, разуплотнения и сдвиговой концентрации. Показано, что универсальные пороговые критерии не могут быть непосредственно перенесены на все объекты недропользования и должны уточняться с учетом инженерно-геологических условий, режима горных работ, особенностей наблюдательной сети и точности измерений. Отмечено, что достоверность интерпретации временных рядов в значительной степени зависит от качества их обработки, что дополнительно подчеркивает актуальность развития отечественных сервисов высокоточной обработки ГНСС-данных для задач геомеханического и геодинамического мониторинга.

Ключевые слова: ГНСС-наблюдения, геодеформационный анализ, деформационный мониторинг, объекты недропользования, временные ряды координат, критические смещения, деформационное поле, главные оси деформации, дилатация, максимальный сдвиг, геомеханическая интерпретация, устойчивость откосов, промышленная безопасность

Благодарности: Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (научная тема FSSF-2026-0077).

Для цитирования: Докукин П.А., Поддубский А.А., Шевчук Р.В., Маневич А.И., Алешин М.В. Выявление критических смещений и деформаций на объектах недропользования по временным рядам ГНСС-наблюдений. *Горная промышленность*. 2026;(5):152–158. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-152-158

Identification of critical displacements and deformations at subsoil assets based on GNSS observation time series

P.A. Dokukin, A.A. Poddubsky, R.V. Shevchuk, A.I. Manevich✉, M.V. Aleshin
RUDN University, Moscow, Russian Federation
✉ ai.manevich@yandex.ru

Abstract: The article examines approaches to identifying critical displacements and deformations at mining assets using the GNSS observation time series. It is shown that assessing the stability of mining-engineering facilities should not be limited to analyzing absolute displacements of individual stations only, since displacements of the same magnitude may correspond to different stages of the deformation process. Existing approaches to interpretation of the displacement rates, allowable deformations, and hazard levels are reviewed based on an analysis of Russian and international publications, as well as regulatory and methodological documents. Particular attention is given to transition from assessing the kinematics of individual points to analyzing the spatial deformation field. The principal strain axes, dilatation, and maximum shear strain are proposed as informative parameters, which combined analysis makes it possible to identify zones of extension, compression, loosening, compaction, and shear strain concentration. It is shown that universal threshold criteria cannot be directly transferred to all the mining assets and should be refined with regard to the specific engineering-geological conditions, mining regime, characteristics of the monitoring network, and measurement accuracy. It is also noted that reliability of the time-series interpretation largely depends on the quality of data

processing, which highlights the relevance of developing domestic high-precision GNSS data processing tools for geomechanical and geodynamic monitoring tasks.

Keywords: GNSS observations, deformation monitoring, subsoil assets, coordinate time series, critical displacements, deformation field, principal deformation axes, dilatation, maximum shear strain, geomechanical interpretation, slope stability, industrial safety

Acknowledgements: This work was funded by the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSSF-2026-0077).

For citation: Dokukin P.A., Poddubsky A.A., Shevchuk R.V., Manevich A.I., Aleshin M.V. Identification of critical displacements and deformations at subsoil assets based on GNSS observation time series. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):152–158. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-152-158

Введение

Разработка месторождений полезных ископаемых сопровождается изменением напряжённо-деформированного состояния массива горных пород и земной поверхности. Эти изменения проявляются в оседаниях, горизонтальных смещениях, локальных деформациях бортов карьеров, отвалов, уступов, в нарушении устойчивости подработанных участков и инженерных сооружений. Поэтому задача своевременного обнаружения опасных тенденций в деформационном процессе имеет не только научное, но и прямое прикладное значение, поскольку связана с промышленной безопасностью, сохранностью инфраструктуры и снижением риска аварийных событий. Современный деформационный мониторинг опирается на совмещение геодезических, маркшейдерских и геомеханических методов, однако именно ГНСС (глобальные навигационные спутниковые системы) наблюдения заняли особое место как метод получения высокоточных координатных рядов [1] во времени (рис 1).

Исторически переход к спутниковым методам мониторинга был связан с тем, что классические линейно-угловые методы измерений: нивелирование, тахеометрические наблюдения, хотя и обеспечивают высокую точность, но часто недостаточно оперативны и слабо приспособлены к непрерывному контролю быстро меняющихся процессов.

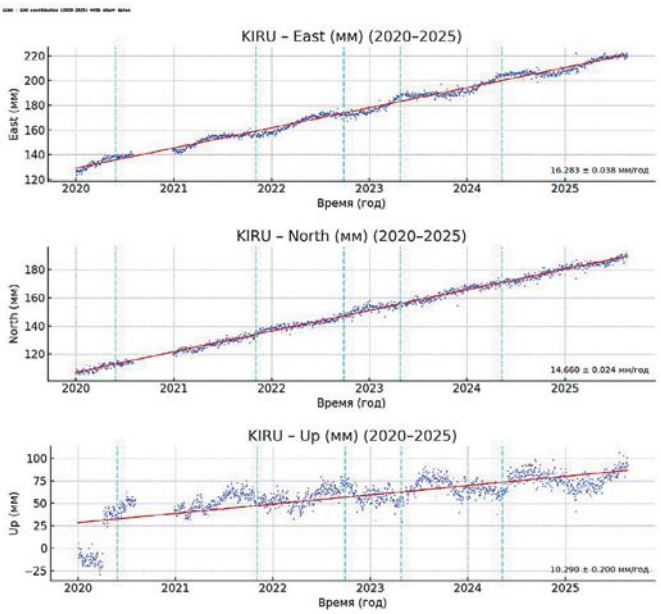


Рис. 1
Временные ряды координатных смещений ГНСС-станции FAIR (2020–2025)

Fig. 1
Time series of coordinate displacements at the FAIR GNSS station (2020–2025)

Уже в ранних работах по применению ГНСС для мониторинга склоновых деформаций было показано, что спутниковые методы позволяют идентифицировать значимые смещения с высокой частотой (как постоянно действующие станции, так и периодичные дискретные измерения), что особенно важно для опасных производственных объектов. Потому что наблюдаемые движения могут быть как медленными и квазилинейными, так и скачкообразными, связанными с изменением горнотехнической или сейсмической обстановки [1; 2].

Методология

Классическая работа [1] стала одной из ранних методических основ использования ГНСС в задачах деформационного мониторинга. Авторы показали, что спутниковые наблюдения могут быть использованы не только для фиксации уже произошедших смещений, но и для оценки кинематики деформирования, если наблюдения организованы как последовательный временной ряд. Для объектов недропользования предельное состояние устойчивости бортов карьеров/горных выработок определяется не одной координатой или одним измерением, а динамикой изменения положения пункта во времени.

В работе [2] показана эффективность сочетания ГНСС-измерений и роботизированных тахеометров для мониторинга крупных карьеров. Авторы рассматривали не просто автоматизацию наблюдений, а построение полноценных гибридных систем контроля, способных непрерывно отслеживать пространственные перемещения на больших площадях. Эта работа важна тем, что фактически задала современную логику интегрированного мониторинга: ГНСС используется как высокоточный опорный и кинематический компонент, а наземные геодезические средства дополняют его в зоне локализации мониторинга (рис. 2).

Следующий важный этап связан с ориентацией технологии ГНСС как основы специализированных систем мониторинга деформаций на горных предприятиях. В работе [3] подчёркивалось, что развитие деформационного мо-



Рис. 2
Совмещенный мониторинг с помощью ГНСС и тахеометра

Fig. 2
Combined monitoring using the GNSS and a total station

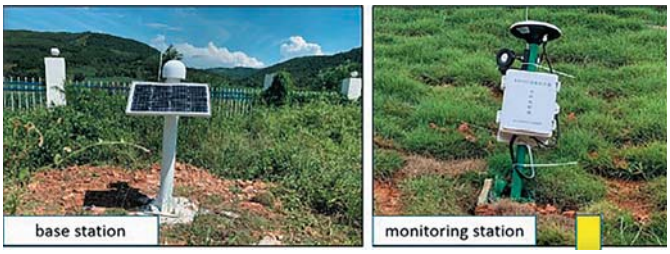


Рис. 3
Устройство автономной станции мониторинга средствами ГНСС

Fig. 3
Setup of a standalone GNSS monitoring station

ниторинга делает возможным переход от разовых измерений к систематическому контролю геомеханических и геодинамических процессов и явлений. Авторы предложили использовать различные методики наблюдений в зависимости от пространственного масштаба задачи: для больших территорий – сеть опорных станций (постоянно действующих), для локальных деформаций – дискретные наблюдения.

Конечной целью мониторинга в задачах оценки устойчивости объектов недропользования является не только идентификация величин смещений, но и их содержательная интерпретация для выявления опасных процессов. Как правило, основное внимание уделялось определению собственно смещений, то есть вектора смещения наблюдаемого пункта за заданный временной интервал. Однако для обоснованной оценки устойчивости объекта такой информации недостаточно. Одинаковые по модулю смещения могут соответствовать принципиально различным геомеханическим и геодинамическим ситуациям: с одной стороны, безопасному долговременному тренду, с другой, начальной или уже развивающейся фазе ускоряющегося деформирования, предшествующей переходу системы в критическое состояние. В связи с этим научный акцент постепенно сместился от простой регистрации смещений к деформационному анализу как индикаторам эволюции напряженно-деформированного состояния [4; 5]. Для инженерной интерпретации необходимо различать фоновые движения, допустимые эксплуатационные деформации, аномальные изменения режима деформирования и предаварийные стадии.

В зарубежной литературе подчёркивается, что универсальных пороговых значений, пригодных для всех горнотехнических объектов, не существует. Это связано с различиями в инженерно-геологических условиях, типов пород, масштабах деформируемого массива, конфигурации откосов и бортов, режиме горных работ, а также в характеристиках самих временных рядов.

Наиболее наглядные численные градации приведены в работе [6], посвящённой мониторингу оползней по данным ГНСС. В этой модели при скорости смещения менее 2 мм/сут состояние считалось стабильным; диапазон 2–10 мм/сут соответствовал первому уровню предупреждения; 10–30 мм/сут – второму уровню предупреждения, отражающему заметное ускорение деформирования; при скорости более 30 мм/сут и касательном угле кривой более 85° состояние классифицировалось как аварийное (рис. 3). Однако сами авторы рассматривают эти пороги как модель, привязанную к конкретному объекту, а не как универсальный стандарт.

В российской практике вопрос интерпретации смещений и деформаций на горных предприятиях, в частности на карьерах и отвалах, рассматривается не только как задача инструментального контроля, но и как элемент системы обеспечения промышленной безопасности. В инструкции по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости[1] говорится, что мониторинг оценки рисков должен обеспечивать безопасное ведение горных работ и включать обоснование требуемой точности и периодичности наблюдений (табл. 1), перечень контролируемых параметров, признаки нарушения устойчивости, а также допустимые значения деформаций и критерии безопасности.

Таблица 1
Зависимость периодичности наблюдений за состоянием откосов карьеров от скоростей смещений

Table 1
A dependence of the observation frequency for open-pit slope conditions on the displacement rates

Скорость смещения, мм/сут	Периодичность наблюдений, сут
0,1–0,5	365 (1 раз в год)
0,5–1,0	180 (2 раза в год)
1,0–2,0	90 (ежеквартально)
2,0–5,0	45
5,0–10,0	15
10,0–20,0	7–8
20,0 и выше	3–4

Принципиально важно, что в методических указаниях прямо подчеркивается то, что система мониторинга определяется индивидуально для каждого объекта, а на этапе эксплуатации точность и периодичность наблюдений могут уточняться эксплуатирующей или специализированной организацией в соответствии с целями и задачами мониторинга. Это означает, что приведенные в нормативно-методической литературе значения следует рассматривать не как универсальные константы, а как ориентировочную и регламентирующую основу для построения локальной системы наблюдений на конкретном объекте недропользования (табл. 2).

В нормативной практике различают долгосрочный и оперативный мониторинг. Долгосрочный мониторинг организуется на длительный период эксплуатации и ориентирован на выявление признаков крупномасштабных деформаций, тогда как оперативный мониторинг применяется в локальных зонах критических или развивающихся деформаций, в рабочих зонах и на участках размещения внутрикарьерной инфраструктуры. Соответственно, численные характеристики смещений интерпретируются не изолированно, а в контексте режима наблюдений и уровня опасности процесса. По результатам долгосрочного мониторинга состояние откосов и бортов должно оцениваться по нескольким уровням безопасности. В качестве диагностических признаков используются коэффициент запаса устойчивости, относительные горизонтальные деформации, а также общие величины смещений массива (табл. 3). При этом упругие и затухающие деформации относятся к работоспособному состоянию объекта, тогда как значительные деформации с развитием трещин и заколов характеризуют ограниченно работоспособное состояние, а достижение предельных параметров соответствует аварийной или критической стадии.

1 Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. Л.: ВНИМИ, 1971. 187 с. Режим доступа: http://gost.gtsever.ru/Data2/1/4294853/4294853736.pdf (дата обращения: 23.05.2026).

Таблица 2
Периодичность наблюдений за состоянием отвалов

Table 2
Observation frequency for waste dump conditions

Характеристика устойчивости	Скорость смещения, см/сут	Периодичность наблюдений	Примечание
Устойчивый. Соотношение скоростей (Vвер > 0, Vгор ≈ 0; Vгор << Vвер)	Менее 0,3	Раз в квартал	Работы на отвале допускаются
Подвижный (устойчивый относительно). (Vгор ≈ Vвер)	0,3–1,0	Раз в месяц	Работы на отвале допускаются
	1,0–5,0	Раз в неделю	Работы на отвале допускаются
	5,0–10,0	Два раза в неделю	Работы на отвале допускаются
	10–20	Через день	Работы на отвале допускаются
	20–30	Ежедневно	Работы на отвале допускаются
	30–50	Дважды в смену	Работы на отвале допускаются в исключительных случаях
Неустойчивый. (Vвер > 0, Vгор >> 0, Vгор >> Vвер)	Более 50	Дважды в смену	Работы на отвале не допускаются

Таблица 3
Оценка состояния откоса по результатам долгосрочного мониторинга

Table 3
Assessment of the slope condition based on long-term monitoring results

Показатель	Критерии	Характеристика состояния
1	Коэффициент запаса $n \geq 1{,}3$; относительные горизонтальные деформации $\varepsilon \leq 1 \cdot 10^{-3}$	Упругие деформации
2	n = 1,3-1,2; общие смещения поверхности бортов карьеров высотой более 100 м – 200–300 мм и более; $\varepsilon = (1\text{-}5) \cdot 10^{-3}$	Затухающие во времени смещения, возникновение микро- и макротрещин
3	n = 1,2-1,1; $\varepsilon = (5\text{-}20) \cdot 10^{-3}$; общие величины смещений массива в пределах призмы оползания глубоких карьеров – 1,5–2,0 м и более	Значительные деформации прибортового массива; на поверхности возникают видимые заколы и трещины; деформации во времени преимущественно затухают
4	n = 1,1-1,05 и менее; $\varepsilon = (20\text{-}30) \cdot 10^{-3}$	Предельное состояние откоса; со временем наблюдаются разрушения бортов

Существенно и то, что при анализе скоростей рекомендуется учитывать только те случаи, когда величины смещений превышают погрешности измерений; если же смещения находятся в пределах точности наблюдений, анализ должен опираться на накопленные смещения и устойчивость их направлений.

Обработка временных рядов ГНСС является сегодня одной из центральных задач деформационного анализа. В работах [4; 7] показано, что координатные ряды представляют собой сумму полезного сигнала и набора шумовых и систематических составляющих: ошибок тропосферы и ионосферы, нестабильности системы отсчёта, орбитальных погрешностей, сезонных эффектов, коррелированных шумов и других факторов. Авторы подчёркивают, что для надёжного извлечения слабых сигналов – вплоть до миллиметровых скоростей, необходимо корректно задавать как функциональную, так и стохастическую модель временного ряда смещений. Для прикладных задач недропользования это означает, что без фильтрации и анализа шумовой структуры даже высокоточные координаты не гарантируют корректного вывода о реальной геодинамической ситуации.

Вопрос геодинамического и геодезического мониторинга объектов недропользования получил развитие прежде всего в работах [8; 9]. В статьях о геодезическом обеспечении геодинамического мониторинга подчёркивается, что геодезический метод является одним из надежных способов количественной оценки состояния массива и техногенных объектов, поскольку позволяет напрямую фиксировать величины и направления смещений. Наблюдения должны быть связаны с геомеханической интерпретацией, а сами данные – использоваться не как самоцель, а как основа для диагностики состояния объекта. И.Ю. Розанов и соавт. описывают организацию ГНСС-наблюдений, размещение фундаментальных реперов, используемую аппаратуру и подходы к интерпретации результатов при открытых горных работах на руднике «Железный» АО «Ковдорский ГОК» [10]. ГНСС здесь рассматривается как часть инженерной системы наблюдений, ориентированной на контроль устойчивости и принятие решений в условиях действующего горного предприятия. Схожая логика прослеживается в исследовании Е.В. Ситникова и соавт., которые разработали методику инструментального контроля устойчивости карьерных откосов с использованием ГНСС-технологий [11]. То есть речь идёт уже не об «определении координат», а о создании наблюдательной схемы, позволяющей выявлять развитие деформационного процесса на откосах и уступах карьера. Значительный интерес представляет и работа А.А. Панжина и соавт. по Коркинскому угольному месторождению, где ГНСС-мониторинг и моделирование поля деформаций рассматриваются совместно [12].

Примером интерпретации временных рядов ГНСС-наблюдений является исследование В.И. Кафтана и соавт., выполненное на постоянно действующей ГНСС-станции (рис. 4) комплексной геомагнитной обсерватории «Климовская» методом Precise point position (PPP) [13]. Полученные результаты представляют существенный интерес именно с точки зрения методики анализа временных рядов, так как в работе был рассмотрен набор специализированных сервисов онлайн-обработки файлов статических ГНСС-измерений. В обработке участвовали сервисы AUSPOS, CSRS-PPP, OPUS, GAPS, APPS, Magic-GNSS и SCOUT. Однако по результатам тестирования для регулярной обработки файлов наблюдений пункта KLIM были отобраны три сервиса – OPUS, AUSPOS и CSRS-PPP, которые авторы сочли наиболее пригодными для решения поставленной задачи. Тем самым



Рис. 4
Комплект ГНСС-оборудования, установленный на геодезическом пункте KLIM для постоянных измерений

Fig. 4
A GNSS set installed at the KLIM geodetic station for continuous measurements

в статье фактически показано, что надёжная интерпретация временного ряда должна опираться не на один способ обработки, а на сопоставление нескольких независимых решений, полученных разными вычислительными схемами.

Установлено, что сервисы проявили себя по-разному: наименьшие значения среднеквадратического отклонения и наименьший разброс измерений получены при использовании AUSPOS и CSRS-PPP, тогда как при обработке через OPUS разброс координат оказался заметно выше. В численном выражении авторы приводят следующие оценки: для AUSPOS и CSRS-PPP средние значения СКО составили 2–5 мм в плане и 7–15 мм по высоте, тогда как для OPUS разброс увеличивался до 2–20 мм в плане и 15–30 мм по высоте. Эти результаты принципиально важны для деформационного мониторинга, поскольку показывают, что один и тот же исходный массив спутниковых наблюдений может давать разную степень устойчивости координатного ряда в зависимости от выбранной стратегии обработки. В методическом и прикладном отношении это указывает на целесообразность разработки российского сервиса онлайн-обработки статических ГНСС-измерений, который обеспечивал бы независимую, воспроизводимую и технологически устойчивую обработку временных рядов, работу в принятых государственных и международных системах координат, а также возможность интеграции с отечественными системами геодинамического и геомеханического мониторинга. Для задач выявления критических смещений и деформаций на объектах недропользования создание такого инструмента представляется особенно важным, поскольку позволяет объединить требования к точности, оперативности, метрологической прослеживаемости и технологической независимости обработки наблюдений.

Результаты

Критическим, опасным может быть не абсолютное смещение одной точки, а пространственно согласованная зона растяжения, сжатия, сдвига или локального расхождения векторов смещения. Если смещение во времени – это кинематическая характеристика одного пункта, то деформация описывает относительное изменение положения группы пунктов и, таким образом, больше связана с изменением состояния массива. Для интерпретации геодинамического состояния территории необходимо вычислять комплекс деформационных характеристик [14]. К числу таких параметров (рис. 5–7) прежде всего относятся главные оси деформации, позволяющие определить направления максимального растяжения и сжатия среды, дилатация, отражающая суммарное изменение площади или объема деформируемого участка и, соответственно, преобладание процессов разуплотнения либо уплотнения, а также сдвиг, характеризующий интенсивность взаимного смещения элементов среды и степень развития касательных деформаций. Совместный анализ этих показателей позволяет выполнять оценку напряженно-деформированного состояния массива, выявлять участки концентрации деформаций и выделять потенциально опасные зоны, где возможно развитие неустойчивых геодинамических процессов.

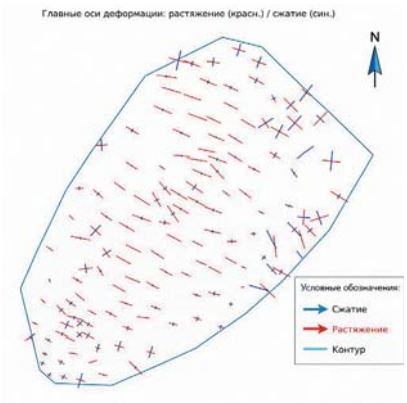


Рис. 5
Пространственное распределение главных осей деформации на исследуемой территории

Fig. 5
Spatial distribution of the principal deformation axes in the surveyed area

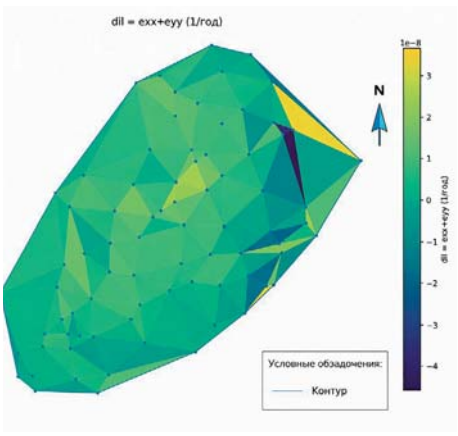


Рис. 6
Пространственное распределение дилатации деформационного поля на исследуемой территории

Fig. 6
Spatial distribution of the deformation field dilatation in the surveyed area

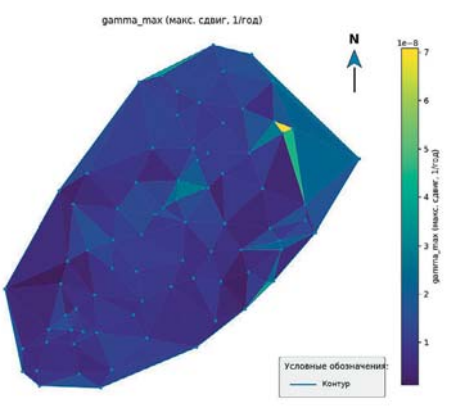


Рис. 7
Пространственное распределение максимальных сдвиговых деформаций на исследуемой территории

Fig. 7
Spatial distribution of the maximum shear strains in the surveyed area

Выводы

Проведённый обзор отечественных и зарубежных исследований, а также нормативно-методических документов показал, что универсальных пороговых критериев критических смещений и деформаций для всех объектов недропользования не существует. Численные значения скоростей смещений, относительных деформаций и уровней предупреждения должны рассматриваться как ориентировочная основа, требующая обязательной адаптации к конкретным инженерно-геологическим условиям, масштабу объекта, режиму горных работ, типу наблюдательной сети и точности измерений. При этом надёжность интерпретации временных рядов ГНСС в значительной степени определяется качеством их обработки, включая учёт шумовых, сезонных и систематических составляющих, без чего даже высокоточные координатные определения не обеспечивают достоверного вывода о реальном геодинамическом состоянии объекта. В этой связи особую актуальность приобретает разработка отечественной интеллектуальной непространственной системы, включающей сервис высокоточной обработки статических и долговременных ГНСС-наблюдений, который обеспечивал бы технологическую независимость, воспроизводимость результатов, а также возможность интеграции с национальными системами геомеханического и геодинамического мониторинга. При мониторинге объектов недропользования использование ГНСС-наблюдений не должно ограничиваться лишь фиксацией абсолютных смещений отдельных пунктов. Наиболее перспективным направлением развития мониторинга является комплексный анализ пространственного деформационного поля, включающий оценку главных осей деформации, дилатации и максимальных сдвиговых деформаций. Совместное использование этих характеристик позволяет выявлять зоны растяжения, сжатия, разуплотнения, уплотнения и концентрации сдвиговых деформаций, а следовательно, более обоснованно выделять потенциально опасные участки на объектах недропользования. Таким образом, интерпретация временных рядов ГНСС-наблюдений в сочетании с анализом деформационных параметров и развитием отечественных инструментов их высокоточной обработки может рассматриваться как методическая основа для раннего выявления критических состояний и повышения эффективности систем геомеханического и геодинамического мониторинга горных предприятий.

Список литературы / References

1. Gili J.A., Corominas J., Rius J. Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring. *Engineering Geology*. 2000;55(3):167–192. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00127-1
2. Brown N., Kaloustian S., Roeckle M. Monitoring of open pit mines using combined GNSS satellite receivers and robotic total stations. In: Potvin Y. (ed.) *Slope Stability 2007: Proceedings of the 2007 International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, September 12–14, 2007*. Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2007, pp. 417–429. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/708_27
3. Gao J.-X., Hu H. Advanced GNSS technology of mining deformation monitoring. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2009;1(1):1081–1088. https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.166
4. He X., Montillet J.-P., Fernandes R., Bos M., Yu K., Hua X., Jiang W. Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources. *Journal of Geodynamics*. 2017;106:12–29. https://doi.org/10.1016/j.jog.2017.01.004
5. Gazeaux J., Williams S., King M., Bos M., Dach R., Deo M. et al. Detecting offsets in GPS time series: First results from the detection of offsets in GPS experiment. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2013;118(5):2397–2407. https://doi.org/10.1002/jgrb.50152
6. Chen Z., Huang G., Xie W., Zhang Y., Wang L. GNSS real-time warning technology for expansive soil landslide – A case in Ningming demonstration area. *Remote Sensing*. 2023;15(11):2772. https://doi.org/10.3390/rs15112772
7. Шевчук Р.В., Маневич А.И., Лосев И.В., Алёшин И.М., Акматов Д.Ж., Татаринова Т.А., Урманов Д.И. Анализ воздействия радиопомех и параметров навигационных спутниковых измерений на их точность на залесенных территориях. *Геодезия и картография*. 2024;(8):23–30. https://doi.org/10.22389/0016-7126-2024-1010-8-23-30
Shevchuk R.V., Manevich A.I., Losev I.V., Aleshin I.M., Akmatov D.Zh., Tatarinova T.A., Urmanov D.I. Analysis of the radio interference and measurement parameters impact on GNSS accuracy in forested areas. *Geodeziya i Kartografiya*. 2024;(8):23–30. (In Russ.). https://doi.org/10.22389/0016-7126-2024-1010-8-23-30
8. Панжин А.А., Сашурин А.Д., Панжина Н.А., Мазуров Б.Т. Геодезическое обеспечение геодинамического мониторинга объектов недропользования. *Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий)*. 2016;(4):26–39.
Panzhin A.A., Sashourin A.D., Panzhina N.A., Mazurov B.T. Geodesic support of geodynamic monitoring of objects of subsurface use. *Vestnik SSUGT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*. 2016;(4):26–39. (In Russ.).
9. Кафтан В.И., Миронов И.К., Маневич А.И., Шевчук Р.В., Магуськин В.М. Современные движения и деформации земной коры в окрестности Авачинского вулкана (п-ов Камчатка) с 2015 по 2023 гг. *Физика Земли*. 2025;(3):115–128. Режим доступа: https://earthphysras.ru/s3034645225030093-1/ (дата обращения: 23.05.2026).
Kaftan V.I., Mironov I.K., Manevich A.I., Shvchuk R.V., Maguskin V.M. Recent movements and deformations of the earth's crust in the region of Avacha volcano (Kamchatka peninsula) from 2015 to 2023. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2025;61(3):385–395. https://doi.org/10.1134/S1069351325700302

10. Розанов И.Ю., Кузнецов М.А., Достовалов Р.Н. Опыт применения методов космической геодезии для геомеханического мониторинга массивов горных пород при открытых горных работах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(4):100–106. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2017/4/100_106_4_2017.pdf (дата обращения: 23.05.2026).
Rozanov I.Yu., Kuznetsov M.A., Dostovalov R.N. Case history of space geodesy in geomechanical monitoring of rock mass under open pit mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(4):100–106. (In Russ.). Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2017/4/100_106_4_2017.pdf (accessed: 23.05.2026).

11. Ситникова Е.В., Хмырова Е.Н., Ожигин Д.С. Методика инструментального контроля состояния устойчивости карьерных откосов с использованием GNSS технологий. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2020;1(1):161–168. https://doi.org/10.33764/2618-981X-2020-1-1-161-168
Sitnikova E.V., Hmyrova E.N., Ozhigin D.S. Methodology of instrumental control of stability of quarry slopes using GNSS technologies. *Interexpo GEO-Siberia*. 2020;1(1):161–168. (In Russ.). https://doi.org/10.33764/2618-981X-2020-1-1-161-168

12. Панжин А.А., Мазуров Б.Т., Панжина Н.А. Геодинамический мониторинг и моделирование поля деформаций на Коркинском угольном месторождении. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2021;(2):94–109.
Panzhin A.A., Mazurov B.T., Panzhina N.A. Geodynamic monitoring and modeling of the deformation field a t the Korkinsky coal deposit. *Izvestiya Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2021;(2):94–109. (In Russ.).

13. Кафтан В.И., Татаринов В.Н., Побединский М.Г., Шаяхметов Р.Ф., Маневич А.И., Шевчук Р.В., Лосев И.В. ГНСС-наблюдения на комплексной геомагнитной обсерватории «Климовская». *Геофизические процессы и биосфера*. 2023;22(2):143–154. Режим доступа: https://static.ifz.ru/10.21455/GPB2023.2-7 (дата обращения: 23.05.2026).
Kaftan V.I., Tatarinov V.N., Pobedinsky M.G., Shayahmetov R.F., Manevich A.I., Shevchuk R.V., Losev I.V. GNSS-observations at the integrated geomagnetic observatory “Klimovskaya”. *Geophysical Processes and Biosphere*. 2023;22(2):143–154. (In Russ.). Available at: https://static.ifz.ru/10.21455/GPB2023.2-7 (accessed: 23.05.2026).

14. Шевчук Р.В. Обоснование и разработка метода выявления зон возможного нарушения изоляционных свойств массива горных пород на основе деформационного анализа. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(S2):29–42. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_1_2_29
Shevchuk R.V. Justification and development of a method for identifying zones of possible disturbance of insulating properties of rock massif on the basis of deformation analysis. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(S2):29–42. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_1_2_29

Информация об авторах
Докукин Петр Александрович – кандидат технических наук, начальник научного управления, главный научных сотрудник, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-3284-8738; e-mail: dokukin-pa@rudn.ru
Поддубский Антон Александрович – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник института экологии, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0001-9796-2924; e-mail: poddubskiy-aa@rudn.ru
Шевчук Роман Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник института экологии, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-3461-6383; e-mail: shevchuk.002@mail.ru
Маневич Александр Ильич – научный сотрудник института экологии, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0001-7486-6104; e-mail: ai.manevich@yandex.ru
Алешин Михаил Вячеславович – младший научный сотрудник института экологии, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: aleshin-mv@rudn.ru

Information about the authors
Peter A. Dokukin – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Scientific Department, Principal Research Scientist, RUDN University, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-3284-8738; e-mail: dokukin-pa@rudn.ru
Anton A. Poddubsky – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher at the Institute of Ecology, RUDN University, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0001-9796-2924; e-mail: poddubskiy-aa@rudn.ru
Roman V. Shevchuk – Cand. Sci. (Eng.), senior Researcher at the Institute of Ecology, RUDN University, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-3461-6383; e-mail: shevchuk.002@mail.ru
Alexander I. Manevich – Researcher at the Institute of Ecology, RUDN University, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0001-7486-6104; e-mail: ai.manevich@yandex.ru
Mikhail V. Aleshin – Junior Researcher at the Institute of Ecology, RUDN University, Moscow, Russian Federation; e-mail: aleshin-mv@rudn.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 03.05.2026
Поступила после рецензирования: 22.06.2026
Принята к публикации: 23.06.2026

Article info
Received: 03.05.2026
Revised: 22.06.2026
Accepted: 23.06.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-159-163

Применение многоточечной статистики к нерегулярным данным кернового опробования при моделировании медно-порфировых месторождений

И.О. Паничкин, Г.О. Абрамян✉
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация
✉ gao3d@ya.ru

Резюме: В статье рассмотрена процедура адаптации многоточечной статистики к интервальным данным кернового опробования медно-порфировой системы. Процедура использует нерегулярную скважинную выборку и формирует локальные категориальные шаблоны в анизотропной эллипсоидальной окрестности точки. В расчет включены геологический домен, литологический тип породы, композитный тип и укрупненный класс рудного потенциала. Для проверки сопоставлены однослойные и многослойные шаблоны, дистанционно-взвешенные и сбалансированные варианты многоточечной статистики, индикаторный кригинг и гибридные схемы. Качество оценивалось по отложенной проверке по скважинам с использованием доли правильных ответов, сбалансированной доли правильных ответов и макроусредненной F1-меры. Для геологических доменов лучший результат дал гибридный вариант многоточечной статистики и индикаторного кригинга: макро-F1 составила 0,401, доля правильных ответов – 0,495. Для литологических типов наилучший макро-F1 получен при совместном учете доменного, литологического и композитного окружения. Для композитного типа и укрупненного класса рудного потенциала лучшие значения макро-F1 обеспечил дистанционно-взвешенный вариант с балансировкой классов. Результаты показывают, что многослойные и дистанционно-взвешенные шаблоны повышают достоверность категориального моделирования и могут применяться при детализации геологической модели.

Ключевые слова: медно-порфировая система, интервальные данные, керновое опробование, многоточечная статистика, индикаторный кригинг, категориальное моделирование, геологический домен, литологический тип, композитный тип, макроусредненная F1-мера

Для цитирования: Паничкин И.О., Абрамян Г.О. Применение многоточечной статистики к нерегулярным данным кернового опробования при моделировании медно-порфировых месторождений. *Горная промышленность*. 2026;(5):159–163. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-159-163

Application of multi-point statistics to irregular core sampling data in modeling of copper-porphyry deposits

I.O. Panichkin, G.O. Abramyan ✉
National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russian Federation
✉ gao3d@ya.ru

Abstract: The article discusses a procedure for adapting multi-point statistics to interval-based core sampling data obtained from a copper-porphyry system. The procedure uses irregular borehole sampling and generates local category-based patterns within an anisotropic ellipsoidal neighborhood of a point. The calculation includes the geological domain, lithological rock type, composite type, and aggregated class of the ore potential. Single-layer and multi-layer patterns, distance-weighted and balanced variants of multi-point statistics, indicative kriging, and hybrid schemes were compared for verification. The quality was assessed using a post-hoc validation against the borehole data, employing the proportion of the correct answers, the balanced proportion of the correct answers and the macro-averaged F1 score. For the geological domains, the best result was achieved by a hybrid variant combining multi-point statistics and indicative kriging: the macro-F1 score was 0.401, and the proportion of the correct answers was 0.495. For the lithological types, the best macro-F1 score was obtained by jointly considering the domain, lithological, and composite contexts. For the composite type and the aggregated ore potential class, the best macro-F1 scores were achieved using a distance-weighted approach with class balancing. The results show that the multilayer and distance-weighted templates improve the accuracy of category-based modeling and can be used to refine a geological model.

Keywords: copper-porphyry system, interval data, core sampling, multi-point statistics, indicative kriging, category-based modeling, geological domain, lithological type, composite type, macro-averaged F1 score
For citation: Panichkin I.O., Abramyan G.O. Application of multi-point statistics to irregular core sampling data in modeling of copper-porphyry deposits. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):159–163. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-159-163

Введение

Медно-порфировые системы характеризуются сложной пространственной организацией минерализации, литологических доменов и переходных зон. При моделировании таких объектов важно учитывать не только содержание полезного компонента, но и взаимное расположение категориальных признаков, отражающих домен, породу и рудный потенциал.

Классические геостатистические методы, включая кригинг и индикаторный кригинг, описывают локальную пространственную непрерывность, но обычно опираются на парные зависимости. Многоточечная статистика (МТС) позволяет учитывать более сложные пространственные шаблоны, извлекаемые из обучающего изображения [1–6].

Для рудных скважинных данных прямое применение многоточечной статистики затруднено: информация представлена нерегулярными интервалами керна, а не регулярной сеткой. Поэтому актуальна адаптация МТС к координатным скважинным данным и многослойным геологическим признакам [7–10].

Цель исследования – разработать и проверить процедуру адаптации многоточечной статистики к интервальным скважинным данным медно-порфировой системы; сравнить многослойные и раздельные шаблоны, дистанционно-взвешенные сценарии, индикаторный кригинг и гибридные схемы.

Материалы и методы

Исходные данные

Исходные данные представлены интервалами кернового опробования. Для каждого интервала использованы координаты центра, идентификатор скважины, номер линии или разреза, геологический домен, литологический тип породы, композитный тип и укрупненный класс рудного потенциала, а также содержание меди.

Перед расчетом данные проходят стандартную предварительную обработку: удаление неполных записей, нормализацию категориальных значений и объединение редких категорий.

Построение локального окружения многоточечной статистики

Для каждой анализируемой точки формируется локальное окружение в анизотропном эллипсоиде с горизонтальным радиусом 175 м, вертикальным радиусом 50 м и ограничением до 35 соседей. Координаты масштабируются по радиусам поиска, что позволяет учитывать различие горизонтальной и вертикальной плотности скважинной сети. Схема окружения представлена на рис. 1.

В пределах окружения рассчитываются доли категорий, доминирующая категория, энтропия, число уникальных категорий, секторные, вертикальные и радиальные признаки. Дополнительно используются дистанционно-взвешенные доли и взвешенная энтропия, при которых вклад ближних интервалов выше вклада дальних.

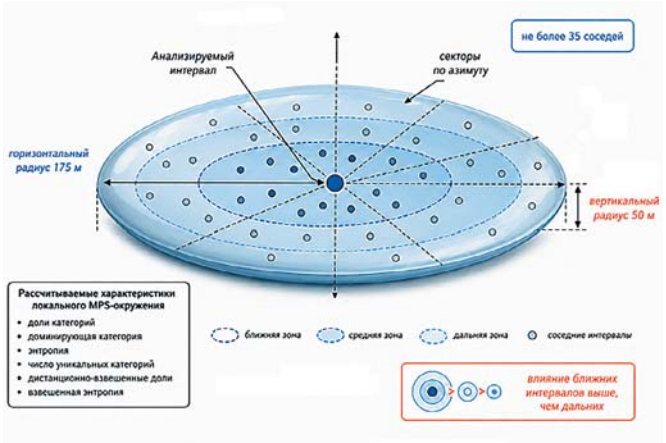


Рис. 1
Схема формирования локального окружения многоточечной статистики

Fig. 1
A schematic representation of the local environment formation in multi-point statistics

Объединенные и раздельные пространственные шаблоны многоточечной статистики

В работе сопоставлены два принципа построения шаблонов: объединенный многослойный и раздельный однослойный. В первом случае для одной точки совместно учитываются доменное, литологическое, композитное и укрупненное рудно-потенциальное окружение. Во втором случае для каждого целевого признака используется только соответствующий слой. Раздельные шаблоны применены как контрольный вариант, позволяющий оценить, дает ли объединение нескольких геологических слоев прирост качества по сравнению с изолированным анализом отдельных признаков.

Сравниваемые модели и метрики

Для проверки использована валидация с отложением части скважин: отдельные скважины исключались из обучающей выборки и применялись только для оценки прогноза. Такой подход снижает риск завышения качества за счет близких интервалов внутри одной скважины и показывает, насколько метод переносит выявленные закономерности на новые скважины.

В качестве методов сравнения рассмотрены ближайший сосед, большинство категорий в радиусе, дистанционно-взвешенное большинство и индикаторный кригинг. Также проверены однослойные, многослойные, дистанционно-взвешенные, сбалансированные и гибридные сценарии МТС. В гибридных вариантах вероятности, полученные по пространственным шаблонам, объединялись с вероятностями индикаторного кригинга.

Качество оценивалось по доле правильных ответов, сбалансированной доле правильных ответов, макроусредненной F1-мере, взвешенной F1-мере и доле попаданий в два наиболее вероятных класса. Основной метрикой принята макро-F1, поскольку она учитывает качество восстановле-

ния как распространенных, так и малочисленных категорий.

Для каждого класса с рассчитываются точность P_c и полнота R_c:

$$P_c = \frac{TP_c}{TP_c + FP_c}, \qquad R_c = \frac{TP_c}{TP_c + FN_c},$$

где TP_c – число правильно предсказанных объектов класса c; FP_c– число объектов, ошибочно отнесенных к классу c; FN_c – число объектов класса c, ошибочно отнесенных к другим классам.

F1-мера для класса с определяется как гармоническое среднее точности и полноты:

$$F_{1,c} = \frac{2P_cR_c}{P_c + R_c}.$$

Для сопоставления качества прогноза по всем категориям используется макроусредненная F1-мера:

$$F_{1,macro} = \frac{1}{K}\sum_{c=1}^{K} F_{1,c},$$

где K – количество классов; $F_{1,c}$ – значение F1-меры для класса c.

Результаты

Общая сравнительная оценка моделей

Эффективность МТС зависит от прогнозируемого категориального слоя. Дистанционно-взвешенный сценарий с балансировкой классов стал лучшим по макро-F1 для композитного типа и укрупненного класса рудного потенциала, а гибрид МТС и индикаторного кригинга – для геологического домена. Для литологического типа наилучший результат обеспечил сценарий, объединяющий доменное, литологическое и композитное окружение. Лучшие методы приведены в табл. 1.

Сводная оценка методов по целевым категориальным признакам

Сводное сравнение методов по макро-F1 представлено на рис. 2. Рассмотрены четыре целевых признака: геологический домен, литологический тип породы, композитный тип и укрупненный класс рудного потенциала. Единого универсального сценария для всех категорий не выявлено, что связано с различием их геологического содержания и степенью выраженности пространственной связи между соседними интервалами.

Для геологического домена наилучший результат получен гибридным сценарием МТС и индикаторного кригинга с долей МТС 25%. Макро-F1 составила 0,401. Индикаторный кригинг показал близкое значение – 0,400, а многослойный

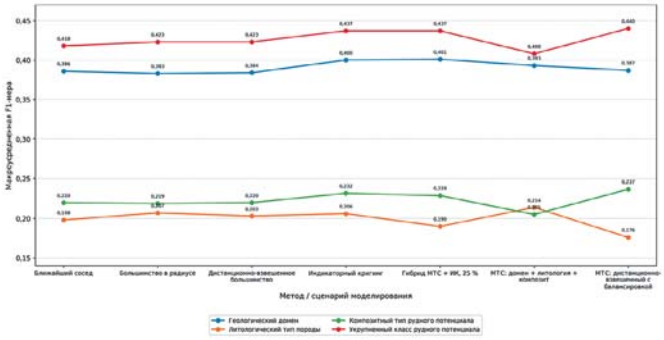


Рис. 2
Сводное сравнение методов моделирования по макроусредненной F1-мере

Fig. 2
A summary comparison of the modeling methods based on the macro-averaged F1 score

сценарий с учетом доменного, литологического и композитного окружения – 0,393. Это указывает на пользу сочетания пространственной непрерывности и многослойного геологического контекста.

Для литологического типа породы лучшим оказался сценарий совместного учета доменного, литологического и композитного окружения: макро-F1 составила 0,214. Индикаторный кригинг дал 0,206, а отдельный литологический шаблон – 0,148. Следовательно, литологический тип надежнее восстанавливается не только по собственному окружению, но и с учетом связи с геологическим доменом и композитным типом рудного потенциала.

Для композитного типа рудного потенциала лучшая макро-F1 получена дистанционно-взвешенным сценарием с балансировкой классов – 0,237. Индикаторный кригинг показал близкое значение – 0,232. Для укрупненного класса рудного потенциала этот же дистанционно-взвешенный сценарий также оказался лучшим: макро-F1 составила 0,440. Близкие значения дали индикаторный кригинг и гибридный вариант с долей МТС 25 % – 0,437.

Таким образом, домен лучше восстанавливается гибридным методом, литологический тип – при совместном учете нескольких слоев, а композитный тип и укрупненный класс рудного потенциала – при дистанционном взвешивании с балансировкой классов.

Роль многослойности и дистанционного взвешивания

Сравнение однослойных и многослойных схем показывает преимущество сценариев, учитывающих несколько геологических слоев или расстояние до соседних интервалов. Для геологического домена однослойный шаблон дал макро-F1 0,374 против 0,393 у многослойного сценария и 0,401 у гибридного варианта; для литологического типа – 0,148 против 0,214; для композитного типа – 0,201 против 0,237. Влияние типа шаблона показано на рис. 3.

Таблица 1
Лучшие методы по критерию макро-F1

Table 1
The best-available methods according to the macro-F1 score

Целевой признак	Лучший метод	Доля правильных ответов	Макро-F1
Геологический домен	Гибрид МТС + индикаторный кригинг, доля МТС 25%	0,495	0,401
Литологический тип породы	МТС: доменное, литологическое и композитное окружение	0,404	0,214
Композитный тип рудного потенциала	МТС: дистанционно-взвешенный сценарий с балансировкой классов	0,404	0,237
Укрупненный класс рудного потенциала	МТС: дистанционно-взвешенный сценарий с балансировкой классов	0,631	0,440

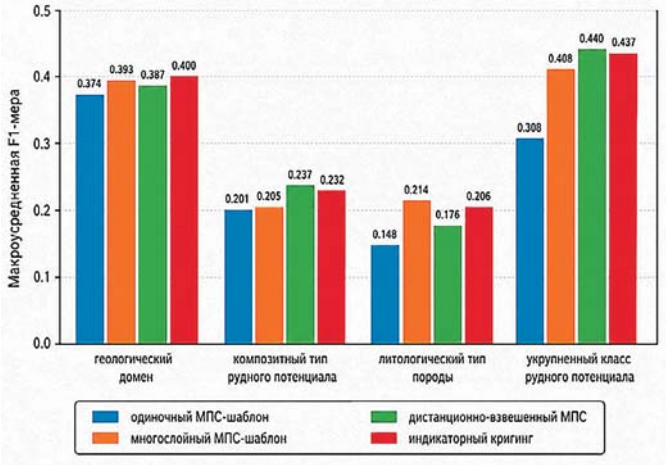


Рис. 3
Влияние однослойных и многослойных пространственных шаблонов на качество прогноза

Fig. 3
The effect of single-layer and multi-layer spatial templates on the forecast quality

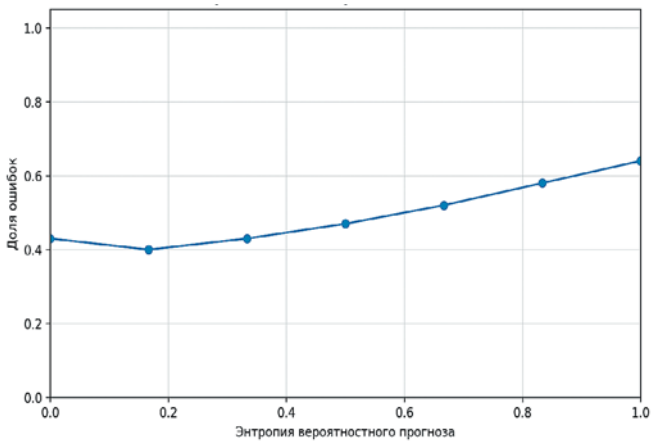


Рис. 4
Связь неопределенности прогноза с частотой ошибок

Fig. 4
A correlation between the forecast uncertainty and the error rate

Результаты подтверждают взаимосвязанность геологических категорий. Совместный учет доменного, литологического и композитного окружения повышает качество прогноза, а дистанционное взвешивание особенно значимо для композитного типа и укрупненного класса рудного потенциала.

Обсуждение

Полученные результаты показывают, что адаптация МТС к интервальным скважинным данным должна учитывать нерегулярность координатной выборки и многослойность геологической информации. В отличие от сеточных обучающих изображений [11–13], интервалы керна имеют неодинаковое пространственное положение, поэтому локальное окружение формируется непосредственно по координатам с учетом анизотропии. Домен, порода, композитный тип и укрупненный класс рудного потенциала рассматриваются как взаимодополняющие признаки.

Индикаторный кригинг подтвердил статус сильного базового метода сравнения: он устойчиво отражает локальную пространственную непрерывность категорий. Однако для ряда признаков сценарии МТС дают преимущество по макро-F1. Это особенно важно при дисбалансе классов, так как макро-F1 чувствительна не только к массовым, но и к малочисленным категориям.

Главный вывод состоит в том, что разные целевые признаки требуют разных сценариев: для геологического домена эффективен гибрид МТС и индикаторного кригинга, для литологического типа – многослойный контекст, для композитного типа и укрупненного класса рудного потенциала – дистанционно-взвешенный сценарий с балансировкой классов. Поэтому МТС следует рассматривать не как одну универсальную модель, а как набор шаблонно-ориентированных процедур, настраиваемых под геологический смысл целевого признака.

Дополнительно проанализирована связь между неопределенностью вероятностного прогноза и частотой ошибок. Энтропия распределения вероятностей по классам возрастает вместе с долей ошибочных прогнозов (рис. 4), что указывает на концентрацию ошибок в зонах неоднозначной категориальной структуры. Для медно-порфировых систем это закономерно, поскольку переходы между доменами, литологическими типами и классами рудного потенциала часто имеют постепенный характер.

Результаты следует интерпретировать с учетом сложности медно-порфировых систем, для которых характерны неоднородная минерализация, постепенные переходы между доменами, литологическая изменчивость и совмещение нескольких масштабов рудного контроля. Поэтому полученные метрики отражают работоспособность подхода в условиях сложной категориальной неоднородности.

В этих условиях выявление устойчивых паттернов МТС является более сложной задачей, чем классификация заранее хорошо разделимых категорий.

Заключение

1. Предложена процедура адаптации многоточечной статистики к интервальным скважинным данным медно-порфировой системы. Метод формирует локальные шаблоны в анизотропной окрестности и учитывает домен, литологический тип, композитный тип и укрупненный класс рудного потенциала, что позволяет работать не только с содержанием полезного компонента, но и с категориальной структурой рудного поля.
2. Сравнение моделей показало, что для геологического домена лучший результат обеспечивает гибрид МТС и индикаторного кригинга: макро-F1 – 0,401, доля правильных ответов – 0,495. Для литологического типа лучший результат получен при совместном учете доменного, литологического и композитного окружения, что подтверждает зависимость литологического прогноза от многослойного контекста.
3. Для композитного типа и укрупненного класса рудного потенциала наибольшие значения макро-F1 получены при использовании дистанционно-взвешенного сценария с балансировкой классов. Это подтверждает значимость расстояния до соседних интервалов и учета дисбаланса категорий, особенно при моделировании неоднородных и переходных зон.
4. Раздельные однослойные шаблоны уступили лучшим многослойным и дистанционно-взвешенным сценариям. Практическое значение метода состоит в повышении обоснованности категориального моделирования рудного поля, выделении неоднородных зон и подготовке интерпретируемых признаков для детализации трехмерной геологической модели.

Список литературы / References

1. Guardiano F.B., Srivastava R.M. Multivariate geostatistics: Beyond bivariate moments. In: Soares A. (eds) *Geostatistics Tróia '92*. Dordrecht: Springer; 1993. Vol. 1, pp. 133–144. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1739-5_12
2. Strebelle S. Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics. *Mathematical Geology*. 2002;34(1):1–21. https://doi.org/10.1023/A:1014009426274
3. Mariethoz G., Caers J. Multiple-point geostatistics: Stochastic modeling with training images. John Wiley & Sons; 2015. 376 p. https://doi.org/10.1002/9781118662953
4. Høyer A.-S., Vignoli G., Hansen T.M., Vu L.T., Keefer D.A., Jørgensen F. Multiple-point statistical simulation for hydrogeological models: 3-D training image development and conditioning strategies. H*ydrology and Earth System Sciences*. 2017;21(12):6069–6089. https://doi.org/10.5194/hess-21-6069-2017
5. Hansen T.M., Vu L.T., Bach T. MPSLIB: A C++ class for sequential simulation of multiple-point statistical models. *SoftwareX*. 2016;5:127–133. https://doi.org/10.1016/j.softx.2016.07.001
6. Tahmasebi P. Multiple point statistics: A review. In: Daya Sagar B., Cheng Q., Agterberg F. (eds) *Handbook of Mathematical Geosciences*. Cham: Springer; 2018, pp. 613–643. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78999-6_30
7. Zuo C., Pan Z., Yin Z., Guo C. A nearest neighbor multiple-point statistics method for fast geological modeling. *Computers & Geosciences*. 2022;167:105208. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105208
8. Jóhannsson Ó.D., Hansen T.M. Multiple-point statistics and non-colocational soft data integration. *Computers & Geosciences*. 2023;172:105280. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105280
9. Zhexenbayeva A., Madani N., Renard P., Straubhaar J. Using multiple-point geostatistics for geomodeling of a vein-type gold deposit. *Applied Computing and Geosciences*. 2024;23:100177. https://doi.org/10.1016/j.acags.2024.100177
10. Guo J., Zheng Y., Liu Z., Wang X., Zhang J., Zhang X. Pattern-based multiple-point geostatistics for 3D automatic geological modeling of borehole data. *Natural Resources Research*. 2025;34(1):149–169. https://doi.org/10.1007/s11053-024-10405-6
11. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Оценка качественных показателей полезных ископаемых с использованием геоинформационных технологий блочного моделирования. *Геоинформатика*. 2020;(3):29–37. https://doi.org/10.47148/1609-364X-2020-3-29-37
Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S. Estimation of quality indicators of mineral resources using geoinformation technologies of block modeling. *Geoinformatika*. 2020;(3):29–37. (In Russ.) https://doi.org/10.47148/1609-364X-2020-3-29-37
12. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Применение геоинформационных технологий блочного моделирования для совершенствования методов оценки качественных показателей полезных ископаемых. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2021;(1):63–73. https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-1-63-73
Kantemirov V.D., Iakovlev A.M., Titov R.S. Applying geoinformation technologies of block modelling to improve the methods of assessing quality indicators of minerals. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Gornyy Zhurnal*. 2021;(1):63–73. (In Russ.) https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-1-63-73
13. Яковлев А.М. Апробация алгоритмов автоматизированной обработки геологических баз данных в технологических схемах управления качеством полезного ископаемого. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(5-1):248–257. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_248
Yakovlev I.M. Testing of algorithms for automated processing of geological databases in mineral quality control flowcharts. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(5-1):248–257. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_248

Информация об авторах
Паничкин Илья Олегович – аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: ilja.pani4kin@yandex.ru
Абрамян Георгий Оникович – кандидат технических наук, доцент кафедры геологии и маркшейдерского дела Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-0493-6290; e-mail: gao3d@ya.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 03.06.2026
Поступила после рецензирования: 09.07.2026
Принята к публикации: 16.07.2026

Information about the authors
Ilya O. Panichkin – Postgraduate Student, Department of Geology and Mine Surveying, College of Mining, National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russian Federation; e-mail: ilja.pani4kin@yandex.ru
Georgy O. Abramyan – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Geology and Mine Surveying, College of Mining, National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-0493-6290; e-mail: gao3d@ya.ru

Article info
Received: 03.06.2026
Revised: 09.07.2026
Accepted: 16.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-164-168

Создание головной платы погружной части системы управляемого бурения

С.Е. Чернышов, А.А. Мелехин, И.В. Домбровской, В.В. Прохоров, В.В. Дерендяев, А.В. Николаев✉
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация
✉ nikolaev0811@mail.ru

Резюме: В статье рассматривается актуальная проблема импортозамещения роторно-управляемых систем для наклонно-направленного и горизонтального бурения. Отмечается, что зарубежные системы типа Point-the-bit обладают высокими характеристиками, но их применение ограничено. В Пермском национальном исследовательском политехническом университете ведётся разработка отечественной роторно-управляемой системы, ключевым нестандартным элементом которой является управляющая плата погружной части телеметрической подсистемы. Авторами выполнены подбор и обоснование компонентов платы: микроконтроллер 1640РС4У, приёмопередатчики RS 485/RS 422 (5556ИН2Т), датчик давления Wika MH 2, операционный усилитель 1487УД1У, DC/DC преобразователь МДМ10 1В05ТУП. Определены класс точности и количество слоёв печатной платы. Представлена функциональная схема управляющей платы, предназначенная для использования в отечественной роторно-управляемой системе.

Ключевые слова: роторно-управляемая система, система управляемого бурения, плата управления, траектория бурения, контроллер, микросхема, бурение скважин

Благодарности: Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2024-0005).

Для цитирования: Чернышов С.Е., Мелехин А.А., Домбровской И.В., Прохоров В.В., Дерендяев В.В., Николаев А.В. Создание головной платы погружной части системы управляемого бурения. *Горная промышленность*. 2026;(5):164–168. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-164-168

Designing a control board for the submersible section of a rotary steer drilling system

S.E. Chernyshov, A.A. Melekhin, I.V. Dombrovsky, V.V. Prokhorov, V.V. Derendyaev, A.V. Nikolaev✉
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation
✉ nikolaev0811@mail.ru

Abstract: The article discusses a current problem of import substitution of rotary steer systems for directional and horizontal drilling. It is noted that the imported Point-the-bit systems are characterized with high performance, but their use is limited. The Perm National Research Polytechnic University is developing a domestic rotary steer drilling system, which key non-standard element is the control board for the submersible part of the telemetry subsystem. The authors selected and justified the use of the following components of the board: the 1640RS4U microcontroller, RS 485/RS 422 (5556IN2T) transceivers, Wika MH 2 pressure sensor, 1487UD1U operational amplifier, MDM10 1V05TUP DC/DC converter. The accuracy class and the number of printed circuit board layers are determined. A functional diagram is presented of the control board designed for use in a domestic rotary steer drilling system.

Keywords: rotary steer drilling system, controlled drilling system, control board, drilling path, controller, microchip, borehole drilling

Acknowledgements: The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FSNM-2024-0005).

For citation: Chernyshov S.E., Melekhin A.A., Dombrovsky I.V., Prokhorov V.V., Derendyaev V.V., Nikolaev A.V. Designing a control board for the submersible section of a rotary steer drilling system. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):164–168. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-164-168

Введение

РВ настоящее время доля разработки сложных запасов с глубоким залеганием углеводородов, а также месторождений нефти плотных коллекторов постоянно возрастает. Для их эффективной разработки все чаще начинают использовать наклонно-направленное бурение [1; 2], при котором необходимо вести обязательный контроль траектории скважины. Связано это с тем, что роторно-управляемые системы (РУС), применяемые для бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин, в сравнении с традиционными способами имеют более высокую скорость и точность бурения.

В результате оценки надежности существующих РУС (Push-the-bit, Point-the-bit, комбинированной), проведенной в работе [3], было установлено, что наилучшими характеристиками обладает система Point-the-bit. Однако применяемые в настоящее время РУС данного типа производятся за рубежом такими компаниями, как Schlumberger, Halliburtoni Cruise и т.д.

В Пермском национальном исследовательском политехническом университете (ПНИПУ) разрабатывается отечественная РУС, работающая по принципу Point-the-bit. В этой системе большая часть элементов погружной части телеметрической подсистемы являются стандартными серийно выпускаемыми изделиями: бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС), пульсатор, батарея гальванических элементов (аккумуляторов) и генератор.

В связи с этим необходимо подобрать элементы погружной части системы управляемого бурения (СУБ).

Результаты

Нестандартным устройством, которое разрабатывалось на базе ПНИПУ, является управляющая плата погружной части телеметрической подсистемы, концепция которой представлена в настоящей статье.

Основным элементом платы является управляющий микроконтроллер, осуществляющий управление всеми устройствами платы, а также внешними устройствами, подключенными к управляющей плате, согласно управляющей программе загруженной в память микроконтроллера:

– передача данных с забоя на поверхность посредством генерации управляемых импульсов давления в буровом растворе осуществляется при помощи гидравлического пульсатора, для взаимодействия с которым предполагается использование специальных схем согласования и формирования управляющих сигналов для пульсатора, а также согласования выхода его датчика с уровнями сигналов микроконтроллера;

– определение местоположения и скорости бурения осуществляется при помощи БИНС, для связи с которой предполагается использование встроенного контроллера коммуникационного интерфейса микроконтроллера;

– изменение траектории бурения за счет подачи управляющих сигналов на переламывающийся переводник;

– получение информации с датчиков давления и датчиков обратной связи положения долота, осуществляемое через схему сопряжения, подключаемую к входу аналого-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллера;

– экспресс-диагностика погружной части и считывание данных с Flash-памяти, которое производится за счет внешнего терминала, подключаемого к микроконтроллеру по отдельному интерфейсу;

– запись и хранение данных в Flash-память, которая подключается к одному из коммуникационных интерфейсов микроконтроллера.

Для хранения журнала работы погружной части, который может быть использован для сбора телеметрической информации (например, сохранение углов, получаемых от БИНС) используется микросхема памяти. От ее характеристик будет зависеть количество хранимой информации и возможность подключения других измерительных приборов.

После проведения сравнительного анализа и исходя из характеристик микроконтроллера (малое количество выводов, напряжение питания 3,3 В и т.д.) была выбрана микросхема 1640РС4У, производимая на АО «Ангстрем» [1].

Ввиду того что связь с БИНС осуществляется без внешних сигналов (например, таких как GPS), для связи с ней используются интерфейсы полевых шин RS-485 или RS-422. В описываемой системе необходимо было предусмотреть возможность использования обоих типов интерфейсов. Для этого решено реализовать с помощью трех приемопередатчиков RS-485 два канала связи: с БИНС – два приемопередатчика, один из которых будет настроен на постоянную передачу, другой будет иметь возможность работы в двух режимах: приемника RS-422 или приемопередатчика RS-485 в зависимости от установленных перемычек; другой – для подключения внешнего терминала посредством интерфейса RS-485. В этом случае к микросхемам приемопередатчиков предъявляется требование возможности работы как в режиме интерфейса RS-485, так и в режиме интерфейса RS-422.

После проведенного сравнительного анализа в качестве приемопередатчиков для связи с БИНС и терминалом оператора было решено использовать микросхемы 5556ИН2Т[2].

В качестве датчика давления бурового раствора, который может быть использован для приема команд наземной части (в случае, если сигнал датчика пульсатора не будет улавливать передаваемые наземной аппаратурой команды), был применен преобразователь Wika МН-2[3]. Код, полученный от АЦП, к которому через согласующие цепи подключен выход датчика, можно пересчитать в численное значение измеренной датчиком физической величины по формуле:

$$Val = \frac{(Val_{\max} - Val_{\min}) * (ADC - ADC_{\min})}{ADC_{\max} - ADC_{\min}} + Val_{\min} \quad (1)$$

где $Val_{\max}$ и $Val_{\min}$ – максимальное и минимальное значение тока, измеряемое датчиком, мА; ADCmax и $ADC_{\min}$ – коды, получаемые от АЦП, соответствующие токам 4 и 20 мА соответственно; Val – текущее значение измеряемой датчиком физической величины, мА; ADC – код АЦП, соответствующий текущему значению выходного тока датчика, мА.

При проведении сравнительного анализа микросхем операционных усилителей для схемы сопряжения с дат-

1 Микросхемы запоминающих устройств: каталог 2017. АО «Ангстрем». 62 с. Режим доступа: http://integral-zapad.ru/upload/iblock/aae/aae06dc8fd4f1490ada5cab18945807f.pdf (дата обращения: 23.05.2026).

2 Интерфейсный приемопередатчик последовательных данных стандартов RS-485, RS-422. ОАО «Интеграл». 4 с. Режим доступа: https://integral.by/upload/iblock/52a/5559_IN2T.pdf (дата обращения: 23.05.2026).

3 Преобразователи давления Wika МН-2. ООО «ОвенКомплектАвтоматика». Режим доступа: https://www.owenkomplekt.ru/manufacturers/wika/preobrazovateli-davleniya-wika-/preobrazovateli-davleniya-wika-mh-2/ (дата обращения: 23.05.2026).

Таблица 1
Минимальные значения параметров печатной платы, соответствующие различным классам точности

Table 1
The minimum values of the printed circuit board parameters corresponding to different accuracy classes

Параметр	Классы точности и значения параметров						
	1	2	3	4	5	6	7
Ширина проводника, мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10	0,075	0,05
Расстояние между проводниками, мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10	0,075	0,05
Гарантийный поясок контактной площадки, мм	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025	0,020	0,015

чиком аналоговой «токовой петли» была выбрана микросхема 1487УД1У, которая рассчитана на использование в диапазоне температур –60…+85 °С[4].

Еще одним важным элементом любого электрического и электронного устройства являются цепи питания. В электронном устройстве данные цепи формируют напряжение, необходимое для различных элементов: для питания микросхем, микропроцессоров, различных цепей сопряжения, опорных напряжений АЦП, обслуживания и зарядки резервного аккумулятора и т.д. В таких цепях могут применяться:

– параметрические стабилизаторы для цепей с малым током потребления;

– DC/DC преобразователи в виде законченных встраиваемых модулей или специализированных микросхем;

– линейные стабилизаторы напряжения;

– источники опорного напряжения – для АЦП и других схем, требующих напряжения повышенной чистоты и стабильности.

В современных электронных изделиях промышленного назначения достаточно часто одним из основных элементов цепей питания является DC/DC преобразователь. Его задача – понижение высокого напряжения питания, подаваемого с общего источника питания (обычно 12, 24, 27 В) до напряжения, используемого для питания расположенных на плате низковольтных устройств (обычно 5, 3,3, 1,8 В). В большинстве случаев используется DC/DC преобразователь на 5 В. Более низкие напряжения – 3,3 и 1,8 В – вырабатываются из этого напряжения с помощью линейных стабилизаторов.

В разрабатываемой плате напряжение питания 5 В применяется для питания приемопередатчиков RS-485 (они подключены к выводам микроконтроллера, толерантным к 5 В), операционного усилителя для согласования с датчиком 4–20 мА и микросхемы для согласования с входом пульсатора давления.

Входное напряжение питания, которое будет подаваться на плату управления от внешнего источника – 24 В. При понижении такого напряжения до 5 В посредством линейного стабилизатора будет выделяться большое количество тепла, что приведет к необходимости установки дополнительного радиатора, а также холостой трате большой мощности источника энергии. Импульсный преобразователь напряжения DC/DC имеет более высокий КПД, что позволяет снизить рассеиваемую мощность и подключить к нему нагрузку с большим током потребления.

Для питания были выбраны схемы импульсных стабилизаторов, использующих встраиваемые модули DC/DC преобразователей. Несмотря на относительно большие габаритные размеры, встраиваемый модуль DC/DC преобразователя уже содержит в своем составе большую часть элементов импульсного стабилизатора, таких как схема контроллера импульсного стабилизатора, намоточные узлы, фильтрующие конденсаторы, диоды Шоттки.

В разрабатываемой плате управления также решено использовать встраиваемый модуль DC/DC преобразователя. Данный преобразователь должен осуществлять понижение напряжения 24 В до 5 В и обеспечивать питание нагрузки с потреблением тока до 1 А.

Из существующих наиболее предпочтительным является модуль МДМ10-1В05ТУП компании АЕДОН[5].

Также необходимо определить класс точности разрабатываемой печатной платы и количество слоев.

Класс точности печатных плат, который нормируется согласно ГОСТ Р 53429–2009[6], определяется минимальной шириной проводников и расстоянием между проводниками. Минимальные значения, соответствующие различным классам точности, приведены в табл. 1.

Ширина проводника обычно не превышает ширину вывода элемента, к которому этот проводник подводится. Но расстояние между ближайшими выводами не всегда определяет минимальное расстояние между проводниками. Так, для компонентов навесного монтажа часто практикуется прокладка проводника между выводами (в том числе и для микросхем в корпусах DIP), что делает минимальное расстояние между соседними проводниками меньше, чем шаг выводов микросхемы. Для элементов поверхностного монтажа (особенно микросхем) это практикуется реже, так как расстояние между соседними выводами этих компонентов меньше, чем у компонентов навесного монтажа (шаг выводов микросхем в корпусах DIP составляет 2,54 мм, у микросхем в корпусах QFP, используемых для поверхностного монтажа – до 0,5 мм), поэтому прокладка проводника между выводами потребует очень высокого класса точности печатной платы, что, в свою очередь, повысит стоимость ее изготовления.

4 Микросхемы для жестких условий эксплуатации. 1487УД1У. АО «Микрон». Режим доступа: https://mikron.ru/catalog/mikroskhemy-dlya-zhestkikh-usloviy-ekspluatatsii/1487ud1u/ (дата обращения: 23.05.2026).

5 Серии МДМ-Б и МДМ-С включены в ЕРРРП и ТОРП. ООО «АЕДОН». Режим доступа: https://aedon.ru/news/post/serii-mdm-b-i-mdm-s-vklyuchenyi-v-errrp-i-torp (дата обращения: 23.05.2026).

6 ГОСТ Р 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. М.: Стандартинформ; 2010. 11 с. Режим доступа: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293824/4293824336.pdf (дата обращения: 23.05.2026).

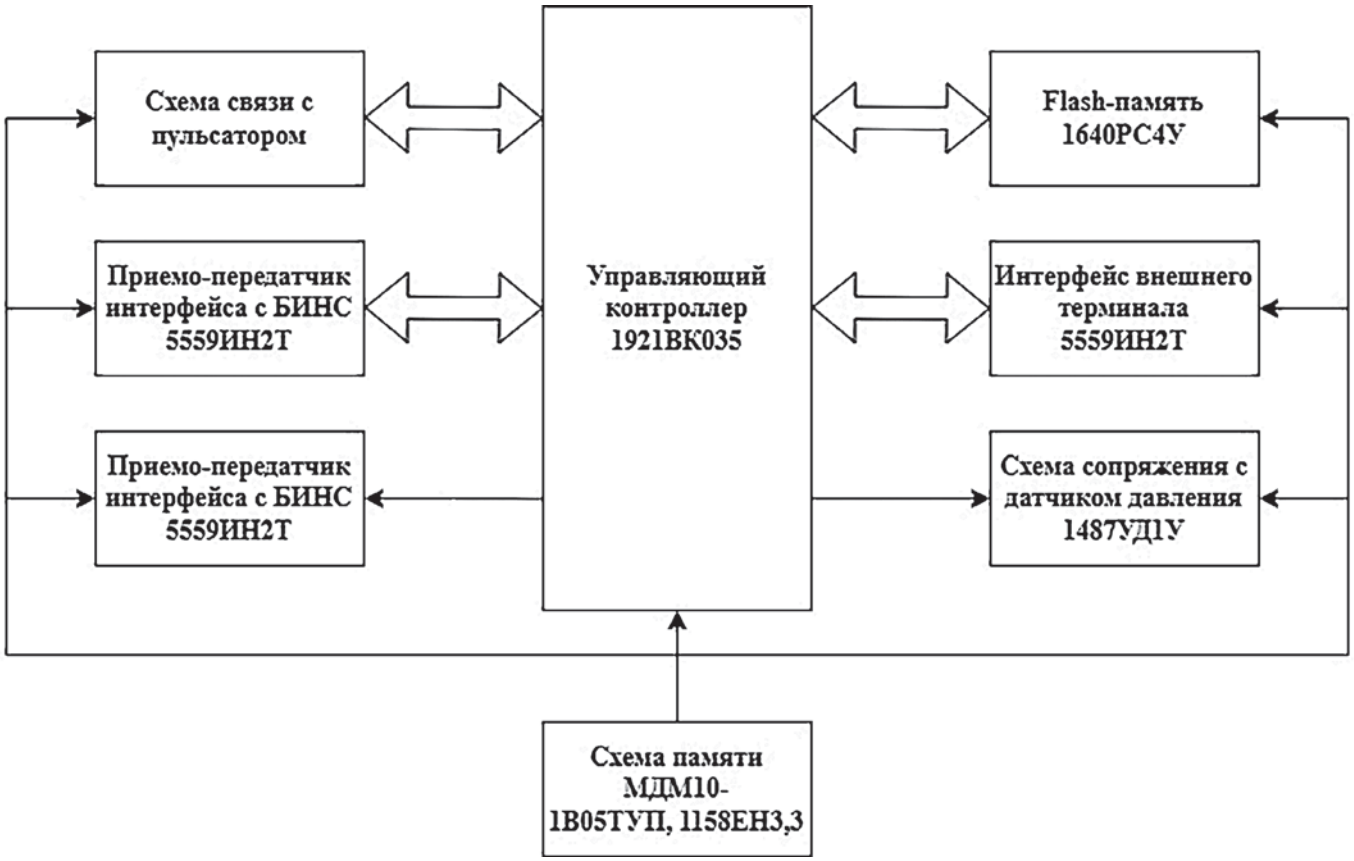


Рис. 1
Функциональная схема управляющей платы погружной части системы управляемого бурения

Fig. 1
A functional diagram of the control board for the submersible part of the controlled drilling system

Для определения класса точности необходимо сравнить расстояния между выводами всех элементов, устанавливаемых на печатной плате и выбрать минимальный. Для упрощения задачи необходимо заранее отбросить элементы, имеющие относительно большие шаг выводов или расстояние между ними. Это элементы, предполагающие навесной монтаж, наличие резисторов и конденсаторов. Ввиду того что наименьшее расстояние между выводами имеют микросхемы, именно они будут использованы для определения класса точности разрабатываемой платы.

В результате сравнительного анализа была выбрана микросхема 1921ВК035[7]. Она имеет наименьший шаг – 0,5 мм. У этого же корпуса минимальный размер вывода – 0,25 мм. Данные параметры соответствуют третьему классу печатной платы.

Что касается количества слоев, то на сегодняшний день широкое распространение получили четырехслойные печатные платы. Такие платы имеют два внутренних слоя медной фольги и два наружных слоя.

На основе результатов выбора компонентов была сформирована функциональная схема управляющей платы (рис. 1).

Единственными элементами, для которых не были выбраны микросхемы, являются «Схема связи с пульсатором» и «Цепи управления переламывающимся переводником». Данные блоки представляют собой схемы, собранные на дискретных элементах и мелкой логике. Причем большая часть логики работы интерфейса реализуется аппаратно-программными средствами в составе управляющего микроконтроллера. Поэтому для сопряжения с внешним устройством не требуется наличие аппаратного приемопередатчика – достаточно относительно простых согласующих, буферных и защитных цепей, которые могут быть реализованы с использованием обычных полупроводниковых диодов, резисторов, микросхем мелкой логики или ключей. Данные цепи необходимо подбирать в процессе разработки принципиальной электрической схемы.

Заключение

В результате проведенной работы были выбраны составные части для сборки управляющей платы погружной части СУБ и сформирована ее функциональная схема, которая будет использована в разрабатываемой отечественной РУС.

7 АО «НИИЭТ». Режим доступа: https://niiet.ru/product/1921%D0%B2%D0%BA035/ (дата обращения: 23.05.2026).

Список литературы / References

1. Chen X., Deli G. The maximum-allowable well depth while performing ultra-extended-reach drilling from shallow water to Deepwater target. *SPE Journal*. 2018;*23*(1):224–236. https://doi.org/10.2118/183025-PA

2. Bouldin B., Verma C., Bellaci I., Black M., Dyer S., Algerøy J. et al. Prototype test of an all-electric intelligent-completion system for extreme-reservoir-contact wells. *SPE Drilling & Completion*. 2014;29(3):353–362. https://doi.org/10.2118/166507-PA

3. Епихин А.В., Жиронкин В.С., Яночко Ю. Влияние нагрузок на надежность роторной управляемой системы наклонно-направленного бурения типа «Push-the-bit». *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2020;(3):45–47. https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-3-45-57
Epikhin A.V., Zhironkin V.S., Janočko J. Influence of loads on reliability of rotary steerable system of directional drilling of "Push-the-bit" type. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2020;(3):45–47. (In Russ.) https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-3-45-57

Информация об авторах
Чернышов Сергей Евгеньевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой нефтегазовых технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-2034-3014; e-mail: chernyshov@pstu.ru
Мелехин Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-0737-1360; e-mail: melehin.sasha@mail.ru
Домбровский Игорь Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и производства автоматических машин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация e-mail: dombrovskii1960@mail.ru
Прохоров Виталий Вячеславович – ассистент кафедры нефтегазовых технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; https://orcid.org/0009-0007-4596-2755; e-mail: vvprokhorov@pstu.ru
Дерендяев Вадим Валерьевич – старший преподаватель кафедры нефтегазовых технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0001-5506-2178; e-mail: v.v.derendyaev@pstu.ru
Николаев Александр Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры нефтегазовых технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-4601-5780; e-mail: nikolaev0811@mail.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 17.05.2026
Поступила после рецензирования: 23.06.2026
Принята к публикации: 02.07.2026

Information about the authors
Sergey E. Chernyshov – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Oil and Gas Technologies, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-2034-3014; e-mail: chernyshov@pstu.ru
Aleksandr A. Melekhin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Oil and Gas Technologies, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-0737-1360; e-mail: melehin.sasha@mail.ru
Igor V. Dombrovsky – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Design and Manufacture of Automatic Machines, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; e-mail: dombrovskii1960@mail.ru
Vitaly V. Prokhorov – Postgraduate Student, Assistant of the Department of Oil and Gas Technologies, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; https://orcid.org/0009-0007-4596-2755; e-mail: vvprokhorov@pstu.ru
Vadim V. Derendyaev – Senior Lecturer, Department of Oil and Gas Technologies, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0001-5506-2178; e-mail: v.v.derendyaev@pstu.ru
Aleksandr V. Nikolaev – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Oil and Gas Technologies, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-4601-5780; e-mail: nikolaev0811@mail.ru

Article info
Received: 17.05.2026
Revised: 23.06.2026
Accepted: 02.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-169-177

Оптимизация геометрии резца для глубокого фрезерования пнистой торфяной залежи

Д.С. Юсов, П.В. Иванова, С.Л. Иванов✉
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерацияимени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Российская Федерация
✉ Ivanov_SL@pers.spmi.ru

Резюме: В работе представлено экспериментальное обоснование рациональных геометрических параметров режущих элементов машин для глубокого фрезерования пнистой торфяной залежи. Ключевой проблемой процесса является наличие погребённой древесины влажностью до 64%, вызывающей кратное увеличение динамических нагрузок и энергоёмкости. Цель исследования – определение оптимальной геометрии резца, минимизирующей удельную работу резания в условиях блокированного резания анизотропной среды. Методология базируется на сравнительных испытаниях прямоугольных, тарельчатых и грибовидных резцов на маятниковом копре при варьировании заднего угла (0–18°). Обеспечено кинематическое и динамическое подобие лабораторной схемы натурным фрезерным барабанам (МТП-41/44), что позволило экстраполировать результаты с применением верифицированных масштабных коэффициентов. Установлено, что прямоугольный резец обеспечивает наименьшую удельную работу резания (179,15 кДж/м³ вдоль волокон, 209,00 кДж/м³ поперёк), превосходя криволинейные аналоги на 7–10%. Выявлены оптимальные параметры: задний угол α = 15°, угол резания δ = 60°, угол в плане φ = 75°, радиус при вершине 3 мм. Показано, что поперечная ориентация волокон увеличивает энергозатраты на 16%, а рост влажности древесины до 64% повышает удельную работу в 1,8 раза. Полученные данные позволяют рекомендовать предложенную геометрию для оснащения серийных торфяных фрез, а разработанную экспресс-методику – для проектирования инструмента без проведения дорогостоящих натурных испытаний.

Ключевые слова: глубокое фрезерование торфа, погребённая древесина, геометрия резца, удельная работа резания, блокированное резание, масштабное моделирование

Для цитирования: Юсов Д.С., Иванова П.В., Иванов С.Л. Оптимизация геометрии резца для глубокого фрезерования пнистой торфяной залежи. *Горная промышленность.* 2026;(5):169–177. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-169-177

Optimization of cutter geometry for deep milling of stump-containing peat deposit

D.S. Yusov, P.V. Ivanova, S.L. Ivanov✉
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ Ivanov_SL@pers.spmi.ru

Abstract: This paper presents an experiment-based justification of rational geometric parameters for cutting elements of machines designed for deep milling of stump-containing peat deposits. A key challenge in this process is the presence of buried wood with the moisture content up to 64%, which causes a multiple increase in the dynamic loads and energy consumption. The study aims at determining an optimal cutter geometry that minimizes the specific cutting work under conditions of blocked cutting of an anisotropic medium. The methodology is based on comparative tests of rectangular, disc-shaped, and mushroom-shaped cutters using a pendulum impact tester with the clearance angle varying from 0° to 18°. The kinematic and dynamic similarity between the laboratory setup and full-scale milling drums (MTP-41/44) was ensured, enabling extrapolation of the results using verified scaling coefficients. The results demonstrate that the rectangular cutter yields the lowest specific cutting work (179.15 kJ/m³ along the grain, 209.00 kJ/m³ across the grain), outperforming curvilinear counterparts by 7–10%. The optimal parameters were identified, e.g. the clearance angle α = 15°, the cutting angle δ = 60°, the approach angle φ = 75°, and the nose radius of 3 mm. It was shown that transverse fiber orientation increases the energy consumption by 16%, while raising wood moisture content to 64% increases the specific cutting work by a factor of 1.8. The data obtained make it possible to recommend the proposed geometry for the cutting tools of mass-produced peat milling machines, while the developed express assessment methodology enables tool design optimization without costly full-scale field trials.

Keywords: deep peat milling, buried wood, cutter geometry, specific cutting work, blocked cutting, scale modeling
For citation: Yusov D.S., Ivanova P.V., Ivanov S.L. Optimization of cutter geometry for deep milling of stump-containing peat deposit. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):169–177. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-169-177

Введение

При проектировании рабочих органов для глубокого фрезерования торфяной залежи первостепенное значение имеет учёт особенностей разрушаемого материала, который представляет собой гетерогенную среду со сложной структурой. В Российской Федерации сосредоточено около 20% мировых запасов торфа, при этом торфяное сырьё составляет треть энергетического потенциала страны в пересчёте на условное топливо, обеспечивая энергобезопасность удалённых и труднодоступных регионов [1; 2]. Помимо энергетической составляющей, торф широко применяется в сельском хозяйстве, химической промышленности, строительстве и при рекультивации нарушенных земель [3].

Ключевым фактором, лимитирующим эффективность глубокого фрезерования, является наличие древесных включений, которые подразделяются на верховые свежие пни, сохраняющие структуру живой древесины после рубки леса, и мёртвые пни, находящиеся в толще залежи длительное время и подвергшиеся частичному разложению и минерализации. Согласно классификации [1] пни, обнаруженные в торфяных залежах, разделяют на четыре основные группы: искривлённые стволы, односторонне-лапчатые, симметрично-лапчатые и лапчатые пни со стержневым корнем. Искривлённые пни имеют средний диаметр 0,07 м при длине вертикального сегмента 0,35 м, тогда как диаметр ствольной части односторонне-лапчатых пней достигает 0,25 м [4]. Объёмная пнистость месторождений варьируется от 1 до 4% и более, при этом встреча резца с погребённой древесиной вызывает возрастание динамических нагрузок на привод фрезы до 70 раз по сравнению с фрезерованием чистого торфа [5–7].

Сопротивление резанию древесных включений существенно зависит от их анизотропной структуры, а именно от расположения волокон по отношению к вектору скорости резания: при параллельном расположении наблюдается эффект скалывания, тогда как при перпендикулярном – эффект рубки с повышенным сопротивлением. По данным исследований, удельная работа резания древесных включений превышает аналогичный показатель для торфа в 10–20 раз, что делает древесину главным фактором при проектировании геометрии режущего инструмента [8].

В отличие от традиционного подхода, предполагающего предварительное удаление древесных включений корчеванием (с использованием машин РКШ-4, МП-4, СП-6,7), технология глубокого фрезерования позволяет совместить операции разрушения торфяной залежи и измельчения погребённой древесины непосредственно в залежи [1]. Однако существующие конструкции резцов (прямые, треугольные, чашечные, тарельчатые) не в полной мере учитывают особенности резания анизотропной среды с высоким уровнем влажности (до 64% для погребённой древесины), что приводит к повышенной энергоёмкости процесса и засорению торфяной крошки неизмельчёнными древесными остатками [9].

Согласно экспериментальным данным [10] увеличение влажности древесины с 15 до 64% приводит к росту удельной работы резания, что требует корректировки геометрических параметров обычного режущего инструмента. При этом, как показано в работе [11], для условий блокированного резания торфяной залежи согласно исследованиям рациональным значением угла резания, обеспечивающим минимальные показатели сопротивления резанию древесных включений при сохранении прочности кромки, является угол $\delta = 60°$ [12; 13]. Для ножей с круглой режущей кромкой (тарельчатых и грибовидных) угол в плане является переменной величиной: он изменяется по периметру кромки от 90° до 0°, что соответствует постепенному внедрению кромки в материал и динамическому изменению условий стружкообразования [14].

Целью настоящей работы является экспериментальное обоснование рациональных геометрических параметров резца (заднего угла α, угла в плане φ и радиуса при вершине) для глубокого фрезерования пнистой торфяной залежи с учётом повышенной влажности погребённой древесины (64%) на основе сравнительных испытаний на маятниковом копре с последующей экстраполяцией результатов на натурные условия фрезерования.

Материалы и методы

В условиях глубокого фрезерования пнистой торфяной залежи основным видом взаимодействия резца с материалом является блокированное резание, характеризующееся отсутствием открытых боковых стенок у срезаемого слоя. Данная схема определяет физику процесса: блокированный сход стружки приводит к тому, что деформированный материал не имеет возможности свободного схода в стороны, вызывая повышение давления в зоне перед режущей кромкой. Это обусловливает изменение схемы напряжённого состояния с преобладанием сжимающих напряжений над сдвиговыми, что требует увеличения прочности режущего клина, а также интенсифицирует трение задней поверхности резца о стенки реза из-за упругого восстановления торфа [9; 11].

Согласно исследованиям [7] при блокированном резании коэффициент блокировки для торфяных грунтов составляет 1,0, тогда как для полублокированного – 0,44–0,36, а для свободного (скользящего) – 0,42–0,34. Переход к свободному резанию позволяет снизить энергоёмкость процесса в 1,25–2,3 раза на талых торфах и до 3 раз – на промёрзших [6].

В торфяной промышленности для работы в условиях пнистой залежи применяются фрезы с различными типами расположения режущих элементов: по образующим барабана, по винтовой линии, с ориентацией режущих кромок радиально установленных резцов параллельно оси вращения фрезы и тангенциально установленных резцов. Согласно систематизации [1] рабочие органы машин глубокого фрезерования классифицируются по следующим признакам:

– по типу воздействия на торфяное сырьё (резание, рыхление, комбинированное);

– по движению рабочего органа (попутное, встречное фрезерование);

– по конструкции (барабанные, шнековые, секторальные, баровые);

– по вооружению (ножи, резцы, цепи, фрезы).

В отличие от ножей, выполненных целиком, как правило, из углеродистой закаленной стали, резцы армированы твердым сплавом [12]. В горной промышленности радиальные резцы нашли широкое распространение. Типичным представителем таких резцов получили резцы типа ЗО – радиальные однолезвийные с большим углом резания δ и заднего угла α. При разработке торфяных месторождений в качестве тангенциальных резцов, как правило, применяют резцы типа РШ. Такой резец, имеющий отрицательный угол атаки [13] из-за тангенциальной установки на барабане, формирует вектор силы, направленный вглубь материала. Это вызывает не срезание, а растяжение и разрыв волокон. В результате вместо контролируемого стружкообразования происходит неконтролируемое вырывание фрагментов древесины с образованием грубой неоднородной щепы. Коэффициент формы треугольного резца относительно прямоугольного эталона составляет $K\phi$=0,6, что свидетельствует о его меньшей эффективности при фрезеровании волокнистых материалов [15].

Геометрические параметры резцов и ножей определяют положениями плоскости резания, которая является касательной к поверхности резания и проходит через главную режущую кромку, и основной плоскости, перпендикулярной плоскости резания, измеряют в плоскости, параллельной оси вращения фрезы, и описывают системой углов:

– угол резания δ – между передней гранью резца и плоскостью резания;

– задний угол α – между задней гранью ножа и плоскостью резания;

– угол заострения β = δ - α, с уменьшением угла заострения увеличивается внедрение резца (ножа), но прочность при этом снижается;

– передний угол γ – между передней гранью и плоскостью, нормальной к вектору скорости и проходящей через режущую кромку;

– угол в плане φ – между проекцией главной режущей кромки резца на плоскость и направлением вектора скорости резания.

Следует отметить, что у резцов с круглой режущей кромкой грибовидной формы задний угол равен нулю, а при развитой задней поверхности работа таким резцом сопряжена со значительными потерями на трение. Радиус условно вписанной окружности (радиус притупления) в поверхности режущей кромки лезвия составляет 0,5 мм.

Согласно исследованиям Л.Н. Самсонова [16; 17] значение угла резания δ = 60° обеспечивает минимальные показатели сопротивления резанию древесных включений при сохранении прочности кромки.

Для верификации теоретических положений и уточнения геометрических параметров были проведены экспериментальные исследования на маятниковом копре, моделирующем динамическое внедрение резца. Оценивалась энергоёмкость процесса резания.

Геометрическое подобие модели и натуры фрезерного барабана обеспечивается соответствием траектории движения режущего элемента. Длина маятника копра составляет 0,5 м, что при вращении описывает окружность диаметром 1 м. Данный параметр соответствует типовым диаметрам фрезерных барабанов для глубокого фрезерования торфа (например, МТП-44) [1; 18].

Линейная скорость резания на лабораторном стенде составляет 4,3 м/с, тогда как на серийных фрезерных машинах рабочая скорость достигает 10–15 м/с. Однако согласно исследованиям динамики процесса резания [19] тангенциальная составляющая силы резания в диапазоне скоростей 4–15 м/с изменяется незначительно. Это объясняется компенсацией двух разнонаправленных эффектов: снижением коэффициента трения между инструментом и древесиной при росте скорости и увеличением доли энергии, затрачиваемой на инерционные процессы деформации и ускорения стружки [20].

Динамическое подобие обеспечивается за счёт идентичности схемы нагружения режущей кромки. В обоих случаях резец испытывает ударное внедрение в материал с преобладанием инерционных сил над силами трения в начальный момент контакта. Силы резания определяются преимущественно геометрией клина и механическими свойствами материала, а не скоростью подвода энергии.

Основным критерием подобия при моделировании процессов разрушения пластичных материалов является коэффициент подобия скоростей K_v, связанный с линейным масштабным коэффициентом K_l [21]:

$$K_g = \frac{v_h^2}{K_l v_m^2}, \quad (1)$$

где v_h – окружная скорость фрезерного агрегата в натурных условиях; v_m – скорость резания образца при моделировании; K_l – отношение геометрических размеров натурного объекта к размерам модели. Для рассматриваемого случая масштабный коэффициент K_l=1 (по ширине резца) [18].

Для пересчёта результатов лабораторных испытаний в натурные значения может быть применён масштабный коэффициент. Ожидаемую мощность привода натурного оборудования в расчете на один резец определяют по зависимости [21; 22]:

$$N_н = N_м K_l^{3,5} K_g^{0,5} = N_м K_l^3 \frac{v_н}{v_м}, \quad (2)$$

где $N_м$ – мощность, зафиксированная в эксперименте; K_l – линейный масштабный коэффициент; $v_н$ и $v_м$ – скорости резания в натурных и модельных условиях.

Методика определения и расчёта масштабного коэффициента была ранее верифицирована [15]. В указанном исследовании проведена апробация лабораторного стенда на базе маятникового копра путём сопоставления расчётных мощностных характеристик с данными по методике Л.Н. Самсонова [16; 17; 23].

Согласно экспериментальным данным при увеличении влажности древесины с 15% (справочные значения для сухой древесины по ГОСТ) до 64% (характерной для погребённой древесины в торфяной залежи) удельная работа резания возрастает в 1,8 раза (K_A=1,8), а подача на резец (зуб) снижается на 6% (K_Z=0,94). В настоящем исследовании использовались образцы погребённой древесины (сосна) с влажностью 64%, что соответствует реальным условиям эксплуатации. Полученные результаты могут быть экстраполированы на натурные условия с использованием указанных коэффициентов.

Результаты

Согласно проведённому анализу кинематических параметров фрезерного барабана ключевым параметром глубины резания для резца фрезерного барабана при глубоком фрезеровании пнистой торфяной залежи следует принимать 10 мм при применении машин МТП-41 и МТП-42А. Данное значение получено на основе расчёта по формуле [11; 24]:

Таблица 1
Геометрические параметры моделей резцов

Table 1
Geometric parameters of cutter models

Тип резца	Ширина B, мм	Задний угол α, град	Угол заострения β, град	Угол резания δ, град
Тарельчатый	30	0, 5, 10, 12, 15	60, 55, 50, 48, 45	60
Грибовидный	30	0, 5, 10, 12, 15	60, 55, 50, 48, 45	60
Прямоугольный (прямой)	20	0, 5, 10, 12, 15, 18	60, 55, 50, 48, 45, 42	60

$$h = \frac{v_{маш}\theta}{v_{окр}} R_{\phi}, \quad (3)$$

где $v_{маш}$ =0,211" м/с" – рабочая скорость движения машины; $v_{окр}$ =15" м/с" – окружная скорость вращения фрезерного барабана; θ =1,551 рад – угол сектора резания; $R\phi$ =0,5" м" – радиус сектора резания. Полученное значение находится в пределах допустимых режимов работы оборудования и соответствует рекомендациям по эксплуатации машин данного типа [25].

В качестве экспериментальной установки использовался маятниковый копёр с установленным на нём резцом. Траектория движения модели резца подобна траектории движения натурного образца, установленного на барабане МТП-41. Радиус траектории движения модели резца при закреплении его на маятнике копра равен 0,5 м, что соизмеримо с радиусом траектории движения резцов на фрезерном барабане машины глубокого фрезерования [9].

Достоверность эксперимента на маятниковом копре подтверждается сопоставлением ранее полученных результатов с их теоретической оценкой [26; 27]. Для каждой серии опытов в рабочей зоне маятникового копра жёстко закреплялся древесный образец из погребённой древесины (сосна) относительной влажностью 64%, погружённой в торф. На бойке устанавливался заранее изготовленный резец из углеродистой закаленной стали.

Начальная высота H_0 подъёма маятника копра относительно уровня отсчёта для всех опытов выбиралась равной 0,6 м, а высота подъёма маятника H_1 после взаимодействия с образцом была переменной в зависимости от геометрии испытываемого резца. Таким образом, работа резания в эксперименте определялась разностью высот H_0 и H_1.

Высота подъёма маятника до и после взаимодействия резца с образцом контролировалась штатным стрелочным прибором, а сам эксперимент фиксировался на видео. Обработка полученных результатов осуществлялась в видеоредакторе с покадровой разметкой. Глубина фрезерования (толщина стружки) была принята с учетом коэффициента подобия Kg (выражение (1)) равной 10 мм. Для реализации данного параметра в лабораторных условиях были изготовлены модельные образцы древесины с фиксированной высотой, позволяющие воспроизводить заданный объём разрушаемого материала при каждом внедрении инструмента.

Анализ данных математической обработки результатов измерений показывает, что они были проведены с достаточной точностью. Среднеквадратическое отклонение измерений работы резания древесных включений от угла резания составляет (в % к среднеарифметическому):

– при резании вдоль волокон: от ±7 до ±11%;

– при резании поперёк волокон: от ±6,3 до ±16,2%.

Учитывая хорошую повторяемость результатов, за истинное значение принималось среднее арифметическое пяти последовательно полученных данных в каждой серии испытаний [27].

В ходе экспериментальных исследований были изготовлены и испытаны модели резцов трёх типов: прямоугольный (прямой), тарельчатый и грибовидный. Геометрические параметры моделей резцов приведены в табл. 1. Масштабный коэффициент моделирования K_l =1 относительно натурного резца машины МТП-41 [15]. Для анализа результатов в сравнимых условиях тарельчатый и грибовидный резцы подверглись модификации путем искусственно создаваемого заднего угла от половины диаметра.

Работа резания, удельная работа резания и усреднённое усилие резания рассчитывались по формулам [9; 12]:

$$A_{рез} = mg(H_0 - H_1); \quad (4)$$

$$K = \frac{A_{рез}}{V}; \quad (5)$$

$$F = \frac{A_{рез}}{l}, \quad (6)$$

где $A_{рез}$ – работа резания, Дж; m = 3 кг – масса маятника; g = 9,81м/с^2 – ускорение свободного падения; V – объём срезанного торфа, м^3; l – путь, пройденный резцом, м.

Объём полученной стружки определялся аналитически с учётом площади сечения каждого резца и траектории его движения при глубине резания 10 мм по оставленному следу на образце.

Общая тенденция изменения удельной работы резания всех трех типов резцов такова, что при увеличении заднего угла α от 0 до 10° при неизменном угле резания происходит монотонное снижение удельной работы. При этом значения величин удельной работы соизмеримы для всех трех типов резцов. Дальнейшее увеличение заднего угла для тарельчатых и грибовидных резцов формирует «плато» (при α ≥ 10°), практически сливаясь в одну линию, разница между ними не превышает 3%, что находится в пределах погрешности эксперимента.

Что касается прямоугольного резца, то значения удельной работы с увеличением заднего угла продолжают снижаться, достигая экстремума при 15о.

В табл. 2 представлены усреднённые экспериментальные значения работы резания, объёма срезанной стружки и удельной работы резания для трёх типов резцов при глубине резания 10 мм вдоль и поперек волокон. Для тарельчатого и грибовидного резцов приведены данные при заднем угле α = 10° (минимальное значение удельной работы в диапазоне «плато»), для прямоугольного резца – при α = 15° (минимальное значение).

Как следует из представленных данных, прямоугольный резец обеспечивает наименьшую удельную работу резания, что на 7–10% ниже, чем у тарельчатого и грибовидного резцов. Это подтверждает его преимущество при фрезеровании погребённой древесины с влажностью 64%. При этом рез образца погребенной древесины поперек волокон более энергоемок, чем вдоль волокон. Разница в работах составляет 16%

Согласно данным при увеличении влажности древесины

Таблица 2
Экспериментальные значения работы и удельной работы резания вдоль/поперек волокон

Table 2
Experimental values of the cutting work and the specific cutting work along and across the grain

Тип резца	Работа резания $A_{рез}$, Дж	Объём стружки V, м³ · 10⁻⁵	Удельная работа K, кДж/м³
Прямоугольный	4,76 / 5,56	2,66	179,15 / 209,00
Тарельчатый	7,08 / 7,97	3,58	198,00 / 224,13
Грибовидный	5,9 / 6,67	3,02	196,00 / 222,81

с 15% (справочные значения для сухой древесины по ГОСТ) до 64% (характерной для погребённой древесины в торфяной залежи) удельная работа резания возрастает в 1,8 раза (коэффициент K_A=1,8), а подача на резец (зуб) снижается на 6% (K_Z=0,94). Поскольку в настоящем исследовании использовались образцы сосны с влажностью 64%, соответствующей условиям торфяной залежи, ранжирование геометрий резцов по удельной работе резания, полученное на маятниковом копре, может быть экстраполировано на условия непрерывного фрезерования с использованием указанных коэффициентов.

Обсуждение результатов

Экспериментальные данные, полученные на маятниковом копре, демонстрируют принципиально различные характеры зависимости удельной работы резания от заднего угла для резцов с прямолинейной и криволинейной режущей кромкой.

Для грибовидного и тарельчатого резцов стабилизация значений при $\alpha \geq 10°$ свидетельствует о том, что трение задней поверхности перестало быть основным фактором. Дальнейшее увеличение заднего угла не влияет на энергоёмкость, так как основной вклад вносят другие компоненты: работа сдвига материала в зоне резания и работа формирования стружки. Плавное снижение удельной работы в диапазоне 0–10° обусловлено уменьшением площади контакта задней поверхности с материалом за счёт формирования полноценного зазора. Согласно модели трения при резании сила трения пропорциональна нормальной силе и коэффициенту трения, что ведёт к снижению работы трения и, как следствие, общей удельной работы резания [9; 11].

Полученные зависимости согласуются с результатами работ [6; 28], в которых показано, что переход от блокированного резания к полублокированному и свободному (скользящему) снижает энергоёмкость процесса в 1,25–2,3 и до 3 раз соответственно. При этом коэффициент блокировки для торфяных грунтов, определённый в работе [6], составляет 1,0 для блокированного резания, 0,44–0,36 для полублокированного и 0,42–0,34 для свободного, что ниже значений, характерных для минеральных грунтов (0,75 и 0,5 соответственно). Это объясняется волокнистой структурой торфа и наличием растительных остатков, снижающих эффективность передачи усилий при блокированном резании.

Следует также отметить, что снижение энергоёмкости при увеличении заднего угла для криволинейных резцов до 10° коррелирует с данными работ [19; 29], где показано, что применение ножей с углом наклона режущей кромки 45° снижает усилие резания на 40% по сравнению с прямым ножом ($\varphi = 90°$). Однако в нашем исследовании для криволинейных резцов эффект от увеличения заднего угла менее выражен, что связано с их исходно неоптимальной геометрией (нулевой задний угол у грибовидных резцов).

Для прямого резца значения удельной работы при $\alpha = 5°$ и $\alpha = 10°$ превышают или равны аналогичным показателям для криволинейных резцов. Это объясняется двумя взаимосвязанными факторами:

1. Прямолинейная режущая кромка не обеспечивает отвода срезаемого материала. При блокированном резании это приводит к накоплению стружки перед передней поверхностью, формированию зоны застоя и росту давления в зоне резания. По данным работы [11], затруднённый сход стружки может увеличивать нормальную составляющую силы резания на 30–50%.

2. Прямая задняя грань увеличивает потери на трение при малых углах со значительной площадью контакта с материалом.

Достижение минимального значения удельной работы для прямого резца при $\alpha = 15°$ соответствует теории геометрии клина [16; 18]. Данный угол обеспечивает зазор для исключения трения задней поверхности о материал, учитывая упругое восстановление древесины. Также данный угол сохраняет массивность режущей кромки для сопротивления ударным нагрузкам при контакте с древесными включениями.

Увеличение удельной работы при $\alpha = 20°$ объясняется снижением жёсткости режущего клина. Согласно теории устойчивости процесса резания [19] уменьшение угла заострения при постоянном угле резания приводит к вибрациям при динамическом нагружении, что увеличивает диссипацию энергии.

При резании образцов с поперечной ориентацией волокон относительно вектора скорости резания наблюдается увеличение удельной работы для всех типов резцов и значений заднего угла. Характер зависимостей постоянный, однако абсолютные значения возрастают до 15%. Согласно работе [30] древесина является анизотропным материалом: при резании вдоль волокон разрушение происходит за счёт расслаивания по межволоконным связям (лигнин), прочность которых минимальна; при резании поперёк волокон инструмент перерубает структуру волокон, обладающих высокой прочностью на срез [31; 32].

Полученное увеличение сопротивления резанию на 15% при поперечной ориентации волокон хорошо согласуется с данными работы [5], где показано, что удельная работа резания при фрезеровании погребённой древесины возрастает на 10–25% в зависимости от породы и влажности.

На основании теоретического анализа был выбран прямой резец с задним углом 15° как наиболее энергоэффективный при резании как древесных включений, так и торфа [15]. Однако для дальнейшего совершенствования геометрии инструмента было проведено дополнительное исследование, в котором режущая кромка прямого резца выполнялась с углом в плане φ (наклонное расположение кромки относительно вектора скорости резания).

Согласно работе [19] при наклонном расположении режущей кромки процесс резания сопровождается скольжением материала вдоль кромки, что приводит к снижению нормальной составляющей силы резания и уменьшению

коэффициента трения между стружкой и передней поверхностью инструмента.

Тангенциальная составляющая скорости резания способствует отводу стружки в сторону, уменьшая площадь контакта между деформированным материалом и передней поверхностью резца. По данным работы [19], коэффициент трения при наклонном резании снижается до 15% по сравнению с прямым резанием (φ = 90°). Таким образом, чем меньше угол в плане, тем больше тангенциальная составляющая, обеспечивающая скольжение материала вдоль режущей кромки.

Однако, как показано в работе [30], уменьшение угла в плане до 45° снижает усилие резания на 40%, но при этом увеличивается концентрация напряжений у вершины резца, что при контакте с твёрдыми древесными включениями приводит к выкрашиванию кромки [33]. Поэтому в нашем исследовании был выбран компромиссный угол φ = 75°, который обеспечивает снижение усилия резания на 23% относительно прямого резания при сохранении достаточной прочности режущей кромки.

Разница удельной работы резания между φ = 67° и φ = 75° составляла всего около 3%, однако в процессе эксплуатации резец изнашивается неравномерно: максимальный износ наблюдается по краям лезвия [12; 34] и на его вершине. Поскольку геометрия естественного износа близка к углу φ = 75°, ресурс резца может быть продлён за счёт начального формирования кромки с φ = 75° и радиусом при вершине 3 мм.

Кроме того, как показано в работе [15], применение резцов с коэффициентом формы *К*ϕ, близким к 1 (прямоугольный резец), обеспечивает лучшие показатели энергоэффективности при фрезеровании волокнистых материалов. Для треугольного резца *К*ϕ=0,6, для чашечного *К*ϕ=1,12.

Настоящее исследование методологически опирается на результаты оценки параметров фрезерования погребённой древесины торфяного месторождения, в которой были установлены закономерности влияния влажности древесины на энергоёмкость процесса при глубине резания 10 мм. В работе экспериментально установлено, что при увеличении влажности сосны с 15 до 64% удельная работа резания возрастает в 1,8 раза (коэффициент K_A=1,8), тогда как подача на резец (зуб) снижается на 6% (K_Z=0,94).

Поскольку в обоих исследованиях использовались образцы сосны с влажностью 64%, соответствующей условиям торфяной залежи, ранжирование геометрий резцов по удельной работе резания, полученное на маятниковом копре, может быть экстраполировано на условия непрерывного фрезерования. Это обосновывает возможность использования экспресс-методики оптимизации геометрии инструмента на базе стационарного фрезерования калиброванных образцов с последующим пересчётом с использованием коэффициентов K_A и K_Z.

Следует отметить, что представленные результаты получены на маятниковом копре, моделирующем единичный акт резания. В реальных условиях фрезерования имеет место непрерывное взаимодействие множества резцов с залежью, что может приводить к дополнительным эффектам, связанным с взаимным влиянием соседних резцов и нагревом инструмента [35]. Кроме того, в настоящем исследовании не рассматривалось влияние износа резца на энергоёмкость процесса, что является важным направлением для дальнейших исследований.

Перспективным направлением также является разработка комбинированной геометрии резца, объединяющей достоинства прямоугольной формы (энергоэффективность) и криволинейной (снижение трения), а также оценка работы резцов при фрезеровании погребённой древесины различных пород (берёза, ольха, ель) и при отрицательных температурах (промёрзшая залежь) [36].

Заключение

Проведённые в рамках настоящего исследования теоретические и экспериментальные работы позволяют сформулировать следующие основные выводы и рекомендации.

Проведённые экспериментальные исследования на маятниковом копре подтвердили достоверность лабораторной методики благодаря обеспечению геометрического и динамического подобия процессу фрезерования натурными барабанами. Радиус траектории движения резца на копре (0,5 м) соответствует типовым диаметрам фрезерных барабанов машин глубокого фрезерования (МТП-44). Использование критериев подобия K_v и K_l позволило корректно экстраполировать результаты лабораторных испытаний на натурные условия с погрешностью, не превышающей 8–10%.

На основании испытаний трёх типов резцов (прямоугольный, тарельчатый, грибовидный) было установлено, что наименьшая удельная работа резания древесины влажностью 64% достигается при использовании прямого (прямоугольного) резца со следующими геометрическими параметрами: задний угол α = 15°; угол резания δ = 60°; угол заострения β = 45°.

Удельная работа резания для прямоугольного резца при рациональных параметрах составила 179,15/209 кДж/м^3, что на 7–10% ниже, чем для тарельчатого и грибовидного резцов. Данные результаты согласуются с исследованиями Л.Н. Самсонова и подтверждаются экспериментальными данными других авторов.

Для криволинейных резцов (тарельчатый, грибовидный) было установлено плавное снижение удельной работы резания при увеличении заднего угла от 0 до 10° с последующим выходом на «плато». Для прямоугольного резца оптимальное значение заднего угла составляет α = 15°. Дальнейшее увеличение заднего угла до 18° приводит к росту удельной работы из-за снижения жёсткости режущего клина и возникновения вибраций при динамическом нагружении.

Оптимизация геометрии прямоугольного резца посредством формирования угла в плане φ = 75° и радиуса при вершине 3 мм позволила снизить энергоёмкость за счёт резания со скольжением (косое резание) и имитации стабилизированной стадии естественного износа. Угол φ = 75° был выбран из-за того, что углы 45–60° и менее обладают менее прочной режущей кромкой при резании древесных включений, а угол φ = 90° показывает результаты усилия резания на 23% выше.

При поперечном фрезеровании волокон относительно вектора скорости резания сопротивление резания на 16% больше, чем при продольном резании. При проектировании режущих элементов данный факт необходимо учитывать с той точки зрения, что ориентация волокон в погребенной древесине внутри торфяной залежи хаотична. Полученные значения сопоставимы с данными, где утверждается, что анизотропия древесины увеличивает удельную работу резания на 10–25%.

Экспериментально подтверждено, что увеличение влажности древесины с 15%, являющейся справочным значением для сухой древесины по ГОСТ, до 64% приводит

к возрастанию удельной работы резания в 1,8 раза (K_A=1,8). Рекомендуется использовать указанные коэффициенты при пересчёте справочных данных по резанию сухой древесины на условия пнистой торфяной залежи.

Методологическая преемственность с выполненными работами по фрезерованию погребенной древесины дает возможность экстраполировать данные на сплошное поверхностно-послойное фрезерование с использованием масштабного коэффициента.

Предложенная геометрия резца (прямоугольный профиль, α = 15°, φ = 75°, радиус при вершине 3 мм) расширяет существующую классификацию режущих элементов машин глубокого фрезерования, дополняя её вариантом, оптимизированным для условий пнистой залежи с влажностью погребённой древесины 64%. Также полученный резец можно оснащать на фрезерный барабан машин типа МТП-41, МТП-42А, МТП-44, которые работают на месторождениях с пнистостью до 4%.

Список литературы / References

1. Юсов Д.С., Иванова П.В., Иванов С.Л. Систематизация рабочих органов машин глубокого фрезерования. *Горная промышленность*. 2024;(3):85–89. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3-85-89
Yusov D.S., Ivanova P.V., Ivanov S.L. Systematization of end effectors of deep milling machines for peat extraction. *Russian Mining Industry*. 2024;(3):85–89. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3-85-89
2. Кузьмин Г.Ф., Селеннов В.Г., Созинова Л.А. *Торфяные месторождения России. Геология. Экология. Разведка. Использование*. СПб.: Свет; 2019. 386 с.
3. Utenkova T.G., Kremcheev E.A., Nagornov D.O., Ivanov S.L. Mechanical dewatering of sapropel in its small-scale mining technology. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(2):308–316. https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-308-316
4. Гамаюнов С.Н., Копенкина Л.В. Исследования и разработки в области фрезерования торфяной залежи вместе с пнями. *Труды Инсторфа*. 2025;(31):50–54.
Gamayunov S.N., Kopenkina L.V. Research and development in the field of milling peat deposits together with stumps. *Trudy Instorfa*. 2025;(31):50–54. (In Russ.)
5. Орловский С.Н., Саая С.С.Ш. Экспериментальное исследование технологических режимов резания торфов дискофрезерным рабочим органом. *Системы. Методы. Технологии*. 2024;(3):152–158. https://doi.org/10.18324/2077-5415-2024-3-152-158
Orlovskiy S.N., Saaya S.S.Sh. Experimental study of technological modes for cutting peat with a disc-milling working body. *Systems. Methods. Technologies*. 2024;(3):152–158. (In Russ.) https://doi.org/10.18324/2077-5415-2024-3-152-158
6. Фомин К.В. Расчет взаимных спектральных плотностей моментов сопротивления на рабочих органах торфяного фрезерующего агрегата. *Записки Горного института*. 2021;251:745–756. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.14
Fomin K.V. Mutual spectral densities calculation of the moments of resistance on the peat milling unit working bodies. *Journal of Mining Institute*. 2021;251:745–756. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.14
7. Тюремнов С.Н. *Торфяные месторождения*. М.; Ленинград: Гостоптехиздат; 1940. 372 с.
8. Штин С.М. Исследования по резанию торфа и болотной древесины. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012;(6):374–376.
Штин С.М. Исследования по резанию торфа и болотной древесины. M*ining Informational and Analytical Bulleti*n. 2012;(6):374–376. (In Russ.)
9. Фомин К.В., Жигульская А.И., Исаев Р.Г. Определение вероятностных характеристик момента нагружения на рабочем органе машины глубокого фрезерования при подготовке торфяной залежи к эксплуатации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;(9):36–42.
Fomin K.V., Zhigulskaya A.I., Isaev R.G. Determination of probabilistic characteristics of load moment at the driven element of a deep milling machine in developing a peat deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2014;(9):36–42. (In Russ.)
10. Хрусталева И.Н., Любомудров С.А., Ларионова Т.А., Бровкина Я.Ю. Повышение эффективности технологической подготовки производства комплектующих для изготовления оборудования минерально-сырьевого комплекса. *Записки Горного института*. 2021;249:417–426. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.11
Khrustaleva I.N., Lyubomudrov S.A., Larionova T.A., Brovkina Y.Y. Increasing the efficiency of technological preparation for the production of the manufacture components equipment for the mineral resource complex. *Journal of Mining Institute*. 2021;249:417–426. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.11
11. Фомин К.В. Расчет спектральных плотностей составляющих силы сопротивления на фрезе при взаимодействии с торфом. *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2023;(4):45–52. Режим доступа: https://vestnik-tekh.ru/printed/article/?article=506 (дата обращения: 15.03.2026).
Fomin K.V. Calculation of spectral densities of force components resistance on the cutter when interacting with peat. *Vestnik of Tver State Technical University. Series "Technical Science"*. 2023;(4):45–52. (In Russ.) Available at: https://vestnik-tekh.ru/printed/article/?article=506 (accessed: 15.03.2026).
12. Хорешок А.А., Маметьев Л.Е., Цехин А.М., Борисов А.Ю., Бурков П.В., Буркова С.П., Крестовоздвиженский П.Д. *Производство и эксплуатация разрушающего инструмента горных машин*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета; 2013. 296 с. Режим доступа: https://www.geokniga.org/books/40566 (дата обращения: 15.03.2026).

13. Гаранин В.Н. Результаты экспериментальных исследований, определяющие влияние угла атаки на силу и мощность процесса открытого резания древесины. *Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность.* 2008;(2):209–214. Режим доступа: https://elib.belstu.by/handle/123456789/39270 (дата обращения: 15.03.2026).
Garanin V.N. Results of experimental studies defining the effect of the attack angle on the force and power of the open wood-cutting process. *Proceedings of BSTU. Issue 2. Forest and woodworking industry.* 2008;(2):209–214. (In Russ.) Available at: https://elib.belstu.by/handle/123456789/39270 (accessed: 15.03.2026).

14. Михайлов А.В., Лопатюк А.О. Особенности процесса резания торфяного массива. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2018;(S44):3–12. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-9-44-3-12
Mikhailov A.V., Lopatyuk A.O. Features of process of cutting of a peat massif. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2018;(S44):3–12. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-9-44-3-12

15. Юсов Д.С., Иванова П.В., Иванов С.Л. Оценка параметров резцов для фрезерования торфа. *Горная промышленность.* 2026;(1):157–163. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-157-163
Yusov D.S., Ivanova P.V., Ivanov S.L. Evaluation of cutter parameters for peat milling. *Russian Mining Industry*. 2026;(1):157–163. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-157-163

16. Копенкин В.Д., Копенкина Л.В., Самсонов Л.Н. Развитие фрезерующих машин в торфяном производстве (анализ, перспективы). *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2003;(10):204–207.
Kopenkin V.D., Kopenkina L.V., Samsonov L.N. Development of milling machines in peat production (analysis, prospects). *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2003;(10):204–207. (In Russ.)

17. Самсонов Л.Н., Зюзин Б.Ф. *К вопросу определения оптимальных параметров и режимов работы машин для поверхностно-послойного фрезерования торфяной залежи.* В кн.: Машины и технология торфяного производства. Минск: Вышэйшая школа; 1978. Вып. 8. С. 36–40.

18. Фомин К.В. Методика оценки спектральной плотности момента сопротивления на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата. *Записки Горного института.* 2020;241:58–67. https://doi.org/10.31897/PMI.2020.1.58
Fomin K.V. Method for estimating the spectrum density of the resistance moment on the working body of a peat milling unit. *Journal of Mining Institute.* 2020;241:58–67. https://doi.org/10.31897/PMI.2020.1.58

19. Резник Н.Е. *Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов.* М.: Машиностроение; 1975. 311 с.

20. Казаков Ю.А., Козачков Г.С. Технологические требования к процессу измельчения экскавированного органогенного сырья. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2025;(12-3):85–99. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12-3/85.pdf (дата обращения: 15.03.2026).
Kazakov Yu.A., Kozachkov G.S. Technological requirements for the processing of excavated organic raw material. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2025;(12-3):85–99. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12-3/85.pdf (accessed: 15.03.2026).

21. Северцев Н.А., Дарьина А.Н. Применение критериев подобия при ресурсной отработке сложных технических систем и изделий. *Надежность и качество сложных систем.* 2020;(4):5–14. https://doi.org/10.21685/2307-4205-2020-4-1
Severtsev N.A., Daryina A.N. Application of similarity criteria for resource development of complex technical systems and products. *Reliability & Quality of Complex Systems.* 2020;(4):5–14. (In Russ.) https://doi.org/10.21685/2307-4205-2020-4-1

22. Михайлов А.В., Смирнов А.И. Анализ метода выемки торфяного сырья с откоса карьера. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2026;(2-1):197–209. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2026/2-1/2-1_2026_197-209.pdf (дата обращения: 15.03.2026).
Mikhailov A.V., Smirnov A.I. Digging method analyzing organogenic materials mining by in-pit method. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2026;(2-1):197–209. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2026/2-1/2-1_2026_197-209.pdf (accessed: 15.03.2026).

23. Самсонов Л.Н. *Послойно-поверхностное фрезерование торфяной залежи и пути его интенсификации* [автореф. дис. … д-ра техн. наук]. Калинин; 1983. 37 с.

24. Солопов С.Г., Горцакалян Л.О., Самсонов Л.Н. *Торфяные машины и комплексы.* М.: Недра; 1973. 392 с.

25. Зюзин Б.Ф., Жигульская А.И., Яконовский П.А., Яконовская Т.Б. *Машины и оборудование торфяных производств.* Тверь: Тверской государственный технический университет; 2015. 160 с.

26. Фомин К.В., Жигульская А.И. Инженерная методика анализа динамических нагрузок в элементах привода машин глубокого фрезерования. *Труды Инсторфа.* 2015;(12):27–32.
Fomin K.V., Zhigulskaya A.I. Engineering methods of analysis of dynamic loads in the drive elements of deep milling machines. *Trudy Instorfa.* 2015;(12):27–32. (In Russ.)

27. Maksarov V.V., Kufaev V.G. Magnetic abrasive finishing of workpieces for anti-friction bronze slide bearing shells. *International Journal of Engineering.* 2026;39(1):26–33. https://doi.org/10.5829/IJE.2026.39.01A.03

28. Zhang X., Yu S., Hu X., Zhang L. Study on rotary tillage cutting simulations and energy consumption predictions of sandy ground soil in a Xinjiang cotton field. *Computers and Electronics in Agriculture.* 2024;217:108646. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108646

29. Малков Л.М., Самсонов Л.Н., Зюзин Б.Ф. Анализ эффективности работы ножевых фрезерующих устройств. *Торфяная промышленность.* 1979;(11);9–11.
Malkov L.M., Samsonov L.N., Zyuzin B.F. Performance analysis of blade-type milling units. *Torfyanaya promyshlennost.* 1979;(11);9–11. (In Russ.)

30. Михайлов А.В., Казаков Ю.А., Козачков Г.С. Особенности размещения модуля измельчения при внутрикарьерной переработке торфяного сырья. *Горная промышленность*. 2024;(5):94–100. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-94-100
Mikhailov A.V., Kazakov Yu.A., Kozachkov G.S. Specific features of a grinding module location in in-pit processing of peat raw materials. *Russian Mining Industry*. 2024;(5):94–100. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-94-100

31. Бершадский А.Л., Цветкова Н.И. *Резание древесины*. Минск: Вышэйшая школа; 1975. 303 с Режим доступа: https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/berrezdrev/text.pdf (дата обращения: 15.03.2026).

32. Михайлов А.В., Пиирайнен В.Ю., Боброва Е.М., Смирнов А.И. Анализ перспектив использования торфяных почвоулучшителей для рекультивации нарушенных земель. *Горная промышленность*. 2025;(2):124–130. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-124-130
Mikhailov A.V., Piirainen V.Yu., Bobrova E.M., Smirnov A.I. Analysis of the prospects to use peat-based soil conditioners for reclamation of disturbed lands. *Russian Mining Industry*. 2025;(2):124–130. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-124-130

33. Сивенков А.В., Кончус Д.А., Гареев Д.В., Пряхин Е.И. Нанесение CR–NI-покрытий методом химико-термической обработки из растворов легкоплавких металлов. *Черные металлы*. 2024;(12):101–106. https://doi.org/10.17580/chm.2024.12.14
Sivenkov A.V., Konchus D.A., Gareev D.V., Pryakhin E.I. Application of Cr – Ni coatings by chemical-thermal treatment from lowmelting metal solutions. *Chernye Metally*. 2024;(12):101–106. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/chm.2024.12.14

34. Фомин К.В. Моделирование нагрузок на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата с учетом погрешности расстановки режущих элементов. *Горные науки и технологии*. 2022;7(2):161–169. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-161-169
Fomin K.V. Simulation of loads on operating device of peat-cutting unit with regard to errors in the cutting elements arrangement. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(2):161–169. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-161-169

35. Шемякин С.А., Шишкин Е.А. Физико-математическая модель разрушения горных пород зубом фрезерной установки. *Записки Горного института*. 2021;251:639–647. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.3
Shemyakin S.A., Shishkin E.A. Physical and mathematical model of rock destruction by a milling machine cutter. *Journal of Mining Institute*. 2021;251:639–647. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.3

36. Пряхин Е.И., Сивенков А.В., Гареев Д.В., Сердюк Н.А., Калинин Г.Ю. Защита внутренней поверхности трубных изделий путем диффузии Cr из расплавов легкоплавких металлов. *Черные металлы*. 2026;(5):48–53. https://doi.org/10.17580/chm.2026.05.07
Pryakhin E.I., Sivenkov A.V., Gareev D.V., Serdyuk N.A., Kalinin G.Yu. Protection of the inner surface of tubular products by Cr diffusion from low-metal melts. *Chernye Metally*. 22026;(5):48–53. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/chm.2026.05.07

Информация об авторах
Юсов Денис Сергеевич – аспирант кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: denis-yus3@mail.ru
Иванова Полина Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-8338-418X
Иванов Сергей Леонидович – доктор технических наук, профессор кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-7014-2464

Информация о статье
Поступила в редакцию: 14.05.2026
Поступила после рецензирования: 23.06.2026
Принята к публикации: 30.06.2026

Information about the authors
Denis S. Yusov – Postgraduate Student, Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: denis-yus3@mail.ru.
Polina V. Ivanova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-8338-418X
Sergey L. Ivanov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-7014-2464

Article info
Received: 14.05.2026
Revised: 23.06.2026
Accepted: 30.06.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-178-185

Оптимизация скоростного режима седельного тягача на основе гибридной модели расхода топлива с автоматической калибровкой по данным CAN-шины

А.С. Дубровский ✉, С.С. Шадрин, Д.А. Макарова, Ю.М. Фурлетов
Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация
✉ a.s.dubrovskii@mospolytech.ru

Резюме: В исследовании предложен метод оптимизации скоростного режима магистрального седельного тягача, объединяющий физическую модель расхода топлива и машинную поправку с автоматической калибровкой по данным бортовой CAN-шины. Физическая составляющая построена на уравнении тягового баланса, параметры которого – КПД трансмиссии, коэффициент сопротивления качению, удельный эффективный расход и приведённые механические потери – определяются без стендовых испытаний путём минимизации методом Пауэлла расхождения между расчётным и измеренным мгновенным расходом; корректность калибровки контролируется по накопленному счётчику расхода (протокол SAE J1939). Машинная поправка реализована алгоритмом LightGBM, аппроксимирующим остаток физической модели; впервые в число признаков включён сигнал текущей передачи, извлекаемый непосредственно из CAN-шины. Оптимальный скоростной профиль рассчитывается методом динамического программирования при ограничении на прирост времени в пути; пространство скоростей дискретизировано на 13 значений в диапазоне 60–80 км/ч. Метод верифицирован в натурном эксперименте с тягачом Mercedes-Benz Actros 1845 на трассе М-11 «Нева» (Москва – Санкт-Петербург, 672,5 км; около 14 млн записей CAN-шины, обработка одного рейса менее двух минут). Погрешность калибровки составила 3,6%, включение признака передачи снизило среднеквадратическую ошибку прогноза с 13,7 до 11,5 л/100 км (на 16%), а отклонение накопленного расхода – до 1,4%. Расчётная экономия топлива достигла 9,3% при увеличении времени движения менее чем на 0,6%. Численное моделирование на маршруте Москва – Казань (809,1 км) подтвердило масштабируемость подхода: экономия 10,4% при приросте времени 2,8% без повторной калибровки модели.

Ключевые слова: седельный тягач, расход топлива, CAN-шина, SAE J1939, тяговый баланс, динамическое программирование, LightGBM, гибридная модель, оптимизация скорости, экономичное вождение

Благодарности: Проект выполнен при финансовой поддержке Московского политехнического университета в рамках программы грантов им. В.Е. Фортова (IV очередь).

Для цитирования: Дубровский А.С., Шадрин С.С., Макарова Д.А., Фурлетов Ю.М. Оптимизация скоростного режима седельного тягача на основе гибридной модели расхода топлива с автоматической калибровкой по данным CAN-шины. *Горная промышленность*. 2026;(5):178–185. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-178-185

Speed profile optimisation for a semi-trailer truck based on a hybrid fuel consumption model with automatic calibration based on CAN bus data

A.S. Dubrovskii ✉, S.S. Shadrin, D.A. Makarova, Yu.M. Furletov
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation
✉ a.s.dubrovskii@mospolytech.ru

Abstract: The paper proposes a method for optimising the speed profile of a long-haul semi-trailer truck that combines a physical fuel consumption model with a machine-learning correction with automatic calibration using on-board CAN bus data. The physical component is built on the tractive balance equation, which parameters, i.e. the power transmission efficiency, rolling resistance coefficient, brake-specific fuel consumption and lumped mechanical losses, are identified without bench testing by minimising the difference between the computed and the measured instantaneous fuel rate using the Powell's method; calibration is verified against the cumulative fuel counter (SAE J1939). The correction is implemented with the LightGBM algorithm that approximates the rest of the physical model; for the first time the current gear signal extracted directly from the CAN bus is used as an additional feature. The optimal speed profile is obtained by dynamic programming subject to a constraint on the travel-time increase; the speed range is lumped into 13 values within 60–80 km/h. The method was verified using a field trial with a Mercedes-Benz Actros 1845 truck on the M-11 «Neva» motorway (Moscow – Saint Petersburg, 672.5 km; about 14 million CAN records processed in under

two minutes). The calibration error was 3.6%; introduction of the gear feature reduced the prediction root-mean-square error from 13.7 to 11.5 L/100 km (by 16%) and the cumulative-consumption deviation down to 1.4%. The computed fuel saving reached 9.3% at the travel time increased by less than 0.6%. Numerical simulation using the Moscow – Kazan route (809.1 km) confirmed the scalability: a 10.4% saving at a 2.8% time increase without model re-calibration.

Keywords: semi-trailer truck, fuel consumption, CAN bus, SAE J1939, tractive balance, dynamic programming, LightGBM, hybrid model, speed optimisation, eco-driving

Acknowledgements: The project was carried out with the financial support of the Moscow Polytechnic University under the V.E. Fortov grant programme (4th Round).

For citation: Dubrovskii A.S., Shadrin S.S., Makarova D.A., Furletov Yu.M. Speed profile optimisation for a semi-trailer truck based on a hybrid fuel consumption model with automatic calibration based on CAN bus data. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):178–185. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-178-185

Введение

Повышение топливной экономичности магистральных грузовых автомобилей остаётся приоритетной научно-практической задачей транспортной отрасли. Устойчивый рост цен на дизельное топливо и ужесточение экологических требований делают востребованными методы, снижающие расход без конструктивных изменений серийных транспортных средств. Особое место среди них занимает оптимизация скоростного режима – выбор рационального профиля скорости с учётом рельефа маршрута и ограничения по времени в пути. Потенциал энергосбережения при согласованном управлении скоростью связанных и автоматизированных транспортных средств оценивается как значительный [1], а формирование единых критериев энергоэффективности наземных транспортных средств остаётся предметом активных исследований [2]. Существенный вклад в баланс сопротивлений вносит сопротивление качению, зависящее в том числе от давления в шинах, что подтверждено экспериментально [3], и сопряжено с ощутимыми эксплуатационными потерями [4].

В классической постановке задача оптимизации скоростного профиля формулируется как задача оптимального управления и решается методом динамического программирования [5; 6]. Качество решения определяется точностью модели расхода топлива. Физические модели, основанные на уравнении тягового баланса, интерпретируемы и обладают высокой обобщающей способностью, однако не учитывают индивидуальных особенностей конкретного автомобиля – износа агрегатов, состояния шин, вариации КПД трансмиссии. Модели машинного обучения дают высокую точность на исторических данных, но склонны к значительным ошибкам при экстраполяции на не представленные в обучающей выборке режимы. Технические параметры автомобиля меняются в эксплуатации и различаются между экземплярами одной модели, поэтому без калибровки под конкретное транспортное средство любая модель даёт систематическую погрешность.

Перспективным источником данных для калибровки служит бортовая сеть автомобиля (CAN-шина, протокол SAE J1939), предоставляющая сигналы мгновенного и накопленного расхода топлива, скорости и текущей передачи без установки дополнительных приборов. Точность этих сигналов требует верификации: сопоставление показаний расхода по CAN-шине с эталонным (весовым) измерением выявляет расхождение интегральных значений от 18,6 до 23,6% [7], поэтому транслируемые значения нуждаются в коррекции и калибровке [8; 9]. При этом накопленный счётчик расхода устойчивее мгновенного сигнала и удобен как относительный эталон. Показано также, что характеристики агрегатов силовой установки можно идентифицировать непосредственно в процессе дорожных испытаний, без стендового оборудования [10].

Модели расхода топлива развиваются по трём направлениям. Физические модели опираются на тяговый баланс и энергетические характеристики движения [2]. Модели машинного обучения, прежде всего градиентный бустинг на решающих деревьях, обеспечивают высокую точность: для смежной задачи авторами показано, что бустинговая регрессия на синхронизированных данных CAN-шины, GPS и рельефа выявляет скрытые причины перерасхода топлива [11; 12]. Гибридные модели, объединяющие физический расчёт и машинную поправку, дают лучшее соотношение точности и обобщающей способности. Существенный резерв экономии обеспечивает и оптимизация режимов работы силовой установки – отключение части цилиндров при частичных нагрузках [13] и рациональный выбор режимных параметров гибридного привода [14]. Оптимизация скоростного профиля методом динамического программирования апробирована в разных видах транспорта, включая железнодорожный и тяжёлые магистральные автомобили [6; 15].

Коллектив авторов развивает методы интеллектуальных и автономных транспортных средств: отработку алгоритмов автономного движения в сложных условиях [16], формирование требований к эксплуатации автономных транспортных средств на дорогах общего пользования [17], совершенствование технического зрения [18] и интеллектуального планирования перевозок [19], повышение энергоэффективности за счёт мехатронных приводов [20]. Настоящая работа развивает это направление применительно к магистральному тягачу. Научная новизна состоит в следующем. Во-первых, разработана процедура автоматической калибровки физической модели исключительно по данным CAN-шины, не требующая стендовых испытаний: параметры определяются минимизацией расхождения расчётного и измеренного мгновенного расхода, а корректность контролируется по накопленному счётчику. Во-вторых, предложена гибридная архитектура, в которой алгоритм LightGBM [12] аппроксимирует не сам расход, а остаток физической модели, причём впервые в качестве дополнительного признака использован сигнал текущей передачи. В-третьих, метод проверен в натурном эксперименте с тягачом Mercedes-Benz Actros 1845 на трассе М-11 (672,5 км) и численным моделированием на маршруте Москва – Казань (809,1 км).

Материалы и методы

Основу физической модели составляет уравнение тягового баланса, связывающее силы сопротивления движению с мощностью, необходимой для поддержания заданной скорости. Путевой расход топлива определяется выражением:

$$Be = (be / (\eta \cdot \rho m)) \cdot [m \cdot g \cdot (f \cdot \cos\alpha + \sin\alpha) + 0{,}5 \cdot \rho \cdot cw \cdot A \cdot \upsilon^2 + m \cdot a + Br], \quad (1)$$

где Be – путевой расход топлива, л/км; be – удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч); η – КПД трансмиссии; ρm – плотность топлива, г/л; m – масса автопоезда, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; f – коэффициент сопротивления качению; α – продольный уклон дороги, рад; ρ – плотность воздуха, кг/м³; cw – коэффициент аэродинамического сопротивления; A – лобовая площадь автопоезда, м²; υ – скорость движения, м/с; a – продольное ускорение, м/с²; Br – приведённые механические потери (отбор мощности), Н.

Ввиду высокого коэффициента полезной нагрузки автопоезда коэффициентом учёта вращающихся масс пренебрегаем; приведённые потери на торможение не учитываются, так как при движении по автомагистрали замедление обеспечивается преимущественно вспомогательной тормозной системой.

Вектор калибруемых параметров определяется минимизацией среднеквадратического отклонения расчётного мгновенного расхода от измеренного по CAN-шине значения:

$$\theta^* = \arg\min F(\theta),\ F(\theta) = (1/N) \cdot \Sigma\,(Be,i_{расч}(\theta) - Be,i_{изм})^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где θ – вектор калибруемых параметров (η, f, be, Br); $Be,i_{расч}$ – расчётный мгновенный расход в i-й точке; $Be,i_{изм}$ – измеренный расход по сигналу Engine_Fuel_Rate CAN-шины; N – число точек выборки. Минимизация выполняется методом Пауэлла в пределах физически допустимых границ. Показания расхода по CAN-шине могут расходиться с эталонным (весовым) измерением на 18–24% [7], поэтому за эталон принят накопленный счётчик High_Resolution_Engine_Total_Fuel_Used как наиболее устойчивый бортовой показатель, а транслируемые значения при необходимости корректируются [8].

Гибридная модель строится как сумма физической составляющей и машинной поправки, компенсирующей систематическую ошибку физической модели (3):

$$Be_{гибр}(\upsilon, \alpha, a, \kappa, G) = Be_{физ}(\upsilon, \alpha, a) + \Delta LGBM(\upsilon, \alpha, a, \kappa, G), \quad (3)$$

где $Be_{физ}$ – физическая составляющая по (1); $\Delta LGBM$ – поправка, аппроксимируемая алгоритмом LightGBM на остатке физической модели; κ – кривизна трассы, 1/м; G – номер текущей передачи (1–12). Модель LightGBM – градиентный бустинг на решающих деревьях с гистограммной аппроксимацией [12] – обучается на 70% данных маршрута, оставшиеся 30% используются для валидации. Включение сигнала передачи обосновано тем, что при равной скорости расход зависит от номера передачи, определяющей частоту вращения и нагрузку двигателя. Текущая передача идентифицируется по сигналам CAN-шины кластеризацией методом K-means с последующим классификационным деревом; извлечение признаков из CAN-шины для задач диагностики расхода топлива использовано авторами в работе [11]. Режим движения накатом исключается из обучающей выборки, пропуски заполняются прямым и обратным распространением ближайшего значения.

Задача оптимизации формулируется следующим образом. Маршрут разбивается на сегменты длиной Δs = 500 м; требуется найти профиль скорости, минимизирующий суммарный расход топлива (4) при ограничении на время в пути (5) с учётом соотношения (6):

$$Q = \Sigma Be(\upsilon k, \alpha k) \cdot \Delta s \rightarrow \min; \quad (4)$$

$$T(\upsilon) \le (1 + \beta) \cdot T_0; \quad (5)$$

$$T(\upsilon) = \Sigma(\Delta s / \upsilon k), \quad (6)$$

где υk – скорость на k-м сегменте; β – коэффициент допустимого увеличения времени в пути; T_0 – фактическое время в пути. Целевая функция рассчитывается по гибридной модели (3). Пространство скоростей дискретизируется на 13 значений в диапазоне 60–80 км/ч. Расчёт времени через дистанцию и скорость устраняет погрешность нестабильной частоты дискретизации CAN-шины; применение динамического программирования для тяжёлых магистральных автомобилей ранее апробировано в работе [6].

Метод реализован в приложении на языке Python, выполняющем импорт и декодирование лог-файлов CAN-шины формата ASC с использованием DBC-файла, автоматическую калибровку методом Пауэлла, обучение гибридной модели на остатках, расчёт оптимального профиля динамическим программированием и визуализацию результатов. Обработка одного рейса (около 14 млн записей) на стандартном офисном компьютере занимает менее двух минут.

Таблица 1
Сигналы CAN-шины (протокол SAE J1939), использованные в работе

Table 1.
The CAN bus signals (SAE J1939 protocol) used in the study

Сигнал (SAE J1939)	SPN	Ед. изм.	Назначение в модели
Wheel_Based_Vehicle_Speed	84	км/ч	Скорость υ; тяговый баланс и расчёт времени
Engine_Fuel_Rate	–	л/ч	Мгновенный расход для калибровки (2)
High_Resolution_Engine_Total_Fuel_Used	–	л	Накопленный счётчик; эталонный расход
Transmission_Current_Gear	–	1–12	Номер передачи G; признак модели (3)

Примечание: сигнал –1 в поле Transmission_Current_Gear соответствует отсутствию данных о передаче и исключается из обработки.
Note: the -1 value in the Transmission_Current_Gear field indicates that there is no gear data and this signal is excluded from processing.



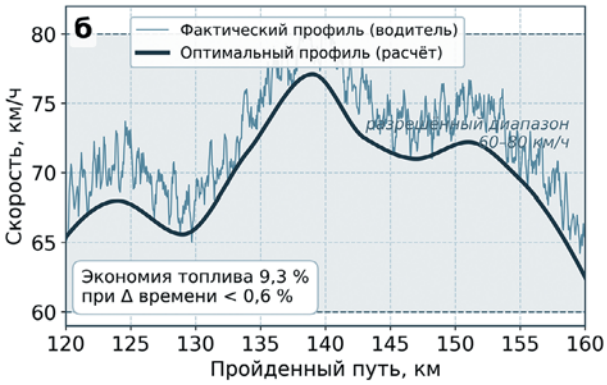


Рис. 1
Продольный профиль высоты маршрута Москва – Санкт-Петербург (М-11, 672,5 км) (а) и сравнение фактического и оптимального скоростного профиля на фрагменте маршрута (б)

Fig. 1
Longitudinal elevation profile of the Moscow – Saint Petersburg motorway (M-11, 672.5 km) (a) and a comparison of the actual and optimal speed profiles over a route fragment (б)

Натурный эксперимент проведён с седельным тягачом Mercedes-Benz Actros 1845, перевозившим груз массой 20 т, на трассе М-11 «Нева» (Москва – Санкт-Петербург, 672,5 км, преимущественно равнинный рельеф с локальными перепадами высот до 120 м и СКЗ продольного уклона 1,21%; продольный профиль высоты приведён на рис. 1, *а*. Данные регистрировались с высокоскоростной CAN-шины (500 кбит/с) аппаратным логгером в формате ASC; суммарный объём составил 14 271 800 записей. Перечень используемых сигналов приведён в табл. 1. Координаты и высота получены из GPS-данных с частотой 1 Гц; продольный уклон вычислялся как производная высоты по пути со сглаживанием скользящим средним по окну 500 м. Эталонный суммарный расход за рейс по накопленному счётчику составил 149,6 л.

Для проверки масштабируемости выполнено численное моделирование на маршруте Москва – Казань (809,1 км). Реальные данные CAN-шины для него отсутствуют, поэтому траектория получена из цифровой модели местности с шагом 2 м (404105 точек, высотные отметки SRTM); СКЗ продольного уклона составило 1,60% при диапазоне высот 63–213 м. Использовались параметры, откалиброванные на М-11, без повторной настройки; масса принята равной 18 000 кг (снаряжённая масса автопоезда), единой для обоих маршрутов ради сопоставимости. Базовый сценарий сформирован в предположении движения с постоянным крутящим моментом (равновесная скорость на сегментах – методом Брента, на горизонтали 70 км/ч, что близко к средней скорости 69,6 км/ч по данным М-11); базовый расход составил 257,1 л.

Результаты

В результате минимизации по формуле (2) для тягача Mercedes-Benz Actros 1845 получены значения параметров физической модели, приведённые в табл. 2. Физическая модель с откалиброванными параметрами прогнозирует накопленный расход 144,1 л; отклонение от эталонных 149,6 л составляет 3,6% и находится в пределах, характерных для оценок точности измерения расхода топлива в реальных условиях эксплуатации [9].

Точность гибридной модели на валидационной выборке (30% данных) для двух конфигураций приведена в табл. 3. Включение сигнала текущей передачи снижает среднеквадратическую ошибку с 13,7 до 11,5 л/100 км, то есть на 16%. Гибридная модель с признаком передачи даёт накопленный расход 147,5 л, что соответствует отклонению от эталона 1,4%. Полученное снижение согласуется с результатами применения градиентного бустинга к данным телеметрии транспортных средств [11]. Соотношение точности моделей и условная важность признаков показаны на рис. 2.

Результаты оптимизации скоростного профиля методом динамического программирования при ограничении на увеличение времени в пути (β = 0,05) на маршруте Москва

Таблица 2
Откалиброванные параметры физической модели тягача Mercedes-Benz Actros 1845

Table 2
Calibrated parameters of the physical model of the Mercedes-Benz Actros 1845 tractor

Параметр	Обозначение	Диапазон поиска	Калиброванное значение
КПД трансмиссии	η	0,90–0,98	≈ 0,95
Коэффициент сопротивления качению	f	0,005–0,010	≈ 0,007
Удельный эффективный расход, г/(кВт·ч)	be	180–220	≈ 199
Приведённые механические потери, Н	Br	0–2000	≈ 600

Примечание: значения получены автоматической калибровкой методом Пауэлла по данным CAN-шины и приведены с округлением; диапазоны поиска заданы физически допустимыми ограничениями.
Note: the values were obtained through automatic calibration using the Powell method based on the CAN bus data; the values are rounded; the search ranges are defined by physically permissible limits.

Таблица 3
Точность гибридной модели (RMSE на валидационной выборке 30%)

Table 3
The accuracy of the hybrid model (RMSE using the 30% validation set)

Конфигурация модели	RMSE, л/100 км	Изменение, %
Гибридная модель без признака передачи	13,7	–
Гибридная модель с признаком передачи	11,5	−16
Удельный эффективный расход, г/(кВт·ч)	180–220	≈ 199
Приведённые механические потери, Н	0–2000	≈ 600

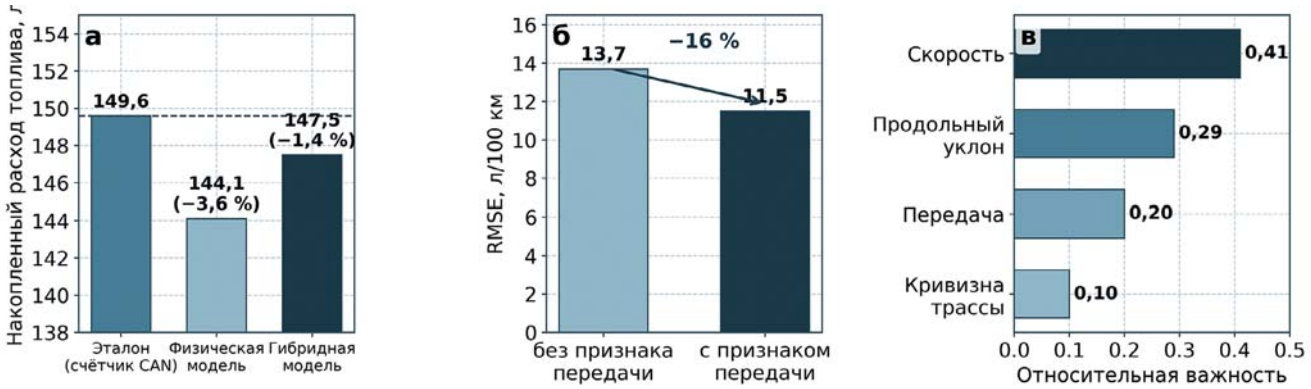


Рис. 2
Точность моделирования расхода топлива:
а – накопленный расход по эталону, физической и гибридной моделям;
б – среднеквадратическая ошибка гибридной модели без и с признаком передачи;
в – условная (иллюстративная) важность признаков модели LightGBM

Fig. 2
The accuracy of fuel consumption modelling:
cumulative consumption using the reference, physical and hybrid models (a);
root-mean-square error of the hybrid model without and with the gear feature (б);
conditional (illustrative) feature importance of the LightGBM model (в)

Таблица 4
Сравнение фактических и оптимальных показателей (Москва – Санкт-Петербург, М-11, 672,5 км)

Table 4
A comparison of the actual and optimal indicators (Moscow – Saint Petersburg, M-11, 672.5 km)

Показатель	Натурный эксперимент (водитель)	Расчёт (оптимальный профиль)	Изменение, %
Расход топлива, л	149,6	135,6	−9,3
Средняя скорость, км/ч	70,1	69,7	−0,6
Время в пути, мин	488,6	491,5	+0,6

Таблица 5
Сравнение результатов оптимизации на маршрутах Москва – Санкт-Петербург и Москва – Казань

Table 5
A comparison of the optimisation results for the Moscow – Saint Petersburg and Moscow – Kazan routes

Параметр	Москва – Санкт-Петербург (М-11)	Москва – Казань
Длина маршрута, км	672,5	809,1
СКЗ продольного уклона, %	1,21	1,60
Тип базового сценария	Натурный эксперимент (CAN)	Численное моделирование
Базовый расход топлива, л	149,6*	257,1**
Оптимальный расход топлива, л	135,6	230,3**
Экономия топлива, %	9,3	10,4
Изменение времени в пути, %	+0,6	+2,8

Примечание: * по данным CAN-шины; ** расчет авторов (численное моделирование).
Note: * based on the CAN bus data; ** authors' calculations (numerical simulation).

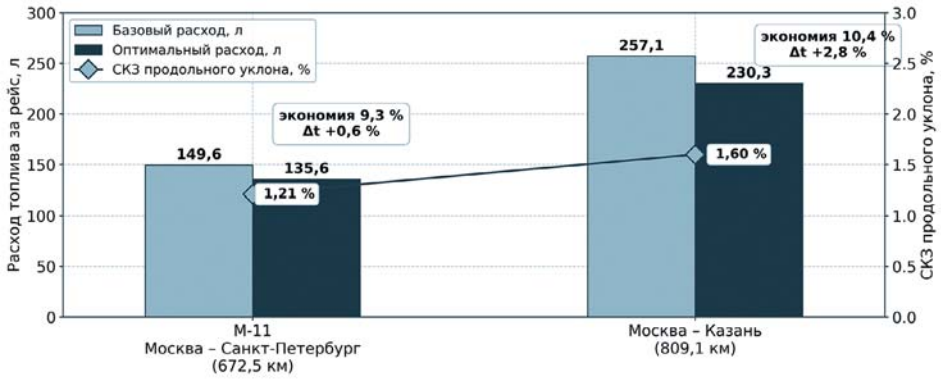


Рис. 3
Сравнение базового и оптимального расхода топлива на маршрутах Москва – Санкт-Петербург и Москва – Казань и среднеквадратическое значение продольного уклона маршрутов (вторая ось)

Fig. 3
A comparison of the baseline and optimal fuel consumption for the Moscow – Saint Petersburg and Moscow – Kazan routes and the root-mean-square value of the longitudinal gradient of the routes (secondary axis)

– Санкт-Петербург приведены в табл. 4. Расчётная экономия топлива составила 9,3% при увеличении времени движения менее чем на 0,6% (на 2,9 мин). Сравнение фактического и оптимального скоростного профиля на фрагменте маршрута показано на рис. 1, б: оптимальный профиль снижает скорость на подъёмах и повышает её на спусках в пределах разрешённого диапазона 60–80 км/ч.

Незначительное различие фактической и оптимальной средних скоростей объясняется тем, что в рассматриваемом рейсе водитель придерживался режима, близкого к оптимальному; для водителей с более высокой средней скоростью потенциал экономии выше. Полученное значение согласуется с оценками потенциала оптимизации скоростного режима [1].

Численное моделирование на маршруте Москва – Казань показало, что применение метода снижает расчётный расход топлива на 10,4% при увеличении времени в пути на 2,8%. Сравнение двух маршрутов приведено в табл. 5 и на рис. 3. Близость значений экономии на маршрутах различной протяжённости и рельефа (9,3 и 10,4%) подтверждает масштабируемость метода и его применимость без повторной калибровки. Более высокая экономия на маршруте Москва – Казань объясняется большим потенциалом адаптации профиля к переменному рельефу (СКЗ уклона 1,60% против 1,21%), что согласуется с выводами об эффективности упреждающего управления скоростью на переменном рельефе [5; 6].

Полученные результаты подтверждают возможность автоматической калибровки физической модели исключительно по данным CAN-шины без стендовых испытаний: погрешность 3,6% приемлема для задач оптимизации скоростного режима. Физическая интерпретация эффекта передачи состоит в том, что КПД трансмиссии зависит от включённой передачи, тогда как в физической составляющей он принят постоянным; машинная настройка компенсирует это упрощение, что соответствует принципу гибридного (физика и машинное обучение) моделирования расхода [11]. Влияние продольного уклона на расход, особенно при полной загрузке, согласуется с представлениями об энергоэффективности наземных транспортных средств [2].

Сравнение с альтернативными подходами подтверждает преимущества предложенной архитектуры: модели расхода, применяемые без калибровки к конкретным условиям эксплуатации, дают систематическую погрешность, что отмечается при выработке единых критериев энергоэффективности [2], тогда как калибруемая по CAN-шине гибридная модель обеспечивает более высокую точность. Достигнутая экономия 9,3% согласуется с оценками потенциала энергосбережения при оптимизации скоростного режима [1]. Ограничением работы является валидация на одном транспортном средстве; расширение на парк автомобилей с различными идентификационными номерами (VIN) и интеграция в телематические платформы составляют направления дальнейших исследований.

Заключение

В работе предложен метод оптимизации скоростного режима седельного тягача на основе гибридной модели расхода топлива с автоматической калибровкой по данным CAN-шины и разработано реализующее его программное обеспечение на языке Python – от декодирования лог-файлов до расчёта оптимального профиля скорости. Основные результаты состоят в следующем.

Показано, что автоматическая калибровка физической модели исключительно по данным CAN-шины без стендовых испытаний обеспечивает погрешность прогноза накопленного расхода топлива 3,6% относительно эталона, полученного по счётчику High_Resolution_Engine_Total_Fuel_Used. Установлено, что включение сигнала текущей передачи в число признаков гибридной модели (LightGBM) снижает среднеквадратическую ошибку прогноза с 13,7 до 11,5 л/100 км (на 16%). Экспериментально подтверждено, что оптимизация скоростного профиля методом динамического программирования на маршруте Москва – Санкт-Петербург (672,5 км) обеспечивает экономию топлива 9,3% при увеличении времени движения менее чем на 0,6%. Численным моделированием на маршруте Москва – Казань показано, что метод сохраняет работоспособность без повторной калибровки и дообучения при расчётной экономии 10,4%.

Практическая значимость работы в том, что метод не требует установки дополнительного оборудования и стендовых испытаний: калибровка выполняется по штатным данным CAN-шины, что делает его пригодным для внедрения в существующие телематические системы транспортных компаний. Дальнейшие исследования включают расширение валидации на парк автомобилей с различными VIN и интеграцию метода в модель прогноза транспортного потока в реальном времени.

Список литературы / References

1. Vahidi A., Sciarretta A. Energy saving potentials of connected and automated vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2018;95:822–843. https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.09.001

2. Гаевский В.В., Иванов А.М., Тарраф М., Дьяков Ф.К., Одинокова И.В., Шадрин С.С. Проблемы определения энергоэффективности наземных транспортных средств. *Труды НАМИ*. 2025;(4):36–45. Режим доступа: https://nami.elpub.ru/jour/article/view/420 (дата обращения: 13.07.2026).
Gaevskiy V.V., Ivanov A.M., Tarraf M., D'yakov F.K., Odinokova I.V., Shadrin S.S. Problems of determining energy efficiency of land vehicles. *Trudy NAMI*. 2025;(4):36–45. (In Russ.) Available at: https://nami.elpub.ru/jour/article/view/420 (accessed: 13.07.2026).

3. Кудрин А.Б., Никифорова П.А., Садовский Д.А., Шадрин С.С. Адаптация измерения расхода топлива автомобиля Renault Fluence, учитывающая давление в шинах. *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. 2021;(1):1. Режим доступа: https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/979 (дата обращения: 13.07.2026).
Kudrin A.B., Nikiforova P.A., Sadovsky D.A., Shadrin S.S. Adaptation of the vehicle fuel rate measurement Renault Fluence vehicle, taking into account the tire pressure. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2021;(1):1. (In Russ.) Available at: https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/979 (accessed: 13.07.2026).

4. Гечекбаев Ш.Д., Дадилов А.С., Абакаров А.А., Игитов Ш.М. Оценка финансовых потерь, обусловленных отклонениями давления в шинах от нормативных значений. *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. 2026;(2):16. Режим доступа: https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/1565 (дата обращения: 13.07.2026).
Gechekbayev S.D., Dadilov A.S., Abakarov A.A., Igitov S.M. Estimation of financial losses caused by tire pressure deviations from regulated values. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2026;(2):16. (In Russ.) Available at: https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/1565 (accessed: 13.07.2026).

5. Hooker J.N., Rose A.B., Roberts G.F. Optimal control of automobiles for fuel economy. *Transportation Science*. 1983;17(2):146–167. https://doi.org/10.1287/trsc.17.2.146

6. Hellström E., Åslund J., Nielsen L. Design of an efficient algorithm for fuel-optimal look-ahead control. *Control Engineering Practice*. 2010;18(11):1318–1327. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2009.12.008

7. Ломов Д.А., Илюшин Д.Н., Салыкин Е.А. Оценка точности измерения расхода топлива по информации из бортовой CAN-шины автомобиля. *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. 2024;(2):5. Режим доступа: https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/1352 (дата обращения: 13.07.2026).
Lomov D.A., Ilyushin D.N., Salykin E.A. Evaluation of the accuracy of measuring fuel consumption based on information from the on-board CAN bus of the car. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2024;(2):5. (In Russ.) Available at: https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/1352 (accessed: 13.07.2026).

8. Wang L., Gonder J., Wood E., Ragatz A. The accuracy and correction of fuel consumption from controller area network broadcast. *SAE Technical Paper* 2017-01-7005. https://doi.org/10.4271/2017-01-7005

9. Pavlovic J., Fontaras G., Broekaert S., Ciuffo B., Ktistakis M.A., Grigoratos T. How accurately can we measure vehicle fuel consumption in real world operation? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2021;90:102666. https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102666

10. Савенков Н.В., Золотарев О.О. Метод определения характеристик двигателей автомобильной гибридной силовой установки в процессе дорожных испытаний. *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. 2024;(2):2. Режим доступа: https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/1353 (дата обращения: 13.07.2026).
Savenkov N.V., Zolotarev O.O. Method for determining the characteristics of engines of a car equipped with a hybrid power unit control system during road tests. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2024;(2):2. (In Russ.) Available at: https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/1353 (accessed: 13.07.2026).

11. Дубровский А.С., Шадрин С.С., Келлер А.В., Макарова Д.А., Фурлетов Ю.М. Определение повышенного расхода топлива автотранспортной техники с использованием методов глубокого обучения при анализе данных телеметрии. *Тракторы и сельхозмашины*. 2026;93(1):81–88. https://doi.org/10.17816/0321-4443-692985
Dubrovskii A.S., Shadrin S.S., Keller A.V., Makarova D.A., Furletov Y.M. Detection of increased fuel consumption in vehicles using deep learning in telematics data analysis. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2026;93(1):81–88. (In Russ.) https://doi.org/10.17816/0321-4443-692985

12. Ke G., Meng Q., Finley T., Wang T., Chen W., Ma W. et al. LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree. In: Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017), Long Beach, CA, December 2017, pp. 3149–3157. Available at: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2017/file/6449f44a102fde848669bdd9eb6b76fa-Paper.pdf (accessed: 13.07.2026).

13. Химченко А.В., Мищенко Н.И., Колесникова Т.Н. Оптимизация режимов работы механизма отключения цилиндров двигателя. *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. 2025;(1):4. Режим доступа: https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/1461 (дата обращения: 13.07.2026).
Khimchenko A.V., Mishchenko N.I., Kolesnikova T.N. Optimization of operating modes of the engine cylinder deactivation mechanism. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2025;(1):4. (In Russ.) Available at: https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/1461 (accessed: 13.07.2026).

14. Савенков Н.В., Золотарев О.О. Рациональный выбор режимных параметров автомобильной гибридной силовой установки. *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. 2023;(1):18. Режим доступа: https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/1197 (дата обращения: 13.07.2026).
Savenkov N.V., Zolotarev O.O. Rational choice of operating parameters of an automobile hybrid power plant. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2023;(1):18. (In Russ.) Available at: https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/1197 (accessed: 13.07.2026).

15. Левин Д.Ю. Оптимизация скорости движения поездов. *Мир транспорта*. 2021;19(6):73–90. https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-6-10
Levin D.Yu. Optimising train speed. *World of Transport and Transportation*. 2021;19(6):73–90. https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-6-10

16. Шадрин С.С. Автономное транспортное средство команды BaseTracK в финале технологического конкурса «Зимний город». *Труды НАМИ*. 2020;(3):46–59. Режим доступа: https://nami.elpub.ru/jour/article/view/154 (дата обращения: 13.07.2026).
Shadrin S.S. The BaseTracK team autonomous vehicle, a finalist of the "Zimniy gorod" technological competition. *Trudy NAMI*. 2020;(3):46–59. (In Russ.) Available at: https://nami.elpub.ru/jour/article/view/154 (accessed: 13.07.2026).

17. Шадрин С.С., Макарова Д.А. Тенденции формирования требований к отчетности об эксплуатации автономных транспортных средств на дорогах общего пользования России. *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. 2023;(1):35–41.
Shadrin S.S., Makarova D.A. Trends in the formation of requirements for reporting on the operation of autonomous vehicles on public roads in Russia. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*. 2023;(1):35–41. (In Russ.)

18. Тыняный А.Г., Кристальный С.Р., Красавин П.А., Топорков М.А., Андреев А.Н. Актуальные вопросы совершенствования технического зрения при использовании на автомобилях. *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. 2026;(1):6. Режим доступа: https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/1547 (дата обращения: 13.07.2026).
Tynyanyy A.G., Kristalniy S.R., Krasavin P.A., Toporkov M.A., Andreev A.N. Current issues in improving technical vision for use in vehicles. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2026;(1):6. (In Russ.) Available at: https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/1547 (accessed: 13.07.2026).

19. Аземша С.А. Интеллектуальная система мультимаршрутного планирования работы пассажирских транспортных средств. *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. 2026;(1):13. Режим доступа: https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/1552 (дата обращения: 13.07.2026).
Azemsha S.A. Public transport intelligent multi-route planning system. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2026;(1):13. (In Russ.) Available at: https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/1552 (accessed: 13.07.2026).

20. Щербин А.В. Повышение энергоэффективности и безопасности движения электромобилей путём использования мехатронных приводов в системах рулевого и тормозного управления. *Труды НАМИ*. 2026;(1):138–148. Режим доступа: https://nami.elpub.ru/jour/article/view/448 (дата обращения: 13.07.2026).
Shcherbin A.M. Improving energy efficiency and safety of driving of electric vehicles by using mechatronic drives in steering and brake systems. *Trudy NAMI*. 2026;(1):138–148. (In Russ.) Available at: https://nami.elpub.ru/jour/article/view/448 (accessed: 13.07.2026).

Информация об авторах
Дубровский Артём Семёнович – преподаватель Передовой инженерной школы технологического лидерства FDR, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0009-0001-1685-7039; e-mail: a.s.dubrovskii@mospolytech.ru
Шадрин Сергей Сергеевич – доктор технических наук, профессор Передовой инженерной школы технологического лидерства FDR, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-2606-9984; e-mail: shadrin@madi.ru
Макарова Дарья Алексеевна – кандидат технических наук, старший преподаватель Передовой инженерной школы технологического лидерства FDR, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-0752-5075; e-mail: makarovadaria224@gmail.com
Фурлетов Юрий Михайлович – кандидат технических наук, доцент Передовой инженерной школы технологического лидерства FDR, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-5180-4899; e-mail: yury.furletov@gmail.com

Информация о статье
Поступила в редакцию: 06.06.2026
Поступила после рецензирования: 15.07.2026
Принята к публикации: 17.07.2026

Information about the authors
Artem S. Dubrovskii – Lecturer, Advanced Engineering School of Technological Leadership FDR, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0009-0001-1685-7039; e-mail: a.s.dubrovskii@mospolytech.ru
Sergey S. Shadrin – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Advanced Engineering School of Technological Leadership FDR, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-2606-9984; e-mail: shadrin@madi.ru
Daria A. Makarova – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer, Advanced Engineering School of Technological Leadership FDR, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-0752-5075; e-mail: makarovadaria224@gmail.com
Yury M. Furletov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Advanced Engineering School of Technological Leadership FDR, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-5180-4899; e-mail: yury.furletov@gmail.com

Article info
Received: 06.06.2026
Revised: 15.07.2026
Accepted: 17.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-186-189

Доступные технологии повышения энергетической эффективности и безопасности разрушения горных пород

Н.Н. Ефремовцев ✉
Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация
✉ noee7@mail.ru

Резюме: В результате проведенных исследований предложен комплекс методологических и технологических решений, направленный на автоматизацию взрывных работ в особо сложных условиях и повышение мер безопасности производства. Новизна и актуальность предложенных решений подтверждены патентами и результатами испытаний. В статье представлены: 1)_ роботизированная технология формирования скважинных зарядов с переменной энергетической насыщенностью и чувствительностью; 2) методология формирования цифровых двойников имитационных композиционных моделей взрываемых сред, конструкций зарядов испытательного стенда и условий взрывания на полигоне. Разработанная методология позволяет проводить анализ различных способов перераспределения энергии вредного воздействия взрыва на окружающую среду в полезные формы ее использования. Для оценки закономерностей изменения параметров напряженного состояния взрываемой среды, а также процессов предразрушения и фрагментации проведены исследования с применением физических экспериментов и модифицированного (дополненного) метода сглаженных частиц. В результате исследований получены фундаментальные зависимости вектора скорости смещения частиц грунта от взрывчатых характеристик средств разрушения горных пород. Установлено, что зависимость скорости смещения грунта от энергии заряда взрывчатого вещества носит полиномиальный характер. В статье представлены графики изменения внутренней энергии гранул аммиачной селитры с различной морфологией.

Ключевые слова: буровзрывные работы, роботизированные технологии, цифровые имитационные модели, детонация, сейсмическое воздействие взрыва, кинетика выделения энергии, кинетика поглощения энергии, метод сглаженных частиц

Благодарности: Исследования проведены в Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН в рамках научно-исследовательских программ по темам FMMS-2024-0007; FMMS-2024-0008.

Для цитирования: Ефремовцев Н.Н. Доступные технологии повышения энергетической эффективности и безопасности разрушения горных пород. *Горная промышленность.* 2026;(5):186–189. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-186-189

Available technologies for improving energy efficiency and safety in rock blasting

N.N. Efremovtsev ✉
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
✉ noee7@mail.ru

Abstract: Based on the research performed, a set of methodological and engineering solutions has been proposed, which aims to introduce automation in blasting operations performed in particularly challenging conditions and to enhance workplace safety. The novelty and relevance of the proposed solutions are confirmed by patents and test results. This article presents: (1) a robotic technology to form borehole charges with variable energy density and sensitivity; (2) a methodology for creating digital twins of simulation composite models of the blasted media, test bench charge configurations, and blasting conditions at the test site. The developed methodology makes it possible to analyze various methods used to redistribute the harmful energy of the blast impact on the environment into useful forms of energy that can be utilized. Studies were conducted using physical tests and a modified (extended) smoothed particle method to assess the patterns of change in the stress state parameters of the blasted media, as well as the processes of pre-failure and fragmentation. The research revealed fundamental relationships between the displacement velocity vector of the rock fragments and the explosive properties of the rock disintegration means. It was established that the relationship between the rock displacement velocity and the explosive energy of the charge is polynomial in nature. This article presents diagrams showing changes in the internal energy of the ammonium nitrate granules with different morphologies.

Keywords: drilling and blasting operations, robotic technologies, digital simulation models, detonation, seismic effects of the blast, kinetics of energy release, kinetics of energy absorption, smoothed particle method

Acknowledgements: The research was performed at the Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences as part of the FMMS-2024-0007 and FMMS-2024-0008 research programmes.

For citation: Efremovtsev N.N. Available technologies for improving energy efficiency and safety in rock blasting. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):186–189. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-186-189

Введение

Актуальность комплексных исследований в области совершенствования способов и средств управления интенсивностью дробления горных пород и вредным действием взрыва обусловлена ужесточением требований к охране окружающей среды, ухудшением горнотехнических условий разработки месторождений, повышением объемов взрывных работ на большой глубине, в непосредственной близости с охраняемыми объектами, необходимостью повышения полноты химического превращения и устойчивости детонации для снижения расхода взрывчатых веществ и сейсмического воздействия массовых взрывов. Несмотря на значительное количество работ, посвященных дробящему и сейсмическому действию взрывов [1; 2], влиянию природных и технологических факторов [3; 4], до настоящего времени недостаточное внимание уделялось методологии проведения физических экспериментов в условиях полигона и численным методам исследований закономерностей влияния кинетики выделения энергии на изменения дробящего и вредных действий взрыва с применением цифровых моделей детонационных систем.

В результате проведенных исследований научно обоснован и предложен комплекс методологических и технологических разработок, новизна и актуальность которых подтверждены патентами и результатами испытаний.

Результаты

На основе изучения влияния температуры окружающей среды, вещественного состава и структуры топливной составляющей промышленных взрывчатых веществ на ее реологические свойства и впитывающую способность разработаны рациональные технологические схемы, способы и технологический регламент производства, а также установка для производства поризующих топливных смесей [5] и взрывчатых веществ на их основе [6], адаптированных к условиям применения роботизированных технологий производства ПВВ и заряжания скважин. Использование разработанных составов топливных смесей позволяет многократно увеличить площадь соприкосновения окислителя с топливом и энергетическими добавками [7].

Комплекс инновационных технологических решений [5] направлен на повышение экологической безопасности горного производства за счет вовлечения в производство отходов (отработанного масла и продуктов переработки РТИ – резиновой крошки, сажи, технического углерода, пиролизного масла), расширение функциональных возможностей установки, ассортимента конечной продукции и вариабельности ее свойств, повышение производительности и энергетической эффективности производства.

Группа технических решений может быть использована при организации производства микродисперсных эмульсий или суспензий с целью получения топливных смесей для отопления жилых и производственных зданий, производства промышленных взрывчатых веществ с использованием отходов производства на заводах и непосредственно на местах применения. Установка формируется из оборудования, смонтированного в помещении стационарно или на автотранспортной базе. Она содержит емкости с термостатирующими устройствами для хранения компонентов водной фазы, жидкой углеводородной топливной фазы – отработанного масла, дизельного топлива, эмульгаторов, твердых порошкообразных компонентов и жидких сенсибилизаторов, а также устройства для их дозированной подачи. В состав установки входит аппарат для получения водной фазы эмульсии или суспензии и пропитывающей жидкости, аппарат очистки и подготовки углеводородной фазы для снижения вязкости отработанного масла и/или подготовки углеводородной фазы на основе индустриального масла. Аппарат приготовления эмульсий или суспензий содержит емкость предварительного смешивания водной, жидкой углеводородной топливной фаз, жидких сенсибилизаторов и твердых порошкообразных энергетических добавок, роторно-пульсационную мельницу и ультразвуковой диспергатор, выполненные с возможностью функционирования в замкнутом режиме.

В основе технологического процесса получения эмульсий топливных смесей используются способы производства, предусматривающие несколько стадий диспергирования:

– предварительное смешивание водной фазы, жидкой углеводородной топливной фазы и жидких сенсибилизаторов и твердых порошкообразных энергетических добавок;

– диспергирование смеси жидких и твердых порошкообразных компонентов в роторно-пульсационной мельнице и ультразвуковом проточном диспергаторе в несколько циклов в замкнутом режиме.

После диспергирования поток направляют в статический диспергатор – фильтр, а далее – в емкость для готовой продукции.

Проведен комплекс лабораторных и промышленных испытаний топливных смесей. Разработаны и смонтирована установка по производству поризующих топливных смесей (ТС), технологический регламент на производство топливных смесей с различной энергетической насыщенностью для взрывного дробления пород с высокой и средней крепостью, а также щадящего взрывания в различных климатических условиях, в том числе в условиях Крайнего Севера.

Промышленные испытания установки показали, что ее производительность составляет до 2000 л/смену. Комплекс технологических и конструктивных возможностей позволяет получить стабильные ТС, суспензии с вязкостью, не превышающей вязкость дизельного топлива, и размером глобул водной и топливной фаз эмульсии в среднем 5,47 мк. Максимальные размеры углерода и сажи составляет 9 мк. Обработка ультразвуком позволяет в 10 раз увеличить содержание углерода фракции менее 0,5 мкм, что увеличивает стойкость суспензии до 30 сут.

Разработанные составы взрывчатых смесей и поризующих эмульсий топливных смесей обеспечивают проникновение топлива внутрь гранул непористой селитры и энергетических добавок и позволяют сформировать систему трещин и дефектов в гранулах аммиачной селитры (АС) за счет эффекта Ребиндера, многократно увеличивая площадь контакта между топливом и окислителем. Промышленные испытания Гранулита «ЕФ-П», изготовленного на основе полученных топливных смесей, показали, что заполнение эмульсией гранул плотной аммиачной селитры происходит в течение 2–4 ч и новое взрывчатое вещество имеет взрывчатые характеристики, превышающие штатные, содержащие тротил ПВВ, за счет увеличения площади

соприкосновения топлива, энергетических добавок и окислителя [6].

Технический результат, получаемый при осуществлении изобретения, заключается в повышении промышленной и экологической безопасности горного производства (вовлечения в использование на горном предприятии отходов переработки РТИ и отработанных масел), функциональных возможностей установки, ассортимента конечной продукции и вариабельности ее свойств, производительности и энергетической эффективности производства, в возможности получения энергоемких материалов с различной энергетической насыщенностью и со свойствами, оптимальными для конкретных условий разработки месторождений полезных ископаемых за счет обеспечения оптимальной кинетики выделения энергии.

Предложен комплекс технологических решений, направленный на автоматизацию работ и повышение мер безопасности производства. В патенте описаны роботизированная технология, способы получения взрывчатого состава и формирования детонационной системы с переменной энергетической насыщенностью и чувствительностью. Согласно патенту на группу изобретений [8] производство взрывчатых веществ и заряжание скважин осуществляются с использованием передвижной роботизированной технологической платформы (РТП) на базе смесительно-зарядной машины, которая дополнительно оснащена системами навигации и автономного передвижения в соответствии с заранее заданной траекторией передвижения по блоку и в соответствии с координатами скважин и манипуляционной системой.

Предусмотрено оснащение РТП техническим зрением устройства захвата и подачи зарядных шлангов, регулирующим их положение во времени в трех пространственных координатах, сенсорными системами, обеспечивающими получение и обработку данных о свойствах окружающей среды, контроль положения шлангов по высоте скважины и высоты скважинного заряда с обратной связью, системой оперативного регулирования взрывчатых свойств формируемого заряда. В патенте на группу изобретений [8] предложены шесть способов производства взрывчатых веществ, в том числе четыре способа получения состава шашек детонаторов и промежуточных детонаторов на местах применения, включающих получение невзрывчатой эмульсионной матрицы на основе обратной и/или прямой эмульсии, гранулированной и/или порошкообразной аммиачной селитры и заполнение ими оболочек, отличающихся тем, что до мест применения транспортируются невзрывчатые и некапсюлеактивные смеси в оболочках шашек детонаторов, заполненные невзрывчатой эмульсионной матрицей, а на местах их применения в охлажденную эмульсионную матрицу вводятся и перемешиваются с невзрывчатой эмульсионной матрицей энергетические и сенсибилизирующие добавки.

Научная новизна работы заключается в обосновании методологии комплексных исследований дробящего, сейсмического и других опасных воздействий взрыва на основе классификаций способов управления их параметрами; применении физических экспериментов и модифицированного, дополненного инновационным программным обеспечением метода SPH; использовании цифровых моделей конструкций зарядов и условий взрывных работ на различных масштабных уровнях. Разработана многоцелевая многоканальная система получения и обработки информации с применением волоконно-оптических датчиков для исследования кинетики химических реакций в заряде ВВ, изменения во времени и пространстве ореола распространения пылегазового облака, температуры, концентрации вредных продуктов детонации и пыли. Особое внимание в процессе исследований уделялось стадии предразрушения, кинетике выделения и поглощения энергии взрыва, определяющих количество образующихся мелких фракций, установлению закономерностей изменения во времени и пространстве численных значений параметров напряженного состояния среды, скорости смещения и фрагментации горных пород, изменения анизотропии акустических показателей горных пород в выделенных зонах действия энергии взрыва.

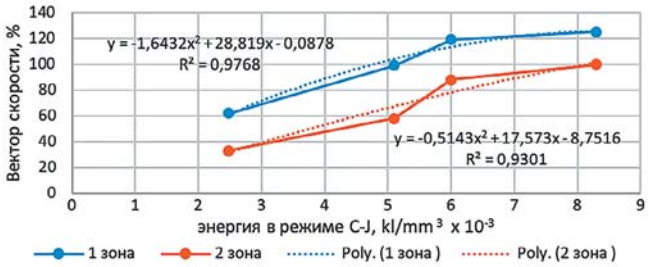


Рис. 1
Зависимости вектора скорости смещения грунта от энергии взрыва заряда различных взрывчатых веществ в режиме C-J – ECJ

Fig. 1
Dependences of the velocity vector of the rock mass displacement on on the explosive energy of various explosives in the C-J – ECJ mode

В качестве примера результатов исследований на рис. 1 представлены обобщённые результаты расчётов, полученных для различных зон действия энергии взрыва.

На рис. 1 показаны полиномиальные зависимости векторной скорости в относительных единицах: зона 1 – в ближней зоне действия взрыва в пределах 4–7 радиусов заряда; зона 2 – полиномиальная зависимость в пределах 7–12 радиусов заряда.

Впервые разработана и апробирована цифровая имитационная модель инициирования, развития и затухания детонации зарядов гранулитов с различной морфологией гранул аммиачной селитры. На рис. 2 приведены некоторые результаты численных экспериментов, полученные с применением дополненной методики применения модифицированного метода сглаженных частиц SPH для анализа результатов воздействия взрыва на различных масштабных уровнях. Дополненный автором модифицированный метод сглаженных частиц предусматривает получение и обработку графических изображений полей деформации, предразрушения и показателей напряженного состояния взрываемых сред, вектора скорости смещения частиц грунта.

Для получения исходных количественных характеристик используется авторский программный модуль, разработанный на JavaScript, выполняющий автоматическую обработку изображений с заданной цветовой шкалой и расчёт долевого распределения показателей. Модуль обеспечивает автоматизированный количественный анализ цветового состава изображений, формирование таблиц распределения пикселей по цветовым классам и расчёт энергетических и других показателей, в дальнейшем используемых в качестве исходных данных для вычислений.

Цифровая имитационная модель позволяет проводить численную оценку изменения во времени и пространстве давления, внутренней энергии в грануле ВВ, в межгра-



Рис. 2
Пример результатов расчета изменения внутренней энергии (J/kg10^7) при детонации гранулы смеси АС/ДТ-6 с базовой и модифицированной морфологией

Fig. 2
An example of the calculation results for changes in the intrinsic energy (J/kg10^7) during detonation of one granule of the AS/DT-6 mixture with the basic and modified morphologies

нульном пространстве, а также за пределами свободной поверхности заряда. Дополненная методика применения модифицированного метода сглаженных частиц SPH предусматривает обработку графических изображений локализации во времени областей пластической деформации, давления, тензора напряжений, внутренней энергии, горячих точек передачи детонации, зон выполнения принятого критерия разрушения среды на стадии предразрушения, изменения скорости фрагментации в зависимости от взрывчатых характеристик ВВ с оценкой кинетики выделения энергии и скорости разлета разрушаемых сред.

Заключение

На основе практического опыта испытаний различных ВВ, проектирования специальных взрывных работ в особо сложных условиях разработаны методология научных исследований и комплекс технологических решений, позволяющих повысить энергетическую эффективность и безопасность взрывных работ с применением инновационных составов взрывчатых веществ, увеличивающих полноту и устойчивость детонации и адаптированных к роботизированной технологии заряжания скважин с переменной энергетической насыщенностью и чувствительностью. Разработана методология анализа различных способов перераспределения энергии вредного воздействия взрыва на окружающую среду в полезные формы ее использования.

Предложена методология формирования цифровых двойников имитационных композиционных моделей взрываемых сред, конструкций зарядов испытательного стенда и условий взрывания на полигоне. Получены фундаментальные зависимости вектора скорости смещения частиц грунта от взрывчатых характеристик средств разрушения горных пород. Ключевым конкурентным преимуществом новых технологий является возможность увеличить безопасность взрывных работ, стабильность и полноту детонации, обеспечить снижение экологических последствий взрывных работ, сформировать зоны дробления в зависимости от прочности пород с использованием зарядов с переменной чувствительностью и кинетикой выделения энергии.

Список литературы / References

1. Мосинец В.Н. *Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах*. М.: Недра; 1976. 271 с.
2. Фадеев А.Б. *Дробящее и сейсмическое действие взрывов на карьерах*. М.: Недра; 1972. 135 с.
3. Кузьменко А.А., Воробьев В.Д., Денисюк И.И., Дауетас А.А. *Сейсмическое действие взрыва в горных породах*. М.: Недра; 1990. 173 с.
4. Тюпин В.Н. *Действие взрыва в трещиноватых массивах горных пород*. Белгород: БелГУ; 2025. 195 с.
5. Ефремовцев Н.Н., Жданов Ю.В., Андержанов С.Р., Левачев С.М., Харлов А.Е., Комиссаров П.В. *Установка и способ производства эмульсий топливных смесей для получения взрывчатых веществ на основе отходов производства*. Патент РФ, RU2765548C1. Опубл. 01.02.2022. Режим доступа: https://patents.google.com/patent/RU2765548C1/ru (дата обращения: 22.02.2026).
6. Ефремовцев Н.Н., Жданов Ю.В., Андержанов С.Р., Левачев С.М., Харлов А.Е. *Состав взрывчатого вещества на основе эмульсии топливной смеси и способ его производства*. Патент РФ, RU2760534C2. Опубл. 26.11.2021. Режим доступа: https://patents.google.com/patent/RU2760534C2/ru (дата обращения: 22.02.2026).
7. Трубецкой К.Н., Ефремовцев Н.Н. О создании инновационных роботизированных геотехнологий формирования детонационных систем для повышения безопасности и эффективности взрывных работ. *Горная промышленность*. 2018;(5):62–64.
Trubetskoy K.N., Efremovtsev N.N. On the development of robotized geotechnologies of detonation systems formation for the improvement of safety and efficiency of blasting processes. *Russian Mining Industry*. 2018;(5):62–64. (In Russ.)
8. Ефремовцев Н.Н., Трубецкой К.Н., Жданов Ю.В. *Смесительно-зарядная машина для роботизированной технологии создания скважинных зарядов с переменной энергетической насыщенностью и способы формирования детонационных систем на их основе*. Патент РФ, RU2789093C2. Режим доступа: https://patents.google.com/patent/RU2789093C2/ru (дата обращения: 22.02.2026).

Информация об авторе
Ефремовцев Никита Николаевич – кандидат технических наук, действительный член Академии горных наук, член Научного совета РАН по проблеме народнохозяйственного использования взрыва, старший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН; г. Москва, Российская Федерация; e-mail: noee7@mail.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 29.05.2026
Поступила после рецензирования: 01.07.2026
Принята к публикации: 06.07.2026

Information about the author
Nikita N. Efremovtsev – Cand. Sci. (Eng.), Full-Fledged Member of the Academy of Mining Sciences, Senior Research Associate at Department No. 5 of Geomechanics and Rock Disintegration, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: noee7@mail.ru

Article info
Received: 29.05.2026
Revised: 01.07.2026
Accepted: 06.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-190-199

Оценка экономической эффективности инвестиционных проектов освоения месторождений твёрдых полезных ископаемых

В.А. Матчинов, И.Г. Моисеева ✉, Н.Н. Губернаторова, И.В. Дробышева, О.М. Орловцев
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Калужский филиал, г. Калуга, Российская Федерация
✉ igmoiseeva@fa.ru

Резюме: Рост капиталоёмкости и удлинение сроков освоения месторождений твёрдых полезных ископаемых при высокой геолого-экономической неопределённости требуют адаптированной методики оценки эффективности инвестиционных проектов недропользования. Цель – обосновать методический аппарат, объединяющий дисконтированный денежный поток (NPV, IRR, DPP, PI), анализ чувствительности и сценарный анализ с авторским интегральным скорингом инвестиционной привлекательности. Методы: сравнительный анализ шести критериев оценки; расчётный DCF-пример по трём типам месторождений (крупное высокосортное, среднее, мелкое удалённое); однофакторный анализ чувствительности NPV к шести факторам; оценка эффекта мер господдержки (льгота по налогу на прибыль, каникулы по НДПИ, СЗПК); матрица рисков. Результаты (расчёт авторов): NPV трёх типов – 62,5; 20,4 и 0,7 млрд руб.; IRR – 25,0; 21,9 и 16,7%; DPP – 8,1; 9,7 и 13,9 года; интегральный индекс инвестиционной привлекательности – 81,0; 69,9 и 52,7 балла. Анализ чувствительности выявил доминирование цены реализации (размах NPV 47,3 млрд руб. при ±25%) и ставки дисконтирования (25,8 млрд руб.); сценарный разброс базового проекта – от −10,2 до 47,3 млрд руб. Комбинация мер господдержки на предельном проекте увеличивает NPV в девять раз (до 6,8 млрд руб.), IRR – на 2,8 пп, сокращает DPP на 4,8 года. Ранжирование трёх типов проектов по интегральному индексу устойчиво к вариации весов критериев в пределах ±0,05, что подтверждает робастность оценки. Предложенная интегральная модель применима для скрининга и приоритизации проектов недропользования при формировании инвестиционных программ и распределении мер государственной поддержки.

Ключевые слова: оценка эффективности, инвестиционный проект, недропользование, месторождение твёрдых полезных ископаемых, чистый дисконтированный доход, NPV, IRR, анализ чувствительности, сценарный анализ, геолого-экономический риск, меры государственной поддержки, интегральный скоринг

Для цитирования: Матчинов В.А., Моисеева И.Г., Губернаторова Н.Н., Дробышева И.В., Орловцева О.М. Оценка экономической эффективности инвестиционных проектов освоения месторождений твёрдых полезных ископаемых. *Горная промышленность.* 2026;(5):190–199. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-190-199

Assessment of the economic efficiency of investment projects for the development of solid mineral deposits

V.A. Matchinov, I.G. Moiseeva ✉, N.N. Gubernatorova, I.V. Drobysheva, O.M. Orlovtseva
Financial University under the Government of the Russian Federation, Kaluga Branch, Kaluga, Russian Federation
✉ igmoiseeva@fa.ru

Abstract: The growing capital intensity and extending periods for the development of solid mineral (SM) deposits along with high geological and economic uncertainties call for an adapted methodology for evaluating the efficiency of mining investment projects. The aim is to justify a methodological framework that combines discounted cash flow analysis (NPV, IRR, DPP, PI), sensitivity analysis and scenario analysis with an original integral scoring of the project's investment attractiveness. The methods used included a comparative analysis of six evaluation criteria; a model DCF example for three deposit types, i.e. large high-grade, medium-grade, and low-grade in a remote location; single-factor NPV sensitivity analyses for six factors; an assessment of the effect of the governmental support measures, i.e. profit-tax privileges, mineral extraction tax holidays, Agreement on protection and promotion of capital investment; and a risk matrix. The results are based on the authors' calculations: the NPVs for the three types are RUB 62.5 bn, 20.4 bn and 0.7 bn; the IRR – 25.0%, 21.9% and 16.7%; the DPP – 8.1, 9.7 and 13.9 years; the integral attractiveness index – 81.0, 69.9 and 52.7 points. The sensitivity analysis revealed a dominance of the sales price (the NPV spread

RUB 47.3 bn at ±25%) and the discount rate (RUB 25.8 bn); the base project's scenario spread ranged from −10.2 to +47.3 bn. A combination of the governmental support measures for the marginal project increases the NPV nine-fold (to RUB 6.8 bn), the IRR by 2.8 pp, and shortens the DPP by 4.8 years. Ranking of the three project types by the integral index is robust to variation in the criteria weights within ±0.05. The proposed integral model is applicable for screening and prioritising mining projects when designing investment programmes and allocating governmental support.

Keywords: efficiency assessment, investment project, subsoil use, solid mineral deposit, net present value, NPV, IRR, sensitivity analysis, scenario analysis, geological and economic risks, governmental support measures, integral scoring

For citation: Matchinov V.A., Moiseeva I.G., Gubernatorova N.N., Drobysheva I.V., Orlovtseva O.M. Assessment of the economic efficiency of investment projects for the development of solid mineral deposits. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):190–199. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-190-199

Введение

Освоение месторождений твёрдых полезных ископаемых (ТПИ) отличается высокой капиталоёмкостью, длительными инвестиционными циклами (10–25 лет) и повышенной геолого-экономической неопределённостью, что усложняет обоснование инвестиционных решений в недропользовании. Более 85% месторождений мира находятся в государственной собственности, однако большинство ресурсно-зависимых стран изымает менее 5% природной ренты, а эффективность освоения во многом определяется качеством государственного управления недрами и лицензионными режимами [1]. Дифференцированное изъятие горной ренты и долгосрочная стабильность налогообложения добывающего сектора рассматриваются как условие преодоления «парадокса изобилия» [2]. Особенно чувствительны к параметрам оценки малые и удалённые месторождения: обоснование их вовлечения в оборот требует учёта не только инвестиционной привлекательности, но и социально-экономической значимости [3], тогда как доля малых горнодобывающих предприятий в России составляет лишь 1–2% против 15–30% в ряде стран [4]. Показателен проект освоения Улуг-Хемского угольного бассейна, приобретающий положительные коммерческие показатели лишь при государственном финансировании инфраструктуры и обеспечивающий прирост валового регионального продукта и до 5 тыс. рабочих мест [5].

Методический аппарат оценки эффективности проектов недропользования опирается на дисконтированный денежный поток (DCF) со ставкой на основе средневзвешенной стоимости капитала, а также методы капитализации, затратный и сравнительный подходы; при этом значительная часть отечественных месторождений разведана более четверти века назад, что повышает риск освоения [6]. На стадии разведки применяются критерии NPV, IRR, модифицированная IRR, индекс доходности и срок окупаемости, однако российская практика нередко игнорирует ликвидационную стоимость активов, искажая оценку [7]; развиваются и методы экономической оценки земельных участков под добычу и переработку ТПИ доходным подходом [8].

Ключевую роль играет учёт риска и неопределённости. К.В. Матрохина и соавт. предложили интервально-вероятностную модификацию сценарного анализа с оценкой вероятности P(NPV < 0) и применением метода анализа иерархий для снижения субъективности экспертов, показав, что до 68% вариации обоснованности решения объясняется выбором методологии [9]. И. Ю. Новоселова и соавт. обосновали комплексную оценку рисков освоения на основе нечётких трёхточечных оценок NPV с ранжированием факторов цены, затрат и инфраструктуры [10]. А.Е. Череповицын и соавт. по итогам библиометрического анализа зафиксировали невозможность стандартизации весовых коэффициентов при оценке устойчивости проектов [11]. Прикладные геолого-экономические оценки конкретных месторождений ТПИ (Тастыгское месторождение лития: запасы около 596 тыс. т Li_2O, инвестиции порядка 22 млрд руб.) систематизируют рыночные, экологические, логистические и инвестиционные риски [12; 13].

Отдельное направление – меры государственной поддержки и их влияние на стоимость проекта. О.В. Борисова и соавт. предложили расчёт ставки дисконтирования с надбавками за технологический, кадровый, регуляторный и экологический риски и показали влияние мер финансовой поддержки на денежные потоки [14]. Инструментарий включает понижающие коэффициенты и льготы по НДПИ, режимы региональных инвестиционных проектов [15], преференциальные экономические зоны [16] и специальные инвестиционные контракты [17]. Развиваются скрининг-оценка проектов для предоставления господдержки методом анализа иерархий [18], научно-практический выбор модели государственно-частного партнёрства [19] и экономико-пространственные задачи приоритизации освоения новых месторождений [20].

Несмотря на проработанность отдельных аспектов, отсутствует компактная методика, интегрирующая DCF-критерии, анализ чувствительности и сценарный анализ с многокритериальным скорингом инвестиционной привлекательности и прямым учётом мер господдержки применительно к проектам освоения ТПИ. Цель работы – обосновать такую методику и апробировать её на модельном расчётном примере (расчёт авторов). Задачи: систематизировать методы оценки; построить DCF-модель трёх типов месторождений; провести сценарный анализ и анализ чувствительности NPV; оценить эффект мер господдержки; предложить интегральный индекс инвестиционной привлекательности проекта недропользования.

Материалы и методы

Методической основой оценки принят дисконтированный денежный поток (DCF) с расчётом четырёх взаимодополняющих критериев – чистого дисконтированного дохода (NPV), внутренней нормы доходности (IRR), дисконтированного срока окупаемости (DPP) и индекса доходности (PI) [6]. Опора на собственный расчётный аппарат объясняется тем, что действующие нормативные документы, регламентирующие оценку проектов с государственным

участием, не гармонизированы между собой и содержат неполные наборы критериев [21]. Денежный поток проекта освоения месторождения ТПИ формируется как разность выручки, операционных затрат, налога на добычу полезных ископаемых (НДПИ), налога на прибыль и капитальных вложений; чистый дисконтированный доход определяется по формуле:

$$\mathrm{NPV} = \Sigma_t \, (R_t - O_t - N_t - H_t - K_t) \,/\, (1 + r)^t,$$

где NPV – чистый дисконтированный доход, руб.; R_t – выручка года t, руб.; O_t – операционные затраты; N_t – НДПИ; H_t – налог на прибыль; K_t – капитальные вложения; r – ставка дисконтирования; $t = 0…T$ – год расчётного горизонта (сумма сроков освоения и промышленной добычи).

Внутренняя норма доходности IRR определяется как ставка, обращающая NPV в нуль; проект приемлем при её превышении над барьерной ставкой:

$$\Sigma_t \, CF_t \,/\, (1 + \mathrm{IRR})^t = 0,$$

где CF_t – сальдо денежного потока года t. Годовой выпуск товарного металла рассчитан как произведение годовой мощности по руде, содержания полезного компонента и коэффициента извлечения, выручка – как произведение выпуска на цену реализации. Ставка дисконтирования принята кумулятивным методом с надбавками за геолого-экономические, технологические и регуляторные риски [14]:

$$r = r_f + \Sigma_k \, p_k,$$

где r_f – безрисковая ставка; p_k – премия за k-й риск (геологический, ценовой, технологический, инфраструктурный, регуляторный, финансовый). Для трёх типов проектов ставка принята 14, 15 и 16% – по возрастанию совокупного риск-профиля.

Для интегральной оценки инвестиционной привлекательности предложен многокритериальный индекс, свёртывающий частные баллы по пяти критериям с весами:

$$I_{INV} = \Sigma_j \, w_j \cdot s_j, \; \Sigma_j \, w_j \; = 1,$$

где I_{INV} – интегральный индекс инвестиционной привлекательности, баллы 0–100; s_j – частный балл j-го критерия (финансовая эффективность по PI/NPV, доходность по IRR, срок окупаемости по DPP, геолого-экономический риск, эффект мер господдержки); w_j – весовой коэффициент (0,25; 0,20; 0,15; 0,25; 0,15). Частные баллы нормированы линейно на диапазоне 0–100; логика взвешивания критериев согласуется со скрининг-оценкой инвестпроектов методом анализа иерархий [18], который в прикладных исследованиях используется для построения гибких иерархических моделей многокритериальной оценки [22].

Проект относится к «высокой» инвестиционной привлекательности при I_INV ≥ 75 баллов, «средней» – при 60–75, «пограничной» – при 45–60 и «низкой» – ниже 45; итоговое решение сопрягается с выполнением необходимых условий: NPV > 0, превышение IRR над барьерной ставкой и укладывание DPP в срок отработки запасов.

Аналитический аппарат включает: сравнительный анализ методов оценки по шести параметрам; расчётный DCF-пример по трём типам месторождений; сценарный анализ (пессимистический / базовый / оптимистический); однофакторный анализ чувствительности NPV к шести факторам в дифференцированных диапазонах неопределённости; оценку эффекта четырёх мер господдержки по схеме «с мерой – без меры», отделяющей вклад отдельного инструмента от совокупного результата [23]; матричное сопоставление доменов риска и мер их снижения [9]. Модельный пример построен на репрезентативных обобщённых параметрах и не является отчётностью конкретной компании (расчёт авторов).

Сценарии сформированы согласованным изменением группы факторов: в пессимистическом – снижение цены на 18%, рост капитальных и операционных затрат на 10–12% и повышение ставки до 17,5%; в оптимистическом – симметрично благоприятные сдвиги при ставке 13,5%. Анализ чувствительности выполнен методом однофакторного варьирования в дифференцированных диапазонах неопределённости (цена ±25%, содержание ±12%, извлечение ±8%, капитальные затраты ±20%, операционные ±15%, ставка ±3 п.п.); ширина диапазонов отражает разную волатильность факторов при разведанных запасах.

Результаты

Сравнительный анализ методов (табл. 1) показал, что ни один критерий по отдельности не охватывает всех особен-

Таблица 1
Сравнение методов и критериев оценки эффективности инвестиционных проектов освоения месторождений твердых полезных ископаемых

Table 1
A comparison of the methods and criteria for assessing the efficiency of mining projects for solid mineral deposits

Метод / критерий	Экономический смысл	Учёт времени	Учёт риска и неопределённости	Длит. циклы и господдержка	Применимость к ТПИ
NPV (ЧДД)	Прирост стоимости, руб.	Да	Косвенно (ставка)	Частично	Высокая (базовый)
IRR (ВНД)	Доходность, %	Да	Косвенно	Нет	Высокая (с оговорками)
DPP	Срок возврата, лет	Да	Слабо	Нет	Средняя (ликвидность)
PI (ИД)	Отдача на 1 руб.	Да	Косвенно	Нет	Высокая (при лимите)
Реальные опционы	Ценность гибкости	Да	Прямо (волатильность)	Частично	Средняя (данные)
Интегральный скоринг (авт.)	Свёртка, баллы	Да	Прямо (домен риска)	Да (домены срока и господдержки)	Высокая (адаптирован)

Примечание: обобщение на основе методического аппарата оценки эффективности недропользования.
Note: A summary based on the methodological framework for assessing the efficiency of subsoil use.

Таблица 2
Исходные параметры расчётного примера по трём типам месторождений твердых полезных ископаемых

Table 2
Input parameters of the model example for three types of solid mineral deposits

Параметр	Тип I – крупное	Тип II – среднее	Тип III – мелкое
Капитальные вложения (CapEx), млрд руб.	78	48	24
Срок освоения, лет	4	4	3
Срок промышленной добычи, лет	18	16	13
Годовая мощность по руде, млн т	8,5	6,0	3,5
Содержание полезного компонента, %	1,25	1,10	0,90
Коэффициент извлечения, %	89	87	85
Цена реализации, тыс. руб/т металла	635	620	615
Удельные операционные затраты, тыс. руб/т руды	1,85	1,95	2,10
Постоянные затраты, млрд руб/год	1,6	1,3	0,9
Ставка дисконтирования, %	14	15	16
Ставка НДПИ, %	8	8	8
Годовой выпуск металла (полн.), тыс. т	94,6	57,4	26,8
Годовая выручка (полн.), млрд руб.	60,0	35,6	16,5

Примечание: параметры репрезентативные обобщённые (не отчётность конкретной компании); выпуск металла = мощность × содержание × извлечение.
Note: the parameters are representative and generalized (not specific to any single company); metal output = capacity × grade × recovery rate.

Таблица 3
Результаты оценки эффективности по типам месторождений и сценариям

Table 3
The efficiency assessment results by the deposit type and scenario

Показатель	Тип I	Тип II (базовый)	Тип III	Тип II: пессимистический	Тип II: оптимистический
NPV, млрд руб.	62,5	20,4	0,7	−10,2	47,3
IRR, %	25,0	21,9	16,7	13,2	27,3
DPP, лет	8,1	9,7	13,9	> срока	7,3
PI (ИД)	1,98	1,53	1,04	0,75	2,25
Индекс I_INV, балл	81,0	69,9	52,7	—	—
Решение	Принять	Принять	Условно	Отклонить	Принять

Примечание: сценарии пессимистический / оптимистический рассчитаны для базового проекта (Тип II); «условно» – приемлем при мерах господдержки.
Note: The pessimistic and optimistic scenarios are based on the baseline project (Type II); “conditional” means acceptable provided governmental support measures are available.

ностей проектов освоения ТПИ – длительных инвестиционных циклов, повышенной геолого-экономической неопределённости и зависимости от мер господдержки [7]. NPV даёт абсолютный прирост стоимости, но чувствителен к выбору ставки; IRR удобен для сравнения, но искажается при неординарных потоках и не отражает масштаб; DPP и PI дополняют картину ликвидностью и удельной отдачей; реальные опционы отражают ценность управленческой гибкости, но требовательны к данным [11]. Это обосновало построение интегрального скоринга с прямым учётом риска и господдержки.

Исходные параметры расчётного примера по трём типам месторождений приведены в табл. 2, результаты оценки – в табл. 3. Крупное высокосортное месторождение (Тип I) при капитальных вложениях 78 млрд руб. и годовой выручке 60,0 млрд руб. обеспечивает NPV 62,5 млрд руб., IRR 25,0%, DPP 8,1 года и PI 1,98. Среднее месторождение (Тип II, базовый) – NPV 20,4 млрд руб., IRR 21,9%, DPP 9,7 года, PI 1,53. Мелкое удалённое низкосортное месторождение (Тип III) при ставке 16% оказывается предельным: NPV 0,7 млрд руб., IRR 16,7% едва превышает барьерную ставку, DPP 13,9 года почти совпадает со сроком добычи, PI 1,04 [3]. В его профи-

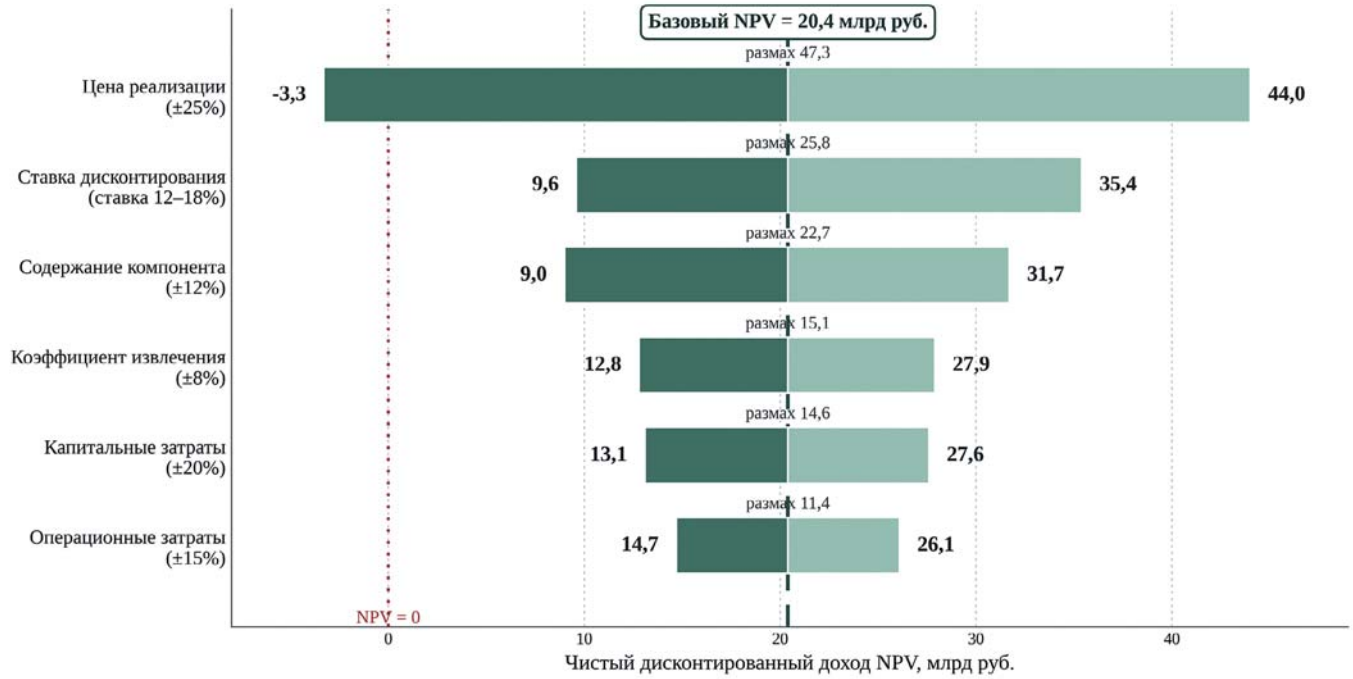


Рис. 1
Торнадо-диаграмма чувствительности NPV проекта освоения месторождения твердых полезных ископаемых (Тип II) к отклонению ключевых факторов

Fig. 1
A tornado diagram of the NPV sensitivity of an SM-deposit mining project (Type II) to deviations in the key factors

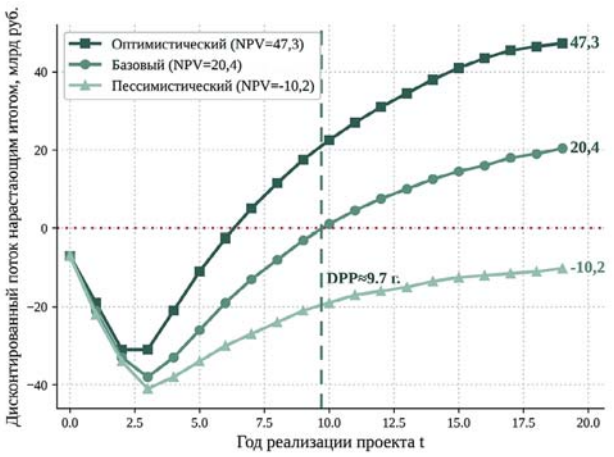
ле сказывается и удалённость: инвестиции в транспортную и энергетическую инфраструктуру признаются условием экономического роста и сбалансированного регионального развития [24], однако в проектах такого типа они ложатся на инвестора и утяжеляют капитальные вложения. Интегральный индекс составил 81,0; 69,9 и 52,7 балла, что относит проекты к «высокой», «средней» и «пограничной» привлекательности.

Применение решающего правила даёт однозначную дифференциацию: проекты Тип I и Тип II принимаются (I_INV 81,0 и 69,9 балла при NPV > 0 и IRR выше барьерной ставки), тогда как Тип III (52,7 балла, IRR лишь на 0,7 пп выше ставки) относится к условно приемлемым, требующим мер господдержки или доразведки для повышения содержания и извлечения. Ранжирование трёх типов устойчиво к вариации весов критериев в пределах ±0,05: в 20 тыс. случайных комбинаций весов перестановок порядка не возникает, что подтверждает робастность интегральной оценки.

Сценарный анализ базового проекта (Тип II) выявил высокую амплитуду результата (рис. 2, *а*): в пессимистическом сценарии (цена −18%, затраты +10–12%, ставка 17,5%) NPV падает до −10,2 млрд руб. при IRR 13,2 %, в оптимистическом – растёт до 47,3 млрд руб. при IRR 27,3%. Дисконтированный поток нарастающим итогом пересекает нуль на 9,7-м году в базовом сценарии и на 7,3-м – в оптимистическом; в пессимистическом проект не окупается в пределах горизонта. Зависимость NPV от ставки (рис. 2, *б*) обращается в нуль при IRR 21,9%, что даёт запас 6,9 пп к базовой ставке 15% [9].

Анализ чувствительности (табл. 4, рис. 1) ранжировал факторы по вкладу в разброс NPV. Доминирует цена реализации: при отклонении ±25% NPV изменяется от −3,3 до 44,0 млрд руб. (размах 47,3 млрд руб.), то есть при неблагоприятной конъюнктуре базовый проект становится убыточным. Далее следуют ставка дисконтирования (размах 25,8 млрд руб. в коридоре 12–18%), содержание полезного компонента (±12%; 22,7), коэффициент извлечения (±8%;

а)



б)

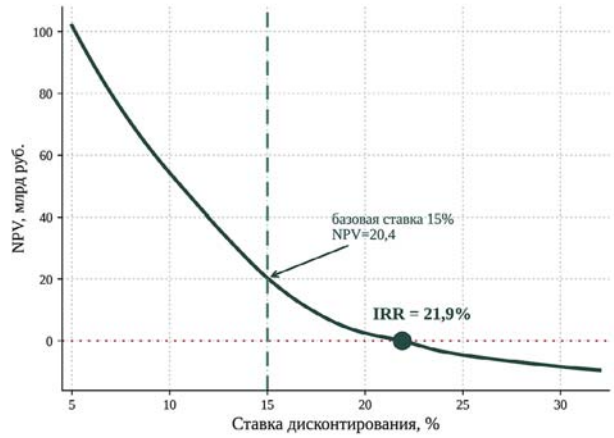


Рис. 2
Сценарные кривые NPV(t) нарастающим итогом (а) и зависимость NPV от ставки дисконтирования с точкой IRR (б) для проекта Тип I

Fig. 2
Cumulative NPV(t) scenario curves (a) and NPV vs. discount rate with the IRR point (б) for the Type II project

Таблица 4
Анализ чувствительности NPV проекта Тип II к ключевым факторам (базовый NPV = 20,4 млрд руб.)

Table 4
NPV sensitivity analysis of the Type II project to the key factors (base NPV = RUB 20.4 bn)

Фактор	Диапазон, %	NPV−, млрд руб.	NPV+, млрд руб.	Размах, млрд руб.	Ранг
Цена реализации	±25	−3,3	44,0	47,3	1
Ставка дисконтирования	12–18	9,6	35,4	25,8	2
Содержание компонента	±12	9,0	31,7	22,7	3
Коэффициент извлечения	±8	12,8	27,9	15,1	4
Капитальные затраты	±20	13,1	27,6	14,6	5
Операционные затраты	±15	14,7	26,1	11,4	6

Примечание: NPV− и NPV+ – значения при неблагоприятном и благоприятном отклонении фактора; ранг – по убыванию размаха.
Note: the NPV− and NPV+ values are for an unfavorable and favorable deviation of the factor, respectively; the rank is in descending order of magnitude.

Таблица 5
Влияние мер государственной поддержки на показатели эффективности предельного проекта Тип III

Table 5
Effects of the governmental support measures on the efficiency indicators of the marginal Type III project

Мера господдержки	NPV, млрд руб.	ΔNPV, млрд руб.	IRR, %	DPP, лет	PI
Без мер (базовый)	0,7	—	16,7	13,9	1,04
Льгота по прибыли (региональный инвестиционный проект, 10%, 6 лет)	1,9	+1,1	17,6	12,4	1,09
Каникулы по налогу на добычу полезных ископаемых (0 %, 4 года)	2,6	+1,8	18,3	11,6	1,13
Соглашение о защите и поощрении капиталовложений (стабилизация, *r* −2 пп)	3,3	+2,6	16,7	11,6	1,16
Комбинация мер	6,8	+6,1	19,5	9,1	1,33

Таблица 6
Матрица доменов риска проекта освоения месторождения твердых полезных ископаемых и мер их снижения

Table 6
A matrix of risk domains for an SM-deposit mining project and their mitigation measures

Домен риска	Проявление в проекте	Влияние	Мера снижения / господдержки
Геологический	Отклонение содержания, запасов, извлечения	NPV, PI	Доразведка, поэтапный ввод, консервативные кондиции
Ценовой	Волатильность цен на сырьё	NPV (главный)	Хеджирование, долгосрочные контракты, диверсификация
Технологический	Срыв сроков и параметров переработки	CapEx, OpEx, DPP	Пилотирование, EPC-контракты, резерв мощности
Регуляторный	Изменение налога на добычу полезных ископаемых, налогов, условий недропользования	NPV, ставка	Соглашение о защите и поощрении капиталовложений, специальный инвестиционный контракт
Инфраструктурный	Удалённость, дефицит энерго- и транспортной сети	CapEx, OpEx	ГЧП, инфраструктурные субсидии, территория опережающего развития / особая экономическая зона
Финансовый	Стоимость и доступность капитала	Ставка, NPV	Проектное финансирование, субсидирование ставки, инвествычет

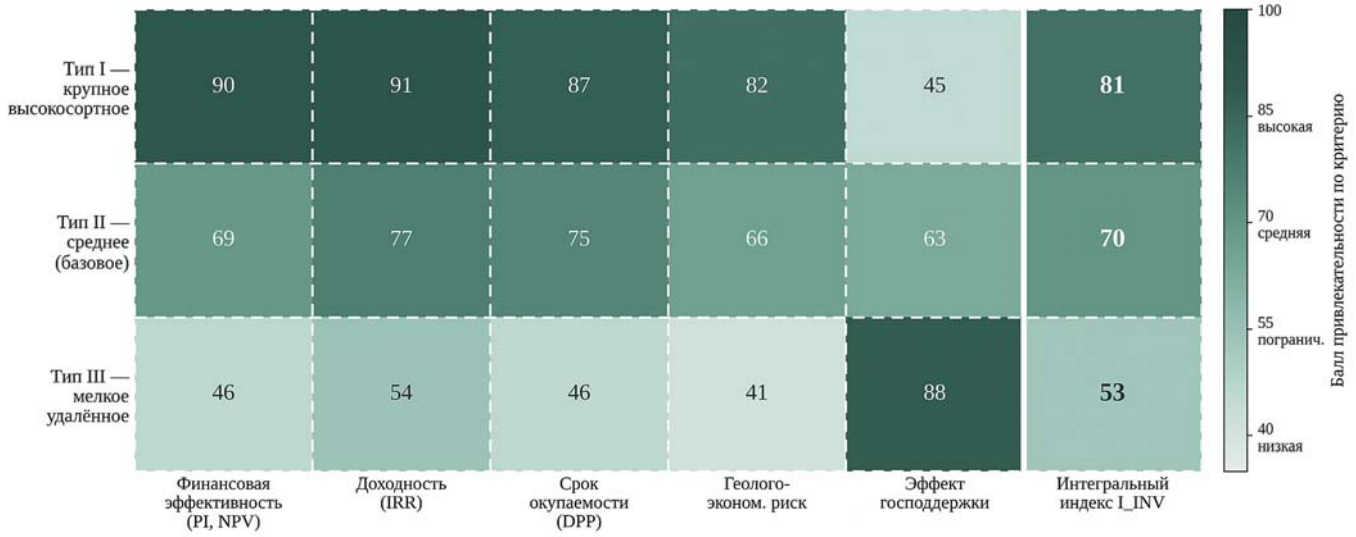


Рис. 3
Тепловая карта скоринга инвестиционной привлекательности типов проектов освоения месторождений твердых полезных ископаемых по критериям интегральной модели (баллы 0–100)

Fig. 3
A heat map of the investment attractiveness scoring for the types of SM-deposit development projects by the criteria of the integral-model (0–100 points)

15,1), капитальные (±20%; 14,6) и операционные (±15%; 11,4) затраты. Преобладание ценового и ресурсно-геологического факторов над затратными подтверждает приоритет управления выручкой и качеством запасов [8]. Сама задача выделения факторов, наиболее сильно влияющих на результирующий показатель, решается и средствами когнитивного моделирования, где связи между факторами задаются взвешенным ориентированным графом, а вычислительные эксперименты показывают, как импульс по управляемому фактору доходит до целевого [25].

Эффект мер господдержки оценён на предельном проекте Тип III (табл. 5). Льгота по налогу на прибыль (региональный инвестпроект, 10% на 6 лет) повышает NPV до 1,9 млрд руб., каникулы по НДПИ (нулевая ставка на 4 года) – до 2,6 млрд руб., механизм СЗПК (стабилизация условий, снижение ставки на 2 пп) – до 3,3 млрд руб. [17]. Комбинация мер даёт кумулятивный эффект: NPV 6,8 млрд руб. (рост в девять раз), IRR 19,5% (+2,8 пп), DPP 9,1 года (−4,8 года), PI 1,33. Показательно, что механизм СЗПК, снижая ставку, не меняет IRR (16,7%), но повышает NPV и сокращает DPP – действует на стоимость капитала, а не на денежный поток [19]. Такое разделение каналов влияния важно при калибровке поддержки: методологическое обоснование СЗПК предполагает сопоставление рентабельности инвестированного капитала проекта с медианным значением по отрасли, что задаёт количественный ориентир для назначения мер [26]. Матрица «домен риска – мера снижения» (табл. 6) систематизирует соответствие рисков инструментам митигации, включая доразведку, хеджирование, ГЧП и налоговые преференции [15].

Сопоставление мер по удельному эффекту показывает, что при равном формате максимальный прирост NPV на предельном проекте даёт механизм СЗПК (+2,6 млрд руб. за счёт снижения риск-премии), тогда как каникулы по НДПИ и льгота по прибыли по отдельности действуют слабее (+1,8 и +1,1 млрд руб.), но взаимодополняемы; поэтому комбинация обеспечивает нелинейный совокупный эффект (+6,1 млрд руб.), переводя проект в устойчиво положительную зону (PI с 1,04 до 1,33).

Тепловая карта скоринга (рис. 3) визуализирует различие профилей: Тип I лидирует по финансовым критериям (баллы 82–91) при низкой потребности в господдержке (45), тогда как Тип III при слабых финансовых баллах (41–54) демонстрирует максимальную отзывчивость на меры господдержки (88). Отсюда ключевой управленческий вывод: инструменты господдержки наиболее результативны для маргинальных проектов, где переводят проект из зоны отклонения в зону условной приемлемости, тогда как для высокосортных их вклад в интегральную привлекательность невелик [18].

Заключение

Предложенная методика соединяет классический DCF-аппарат (NPV 62,5 / 20,4 / 0,7 млрд руб.; IRR 25,0 / 21,9 / 16,7 %; DPP 8,1 / 9,7 / 13,9 года для трёх типов месторождений) с многокритериальным интегральным индексом инвестиционной привлекательности (81,0 / 69,9 / 52,7 балла), что позволяет ранжировать разнокачественные проекты освоения ТПИ по единой шкале с прямым учётом геолого-экономического риска и мер господдержки. Анализ чувствительности показал доминирование ценового фактора (размах NPV 47,3 млрд руб. при ±25%) и ставки дисконтирования (25,8 млрд руб.), что определяет приоритеты риск-менеджмента. Сценарный разброс базового проекта (от −10,2 до 47,3 млрд руб.) подтверждает необходимость сценарного и вероятностного подхода вместо точечной оценки [9]. Меры господдержки на предельном проекте увеличивают NPV в девять раз и сокращают DPP на 4,8 года, а их дифференцированное влияние (СЗПК – на стоимость капитала, льготы по НДПИ и прибыли – на денежный поток) обосновывает адресность применения к проектам «пограничной» привлекательности [5]. Практическая значимость модели – в применимости для скрининга и приоритизации проектов недропользования при формировании инвестиционных программ и распределении мер государственной поддержки [20].

Список литературы / References

1. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами. *Записки Горного института*. 2023;259:95–111. https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100
Litvinenko V.S., Petrov E.I., Vasilevskaya D.V., Yakovenko A.V., Naumov I.A., Ratnikov M.A. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:95–111. https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100

2. Лапинскас А.А. Влияние горной ренты на эффективность использования природного потенциала: парадокс изобилия и его российская специфика. *Записки Горного института*. 2023;259:79–94. https://doi.org/10.31897/PMI.2023.13
Lapinskas A.A. Influence of mining rent on the efficiency of using natural potential: the paradox of plenty and its Russian specifics. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:79–94. https://doi.org/10.31897/PMI.2023.13

3. Батугина Н.С., Ткач С.М., Хоютанов Е.А., Охлопков В.В. Оценка потенциала и перспективы освоения малых месторождений твердых полезных ископаемых Арктической зоны Якутии. *Арктика: экология и экономика*. 2025;15(3):69–82. https://doi.org/10.25283/2223-4594-2025-3-69-82
Batugina N.S., Tkach S.M., Khoiutanov E.A., Okhlopkov V.V. Assessment of the potential and prospects for the development of small solid mineral deposits in the Arctic Zone of Yakutia. *Arktika: Ekologia i Ekonomika*. 2025;15(3):69–82. (In Russ.) https://doi.org/10.25283/2223-4594-2025-3-69-82

4. Батугина Н.С., Гаврилов В.Л. Роль малых горнодобывающих предприятий в социально-экономическом развитии Республики Саха (Якутия). *ЭКО*. 2024;54(4):8–26. https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2024-4-8-26
Batugina N.S., Gavrilov V.L. The role of small mining enterprises in the socio-economic development of the Republic of Sakha (Yakutia). *ECO*. 2024;54(4):8–26. (In Russ.) https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2024-4-8-26

5. Дабиев Д.Ф., Аюнова О.Д. Состояние и перспективы освоения Улуг-Хемского угольного бассейна. *Уголь*. 2021;(11):45–49. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-11-45-49
Dabiev D.F., Ayunova O.D. State and prospects of development of the Ulugh-Khem coal basin. *Ugol'*. 2021;(11):45–49. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-11-45-49

6. Колокольцева А.В. Современные подходы к оценке эффективности добычи полезных ископаемых. *Власть и управление на Востоке России*. 2021;(1):228–236. Режим доступа: https://vlastdviu.ranepa.ru/downLoad/rio/j2021-1/23%20Колокольцева%20А.%20В..pdf (дата обращения: 02.04.2026).
Kolokoltseva A.V. Modern approaches to evaluating the efficiency of mining. *Power and Administration in the East of Russia*. 2021;(1):228–236. (In Russ.) Available at: https://vlastdviu.ranepa.ru/downLoad/rio/j2021-1/23%20Колокольцева%20А.%20В..pdf (accessed: 02.04.2026).

7. Быченко И.А. Методы оценки инвестиционных проектов по добыче твердых полезных ископаемых на стадии разведки. *Вестник евразийской науки*. 2024;16(S3):17FAVN324. Режим доступа: https://esj.today/PDF/17FAVN324.pdf (дата обращения: 02.04.2026).
Bychenko I.A. Methods of evaluation of investment projects for the extraction of solid minerals at the exploration stage. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(S3):17FAVN324. (In Russ.) Available at: https://esj.today/PDF/17FAVN324.pdf (accessed: 02.04.2026).

8. Быкова Е.Н., Хайкин М.М., Шабаева Ю.И., Белобородова М.Д. Развитие методологии экономической оценки земельных участков для добычи и переработки твердых полезных ископаемых. *Записки Горного института*. 2023:259:52–67. https://doi.org/10.31897/PMI.2023.6
Bykowa E.N., Khaykin M.M., Shabaeva Y.I., Beloborodova M.D. Development of methodology for economic evaluation of land plots for the extraction and processing of solid minerals. *Journal of Mining Institute*. 2023:259:52–67. https://doi.org/10.31897/PMI.2023.6

9. Матрохина К.В., Трофимец В.Я., Мазаков Е.Б., Маховиков А.Б., Хайкин М.М. Развитие методологии сценарного анализа инвестиционных проектов предприятий минерально-сырьевого комплекса. *Записки Горного института*. 2023;259:112–124. https://doi.org/10.31897/PMI.2023.3
Matrokhina K.V., Trofimets V.Y., Mazakov E.B., Makhovikov A.B., Khaykin M.M. Development of methodology for scenario analysis of investment projects of enterprises of the mineral resource complex. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:112–124. https://doi.org/10.31897/PMI.2023.3

10. Новоселова И.Ю., Петров И.В., Новоселов А.Л. Арктический уголь: методические вопросы комплексной оценки рисков. *Уголь*. 2020;(8):88–91. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-8-88-91
Novoselova I.Yu., Petrov I.V., Novoselov A.L. Arctic coal: methodological issues of an integrated risk assessment. *Ugol'*. 2020;(8):88–91. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-8-88-91

11. Череповицын А.Е., Цветков П.С., Евсеева О.О. Критический анализ методических подходов к оценке устойчивости арктических нефтегазовых проектов. *Записки Горного института*. 2021;249:463–479. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.15
Cherepovitsyn A.E., Tcvetkov P.S., Evseeva O.O. Critical analysis of methodological approaches to assessing sustainability of arctic oil and gas projects. *Journal of Mining Institute*. 2021;249:463–479. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.15

12. Ооржак В.О. Геолого-экономическая оценка перспектив освоения и рисков развития Тастыгского месторождения лития. *Горная промышленность*. 2025;(6):134–137. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-134-137
Oorzhak V.O. Geological and economic assessment of development prospects and risks of the Tastykskoe lithium deposit. *Russian Mining Industry*. 2025;(6):134–137. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-134-137

13. Дабиев Д.Ф. Экономическая оценка эффективности освоения Тастыгского месторождения сподуменовых пегматитов на территории Тывы. *Горная промышленность*. 2022;(3):103–105. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-103-105
Dabiev D.F. Economic assessment of efficiency to develop the Tastyg spodumene pegmatite deposit in Tyva. *Russian Mining Industry*. 2022;(3):103–105. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-103-105

14. Борисова О.В., Древинг С.Р., Лосева О.В., Федотова М.А. Меры финансовой господдержки и риск-факторы, влияющие на стоимость инвестиционных проектов по внедрению промышленных робототехнических комплексов. *Финансы: теория и практика*. 2025;29(3):20–34. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-3-20-34
Borisova O.V., Dreving S.R., Loseva O.V., Fedotova M.A. State financial support measures and risk factors affecting the cost of investment projects for the introduction of industrial robotic complex. *Finance: Theory and Practice*. 2025;29(3):20–34. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-3-20-34

15. Коробова О.С. Механизмы стимулирования реализации проектов в сфере обращения с отходами недропользования. Известия высших учебных заведений. *Геология и разведка*. 2020;63(6):87–94. https://doi.org/10.32454/0016-7762-2020-63-6-87-94
Korobova O.S. Mechanisms for stimulating the implementation of projects in the sphere subsurgery waste handling. Proceedings of Higher Educational Establishments: *Geology and Exploration*. 2020;63(6):87–94. (In Russ.) https://doi.org/10.32454/0016-7762-2020-63-6-87-94

16. Волков А.Д. Мировой опыт применения экономико-правовых режимов и его использование в пространственной организации экономики Арктического региона. *Экономика, предпринимательство и право*. 2021;11(6):1389–1404. https://doi.org/10.18334/epp.11.6.112298
Volkov A.D. World experience of economic and legal regimes and its application in the spatial organization of the Arctic region. *Journal of Economics, Entrepreneurship and Law*. 2021;11(6):1389–1404. (In Russ.) https://doi.org/10.18334/epp.11.6.112298

17. Иншакова А.О. Специальный инвестиционный контракт как инструмент государственной поддержки инвестиционной деятельности в России. *Правовая парадигма*. 2024;23(4):67–74. https://doi.org/10.15688/lc.jvolsu.2024.4.9
Inshakova A.O. The special investment contract as an instrument of state support for investment activities in Russia. *Legal Concept*. 2024;23(4):67–74. (In Russ.) https://doi.org/10.15688/lc.jvolsu.2024.4.9

18. Косорукова И.В., Лосева О.В., Федотова М.А. Скрининг-оценка региональных инвестиционных проектов для предоставления мер государственной финансовой поддержки. *Финансы: теория и практика*. 2024;28(2):23–39. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2024-28-2-23-39
Kosorukova I.V., Loseva O.V., Fedotova M.A. Screening-evaluation of regional investment projects for the provision of state financial support measures. *Finance: Theory and Practice*. 2024;28(2):23–39. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2024-28-2-23-39

19. Тютюкина Е.Б., Губернаторов А.М., Егорова Д.А. Развитие научно-практического подхода к выбору модели государственно-частного партнерства при реализации инвестиционного проекта в регионе. *Финансы: теория и практика*. 2025;29(5):6–20. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-5-6-20
Tyutyukina E.B., Gubernatorov A.M., Egorova D.A. The development of a scientific and practical approach to selecting a public-private partnership model for implementation of an investment project in a region. *Finance: Theory and Practice*. 2025;29(5):6–20. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-5-6-20

20. Новоселова И.Ю., Новоселов А.Л. Экономико-пространственные задачи освоения новых месторождений углеводородных ресурсов в Арктической зоне Российской Федерации. *Экономика. Налоги. Право*. 2024;17(2):95–105. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2024-17-2-95-105
Novoselova I.Yu., Novoselov A.L. Economic and spatial objectives of the development of new hydrocarbon deposits in the arctic zone of the Russian federation. *Economics, Taxes & Law*. 2024;17(2):95–105. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2024-17-2-95-105

21. Помулев А.А. Методические аспекты оценки эффективности инвестиционных проектов с государственным участием. *Экономика. Налоги. Право*. 2023;16(4):52–64. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-4-52-64
Pomulev A.A. Methodological aspects of evaluating the effectiveness of investment projects with state participation. *Economics, Taxes & Law*. 2023;16(4):52–64. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-4-52-64

22. Кормильцева Е.А., Байгушева И.А., Варова Н.Л., Стариков В.И., Шмакова А.П., Бурмистрова Н.А. Исследование готовности будущих экономистов к использованию искусственного интеллекта на основе метода анализа иерархий. *Science for Education Today*. 2024;(3):113–134. https://doi.org/10.15293/2658-6762.2403.06
Kormiltseva E.A., Baygusheva I.A., Varova N.L., Starikov V.I., Shmakova A.P., Burmistrova N.A. Study of the future economists' readiness to use artificial intelligence based on the hierarchy analysis method. *Science for Education Today*. 2024;(3):113–134. (In Russ.) https://doi.org/10.15293/2658-6762.2403.06

23. Тихонова А.В. Проблема сепарирования эффектов государственной финансовой поддержки и варианты ее решения. *Экономика. Налоги. Право.* 2023;16(5):104–113. https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-5-104-113
Tikhonova A.V. The problem of separating the effects of state financial support and its solutions. *Economics, Taxes & Law.* 2023;16(5):104–113. (In Russ.) https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-5-104-113

24. Капустина Н.В., Садыков А.И., Подгорский Я. Роль инвестиций в инфраструктуру в экономическом росте и сбалансированном региональном развитии. *Финансы: теория и практика.* 2023;27(2):50–63. Режим доступа: https://financetp.fa.ru/jour/article/view/2077 (дата обращения: 02.04.2026).
Kapustina N.V., Sadykov A.I., Podhorský J. The role of infrastructure investment in economic growth and balanced regional development. *Finance: Theory and Practice.* 2023;27(2):50–63. Available at: https://financetp.fa.ru/jour/article/view/2077 (accessed: 02.04.2026).

25. Тюменцева Е.Ю., Шамис В.А., Мухаметдинова С.Х. Факторы, оказывающие существенное влияние на уровень финансовой грамотности студентов вузов: прогнозирование на основе когнитивной методологии. *Science for Education Today.* 2023;(5):124–140. Режим доступа: http://sciforedu.ru/article/5912 (дата обращения: 02.04.2026).
Tyumentseva E.Y., Shamis V.A., Mukhametdinova S.K. Factors having the most significant impact on university students' level of financial literacy: Forecasting based on cognitive methodology. *Science for Education Today.* 2023;(5):124–140. (In Russ.) Available at: http://sciforedu.ru/article/5912 (accessed: 02.04.2026).

26. Тютюкина Е.Б., Егорова Д.А. Государственная поддержка инвестиционных проектов в рамках соглашения о защите и поощрении капиталовложений: методологическое обоснование. *Финансы: теория и практика.* 2023;27(5):43–54. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2023-27-5-43-54
Tyutyukina E.B., Egorova D.A. State support of investment projects within the framework of an agreement on the protection and promotion of capital investments: a methodological rationale. *Finance: Theory and Practice.* 2023;27(5):43–54. https://doi.org/10.26794/2587-5671-2023-27-5-43-54

Информация об авторах
Матчинов Виталий Анатольевич – кандидат экономических наук, доцент кафедры учёта и менеджмента, директор, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Калужский филиал, г. Калуга, Российская Федерация; e-mail: vamatchinov@fa.ru
Моисеева Ирина Геннадьевна – кандидат психологических наук, доцент кафедры экономики, финансов и гуманитарных дисциплин, заместитель директора по научной работе, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Калужский филиал, г. Калуга, Российская Федерация; e-mail: igmoiseeva@fa.ru
Губернаторова Наталья Николаевна – кандидат экономических наук, заведующий кафедрой учёта и менеджмента, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Калужский филиал, г. Калуга, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0001-5199-6360; e-mail: nngubernatorova@fa.ru
Дробышева Ирина Васильевна – доктор педагогических наук, заведующий кафедрой бизнес-информатики и высшей математики, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Калужский филиал, г. Калуга, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-4260-8634; e-mail: ivdrobysheva@fa.ru
Орловцева Оксана Михайловна – кандидат экономических наук, заведующий кафедрой экономики, финансов и гуманитарных дисциплин, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Калужский филиал, г. Калуга, Российская Федерация; e-mail: omorlovtseva@fa.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 19.06.2026
Поступила после рецензирования: 22.07.2026
Принята к публикации: 27.07.2026

Information about the authors
Vitaly A. Matchinov – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of Accounting and Management, Director, Financial University under the Government of the Russian Federation, Kaluga Branch, Kaluga, Russian Federation; e-mail: vamatchinov@fa.ru
Irina G. Moiseeva – Cand. Sci. (Psychol.), Associate Professor of the Department of Economics, Deputy Director for Research, Finance and Humanities, Financial University under the Government of the Russian Federation, Kaluga Branch, Kaluga, Russian Federation; e-mail: igmoiseeva@fa.ru
Natalia N. Gubernatorova – Cand. Sci. (Econ.), Head of the Department of Accounting and Management, Financial University under the Government of the Russian Federation, Kaluga Branch, Kaluga, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0001-5199-6360; e-mail: nngubernatorova@fa.ru
Irina V. Drobysheva – Dr. Sci. (Educ.), Head of the Department of Business Informatics and Higher Mathematics, Financial University under the Government of the Russian Federation, Kaluga Branch, Kaluga, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-4260-8634; e-mail: ivdrobysheva@fa.ru
Oksana M. Orlovtseva – Cand. Sci. (Econ.), Head of the Department of Economics, Finance and Humanities, Financial University under the Government of the Russian Federation, Kaluga Branch, Kaluga, Russian Federation; e-mail: omorlovtseva@fa.ru

Article info
Received: 19.06.2026
Revised: 22.07.2026
Accepted: 27.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-200-205

Изменение энтальпии вентиляционной струи при работе дизельной техники в подземных сооружениях криолитозоны

В.Ю. Панков ✉
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация
✉ pankov1956@inbox.ru

Резюме: Цель работы – определение влияния дизельной техники на тепловой режим горных выработок подземных сооружений криолитозоны. В статье проанализированы литературные источники, где утверждается, что в механизированных шахтах и рудниках дизельная техника является определяющим фактором формирования теплового режима, причем существует прямая зависимость между количеством работающих машин, их мощностью и приращением температуры в горной выработке. Поскольку отдельные литературные данные противоречат друг другу, были проведены исследования и получены расчетные зависимости для определения приращения энтальпии и температуры в подземных сооружениях при работе дизельных машин и механизмов. На основании качественного и количественного анализа установлено, что приращение энтальпии (температуры) воздуха в горных выработках подземных сооружений не зависит от мощности и количества действующих дизельных установок и полностью определяется начальной температурой вентиляционной струи и термодинамическим коэффициентом полезного действия (КПД) двигателей. Установлено, что приращение температуры главным образом определяется КПД действующих дизельных установок и увеличивается при повышении начальной температуры вентиляционной струи: причем, чем выше КПД установки, тем меньше влияние начальной температуры воздуха на тепловой режим в выработке. Показано, что даже при минимальном термодинамическом КПД дизельной техники, равном 0,4, приращение температуры, как правило, не превышает 6,0 °С при начальной положительной температуре воздуха и 5,0 °С при начальной отрицательной температуре воздуха в горной выработке.

Ключевые слова: подземное сооружение, горная выработка, тепловой режим, дизельная техника, вентиляция, энтальпия, температура, источник тепла, метод расчета

Благодарности: Автор выражает благодарность профессору А.Ф. Галкину за идею работы и помощь в подготовке статьи к публикации.

Для цитирования: Панков В.Ю. Изменение энтальпии вентиляционной струи при работе дизельной техники в подземных сооружениях криолитозоны. *Горная промышленность.* 2026;(5):200–205. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-200-205

Changes in the enthalpy of the ventilation stream during operation of diesel equipment in underground facilities in the permafrost zone

V.Yu. Pankov ✉
M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation
✉ pankov1956@inbox.ru

Abstract: The purpose of this work was to determine the effect of diesel equipment on the thermal regime of mine workings of underground operations in the permafrost zone. The paper analyzes literature sources which state that in mechanized mines and mines, diesel equipment is a determining factor in formation of the thermal regime, and there is a direct relationship between the number of operating machines, their power and the increment of temperature in the mine working. Since certain literary data contradict each other, studies were carried out and calculated dependencies were obtained to determine the increment of enthalpy and temperature in underground facilities during operation of diesel machines and mechanisms. On the basis of qualitative and quantitative analyses, it was established that an increment in the enthalpy (temperature) of the air in the mine workings of underground facilities does not depend on the power and the number of operating diesel units and is fully determined by the initial temperature of the ventilation stream and the thermodynamic efficiency of the engines. It has been established that the increment in the temperature is mainly determined by the efficiency of the operating diesel units, and it

increases with an increase in the initial temperature of the ventilation stream: moreover, the higher the efficiency of the units, the smaller is the effect of the initial air temperature on the thermal regime in the mine working. It is shown that even with the minimum thermodynamic efficiency of the diesel equipment equal to 0.4, the temperature increment cannot exceed 6.0°C at the initial positive air temperature, and 5.0°C at the initial negative air temperature in the mine working.

Keywords: underground structure, mine working, thermal regime, diesel equipment, ventilation, enthalpy, temperature, heat source, calculation method

Acknowledgements: The author expresses his gratitude to Professor A.F. Galkin for the idea behind this work and for his assistance in preparing the article for publication.

For citation: Pankov V.Yu. Changes in the enthalpy of the ventilation stream during operation of diesel equipment in underground facilities in the permafrost zone. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):200–205. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-200-205

Введение

Теплосодержание (или энтальпия) влажного воздуха – это количество теплоты, необходимое для нагрева 1 кг сухого воздуха и содержащихся в нем водяных паров от начальной до текущей температуры. В технической термодинамике эта величина измеряется в килоджоулях на килограмм сухого воздуха (кДж/кг). В подземном сооружении при работе дизельных установок, например машин и механизмов с дизельным приводом, энтальпия вентиляционного воздуха будет изменяться за счет тепловыделений от дизельных установок. Это приращение обычно рассматривается как приращение за счет действия абсолютных источников тепловыделения [1]. То есть считается, что влагосодержание воздуха в сооружении за счет работы дизельных установок не изменяется. Обычно для приращения температуры от дизельных установок, используются два основных способа учета образования дополнительного количества тепла: а) через КПД дизельных установок, например [2], и б) напрямую, через теплоту сгорания дизельного топлива, например [3]. Сравнительной точности определения по двум методикам в литературе не найдено. Но, считая, что первый способ косвенно учитывает и теплоту сгорания дизельного топлива, можно считать его вполне приемлемым для инженерных расчетов.

В литературе имеются разноречивые сведения о влиянии дизельных установок на тепловой режим подземных сооружений. Например, в статье [4] приведены графики, согласно которым приращение температуры от работы дизельных установок может превышать 20 °С. Причем, чем больше уровень тепловыделений дизельных установок, тем больше нагрев температуры. По всей вероятности, это вызвано объединением всех типов абсолютных источников в одно целое, что противоречит правилам безопасности, которые регламентируют количество воздуха, подаваемого в подземное сооружение, при использовании дизельной техники. В работе [5] утверждается, что с увеличением количества работающих в выработке дизельных машин температура в забое увеличивается пропорционально их мощности. В работах [6; 7], наоборот, доказывается, что приращение от работы дизельной техники в рудниках криолитозоны – величина приблизительно постоянная, не превышающая нескольких градусов Цельсия и от количества одновременно работающей техники не зависит. То есть единого мнения среди специалистов, занимающихся прогнозом и регулированием теплового режима подземных сооружений, в этом вопросе нет. В то же время никто не отрицает факт, что собственно тепловыделения от абсолютных источников играют важную роль в формировании теплового режима рудников криолитозоны и оказывают существенное влияние например на устойчивость горных пород, которая зависит от температуры воздуха в выработках. Важность учета абсолютных источников тепла (в том числе дизельных машин и механизмов) в формировании теплового режима в подземных сооружениях криолитозоны отмечается многими исследователями в области горной теплофизики и инженерного мерзлотоведения [8; 9].

Целью настоящей работы было определение влияния дизельной техники на тепловой режим подземных сооружений криолитозоны, в частности, высокомеханизированных рудников криолитозоны, в которых активно используется дизельная техника при погрузке и доставке руды и материалов.

Материалы и методы

Тепловой баланс подземного сооружения при наличии работающей дизельной техники запишем в виде следующего равенства, Вт,

$$d(GJ) = q, \quad (1)$$

где G – расход воздуха, кг/с; J – энтальпия воздуха, Дж/кг; q – суммарные тепловыделения от дизельных установок, Дж/с.

Считая, что расход воздуха не изменяется в период проветривания объекта, можно записать следующее балансовое уравнение, Вт:

$$GdJ = q. \quad (2)$$

Массовый расход воздуха определяется по формуле, кг/с,

$$G = \gamma(t,d)Q\,, \quad (3)$$

где $\gamma(t,d)$ – плотность воздуха, являющаяся функцией температуры t и влажности d, определение которой для подземных сооружений можно найти в работах [10; 11]; Q – нормативный объемный расход воздуха на проветривание, м³/с.

С учетом выражения (3) формулу для определения приращения энтальпии в зависимости от тепловыделения дизеля можно записать в виде, Дж/кг:

$$dJ = q/Q\gamma(t,d). \quad (4)$$

Тепловыделения при работе дизельной установки представим как часть от ее мощности, Вт,

$$q = nq_0\,, \quad (5)$$

где n – коэффициент, характеризующий количество тепла, которое пошло на нагревание воздуха, в зависимости от мощности двигателя, д.е.; q_0 – мощность работающих дизельных установок, Вт.

Согласно правилам безопасности поступление свежего воздуха на объект с работающей дизельной установкой по разжижению вредных выбросов до нормативных ПДК определяется как величина массового расхода воздуха на единицу мощности дизельной установки, м³/с:

$$Q = \beta q_0 , \quad (6)$$

где β – нормативная величина расхода воздуха на 1 Вт (на 1 л.с.) мощности дизельной техники (обычно 5,0 или 3,5 м³/мин на 1 л.с., что соответствует 0,1133 и 0,0861 м³/с на кВт в зависимости от наличия фильтра-поглотителя вредных газов в дизельной установке и используемого вида топлива), м³/с*Вт.

Подставляя выражения (5) и (6) в (4), получим уравнение для приращения энтальпии, Дж/кг:

$$dJ = n/\beta\gamma(t,d). \quad (7)$$

Если в расчет ввести термодинамический КПД (η) дизельного двигателя, то можно считать

$$n = k(1-\eta)/\eta, \quad (8)$$

где k – коэффициент, определяемый экспериментальным путем (показывающий, какая доля энергии от сгорания топлива пошла непосредственно на нагревание воздуха в выработке), д.е.

Анализируя литературные данные, в оценочных расчетах можно принять диапазон изменения данного параметра от 0,3 до 0,6. Далее нами в расчетах этот параметр считался постоянным, равным 0,45.

Очевидно, что точно рассчитать часть энергии сгорания топлива, которая превращается в тепло, отдаваемое двигателем в окружающую среду затруднительно, особенно учитывая неравномерное потребление энергии (расход топлива) во времени при выполнении различных технологических операций. Поэтому наиболее приемлемым в таких случаях является использование не детерминированных значений исходных данных, а вероятного диапазона их изменения в рассматриваемом процессе. Этот подход и был применен нами в дальнейших расчетах. В частности, термодинамический КПД изменялся в диапазоне от 0,4 до 0,7. В среднем же все литературные источники дают цифру тепловых потерь дизельных машин и механизмов, близкую к 50% от общей энергии сгорания топлива. Список литературных источников по данной тематике достаточно обширен, как и конкретные данные по величине «η», и может быть легко представлен любым вариантом искусственного интеллекта по запросу пользователя.

Перейдя от дифференциала к конечным разностям, получим выражение для определения приращения энтальпии в сооружении при работе любого количества дизельной техники, Дж/кг:

$$\Delta J = = k(1-\eta)/\eta\beta\gamma(t,d). \quad (9)$$

Приращение температуры воздуха в сооружении при работе дизельных установок приближенно может быть найдено из следующих соображений.

В инженерной практике принято определять энтальпию по простой формуле, Дж/кг:

$$J = ct + rd = (1{,}005t + 2500d) * 10^3 , \quad (10)$$

где c – удельная теплоемкость сухого воздуха, Дж/кгК; r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; C – удельная теплоемкость водяного пара, Дж/кгК.

Используя данную зависимость и считая, что дополнительного увлажнения воздуха при работе дизельных установок не происходит, получим следующую простую зависимость для определения приращений температуры в сооружении за счет тепловыделений от работы дизельных установок (принято, что теплоемкость воздуха измеряется в кДж/кгК, т.к. параметр «β» измеряется в м³/с на кВт) , °С:

$$\Delta T = k(1-\eta)/\eta(\beta\gamma(t,d)). \quad (11)$$

Как видно из формул (9) и (11), основным переменным параметром для конкретной дизельной машины, который определяет приращение энтальпии и температуры в выработке, является удельный вес (плотность) воздуха. При этом известно, что влияние влажности на плотность воздуха, особенно в холодном климате, очень мало и может не учитываться во многих инженерных задачах. В работах [11; 12] приводятся количественные данные, подтверждающие этот вывод. Например, плотность влажного воздуха при нуле градусов Цельсия всего на 0,23% меньше, чем у сухого воздуха при этой же температуре. При температуре +4 °С при повышении относительной влажности с 20 до 100% плотность воздуха уменьшается менее чем на 1%. Для сравнения, изменение температуры воздуха от –20 до –10 °С при постоянном давлении изменяет его плотность примерно на 4%, что значительно превышает влияние влажности.

Учитывая эти особенности влажного воздуха, мы получили простую аналитическую зависимость для определения плотности воздуха при характерных значениях влажности воздуха в подземных сооружениях криолитозоны, действительную в пределах изменения температур от –30 до +30 °С, кг/м³:

$$\gamma(t,d) = 1.3 - 4.7 * t * 10^{-3}. \quad (12)$$

Данная формула в дальнейшем использовалась при численных расчетах и построении графиков.

Результаты и их обсуждение

Прежде всего, чтобы оценить достоверность результатов исследований, приведенных во введении [4; 5], проанализируем формулу (9). Анализ данного выражения позволяет сделать важный вывод: приращение теплосодержания воздуха в инженерных сооружениях при работе дизельных установок не зависит от их количества и определяется только уровнем КПД дизельных установок, а также температурой и влажностью входящей вентиляционной струи. Это следует из того факта, что параметры «n» и «β» не зависят от параметра «q_0», т.е. от количества дизельных машин, работающих в сооружении. Переменными являются произведения (nq_0) и (βq_0), но, так как они связаны между собой отношением в формуле (8), то и приращение энтальпии не зависит от «q_0». Более того, это приращение не зависит и от объема сооружения, в котором работают дизельные установки, и полностью определяется нормативным значением расхода воздуха по разжижению вредных газов до норматива ПДК КПД дизельных установок и плотностью подаваемого в сооружение воздуха.

На основании выполненного анализа можно сделать следующий вывод: уровень приращения энтальпии воздуха в подземных сооружениях криолитозоны при работе дизельной техники зависит от плотности воздуха входя-

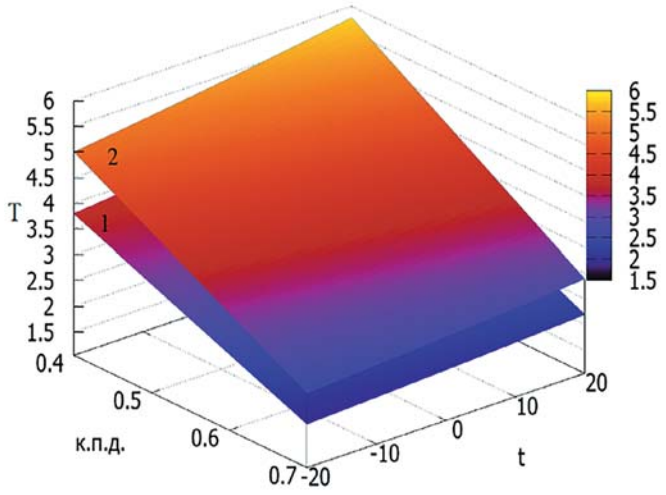


Рис. 1
Приращение температуры воздуха в подземном сооружении в зависимости от начальной температуры и КПД двигателя (0,4–0,7) дизельных машин и механизмов:
1 – при нормативном расходе воздуха 5,0 м³ в минуту на 1 л.с. мощности;
2 – при нормативном расходе воздуха 3,5 м³ в минуту на 1 л.с. мощности

Fig. 1
The air temperature increment in an underground facility depending on the initial temperature and the engine efficiency (0.4–0.7) of the diesel engines and mechanisms:
1 – at a standard air flow rate of 5.0 m³ per minute per 1 horse power;
2 – at a standard air flow rate of 3.5 m³ per minute per 1 horse power

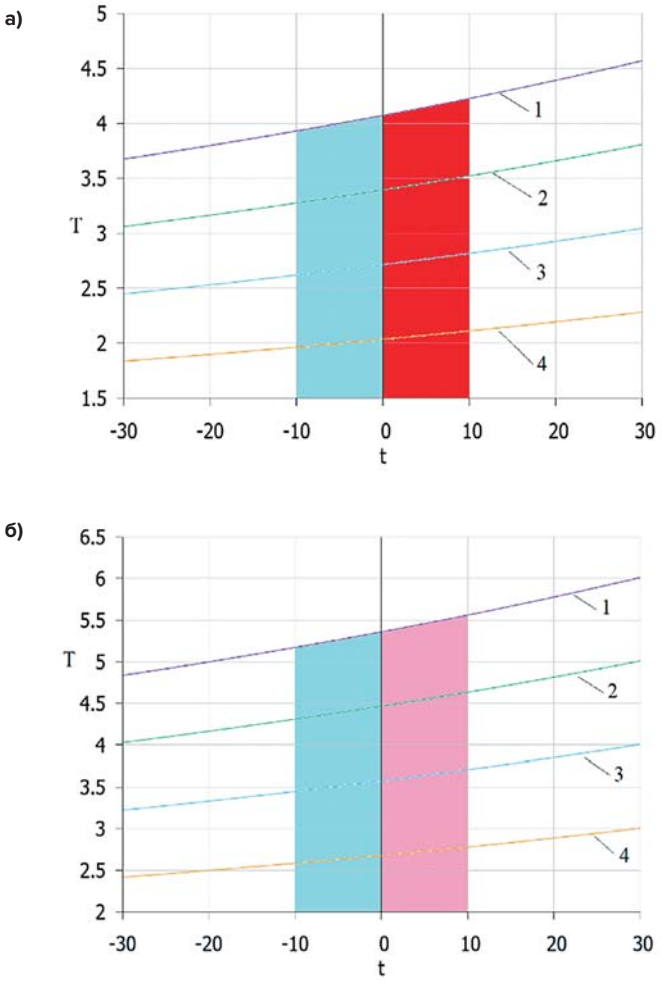


Рис. 2
Приращение температуры воздуха в подземном сооружении в зависимости от начальной температуры:
а – при нормативном расходе воздуха 5,0 м³ в минуту на 1 л.с. мощности;
б – при нормативном расходе воздуха 3,8 м³ в минуту на 1 л.с. мощности; 1 – η = 0,4;
2 – η = 0,5; 3 – η = 0,6;
4 – η = 0,7

Fig. 2
The air temperature increment in an underground facility depending on the initial temperature:
a – at a standard air flow rate of 5.0 m³ per minute per 1 horse power;
б – at a standard air flow rate of 3.8 m³ per minute per 1 horse power;
1 – η = 0.4; 2 – η = 0.5;
3 – η = 0.6; 4 – η = 0.7

щей вентиляционной струи и КПД дизельных установок и не зависит от количества и мощности дизельной техники. То есть главная неточность авторов работ [4; 5] в том, что, увеличивая количество дизельной техники (суммарной мощности установок), они не увеличили количество воздуха в соответствии с существующими нормативами. Это привело к ошибочным количественным выводам о роли машин с дизельным приводом в формировании теплового режима подземных сооружений. На самом деле вклад этого вида абсолютных источников несколько ниже, хотя и играет важную роль в формировании теплового режима горных выработок подземных сооружений криолитозоны. На рис. 1 приведен 3D график, характеризующий уровень приращения температуры воздуха в подземном сооружении за счет работы дизельных установок при нормативах 5,0 и 3,5 м³/мин на 1 л.с. при изменении КПД двигателя в диапазоне от 0,4 до 0,7.

Как видно из графиков на рисунке, наибольшее влияние на изменение температуры оказывает значение КПД двигателя: чем совершеннее дизельная установка, тем меньше приращение температуры. При этом наблюдается следующая закономерность: чем выше начальная температура воздуха в сооружении, тем выше прирост температуры, независимо от КПД двигателей дизельных установок. Даже для несовершенных дизельных установок (КПД равен 0,4) приращение температуры за счет работы дизельных установок не превышает 6,0 °С при положительной температуре воздуха и 5,0 °С при отрицательной температуре воздуха. При изменении нормативного расхода воздуха наблюдается очевидное соотношение: чем меньше нормативный расход воздуха, тем больше прирост температуры. Зависимость прироста температуры в сооружении от начальной температуры вентиляционного воздуха незначительна и не превышает 1,0 °С даже при минимальном КПД установок. С повышением КПД двигателя эта зависимость становится еще менее выраженной – нижняя линия плоскостей на рисунке почти параллельна оси температур. Анализ графиков показывает, что для наиболее вероятного сочетания исходных данных приращение температуры от работы дизельных установок не может превысить 3,5 °С при нормативном расходе 5,0 м³ на 1 л.с. мощности и 5,0 °С при нормативном расходе 3,5 м³ на 1 л.с. мощности установок.

Представление вариантных расчетов в виде трехмерных графиков дает скорее качественную характеристику рассматриваемого процесса. Для установления конкретных, характерных количественных закономерностей данные расчетов целесообразно представить в виде 2D графиков.

На рис. 2 представлены графики изменения приращения температуры воздуха в сооружении при двух значениях нормативного расхода для диапазона изменения начальной температуры воздуха от –30 до +30 °С.

Цветом на рисунках выделены наиболее характерные области изменения температур в горных выработках подземных сооружений криолитозоны. Как следует из графиков, при верхнем значении нормативного расхода воздуха максимальная разность значений приращения температуры в диапазоне –30 – +30 °С составляет приблизительно 0,8 °С при самом низком значении КПД двигателя (60% энергии идет на теплообразование) и приблизительно 0,4 °С при максимальном КПД двигателя (30% энергии идет на теплообразование). При этом максимальное значение приращения температуры равно 4,6 и 2,3 °С соответствует максимальному значению рассмотренного температурного диапазона температуры вентиляционной струи (+30 °С). Для нижнего нормативного значения расхода воздуха (рис. 2, *б*) аналогичные значения составляют 6,0 и 3,0 °С. Приращение разности температур составляет 1,2 и 0,6 °С. Максимально возможное значение приращения температуры в характерной области изменения положительных температур в горных выработках подземных сооружений криолитозоны (выделена красным и розовым цветом) не превышает 5,6 °С, а в области изменения отрицательных температур (выделена голубым цветом) 5,4°С. Если брать средние значения, то наиболее вероятный диапазон приращения температур при работе дизельной техники в зимний период составляет 2,5–3,0 °С, а в летний период 3,5–4,0 °С.

Заключение

Проанализированы существующие методы оценки приращения температуры от действия абсолютных источников. Доказана ошибочность отдельных выводов, в частности, о существенном влиянии количества работающих установок и их мощности на тепловой режим горных выработок криолитозоны. Установлено, что рассматривать дизельные установки как абсолютные источники тепла можно лишь в совокупности с пропорциональным изменением расхода воздуха в зависимости от мощности источника, как предусмотрено правилами безопасности ведения горных работ.

На основании качественного и количественного анализа полученных зависимостей показано, что приращение температуры воздуха в подземных сооружениях криолитозоны при работе машин и механизмов с дизельным приводом не зависит от их количества и мощности, и определяется только КПД двигателей и начальной температурой воздуха в сооружении. В частности, установлено, что во всем практически возможном диапазоне изменения начальной температуры воздуха в подземных сооружениях криолитозоны приращение температуры от работы дизельных установок не может превысить 6,0 °С. Для наиболее вероятных сценариев эксплуатации подземных сооружений эта величина составляет 3,5 °С при нормативном расходе воздуха 5 м³ в минуту на 1 л.с. мощности и 5,0 °С при нормативном расходе воздуха 3,5 м³ в минуту на 1 л.с. мощности установок. Для характерных температурных условий эксплуатации подземных сооружений криолитозоны при оценочных расчетах можно считать, что наиболее вероятный диапазон приращения температур при работе дизельной техники в зимний период составляет 2,5–3,0 °С, а в летний период 3,5–4,0 °С.

Дальнейшие исследования в этой области целесообразно направить на сравнение методов расчета тепловыделений дизельных установок через термодинамический КПД двигателя и через теплоту сгорания топлива, что позволит максимально учесть изменение тепловыделений в различные технологические периоды работы горной техники.

Список литературы / References

1. Галкин А.Ф., Панков В.Ю. Влияние способа учета абсолютных источников тепла на точность прогноза температуры в подземных сооружениях криолитозоны. *Горные науки и технологии*. 2023;8(3):207–214. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-04-105
Galkin A.F., Pankov V.Yu. Absolute heat sources as a method to check the accuracy of temperature prediction in underground structures within cryolithozone. *Mining Science and Technology (Russia).* 2023;8(3):207–214. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-04-105

2. Галкин А.Ф., Панков В.Ю., Фёдоров Я.В. Изменение температуры в камерах подземных сооружений при работе дизельных установок. *Вопросы безопасности*. 2022;(4):27–33. https://doi.org/10.25136/2409-7543.2022.4.38938
Galkin A.F., Pankov V.Y., Fedorov Y.V. Temperature change in the chambers of underground structures when operating diesel units. *Security Issues*. 2022;(4):27–33. (In Russ.) https://doi.org/10.25136/2409-7543.2022.4.38938

3. Смирнов Ю.М., Гендлер С.Г., Костылев П.П., Кулинич С.С. *Исследование тепловыделений при работе дизельного оборудования*. В кн.: Физические процессы горного производства. Л.: ЛГИ; 1976. Вып. 3. С. 77–80.

4. Казаков Б.П., Зайцев А.В. Исследование процессов формирования теплового режима глубоких рудников. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. *Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2014;(10):91–97.
Kazakov B.P., Zaitsev A.V. Study of the formation of thermal regimes in deep mines. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2014;(10):91–97. (In Russ.)

5. Курилко А.С., Хохолов Ю.А., Соловьев Д.Е. Особенности формирования теплового режима россыпных шахт криолитозоны при ведении добычных работ с применением самоходной техники. *Горный журнал.* 2015;(4):29–32. https://doi.org/10.17580/gzh.2015.04.06
Kurilko A.S., Khokholov Yu.A., Soloviev D.E. Features of formation of temperature conditions in placer mines equipped with self-propelled machines in permafrost zone. *Gornyi Zhurnal.* 2015;(4):29–32. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2015.04.06

6. Galkin A., Pankov V. Formation of thermal regime in a permafrost area mine. In: Beskopylny A., Shamtsyan M. (eds) *XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021", Rostov-on-Don, February 24–26, 2021*. Cham; Springer, 2021, pp 205–213. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_21

7. Галкин А.Ф., Дормидонтов А.В., Курта И.В., Короткова К.Б. Влияние дизельных машин на температурный режим горных выработок. *Естественные и технические науки.* 2018;(5):84–86.
Galkin A. F., Dormidontov A. V., Kurta I. V., Korotkova K. B. Influence of diesel vehicles on the temperature regime of mine workings. *Natural and Technical Sciences.* 2018;(5):84–86. (In Russ.)

8. Вернигор В.М., Морозов К.В., Бобровников В.Н. О подходах к проектированию теплового режима рудников в условиях многолетнемерзлых пород. *Записки Горного института.* 2013;205:139–140. Режим доступа: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5508 (дата обращения: 05.04.2026).
Vernigor V.M., Morozov K.V., Bobrovnikov V.N. On approaches to designing of thermal regime at ore mines under permafrost conditions. *Journal of Mining Institute.* 2013;205:139–140. (In Russ.) Available at: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5508 (accessed: 05.04.2026).

9. Галкин А.Ф. Тепловой режим рудников криолитозоны. *Записки Горного института.* 2016;219:377–381. https://doi.org/10.18454/PMI.2016.3.377
Galkin A.F. The thermal condition of the mines in cryolite zone. *Journal of Mining Institute.* 2016;219:377–381. (In Russ.) https://doi.org/10.18454/PMI.2016.3.377

10. Янченко Г.А., Кириченко И.В. Инженерные методы: расчёта плотности влажного воздуха. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2008;(11):112–115. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2008/11/4_YAnchenko3.pdf (дата обращения: 05.04.2026).
Yanchenko G.A., Kirichenko I.V. Engineering methods: calculation of humid air density. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2008;(11):112–115. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2008/11/4_YAnchenko3.pdf (accessed: 05.04.2026).

11. Czarick M., Fairchild B. Cold, humid air is lighter than cold, dry air. *Poultry Housing Tips.* 2009;21(12). Available at: http://www.poultryventilation.com/wp-content/uploads/vol21n12.pdf (accessed: 05.06.2026).

12. Миняев В.В. Расчет параметров атмосферы с учетом влажности воздуха. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки».* 2004;(2):106–120. Режим доступа: https://vestniken.bmstu.ru/articles/425/425.pdf (дата обращения: 05.04.2026).
Minyaev V.V. Computation of atmosphere parameters considering air humidity. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences.* 2004;(2):106–120. (In Russ.) Available at: https://vestniken.bmstu.ru/articles/425/425.pdf (accessed: 05.04.2026).

Информация об авторе
Панков Владимир Юрьевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов автодорожного факультета, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-4933-0265; e-mail: pankov1956@inbox.ru

Information about the author
Vladimir Yu. Pankov – Cand. Sci. (geol.-mineral.), Associate Professor, Department of Highways and Airfields, Faculty of Road Construction, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-4933-0265; e-mail: pankov1956@inbox.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 02.05.2026
Поступила после рецензирования: 23.06.2026
Принята к публикации: 05.07.2026

Article info
Received: 02.05.2026
Revised: 23.06.2026
Accepted: 05.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-206-210

Обеспечение эффективной работы рудничной водоотливной установки в условиях перекачивания высокоабразивных и агрессивных рассолов

Н.П. Овчинников[1] ✉, И.В. Зырянов[2]
[1] Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация
[2] Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного Федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном, г. Мирный, Российская Федерация
✉ ovchinnlar1986@mail.ru

Резюме: Современный этап промышленного освоения многих рудных месторождений характеризуется ухудшением их гидрогеологических и горнотехнических условий отработки. Это делает поиск и разработку инженерных решений, направленных на обеспечение бесперебойной работы водоотливных установок при малых эксплуатационных затратах, одним из наиболее востребованных направлений прикладных исследований. Обоснование и обеспечение рациональных режимов работы рудничных водоотливных установок при перекачивании притоков воды с особо жесткими физико-химическими показателями на основе взаимовлияния их технической и экономической сторон функционирования является актуальной научно-практической задачей. Решение указанной задачи позволит обеспечить устойчивое развитие отечественной горнорудной промышленности в среднесрочной перспективе. Объектом исследования выступили секционные насосы, используемые при перекачивании высокоабразивных и агрессивных рассолов в процессе подземной отработки месторождений кимберлитовых руд. Для решения поставленной задачи на первом этапе исследований была выполнена оценка влияния регулируемых параметров рудничной водоотливной установки на ее надежность и экономичность функционирования. По результатам проведенной комплексной оценки были обоснованы рациональные режимы функционирования рудничных водоотливных установок в условиях перекачивания высокоабразивных и агрессивных рассолов. Разработаны и подробно описаны инженерные решения, направленные на обеспечение эффективной работы рудничных водоотливных установок при перекачивании водопритоков с особо жесткими физико-химическими характеристиками.

Ключевые слова: водоотливная установка, секционные насосы, рудничные рассолы, концентрация твердых частиц, водопритоки, осветление воды, обезвоживание продуктов заиления, механизированный комплекс очистки

Для цитирования: Овчинников Н.П., Зырянов И.В. Обеспечение эффективной работы рудничной водоотливной установки в условиях перекачивания высокоабразивных и агрессивных рассолов. *Горная промышленность*. 2026;(5):206–210. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-206-210

Ensuring efficient operation of a mine dewatering plant when pumping highly abrasive and aggressive brines

N.P. Ovchinnikov[1] ✉, I.V. Zyryanov[2]
[1] M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation
[2] Mirny Polytechnic Institute (branch) of North-Eastern Federal University, Mirny, Russian Federation
✉ ovchinnlar1986@mail.ru

Abstract: The current stage of industrial development of many ore deposits is characterized by deteriorating hydrogeological and mining conditions. This makes the search for and development of engineering solutions to ensure uninterrupted operation of dewatering plants at low operating costs one of the most actual areas of applied research. Thus, justification and provision of rational operating modes for mine dewatering plants used for pumping water flows with particularly harsh physical and chemical properties, based on mutual impact of their technical and economic aspects of operation, constitutes a relevant scientific and practical problem, which solution will ensure sustainable development of the domestic mining industry in the medium term. The object of the study was multistage sectional pumps used for pumping highly abrasive and aggressive brines during underground mining of kimberlite ore deposits. To solve the problem, the first stage of the research made an assessment of

the impact of the adjustable parameters of the mine dewatering plant on its reliability and cost-effectiveness of its operation. The results of the performed comprehensive assessment were used to justify the rational operating modes for mine dewatering plants utilized for pumping highly abrasive and aggressive brines. The paper describes in detail the developed engineering solutions aimed at ensuring efficient operation of the mine dewatering plants used for pumping water inflows with particularly harsh physical and chemical properties.

Keywords: dewatering plant, multistage sectional pumps, underground brines, solids concentration, inflow of water, water clarification, dehydration of sediment accumulations, powered purification complex

For citation: Ovchinnikov N.P., I. Zyryanov V. Ensuring efficient operation of a mine dewatering plant when pumping highly abrasive and aggressive brines. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):206–210. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-206-210

Введение

Организация и эксплуатация водоотлива относятся к числу первостепенных (и в то же время наиболее затратных) технологических задач при освоении обводненных месторождений твердых полезных ископаемых [1–5].

Современные векторы развития отечественной горнодобывающей промышленности указывают на предстоящее увеличение количества разрабатываемых рудных месторождений с осложненными гидрогеологическими характеристиками. Данные предпосылки закономерно повлекут за собой ужесточение требований к организации и эксплуатации систем рудничного водоотлива, так как работоспособность насосного оборудования, в частности секционных насосов, зависит от физико-химических показателей водопритоков (содержание твердых частиц в воде, ее минерализация и кислотность) [6–8].

Накопленный опыт в области горной механики свидетельствует, что существующие научные разработки по совершенствованию водоотливных комплексов и насосостроению не позволяют обеспечить надежную и экономичную работу секционных насосов на рудных месторождениях, характеризующихся высоким содержанием в притоках воды нерастворимых механических примесей и растворимых солей.

Таким образом, обоснование и обеспечение рациональных режимов функционирования рудничных водоотливных установок в условиях перекачивания водопритоков с особо жесткими физико-химическими показателями на основе взаимовлияния технической и экономической сторон организации процесса водоотведения является актуальной научно-практической задачей, решение которой позволит обеспечить устойчивое развитие горнорудной промышленности страны в среднесрочной перспективе.

В качестве объекта исследования были выбраны секционные насосы, применяемые на подземных кимберлитовых рудниках Российской Федерации при отведении высокоабразивных и агрессивных рассолов на дневную поверхность.

Материалы и методы

Для решения поставленной задачи предусматривалась оценка влияния регулируемых параметров водоотливной установки, определяющих ресурс секционных насосов, на ее надежность и экономичность функционирования.

Под регулируемыми параметрами установки следует понимать концентрацию твердых частиц в водопритоках k_{tv}, подачу насоса на момент вывода в капремонт Q_{pr} и риск работы насоса в аварийном режиме, выраженный через поправочный коэффициент k_{av} (при условии надежной защиты ротора от разрушения при осевом сдвиге указанный коэффициент принимается равным 1,1, в остальных случаях – 1).

В качестве оценочных критериев применялись коэффициент технического использования насосного оборудования k_{ti}, а также удельные эксплуатационные затраты на перекачивание им водопритоков Z_v (руб/м³). Расчеты выбранных оценочных критериев проводились по формулам, приведенным в работе [9].

Оценка влияния параметров k_{tv}, Q_{pr} и k_{av} на показатели k_{ti} и Z_v в условиях перекачивания высокоабразивных и агрессивных рассолов была выполнена на примере работы секционных насосов модели НЦСК 350-1100 при водопритоке q_{vod} = 3 млн м³/год.

Результаты

Значения показателей k_{ti} и Z_v в зависимости от концентрации k_{tv} при различных вариациях параметров Q_{pr} и kav, а также технологических схемах водоотведения приведены на рис. 1 и *2* в виде кривых.

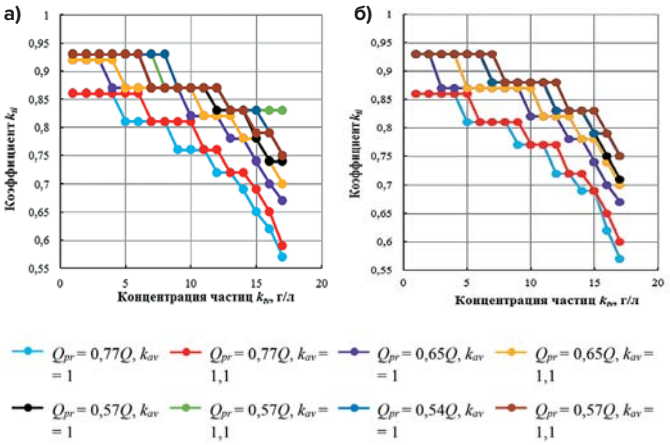


Рис. 1
Коэффициент технического использования насосов k_{ti} в зависимости от концентрации твердых частиц в воде k_{tv}:
а – схема откачки «насос-трубопровод»;
б – схема откачки «2 насоса-трубопровод»

Fig. 1
Utilization coefficient of the pumps k_{ti} as a function of the solids concentration in water k_{tv}:
a – the '*pump-pipeline*' pumping layout;
б – the '*two pumps-pipeline*' pumping layout

По результатам сопоставления кривых, представленных на рис. 1 и 2, установлено, что рациональные режимы работы водоотливных установок при перекачивании насосным оборудованием водопритоков с особо жесткими физико-химическими характеристиками (по критериям надежности и экономичности их отведения) обеспечиваются при следующих условиях эксплуатации: концентрация твердых частиц в перекачиваемой среде – не более 4 г/л, производительность секционного насоса на момент

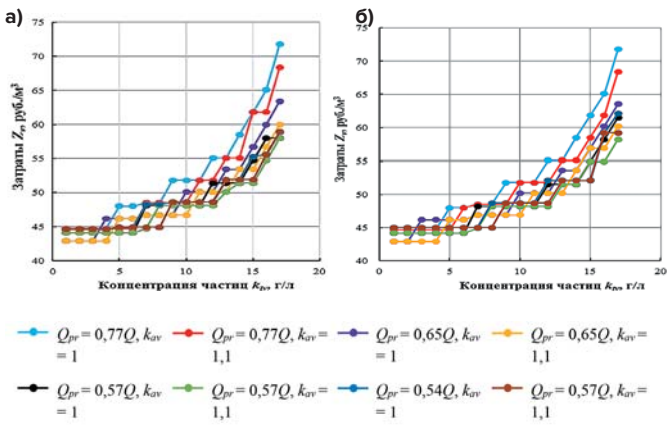


Рис. 2
Удельные эксплуатационные затраты на перекачивание водопритоков Z_v в зависимости от концентрации твердых частиц в воде k_{tv}:
а – схема откачки «насос-трубопровод»;
б – схема откачки «2 насоса-трубопровод»

Fig. 2
The specific operating costs Z_v for pumping water inflows as a function of the solids concentration in water k_{tv}:
a – the '*pump-pipeline*' pumping layout;
б – the '*two pumps-pipeline*' pumping layout

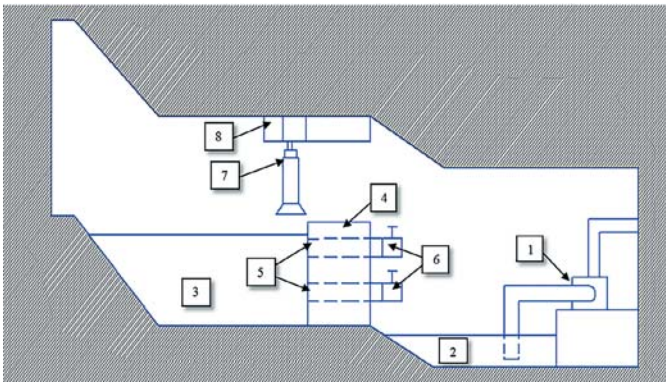


Рис. 3
Главная водоотливная установка с функцией обезвоживания продуктов заиления в отстойниках:
1 – секционные насосы;
2 – водосборник; 3 – отстойник;
4 – бетонная перемычка;
5 – дренажные трубы;
6 – шаровые краны;
7 – погружной насос;
8 – кран-балка

Fig. 3
Main water pumping station with dehydration of the sediment accumulations in settling tanks:
1 – sectional pumps;
2 – water collector;
3 – settling tank;
4 – concrete partition;
5 – drain pipes; 6 – ball valves; 7 – submersible pump;
8 – overhead crane

вывода в капитальный ремонт – 65% от номинальной при условии надежной защиты его ротора от разрушения при осевом сдвиге.

Способы управления регулируемыми параметрами. Применительно к высокоабразивным и агрессивным рассолам наиболее эффективным способом управления фактором k_{tv} в условиях главного водоотлива является традиционный метод их осветления с масштабированием параметров горизонтальных отстойников. В то же время применение отстойников повышенной вместимости приведет к возрастанию объема ило-шламовых отложений. Так как восстановление исходной аккумулирующей способности заиленной водосборной сети с помощью самоходной техники имеет временные ограничения, то максимально возможный эффект от использования отстойников больших размеров может быть получен только при условии оптимизации процесса обезвоживания продуктов заиления.

Технологическая схема главной водоотливной установки, позволяющая значительно снизить исходную концентрацию твердых частиц в высокоабразивных и агрессивных рассолах (не более 4 г/л) на стадии предварительного осветления в отстойниках при обеспечении их полной очистки от продуктов заиления в отведенные сроки, приведена на рис. 3.

Эксплуатация отстойников осуществляется по принципу попеременного действия, т.е. указанные водосборные емкости функционируют поочередно, меняясь технологическими режимами (режимы осветления воды и обезвоживания продуктов заиления).

Режим осветления воды. В работающий отстойник поступает общий приток воды по руднику. В процессе гравитационного отстаивания осветленная жидкая фаза переливается через перемычку и самотеком по водоотливным канавкам направляется в один из двух водосборников (также функционирующих попеременно). Из приемного колодца водосборника осветленная вода подается секционными насосами на поверхность.

Режим обезвоживания продуктов заиления. После завершения первичного отстаивания осветленный верхний слой воды из отстойника сбрасывается в действующий водосборник через дренажные трубы, расположенные в верхней части перемычки. По мере уплотнения осадка и дальнейшей седиментации твердых частиц жидкая фаза продуктов заиления отводится последовательно из промежуточной и придонной зон через трубопроводы, смонтированные в средней и нижней частях перемычки, соответственно. Завершающим этапом является удаление и откатка сгущенных продуктов заиления с помощью погрузочно-доставочных машин.

Для обоснования рациональной вместимости отстойников усовершенствованной конструкции получена следующая регрессионная модель:

$$V_r = a \cdot q_{vod}^{\ b}, \quad (1)$$

где a и b – параметры регрессии, учитывающие плотность водопритоков ρ_{vod} и производственную мощность горнодобывающего предприятия A, влияющую на содержание твердых частиц в воде (табл. 1).

В отличие от главных водоотливных установок, системы участкового водоотлива горнодобывающих предприятий, как правило, не включают отстойники. В результате вода поступает в водосборники без предварительного осветления. Применение водосборников увеличенных размеров в системах участкового водоотлива сдерживается неоправданно высокими капитальными и эксплуатационными затратами.

На рис. 4 представлен разработанный механизированный комплекс по очистке подконвейерного пространства от технологических просыпей на основном горизонте рудника, позволяющий снизить содержание твердых частиц в рудничных рассолах не менее чем на 20% на этапе поступления в водосборники участкового водоотлива при условии сохранения их общепринятой вместимости [10].

Принцип работы комплекса заключается в следующем. При перегружении руды с вибропитателя на ленту конвейера основной объем технологических просыпей скапливается в месте, огороженном от остальной подконвейерной зоны перегородкой. Заборно-погрузочное устройство

Таблица 1
Параметры регрессионной модели, полученной для обоснования рациональной вместимости отстойников усовершенствованной конструкции

Table 1
Parameters of the regression model developed to determine the optimal capacity of the settling tanks with the improved design

Мощность А, млн т/год	При ρ_{vod} = 1050...1100 кг/м³	При ρ_{vod} = 1150...1200 кг/м³
1	a = 0,68, b = 1,5	a = 0,073, b = 1,86
1,5	a = 0,66, b = 1,5	a = 0,055, b = 1,9
2	a = 0,74, b = 1,46	a = 0,041, b = 1,94
2,5	a = 0,94, b = 1,4	a = 0,02, b = 2,05
3	a = 0, 8, b = 1,41	a = 0,009, b = 2,18
3,5	a = 0,59, b = 1,45	a = 0,004, b = 2,3
4	a = 0,244, b = 1,59	a = 0,0046, b = 2,27

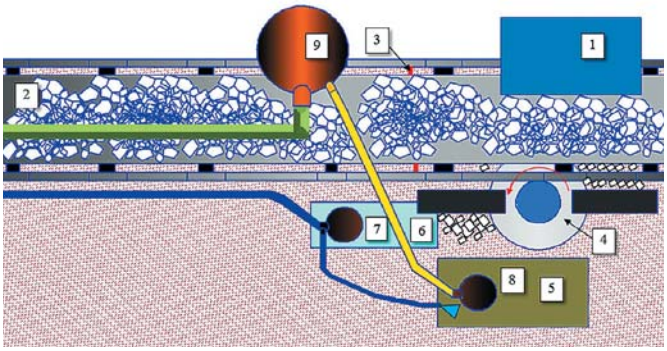


Рис. 4
Механизированный комплекс очистки подконвейерного пространства от просыпей рудной массы:
1 – вибропитатель;
2 – ленточный конвейер;
3 – перегородка;
4 – заборно-погрузочное устройство; 5 – шламосборник;
6 – водосборник;
7 – погружной насос;
8 – погружной насос с агитатором; 9 – емкость для сбора ило-шламовой пульпы

Fig. 4
A powered complex for cleaning ore spillage from the under-conveyor area:
1 – vibrating feeder;
2 – belt conveyor;
3 – baffle;
4 – collecting and loading unit; 5 – sludge sump;
6 – water collector;
7 – submersible pump;
8 – submersible pump with agitator;
9 – silt-slurry collection tank

за счет вращающихся лучей перемещает образовавшиеся просыпи в шламосборник. Параллельно рассолы, поступающие на основной горизонт, отводятся в водосборник, минуя скопление горной массы. Затем рассолы перекачиваются погружным насосом в водосборники участкового водоотлива, при этом часть жидкости отводится в шламосборник, где с помощью агитатора второго погружного насоса происходит ее перемешивание с просыпями до состояния пульпы. Полученная гидросмесь перекачивается в накопительный бак, откуда осуществляется ее дозированная подача на ленту конвейера.

Как видно из рис. 5, разработанный механизированный комплекс является неэнергозатратным технологическим решением, что подтверждает его практическую применимость.

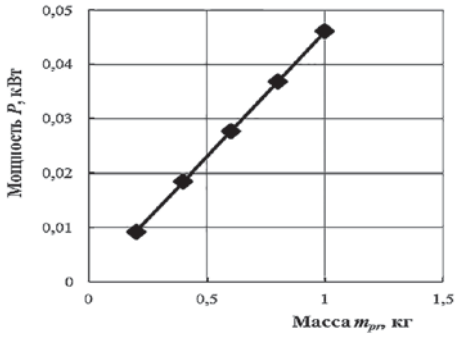


Рис. 5
Зависимость потребляемой мощности мотора-редуктора нагребающей звезды заборно-погрузочного устройства P от массы просыпанной рудной массы m_{pr}

Fig. 5
Dependence of the power consumption P of the geared motor of the loading star of the collecting-and-loading device on the weight of the spilled ore mass m_{pr}

Для секционных насосов характерна работа в аварийных режимах, что обусловлено потерей несущей способности разгрузочного устройства [11]. В ранее проведенном исследовании установлено, что достоверным диагностическим достижения секционным насосом предаварийного состояния является повышение на 20% (и более) среднеквадратичного значения виброскорости трубы разгрузки относительно номинального значения, характерного работоспособной гидравлической пяте (на начальном этапе ее эксплуатации) [12]. Таким образом, диагностирование технического состояния насоса через виброконтроль трубки разгрузки позволит исключить его работу в аварийных режимах, обеспечивая тем самым k_{av} = 1,1.

Рассмотренные способы управления регулируемыми параметрами рудничных водоотливных установок позволяют обеспечить их рациональные режимы функционирования на всем жизненном цикле горнодобывающего предприятия, что имеет важное значение для поддержания бесперебойного отведения водопритоков с особо жесткими физико-химическими показателями при малых эксплуатационных затратах.

Заключение

1. Выполнена оценка влияния регулируемых параметров рудничной водоотливной установки, определяющих ресурс секционных насосов, на ее надежность и экономичность функционирования при перекачивании высокоабразивных и агрессивных рассолов.

2. Обоснованы рациональные режимы функционирования рудничных водоотливных установок на базе секционных насосов в условиях высокоабразивных и агрессивных рассолов.

3. Разработан комплекс технологических и технических решений, направленных на обеспечение эффективной работы рудничных водоотливных комплексов при отведении на дневную поверхность водопритоков с особо жесткими физико-химическими характеристиками.

Список литературы / References

1. Cahyadi T.A., Khalik R.M., Rauf A., Rosadi P.E., Sukamto U., Murtyanto I.W. Study and design of mine drainage systems at open mine with extreme rainfall study case. *AIP Conference Proceedings*. 2021;2363(1):030004. https://doi.org/10.1063/5.0061087

2. Guzy A., Witkowski W.T. Land subsidence estimation for aquifer drainage induced by underground mining. *Energies*. 2021;14(15):4658. https://doi.org/10.3390/en14154658

3. Shao J., Zhang Q., Zhang W., Wang Z., Wu X. Effects of the borehole drainage for roof aquifer on local stress in underground mining. *Geomechanics and Engineering*. 2021;24(5):479–490. https://doi.org/10.12989/gae.2021.24.5.479

4. Макаров В.Н., Чураков Е.О., Макаров Н.В., Попов С.А. Повышение энергоэффективности шахтного водоотлива путём увеличения гидродинамического напора насоса на основе эффекта Магнуса. *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2026;32(2):33–42. Режим доступа: https://zabvestnik.com/wp-content/uploads/250626030652-Makarov.pdf (дата обращения: 18.04.2026).
Makarov V.N., Churakov E.O., Makarov N.V., Popov S.A. Improving the energy efficiency of mine drainage by increasing the hydrodynamic head of the pump based on the magnus effect. *Transbaikal State University Journal*. 2026;32(2):33–42. (In Russ.) Available at: https://zabvestnik.com/wp-content/uploads/250626030652-Makarov.pdf (accessed: 18.04.2026).

5. Чураков Е.О., Макаров В.Н., Макаров Н.В., Бельских А.М. Этапы технического совершенствования центробежных насосов шахтного водоотлива. *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2024;30(1):81–89. https://doi.org/10.21209/2227-9245-2024-30-1-81-89
Churakov E.O., Makarov V.N., Makarov N.V., Belskikh A.M. Stages of technical improvement of mine drainage centrifugal pumps. *Transbaikal State University Journal*. 2024;30(1):81–89. (In Russ.) https://doi.org/10.21209/2227-9245-2024-30-1-81-89

6. Jin Y., Cai Z., Cui J. The characteristics of coarse particle solid–liquid two-phase flow and wear properties in deep-sea multistage mining pumps. *Physics of Fluids*. 2025;37(1):013339. https://doi.org/10.1063/5.0245808

7. Зотов В.В., Мнацаканян В.У., Базлин М.М., Лакшинский В.С., Дятлова Е.В. Повышение ресурса рабочих колес центробежных насосов шахтного водоотлива. *Горная промышленность*. 2024;(2):143–146. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-143-146
Zotov V.V., Mnatsakanyan V.U., Bazlin M.M., Lakshinsky V.S., Dyatlova E.V. Extending the service life of centrifugal dewatering pump impellers in mines. *Russian Mining Industry*. 2024;(2):143–146. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-143-146

8. Рыбаков А.Н., Габбасов Б.М., Курочкин А.И., Ильинов Н.Д. Повышение эффективности эксплуатации горных машин на примере оборудования шахтного водоотлива в условиях Учалинского подземного рудника. Известия высших учебных заведений. *Горный журнал*. 2021;(8):62–71. Режим доступа: https://mining-science.ru/download/2021/8/007.pdf (дата обращения: 18.04.2026).
Rybakov A.N., Gabbasov B.M., Kurochkin A.I., Iliinov N.D. Improving the efficiency of mining machines operation by example of mine dewatering equipment in conditions of Uchaly underground mine. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. *Gornyy Zhurnal*. 2021;(8):62–71. (In Russ.). Available at: https://mining-science.ru/download/2021/8/007.pdf (accessed: 18.04.2026).

9. Овчинников Н.П., Зырянов И.В. Рациональные режимы функционирования водоотливных установок в условиях высокоабразивных и агрессивных рассолов. *Горный журнал*. 2026;(2):41–46. https://doi.org/10.17580/gzh.2026.02.04
Ovchinnikov N.P., Zyryanov I.V. Efficient modes of water drainage systems in the conditions of highly abrasive and aggressive brines. *Горный журнал*. 2026;(2):41–46. (In Russ.). https://doi.org/10.17580/gzh.2026.02.04

10. Овчинников Н.П. Снижение загрязнения шахтных вод в системе участкового водоотлива кимберлитового рудника. *Горные науки и технологии*. 2025;10(2):169–179. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-07-274
Ovchinnikov N.P. Reducing mine water contamination at the local drainage facility of a kimberlite mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(2):169–179. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-07-274

11. Тимохин Ю.В., Паламарчук Т.Н. Результаты исследований осевой силы ротора и параметров автоматических уравновешивающих устройств центробежных секционных насосов. *Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта*. 2017;(45):32–42. Режим доступа: https://masters.donntu.ru/2020/fimm/derkach/library/article5.pdf (дата обращения: 18.04.2026).
Timohin J.W., Palamarchuk T.N. The research results of the axial forces of the rotor and automatic settings. *Collection of Scientific Papers of the Donetsk Railway Transport Institute*. 2017;(45):32–42. (In Russ.) Available at: https://masters.donntu.ru/2020/fimm/derkach/library/article5.pdf (accessed: 18.04.2026).

12. Овчинников Н.П. О контроле за техническим состоянием узла гидравлической пяты секционного насоса. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(10):56–73. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_10_0_56
Ovchinnikov N. P. Technical control of multistage pump balance ring. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(10):56–73. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_10_0_56

Информация об авторах
Овчинников Николай Петрович – доктор технических наук, доцент, директор Горного института, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-4355-5028; e-mail: ovchinnlar1986@mail.ru
Зырянов Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры горного дела, Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного Федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном, г. Мирный, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-2943-0138; e-mail: zyryanoviv@inbox.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 02.06.2026
Поступила после рецензирования: 09.07.2026
Принята к публикации: 14.07.2026

Information about the authors
Nikolay P. Ovchinnikov – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Director of the Institute of Mining, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-4355-5028; e-mail: ovchinnlar1986@mail.ru
Igor V. Zyryanov – Dr. Sci. (Eng.), Professor Department of Mining Engineering, Mirny Polytechnic Institute (branch) of North-Eastern Federal University, Mirny, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-2943-0138; e-mail: zyryanoviv@inbox.ru

Article info
Received: 02.06.2026
Revised: 09.07.2026
Accepted: 14.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-211-214

Перспективы разработки Улуг-Танзекского редкометалльного месторождения Республики Тыва

С.А. Сат ✉, Ш.Ч. Соян, А.Ч. Кылгыдай, Х.Б. Бадарчи, А.Д. Монгуш
Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кызыл, Российская Федерация
✉ saidasha2012@mail.ru

Резюме: Одним из наиболее перспективных стратегических направлений экономического роста Республики Тыва является недропользование. Развитие освоения минерально-сырьевой базы региона приведет к росту промышленного производства, малого и среднего бизнеса, а также даст возможность развивать другие сферы жизнедеятельности – инфраструктуру для развития транспортной отрасли, энергетики и на другие отрасли хозяйства. На основе статистических данных, отчетов отраслевых министерств авторы изучили состояние добывающей отрасли в структуре валового регионального продукта региона. В статье дана характеристика разведанных запасов Улуг-Танзекского месторождения и представлены перспективы его дальнейшей разработки. Результаты исследования позволили авторам сделать вывод о необходимости максимально оперативно запустить мощности и нарастить добычу и переработку стратегически важных для экономики страны минеральных ресурсов. В качестве одного из перспективных направлений развития, которое необходимо включить в план мероприятий Концепции развития и освоения минерально-сырьевой базы Республики Тыва до 2030 г., предложено освоение Улуг-Танзекского месторождения.

Ключевые слова: добывающая отрасль, валовой региональный продукт, Улуг-Танзекское месторождение, редкометалльные минералы, Республика Тыва

Благодарности: Статья выполнена в рамках госзадания Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН №1023033100464-7-1.5.1.

Для цитирования: Сат С.А., Соян Ш.Ч., Кылгыдай А.Ч., Бадарчи Х.Б., Монгуш А.Д. Перспективы разработки Улуг-Танзекского редкометалльного месторождения Республики Тыва. *Горная промышленность.* 2026;(5):211–214. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-211-214

Development prospects of the Ulug-Tanzek rare metal deposit in the Republic of Tyva

S.A. Sat ✉, Sh.Ch. Soyan, A.Ch. Kylgyday, H.B. Badarchi, A.D. Mongush
Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kyzyl, Russian Federation
✉ saidasha2012@mail.ru

Abstract: One of the most promising strategic areas for economic growth in the Republic of Tyva is subsoil use, as the development of the region's mineral resources will lead to an increase in industrial production, small and medium-sized businesses, and provide opportunities for the development of other areas such as infrastructure for the transportation, energy, and other sectors of the economy. The article examines the share of the mining industry in the region's gross regional product based on statistical data and reports from the industry ministries. It provides a description of the explored reserves of the Ulug-Tanzek deposit and identifies the prospects for its further development. The results of the study made it possible to conclude that it is necessary to launch production facilities as promptly as possible and increase the extraction and processing of mineral resources that are strategically important for the country's economy. Mining of the Ulug-Tanzeksky deposit is proposed as one of the promising areas for developing the mineral resources of the Republic of Tyva, which should be included in the action plan of the Concept for the Development and Utilization of the Mineral Resources of the Republic of Tyva until 2030.

Keywords: mining industry, gross regional product, Ulug-Tanzek deposit, rare-metal minerals, Republic of Tyva
Acknowledgements: This article was prepared as part of a state assignment for the Tuva Institute for Integrated Development of Natural Resources, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, No. 1023033100464-7-1.5.1.
For citation: Sat S.A., Soyan Sh.Ch., Kylgyday A.Ch., Badarchi H.B., Mongush A.D. Development prospects of the Ulug-Tanzek rare metal deposit in the Republic of Tyva. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):211–214. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-211-214

Введение

Богатство и разнообразие полезных ископаемых Тувы в значительной мере определяют перспективы экономического развития региона и способно превратить ее в регион с развитым горнопромышленным комплексом. Республика является уникальной металлогенической провинцией, где выявлены месторождения цветных, редких и благородных металлов, каменного угля, железных руд, нерудного сырья для стройиндустрии, пресных и минеральных вод [1].

Тема исследования является очень актуальной, так как президентом России Владимиром Путиным поставлена задача обеспечить технологический суверенитет страны, которая напрямую связана с воспроизводством минерально-сырьевой базы, добычей и переработкой редких металлов.

Республика Тыва является частью крупной Центрально-Азиатской редкометалльной провинции, в которой выявлены многочисленные объекты редкометалльных и редкоземельных руд различной формационной принадлежности. В Республике Тыва выявлено более 50 месторождений и рудопроявлений редких металлов. Наиболее крупные из них разведаны и подготовлены к освоению. Промышленные запасы этих месторождений по танталу, ниобию, цирконию, гафнию, литию, редким землям и урану составляют от 10 до 35% от общероссийских запасов. В республике находятся Улуг-Танзекское редкометалльное (наиболее крупное в России, в его недрах сосредоточено около 30% балансовых запасов диоксида циркония РФ), Арысканское редкоземельное, Тастыгское литиевое (самое богатое по содержанию оксида лития в нашей стране) и Карасугское комплексное железорудно-редкоземельное месторождения (расположено в относительно развитой части Тувы) [2; 3].

Состояние добывающей отрасли Республики Тыва

Объем валового регионального продукта (ВРП) как обобщающего показателя экономической деятельности Республики Тыва ежегодно увеличивается (рис. 1). Так, в 2024 г. увеличение ВРП составило 65,5% по сравнению с 2020 г., а по сравнению с предыдущим годом (с 2023 г.) увеличение составило 11%. Наибольшую долю в структуре ВРП за 2023 г. занимает промышленность (17,7%), в основном за счет добывающей промышленности (14,8%). Горнодобывающая отрасль в структуре промышленности региона занимает основное место, включая добывающую промышленность (73,2%), энергетику и водоснабжение – 19,5%, обрабатывающую промышленность – 5,4%. Следует отметить, что в 2024 г. по сравнению с 2023 г. произошло снижение в целом показателя индекса промышленного производства в республике на 8,6%, а по добыче полезных ископаемых значение индекса снизилось на 13,2%.



Рис. 1
Объем и динамика валового регионального продукта Республики Тыва за 2020–2024 гг., млн руб.

Источник: Статистический ежегодник Республики Тыва 2025: стат. сб. Красноярск: Красноярскстат; 2025. 319 с.

Fig. 1
Volume and dynamics of the gross regional product of the Republic of Tyva for 2020–2024, million Rubles

Source: Statistical Yearbook of the Republic of Tyva for 2025. Krasnoyarsk: Krasnoyarskstat; 2025. 319 p. (In Russ.)

Географическое расположение и труднодоступность Республики Тыва не останавливают инвесторов, на территории республики успешно разрабатываются такие месторождения, как Кызыл-Таштыгское свинцово-цинковое, Ак-Сугское меднопорфировое месторождение, а с 2023 г. лицензию на разработку Тастыгского литиевого месторождения получило ООО «Эльбрусметалл-Литий».



Рис. 2
Структура объема отгруженных товаров добывающих производств в Республике Тыва за 2024 г.

Источник: Социально-экономическое положение Республики Тыва в 2024 году: доклад, №1.37.2РТ. г. Красноярск. Февраль 2025 г. Режим доступа: https://24.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/1.37.2-12_PT(3).pdf (дата обращения: 20.02.2026)

Fig. 2
The structure of the goods shipped by mining operation in the Republic of Tyva in 2024

Source: The social and economic situation in the Republic of Tyva in 2024: Report No. 1.37.2RT. Krasnoyarsk. February 2025. (In Russ.) Available at: https://24.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/1.37.2-12_RT(3).pdf (accessed: 20.02.2026)

Таблица 1
Характеристика разведанных запасов Улуг-Танзекского месторождения

Table 1
Characteristics of the explored reserves of the Ulug-Tanzek deposit

Руды	Запасы категории А+В+С1	Запасы категории С2	Забалансовые запасы
Руда, тыс. т	486 933	275 868	34 897
Оксид лития Li_2O, т	409 160	256 321	42 011
Пентаоксид тантала Ta_2O_5, т	75 261	39 302	2 987
Пентоксид ниобия Nb_2O_5, т	710 961	358 630	31 344
Оксид тербия TR_2O_3, т	307 000	178 800	26 400
Оксид гафния HfO_2, т	82 292	40 576	4 218

Источник: Улуг-Танзекское месторождение. Литий. Ниобий. Редкоземельные металлы. Тантал. Рассеянные элементы. Режим доступа: https://nedradv.ru/nedradv/ru/find_place?obj=acad6aa92903b961caf9a8a492a81ad9 (дата обращения: 20.02.2026).
Source: Ulug-Tanzek deposit. Lithium. Niobium. Rare-earth metals. Tantalum. Trace elements. (In Russ.) Available at: https://nedradv.ru/nedradv/ru/find_place?obj=acad6aa92903b961caf9a8a492a81ad9 (accessed: 20.02.2026).

На 1 января 2025 г. в Республике Тыва функционирует 20 предприятий по добыче полезных ископаемых, в том числе по добыче угля – 3, по добыче металлических руд – 13, по добыче прочих полезных ископаемых – 4.

Объем отгруженных товаров собственного производства добывающих производств (в действующих ценах без НДС, акцизов и др. аналогичных платежей) за 2024 г. составил 32821,5 млн руб., что на 14,5% больше значения 2023 г. Основную долю по объему добычи добывающих производств за 2024 г. занимает добыча металлических руд (77%) (рис. 2). Добыча угля составляет 21,2%, а самая мизерная доля приходится на добычу прочих полезных ископаемых – 1,8%.

Перспективы разработки Улуг-Танзекского месторождения

Согласно прогнозу социально-экономического развития Республики Тыва на 2026 г. и на плановый период 2027 и 2028 гг. планируются мероприятия по реализации разработок новых месторождений драгоценных металлов, цветных и редкоземельных металлов, проведение аукционов на право пользования недрами и реализация инвестиционных проектов[1]. Данные мероприятия включены в план реализации Стратегии социально-экономического развития Сибирского федерального округа на период до 2035 г.[2]

На территории Республики Тыва балансом запасов лития учитываются два месторождения: Улуг-Танзекское с балансовыми запасами полилитионита в редкометалльных гранитах и Тастыгское с забалансовыми запасами сподумена в редкометалльных пегматитах[3].

В республике с 2023 г. реализуется проект по разработке Тастыгского месторождения лития, рассчитанного на 30 лет. Разработкой занимается компания «Эльбрусметалл-Литий».

В 2026 г. планируются проектно-изыскательные работы Улуг-Танзекского месторождения с богатыми характеристиками разведанных запасов минерального сырья[4], расположенного на водоразделе истоков рек Эрзин и Бурен в нагорье Сангилен (табл. 1). В течение 2 лет планируется изыскать и направить на цели уточнения запасов в контексте определения промышленно- значимых технологий около 500 млн руб. После планируемых проектно-изыскательных работ Улуг-Танзекского месторождения проект заинтересует крупных инвесторов на разработку месторождения. Тогда производство на этом месторождении тоже станет крупнейшим налогоплательщиком в республике, что в конечном итоге положительно повлияет на улучшение социально-экономического положения Тувы.

В настоящее время в республике реализуется Концепция развития и освоения минерально-сырьевой базы Республики Тыва до 2030 г. (далее Концепция). В результате успешной реализации Концепции к 2030 г. рост производства промышленной продукции составит до 52,2 млрд руб. Доля отрасли горнодобывающей промышленности в валовом региональном продукте к 2030 г. составит 25,0%. В дорожной карте Концепции обозначены только два месторождения Республики Тыва (Карасугское месторождение редкоземельных металлов, Солчурское свинцово-цинковое рудопроявление) для рассмотрения вопроса по проведению работ их геолого-экономической оценки. На наш взгляд, мероприятия данной Концепции необходимо скорректировать, включив в нее перспективный проект разработки Улуг-Танзекского месторождения, т.к. данное месторождение по запасам лития занимает 2-е место по России (запасы лития оцениваются на 665,5 тыс. т). Реализация данного проекта даст существенный рост промышленного производства по горнодобывающей отрасли, обеспечит высокооплачиваемыми рабочими местами местное население, станет прибыльным источником дохода в бюджет региона.

Заключение

Одним из наиболее перспективных стратегических направлений экономического роста Республики Тыва яв-

1 О Прогнозе социально-экономического развития Республики Тыва на 2026 год и на плановый период 2027 и 2028 годов. Постановление Правительства Республики Тыва №517 от 31.10.2025 г. Режим доступа: http://publication.pravo.gov.ru/document/1700202511050002 (дата обращения: 21.02.2026).

2 Стратегия социально-экономического развития Сибирского федерального округа на период до 2035 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации №129-р от 26.01.2023г. Режим доступа: https://itpgrad.ru/upload/iblock/ee3/dn7jlnkybqyxqlb4ny3yzfzzmxl184lg/Rasporyazhenie-Pravitelstva-RF-ot-26_01_2023-N-129_r-Ob-utve.pdf (дата обращения: 20.02.2026).

3 О Концепции развития и освоения минерально-сырьевой базы Республики Тыва до 2030 года: Постановление Правительства Республики Тыва №17 от 15.01.2019 г. Режим доступа: http://publication.pravo.gov.ru/document/1700201901160003 (дата обращения: 20.02.2026).

4 О Прогнозе социально-экономического развития Республики Тыва на 2026 год и на плановый период 2027 и 2028 годов. Постановление Правительства Республики Тыва №517 от 31.10.2025 г. Режим доступа: http://publication.pravo.gov.ru/document/1700202511050002 (дата обращения: 21.02.2026).

ляется недропользование, поскольку развитие освоения минерально-сырьевой базы Республики Тыва приведет к росту промышленного производства, малого и среднего бизнеса, а также дает возможность развивать другие сферы жизнедеятельности – инфраструктуру для развития транспортной отрасли, энергетики и других отраслей экономики. Освоение Улуг-Танзекского месторождения Республики Тыва должно стать одним из перспективных стратегических направлений развития минерально-сырьевого потенциала региона.

Список литературы / References

1. Лебедев В.И., Кужугет К.С. *Минерально-сырьевой потенциал Республики Тыва: возможности его использования в 1999–2001 гг. и перспективы дальнейшего освоения*. Кызыл: ТИКОПР СО РАН, препринт № 3. 1998. 35 с.

2. Лебедев В.И. Минерально-ресурсный потенциал Тувы. *Вопросы естествознания.* 2015;(3):38–41.
Lebedev V.I. Mineral-resources potential of Tuva. *Voprosy Estestvoznaniya*. 2015;(3):38–41. (In Russ.)

3. Абалаков А.Д., Лысанова Г.И., Шеховцов А.И., Базарова Н.Б., Новикова Л.С. Природные ресурсы и их использование в Республике Тыва. *Успехи современного естествознания.* 2017;(11):55–62. Режим доступа: https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36581 (дата обращения: 20.02.2026).
Abalakov A.D., Lysanova G.I., Shekhovtsov A.I., Bazarova N.B., Novikova L.S. Natural resources and their use in Republic of Tyva. *Advances in Current Natural Sciences.* 2017;(11):55–62. (In Russ.) Available at: https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36581 (accessed: 20.02.2026).

Информация об авторах
Сат Сайдаша Адар-ооловна – младший научный сотрудник, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кызыл, Российская Федерация; https://orcid.org/0009-0008-7256-7758; e-mail: saidasha2012@mail.ru
Соян Шончалай Чудурукпаевна – кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кызыл, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-5734-0482; e-mail: soyan77@mail.ru
Кылгыдай Ай-кыс Чамдаловна – кандидат экономических наук, старший научный сотрудник лаборатории региональной экономики, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кызыл, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-4608-7968; e-mail: aikys_k@mail.ru
Бадарчи Херел Буян-оолович – кандидат экономических наук, старший научный сотрудник лаборатории региональной экономики, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кызыл, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-3940-2018; e-mail: herel_badarchi@mail.ru
Монгуш Аина Денисовна – младший научный сотрудник, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кызыл, Российская Федерация; e-mail: ainadmongush@mail.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 17.05.2026
Поступила после рецензирования: 23.06.2026
Принята к публикации: 05.07.2026

Information about the authors
Saidasha A. Sat– Junior Research Associate, Tuvan Institute for Integrated Exploration of Natural Resources of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kyzyl, Russian Federation; https://orcid.org/0009-0008-7256-7758; e-mail: saidasha2012@mail.ru
Shonchalay Ch. Soyan – Cand. Sci. (Econ.), Leading Researcher, Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kyzyl, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-5734-0482; e-mail: soyan77@mail.ru
Ai-kys Ch. Kylgyday – Cand. Sci. (Econ.), Senior Researcher, Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kyzyl, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-4608-7968; e-mail: aikys_k@mail.ru
Kherel B. Badarchi – Cand. Sci. (Econ.), Senior Researcher, Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kyzyl, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-3940-2018; mail: herel_badarchi@mail.ru
Aina D. Mongush – Junior Researcher, Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kyzyl, Russian Federation; e-mail: ainadmongush@mail.ru

Article info
Received: 17.05.2026
Revised: 23.06.2026
Accepted: 05.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-215-222

Оценка влияния параметров буровзрывных работ на потери при выпуске горной массы методом физического моделирования

А.П. Господариков, В.И. Кириленко✉
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ v453300@ya.ru

Резюме: В статье представлено исследование влияния параметров буровзрывных работ на эксплуатационные потери при системе разработки с обрушением руды и вмещающих пород. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обоснования параметров буровзрывных работ, обеспечивающих снижение эксплуатационных потерь при выпуске под обрушенными породами с учетом изменчивости содержания полезного компонента по высоте рудного тела. Поставленные задачи выполнены методом физического моделирования на экспериментальном стенде в масштабе 1:50 с использованием медно-никелевых руд и вмещающих горных пород. Гранулометрический состав моделируемой горной массы определялся в рамках методики Кузнецова–Раммлера. Проведена серия из шести лабораторных экспериментов для различных гранулометрических составов. Установлено, что увеличение среднего размера куска горной массы в диапазоне 193–433 мм приводит к росту эксплуатационных потерь при выпуске с 54 до 65%. Показано, что укрупнение горной массы ухудшает выпуск верхнего участка рудного тела, характеризующегося повышенным содержанием полезного компонента. Полученные в ходе экспериментов результаты подтверждают, что параметры буровзрывных работ не только определяют процессы разрушения массива, но и оказывают существенное влияние на эксплуатационные потери и качество горной массы.

Ключевые слова: буровзрывные работы, подземные горные работы, система разработки руды, обрушение руды, вмещающие породы, торцевой выпуск горной массы, гранулометрический состав, методика Кузнецова–Раммлера, физическое моделирование, эксплуатационные потери

Для цитирования: Господариков А.П., Кириленко В.И. Оценка влияния параметров буровзрывных работ на потери при выпуске горной массы методом физического моделирования. *Горная промышленность.* 2026;(5):215–222. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-215-222

Impact of the drilling and blasting parameters on the ore drawing losses: a physical modeling study

A.P. Gospodarikov, V.I. Kirilenko ✉
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ v453300@ya.ru

Abstract: This study investigates the impact of the drilling and blasting parameters on the operational losses when using the mining methods of ore and host rock caving. The relevance of the study is associated with the need to justify the blasting parameters that would ensure a reduction in operational losses during ore drawing from below the caved rocks with account of the vertical variations of the ore grade within the ore body. The research was carried out based on physical modeling using a test-bench at a scale of 1:50 with copper-nickel ores and host rocks. The particle size distribution of the simulated rock mass was determined using the Kuznetsov–Rammler method. A series of six laboratory experiments was conducted for different particle size distributions. The results show that an increase in the mean particle size in the range of 193–433 mm leads to an increase in operational losses during ore drawing from 54% to 65%. It is shown that coarser fragmentation negatively affects extraction of the upper part of the ore body, which is characterized with a higher metal content. The obtained results confirm that the drilling and blasting parameters determine not only the rock fragmentation process, but also have a significant effect on the operational losses and the grade of the mined rock mass.

Keywords: drilling and blasting, underground mining, ore drawing, caving method, particle size distribution, Kuznetsov–Rammler method, physical modeling, operational losses

For citation: Gospodarikov A.P., Kirilenko V.I. Impact of the drilling and blasting parameters on the ore drawing losses: a physical modeling study. Russian Mining Industry. 2026;(5):215–222. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-215-222

Введение

В условиях снижения инвестиционной активности в освоении месторождений и воспроизводстве минерально-сырьевой базы, вовлечения в разработку более глубоких горизонтов и труднодоступных запасов, а также усложнения горно-геологических условий рентабельность и конкурентоспособность горнодобывающих предприятий в значительной степени зависят от способности последних компенсировать рост издержек и технологических рисков [1; 2]. Повышение производительности, энергетической и экономической эффективности в таких условиях рассматриваются как основные инструменты обеспечения сохранения технико-экономических показателей горного предприятия [3; 4].

Реализация таких задач в условиях подземных горных работ связывается прежде всего не с отдельным технологическим процессом, а с комплексом технологических решений, направленных на увеличение полноты извлечения запасов, снижение разубоживания и потерь, стабилизацию рудопотока, уменьшение затрат на последующие технологические стадии и повышение безопасности ведения горных работ. В частности, в работах [5–7] показано, что эффективность подземной добычи полезных ископаемых определяется не только параметрами буровзрывных работ (далее – БВР), но и условиями очистной выемки, качеством подготовки массива к отработке, возможностью снижения потерь на последующих стадиях разработки.

Применительно к системе разработки с обрушением руды и вмещающих пород ключевыми направлениями исследований являются совершенствование режима выпуска горной массы, управления качеством рудной массы, обоснования параметров БВР, а также совершенствование средств оперативного контроля качества и движения руды. Например, в работах [8; 9] предлагается использовать цифровые технологии во всей технологической цепочке для обеспечения управления качеством рудной массы. Изучение взаимосвязанных технологических процессов по добыче руды позволяет реализовывать комплексный подход к добыче полезных ископаемых подземным способом, называемый cave-to-mill [10]. Авторы данного подхода подчёркивают, что по сравнению с традиционными стратегиями mine-to-mill для открытых горных работ подземные горные работы характеризуются большей вариабельностью и меньшей управляемостью процессом добычи, а также более сложной связью между параметрами технологических процессов и работой обогатительной фабрики. Анализ современных исследований по подземным горным работам [11–14] показал, что концепция cave-to-mill в настоящее время, в отличие от mine-to-mill, не получила широкого распространения, имея более ограниченный фрагментарный характер, поскольку исследователи рассматривают процессы независимо друг от друга. В этой связи особое значение приобретают исследования, посвященные установлению взаимосвязи между параметрами БВР, гранулометрическим составом отбитой горной массы, закономерностями ее выпуска и показателями последующей переработки, также такие работы формируют основу для развития концепции cave-to-mill. Например, в обзорной работе Kinyua et al. показано, что результаты взрыва влияют на последующие стадии не только через распределение кусков, но и через степень внутренней микротрещиноватости фрагментов [15].

Современные исследования показывают, что параметры БВР, включая диаметр скважин, удельный расход, недозаряд скважин, расстояние между скважинами и схему инициирования, влияют не только на формируемый средний размер куска и выход негабаритной фракции, но и на пространственную изменчивость разрушенной горной массы [15–17]. На основе принятых параметров БВР, используя модели прогнозирования результатов взрыва, можно определить параметры горной массы, формируемой при взрыве [18–20]. При этом используемые модели постоянно дополняются различными поправочными коэффициентами и зависимостями. Так, например, Moomivand & Gheybi внедряют функцию, которая зависит от замедления скважин [21]. Существующие классические эмпирические зависимости, разработанные в основном для открытых горных работ, не всегда адекватно переносятся на подземные горные работы, поэтому они требуют перехода на новую модель прогнозирования либо модернизацию существующих [22; 23].

Полученный с привлечением прогнозных моделей гранулометрический состав в дальнейшем применяется в качестве одного из основных исходных параметров для численного или физического моделирования выпуска горной массы. Например, в работе Sun et al. приводятся результаты изменения разубоживания при различной высоте очистной камеры с учетом среднего размера куска горной массы [24]. Yi et al. при численном моделировании выпуска горной массы на основе гранулометрического состава определяют параметры гравитационного истечения и накопления разубоживания [25]. В работе Yang et al., используя и численное, и физическое моделирование, установили влияние гранулометрического состава на сам механизм выпуска горной массы [26].

Современные исследования показывают, что существующие подходы, как правило, подробно рассматривают либо отдельные аспекты взрывного разрушения массива, либо особенности гравитационного истечения рудной массы. При этом их совместный учёт остается ограниченным и недостаточно проработанным. Таким образом, возникает необходимость в разработке методического подхода, позволяющего определить и количественно оценить влияние параметров БВР на гранулометрический состав горной массы, а также на эксплуатационные потери при выпуске. Проанализированные работы демонстрируют, что в большинстве случаев гранулометрический состав при моделировании задается без учета пространственной изменчивости по объему взорванной массы, а также в достаточно упрощенном виде – либо через средний размер куска, либо через ограниченное число классов крупности для воспроизведения общих характеристик потока, не отражающих в полной мере реальную горную массу. В этой связи использование полной гранулометрической характеристики, формируемой параметрами БВР, представляется вполне обоснованным для исследования процесса выпуска горной массы. Целью работы является установление количественной зависимости между параметрами БВР, гранулометрическим составом горной массы и эксплуатационными потерями руды при выпуске. Научная новизна исследования заключается в установлении количественной зависимости между средним размером куска горной массы, формируемым параметрами БВР, и величиной эксплуатационных потерь при выпуске, а также в определении оптимального диапазона крупности горной массы, обеспечивающего минимальные потери.

Материалы и методы

Физическое моделирование остается по-прежнему одним из основных методов исследования процессов, которые невозможно описать эмпирико-аналитическими зависимостями вследствие большого числа влияющих параметров и в полной мере учесть [27]. Отметим, что физическое моделирование было одним из основных методов исследования различных процессов в горном деле до появления высокопроизводительной вычислительной техники и до сих пор используется как метод исследования, когда непосредственные измерения характеристик горных объектов весьма затруднены или практически невозможны [28; 29].

Таким образом, физическое моделирование горных процессов представляет собой метод исследования, основанный на воспроизведении реальных геотехнических и технологических явлений на специальных стендах. Теоретической основой физического моделирования являются основные положения теории подобия [30]. Согласно теореме Бекингема физические процессы могут быть представлены в виде зависимостей между безразмерными критериями, составленными из размерных параметров системы [31]. В соответствии с теоремой Кирпичева–Гухмана, два процесса являются подобными, если их условия однозначности подобны, а соответствующие критерии подобия численно равны [32]. Применительно к условиям моделирования процесса выпуска горной массы из очистной камеры условия однозначности представляют собой совокупность геометрических параметров системы, физических свойств среды, а также начальных и граничных условий, полностью определяющих протекание процесса [33–35].

Результаты

В работе предполагается, что параметры БВР формируют гранулометрический состав горной массы, который, в свою очередь, определяет характер гравитационного истечения и показатели выпуска. В рамках настоящего исследования был выполнен комплекс из 6 лабораторных экспериментов по физическому моделированию процесса выпуска горной массы из очистной выработки. Был изготовлен экспериментальный стенд, представляющий собой модель очистной камеры, выполненный в геометрическом масштабе 1:50 по отношению к натурным условиям. Учитывая горно-геологические особенности изменения среднего содержания полезного компонента от кровли к почве рудного тела, модель рудного тела была разбита на 3 участка с различным содержанием: участок с низким содержанием полезного компонента (далее – ПК) – 0,9 г/т; участок со средним содержанием ПК – 1 г/т; участок с высоким содержанием ПК – 2,0 г/т. На рис. 1 представлен стенд, воспроизводящий натурные условия, а именно: геометрию очистного пространства, параметры выпускной выработки и условия торцевого выпуска горной массы.

Гранулометрический состав моделируемой горной массы определялся на основе параметров БВР с использованием адаптированной методики Кузнецова–Раммлера [23]. В табл. 1 представлены принятые параметры буровзрывных работ в каждом варианте и параметры гранулометрического состава горной массы. Для каждого сектора очистной камеры рассчитывалось распределение частиц по крупности, после чего данные каждого сектора приводились к принятому масштабу модели. Определение гранулометрической кривой обрушенных горных пород производилось фотопланометрическим методом в выработках посадочного горизонта [36]. Моделирующий материал руды, торцевых и обрушенных пород изготавливался с учетом масштаба из образцов вкрапленных руд и горных пород путем дробления и последующего рассева на стандартные фракции +20; +17,5; +15; +12,5; +10; +7,5; +5; +2,5. Данный подход обеспечивал воспроизведение гранулометрической кривой и соответствие физико-механических характеристик моделируемой среды. Для разделения рудной массы по содержанию ПК частицы руды окрашивались в различные цвета (рис. 2).

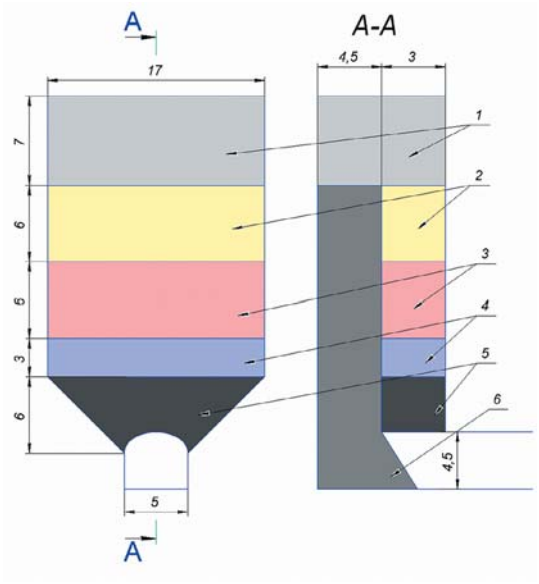


Рис. 1
Геометрия очистной камеры и горнотехнологические параметры выпуска горной массы:
1 – обрушенные горные породы;
2 – участок с высоким содержанием ПК;
3 – участок со средним содержанием ПК;
4 – участок с низким содержанием ПК;
5 – породный прослой;
6 – горная масса отработанного ранее веера

Fig. 1
Stope geometry and mining and processing parameters of rock drawing:
1 – caved rock;
2 – zone with high content of the commercial component;
3 – zone with medium content of the commercial component;
4 – zone with low content of the commercial component;
5 – rock interlayer;
6 – rock mass from a previously mined fan

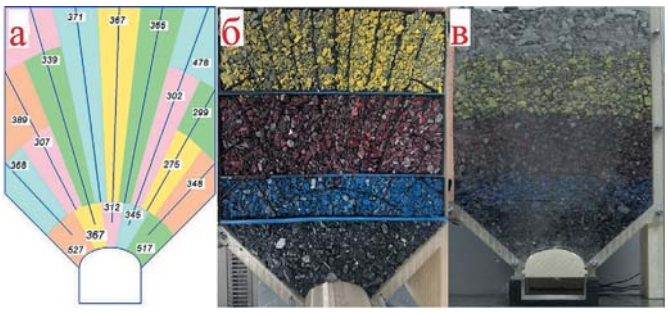


Рис. 2
Процесс подготовки стенда:
а – средний размер фракции в секторе;
б – пример посекторного распределения рудной массы по стенду;
в – подготовленный стенд

Fig. 2
The test-bench preparation process: a – an average PSD in each sector;
б – an example of sector-by-sector distribution of ore mass across the test-bench;
в – a prepared test-bench

Таблица 1
Параметры БВР, используемые для моделирования гранулометрического состава

Table 1
The drilling and blasting parameters used in modeling the particle size distribution (PSD)

Вариант БВР	Диаметр скважин, мм	Расстояние между концами скважин, м	Количество скважин, шт.	Удельный расход, кг/м³	Суммарная длина скважин, м	Средний размер куска после взрыва, мм	Выход негабарита, %	Коэффициент однородности распределения
1	76	3,5	9	0,66	150	433	19,5	1,79
2	86	3,5	9	0,9	150	355	10,1	1,76
3	102	3,5	9	1,20	150	292	6,3	1,59
4	102	3	11	1,44	186	250	2,5	1,62
5	102	2,5	13	1,6	220	222	1,2	1,61
6	102	2	15	1,92	270	193	0,2	1,71

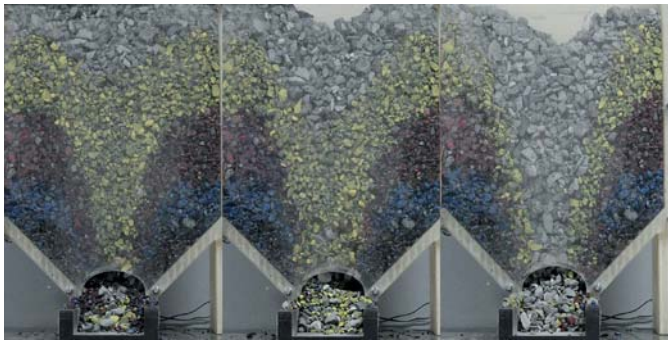


Рис. 3
Процесс истечения горной массы из стенда

Fig. 3
The process of rock mass drawing from the test-bench

Процесс моделирования начинался с поэтапного удаления арочной перемычки: первоначально она извлекалась до уровня рудной камеры, что обеспечивало обрушение пустых пород торцевой части и формирование контактной зоны внутри выпускной выработки. Далее она удалялась, полностью запуская процесс самотечного истечения рудной массы из очистной камеры. Горная масса извлекалась через выпускную выработку с использованием ковша от погрузочно-доставочной машины LH514, выполненного в том же масштабе 1:50. Извлечение горной массы производилось поэтапно с фиксацией объемов извлеченной руды и визуальным наблюдением за развитием потока.

Извлечение горной массы из модели производилось дозированно с целью детального анализа динамики процесса выпуска и изменения качественного состава извлекаемого материала. Выпуск производился сериями доз, каждая из которых представляла собой фиксированный объем горной массы, извлекаемой из модели. На рис. 3 представлен процесс выпуска горной массы из стенда в различные стадии выпуска.

Каждая полученная доза была вручную отсортирована по типам материала на основе цветовой идентификации, что обеспечивало разделение рудной фракции по содержанию и пустой горной породы. После сортировки производилось взвешивание каждой фракции, входящей в состав дозы, с определением массовых долей руды и пустой горной породы. Дополнительно фиксировалась масса руды с каждого из трех участков для последующего подсчета извлеченного полезного компонента. На основе полученных данных рассчитывались эксплуатационные потери при величине разубоживания 30 и 35% по следующей формуле:

$$K_{ПОТ} = \frac{Q_{РУД} - Q_{ВЫПРУД}}{Q_{РУД}},$$

где $Q_{РУД}$ – масса руды в камере, кг; $Q_{ВЫПРУД}$ – масса выпущенной руды, кг.

Обсуждение результатов

Результаты физического моделирования показывают существенное влияние гранулометрического состава и структурной неоднородности горной массы на эксплуатационные потери. При переходе от параметров БВР, формирующих более крупный средний размер куска, к вариантам БВР, формирующим более мелкую горную массу, выявлено снижение эксплуатационных потерь медно-никелевых руд при их выпуске. Таким образом, применение физического моделирования демонстрирует, что гранулометрический состав горной массы является одним из ключевых факторов, определяющих полноту извлечения руды в условиях торцевого выпуска под обрушенными породами.

Анализ зависимости эксплуатационных потерь от среднего размера куска подтверждает (рис. 4), что увеличение среднего размера куска горной массы приводит к устойчивому росту потерь вне зависимости от уровня разубоживания рудной массы. При разубоживании, равном 30%, эксплуатационные потери возрастают с 54 до 65%; тогда как при значении разубоживания 35% интервал эксплуа-

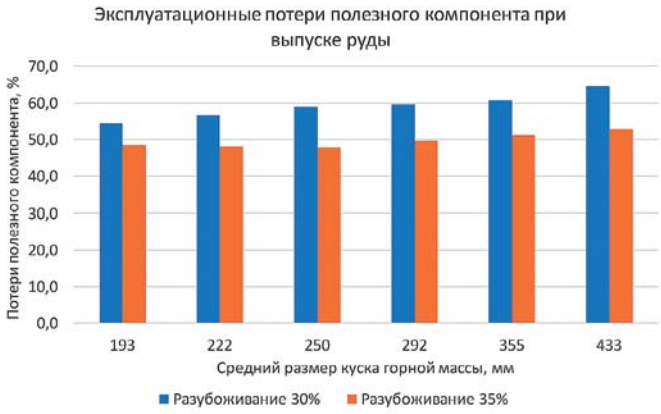


Рис. 4
Влияние среднего размера куска на эксплуатационные потери при выпуске горной массы при различном разубоживании горной массы

Fig. 4
The effects of the average lump size on the operational losses during ore drawing under various ore mass dilution



Рис. 5
Физические процессы, регистрируемые при выпуске горной массы: а – зависание рудной массы; б – образование застойной зоны

Fig. 5
The physical processes observed during ore drawing: а – ore congestion; б – formation of a stagnation zone



Рис. 6
Доля добытой руды из каждого участка при различном гранулометрическом составе

Fig. 6
The share of the ore extracted from each section under different particle size distributions

тационных потерь уменьшается и находится в диапазоне от 48 до 53%. Установлено, что увеличение среднего размера куска приводит к ухудшению условий гравитационного истечения, что связано с образованием застойных зон и неполным вовлечением руды в процесс выпуска (рис. 5).

Полученное распределение выпущенной горной массы по участкам с различным содержанием полезного компонента (рис. 6) позволяет установить, что участки с низким и средним содержанием ПК имеют наименьшую чувствительность к изменению гранулометрического состава горной массы. При этом диапазоны изменения извлечения ПК находятся в интервалах от 54 до 61% и от 54 до 57% соответственно. При этом участок с высоким содержанием ПК при всех рассматриваемых вариантах параметров БВР характеризуется минимальной степенью извлечения и находится в широком диапазоне от 36 до 20%. Дополнительно, при среднем размере куска 433 мм, фиксируется вовлечение менее ценной руды вместо более богатой. Это позволяет установить, что наиболее ценная по содержанию ПК часть рудного тела в меньшей степени вовлекается в зону устойчивого гравитационного истечения и при повышении размера кусков горной массы руда из данного участка увеличивает эксплуатационные потери.

Из графической зависимости изменения массы ПК в выпущенной горной массе (рис. 7) установлено, что увеличение среднего размера куска горной массы приводит к устойчивому снижению количества извлекаемого ПК. Уменьшение среднего размера куска с 433 мм до 193 мм обеспечивает повышение массы ПК в горной массе на 10%, или в абсолютной величине – 333 г с одной камеры. В этих зависимостях установлен нисходящий тренд: при переходе от мелкого гранулометрического состава к крупному масса ПК в выпущенной горной массе уменьшается. При этом для разубоживания, равного 30%, данный тренд более выражен, чем для значения 35%, что подтверждает различную чувствительность процесса выпуска горной массы к укрупнению горной массы.

С физической точки зрения полученные данные могут быть объяснены изменением характера гравитационного истечения горной массы. Более мелкая и однородная горная масса, формируемая шестым вариантом параметров БВР, обеспечивает более равномерное вовлечение руды в поток и уменьшает вероятность формирования застойных зон в пределах очистной камеры. Напротив, при крупно-

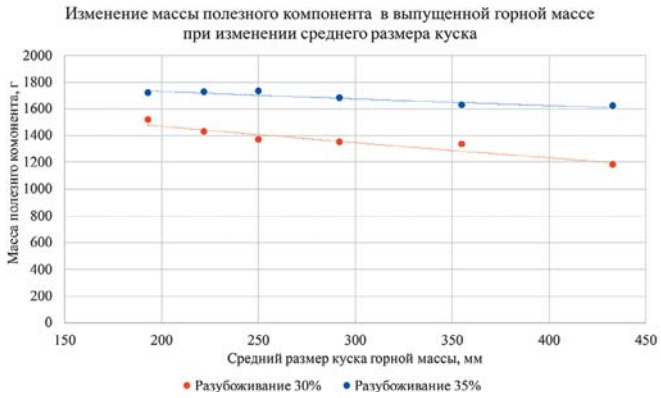


Рис. 7
Масса полезного компонента, содержащегося в выпущенной горной массе

Fig. 7
The weight of the commercial component contained in the muck pile

кусковой горной массе возрастает вероятность локального зависания, образования устойчивых застойных зон и неравномерного истечения, вследствие чего ухудшается выпуск горной массы.

Полученные результаты удовлетворительно согласуются с классическими представлениями о гравитационном истечении горной массы [25; 37; 38], согласно которым увеличение крупности приводит к росту вероятности образования зависаний и формированию застойных зон, что непосредственно увеличивает эксплуатационные потери. Воспроизведение полной гранулометрической кривой горной массы, а не представление горной массы в усредненном виде, позволило более достоверно воспроизвести реальные условия формирования потерь при выпуске и показать, что параметры БВР следует рассматривать как фактор, определяющий не только разрушение массива, но и качество горной массы.

Выводы

Установлено, что при применении системы разработки с обрушением руды и вмещающих пород с торцевым выпуском параметры БВР, определяя изменение гранулометрического состава отбитой рудной массы, значительно влияют на характер гравитационного истечения, распределение извлекаемой руды по участкам различного содер-

жания полезного компонента, эксплуатационные потери и среднее содержание полезного компонента в выпущенной горной массе.

В работе разработан и реализован методический подход к исследованию влияния параметров БВР на показатели выпуска горной массы, основанный на последовательной увязке параметров БВР, гранулометрического состава отбитой горной массы и эксплуатационных потерь. Подход апробирован серией из 6 лабораторных экспериментов физического моделирования на стенде в масштабе 1:50 для условий торцевого выпуска горной массы под обрушенными породами.

Установлено, что изменение параметров БВР приводит к существенному изменению гранулометрического состава горной массы. В исследовании рассматривался диапазон среднего размера куска и выхода негабарита от 193 до 433 мм и от 0,2 до 19,5% соответственно, что позволило проследить влияние крупности на закономерности выпуска. Показано, что при увеличении среднего размера куска горной массы эксплуатационные потери при разубоживании в 30 и 35% увеличиваются в диапазонах с 54 до 65% и с 48 до 53% соответственно. В пересчете на абсолютные значения по полезному компоненту уменьшение среднего размера куска до 193 мм приводит к увеличению массы на 333 г при разубоживании 30% с одной очистной камеры.

Учитывая горно-геологические особенности изменения среднего содержания полезного компонента от кровли к почве рудного тела, наиболее остро стоит вопрос управления параметрами буровзрывных работ и гранулометрическим составом для обеспечения снижения эксплуатационных потерь.

Выявлено, что увеличение среднего размера куска приводит не только к росту общих потерь, но и к ухудшению качественной структуры выпускаемой рудной массы, а именно возрастает степень вовлечения участка с низкой концентрацией полезного компонента, сохраняется стабильный процесс выпуска среднего участка по содержанию полезного компонента, и одновременно ухудшается выпуск богатого участка, что сопровождается снижением массы полезного компонента в выпущенной горной массе. Таким образом, данное исследование показывает, что средний размер куска следует рассматривать как фактор, определяющий не только полноту извлечения руды, но и итоговую массу полезного компонента, реально поступающего в добытую горную массу.

Практическое значение полученных результатов состоит в том, что при обосновании параметров БВР для систем с торцевым выпуском горной массы под обрушенными породами следует учитывать их влияние на стадию выпуска горной массы. Выбор параметров БВР, обеспечивающих снижение размера куска и ограничение выхода негабаритной фракции, следует рассматривать как один из инструментов уменьшения эксплуатационных потерь и повышения полноты извлечения медно-никелевых руд

Вклад авторов
А.П. Господариков – анализ современных методов исследования процесса выпуска горной массы под обрушенными породами.
В.И. Кириленко – разработка методики, проведение физического моделирования, обработка данных эксперимента.

Authors' contribution
Alexander P. Gospodarikov – analysis of modern methods for studying the muck draw process from below the caved rock.
Vladislav I. Kirilenko – development of the methodology, physical modeling, and experimental data processing.

Список литературы / References

1. Radebe N., Chipangamate N. Mining industry risks, and future critical minerals and metals supply chain resilience in emerging markets. *Resources Policy*. 2024;91:104887. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104887
2. Ponomarenko T., Nevskaya M., Jonek-Kowalska I. Mineral resource depletion assessment: alternatives, problems, results. *Sustainability*. 2021;13(2):862. https://doi.org/10.3390/su13020862
3. Nevskaya M.A., Raikhlin S.M., Chanysheva A.F. Assessment of energy efficiency projects at Russian mining enterprises within the framework of sustainable development. *Sustainability*. 2024;16(17):7478. https://doi.org/10.3390/su16177478
4. Sánchez F., Hartlieb P. Innovation in the mining industry: technological trends and a case study of the challenges of disruptive innovation. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020;37(5):1385–1399. https://doi.org/10.1007/s42461-020-00262-1
5. Рудаков М.Л., Дука Н.Е. Моделирование акустического воздействия горного оборудования на персонал при добыче угля подземным способом. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(10):165–179. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_10_0_165
Rudakov M.L., Duka N.E. Modeling acoustic effect exerted on personnel by operating equipment in underground coal mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(10):165–179. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_10_0_165
6. Трушко В.Л., Трушко О.В. Комплексное освоение железорудных месторождений на основе конкурентоспособных подземных геотехнологий. *Записки Горного института*. 2021;250:569–577. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.10
Trushko V.L., Trushko O.V. Integrated development of iron ore deposits based on competitive underground geotechnologies. *Journal of Mining Institute*. 2021;250:569–577. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.10
7. Дарбинян Т.П., Цымбалов А.А., Зубов В.П., Колганов А.В. Влияние трещиноватости горного массива на разубоживание медно-никелевых вкрапленных руд при их добыче на руднике «Октябрьский». *Горный журнал*. 2023;(6):19–24. https://doi.org/10.17580/gzh.2023.06.03
Darbinyan T.P., Tsymbalov A.A., Zubov V.P., Kolganov A.V. Impact of rock mass jointing on dilution of disseminated copper–nickel ore in Oktyabrsky Mine. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(6):19–24. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2023.06.03

8. Цупкина М.В., Кирков А.Е., Клебанов Д.А., Радченко Д.Н. Обоснование необходимости улучшения стратегии управления функционированием горно-технической системы на основе анализа данных об отработке сложноструктурных блоков. *Записки Горного института*. 2024;266:316–325. Режим доступа: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16302 (дата обращения: 19.03.2026).
Tsupkina M.V., Kirkov A.E., Klebanov D.A., Radchenko D.N. Justification of the approaches to improve management strategy of the mining system based on the analysis of data on the mining of complex structural rock blocks. *Journal of Mining Institute*. 2024;266:316–325. Available at: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16302 (accessed: 19.03.2026).

9. Князькин Е.А., Клебанов Д.А., Ювакаев Р.О. Разработка и применение новых методов оценки изменчивости качества полезных ископаемых на основе анализа больших данных для оперативного управления рудопотоком на горных предприятиях. *Записки Горного института*. 2025;275:145–154. Режим доступа: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16586 (дата обращения: 19.03.2026).
Knyazkin E.A., Klebanov D.A., Yuvakaev R.O. New approaches to mineral quality variability evaluation using big data for operational control of ore flows in mining operations. *Journal of Mining Institute*. 2025;275:145–154. Available at: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16586 (accessed: 19.03.2026).

10. Nadolski S., Klein B., Elmo D., Scoble M. Cave-to-mill: a mine-to-mill approach for block cave mines. Mining Technology: *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section A*. 2015;124(1):47–55. https://doi.org/10.1179/1743286315Y.0000000001

11. Имашев А.Ж., Суимбаева А.М., Мусин А.А. Прогнозная оценка разубоживания руды при отработке маломощных крутопадающих залежей системой подэтажных штреков. *Записки Горного института*. 2024;266:283–294. Режим доступа: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16186 (дата обращения: 19.03.2026).
Imashev A.Z., Suimbaeva A.M., Musin A.A. Predictive assessment of ore dilution in mining thin steeply dipping deposits by a system of sublevel drifts. *Journal of Mining Institute*. 2024;266:283–294. Available at: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16186 (accessed: 19.03.2026).

12. Meng X., Long T., Shi X., Wang L., Zhu Z., Tao G. A new insert drawing technique for controlling ore loss and dilution during sublevel caving. *Scientific Reports*. 2025;15:23104. https://doi.org/10.1038/s41598-025-07362-2

13. Kucewicz M., Łukasz M., Baranowski P., Małachowski J., Fuławka K., Mertuszka P., Szumny M. Numerical modeling of blast-induced rock fragmentation in deep mining with 3D and 2D FEM method approaches. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2024;16(11):4532–4553. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.01.017

14. Guo J., Sun S., Jiang N., Wang J., Huang M., Yan X. et al. Optimization of large-diameter deep-hole stope blasting technology based on numerical simulation: a case study of the Dongguashan copper mine. *Scientific Reports*. 2025;15:18547. https://doi.org/10.1038/s41598-025-91789-0

15. Kinyua E.M., Jianhua Z., Kasomo R.M., Mauti D., Mwangangi J. A review of the influence of blast fragmentation on downstream processing of metal ores. *Minerals Engineering*. 2022;186:107743. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107743

16. Ding J., Yang J., Ye Z., Leng Z., Zhou C. Numerical study on rock blasting assisted by in-situ stress redistribution. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2024;153:106022. https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106022

17. Dotto M.S., Pourrahimian Y. The effect of initiation time delay and sequencing on rock damage in multi-hole blasting. *Mining*. 2025; 5(2):22. https://doi.org/10.3390/mining5020022

18. Маринин М.А., Афанасьев П.И., Сушкова В.И., Устименко К.Д., Ахметов А.Р. Опыт применения модели Кузнецова-Раммлера при описании распределения грансостава взорванной горной массы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):96–109. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_96
Marinin M.A., Afanasyev P.I., Sushkova V.I., Ustimenko K.D., Akhmetov A.R. The experience of using the Kuz-Ram model in describing of grain size distribution of blasted rock mass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):96–109. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_96

19. Guo J., Zhao Z., Zhao P., Chen J. Prediction and optimization of open-pit mine blasting based on intelligent algorithms. *Applied Sciences*. 2024;14(13):5609. https://doi.org/10.3390/app14135609

20. Господариков А.П., Киркин А.П., Трофимов А.В., Ковалевский В.Н. Определение физико-механических свойств горных пород при применении противоударных разгрузочных мероприятий. *Горный журнал*. 2023;(1):26–34. https://doi.org/10.17580/gzh.2023.01.04
Gospodarikov A.P., Kirkin A.P., Trofimov A.V., Kovalevsky V.N. Determination of physical and mechanical properties of rocks using anti-burst destress measures. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(1):26–34. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2023.01.04

21. Moomivand H., Gheybi M. Novel empirical models to assess rock fragment size by drilling and blasting. *Measurement*. 2024;238:115375. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115375

22. Shields L., Calnan J., Silva J., Agioutantis Z. Underground bench blast fragmentation: Comparison of a multivariate regression model to established predictive models. *Mining Technology: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy*. 2025;134(1):15–29. https://doi.org/10.1177/25726668241301880

23. Господариков А.П., Ковалевский В.Н., Румянцев А.Е., Кириленко В.И. Адаптация модели прогнозирования гранулометрического состава Кузнецова – Раммлера для условий подземных горных работ. *Горный журнал*. 2026;(2):72–79. https://doi.org/10.17580/gzh.2026.02.09
Gospodarikov A.P., Kovalevskiy V.N., Rumyantsev A.E., Kirilenko V.I. AAdapting the Kuz-Ram fragmentation model to underground mining. *Gornyi Zhurnal*. 2026;(2):72–79. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2026.02.09

24. Sun H., Jin A., Elmo D., Gao Y., Wu S. A numerical based approach to calculate ore dilution rates using rolling resistance model and upside-down drop shape theory. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020;53(10):4639–4652. https://doi.org/10.1007/s00603-020-02180-6

25. Yi C., Johansson D., Wimmer M., Nordqvist A., San Miguel C.R. Numerical modelling of fragmentation by blasting and gravity flow in sublevel caving mines. In: *Potvin Y. (ed.) Caving 2022: Proceedings of the Fifth International Conference on Block and Sublevel Caving, Adelaide, August 30 – September 1, 2022*. Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2022, pp. 963–974. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2205_66

26. Yang C., Li G., Gan D., Cao R., Lin H., Gao R. Particle-scale insights into extraction zone development during block caving: experimental validation and PFC3D simulation of gradation-dependent flow characteristics. *Applied Sciences*. 2025;15(14):7916. https://doi.org/10.3390/app15147916

27. Зуев Б.Ю., Истомин Р.С., Обожина Е.П. Физическое моделирование нелинейных геомеханических процессов при разработке калийных месторождений. *Горный журнал*. 2023;(5):75–80. https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.11
Zuev B.Yu., Istomin R.S., Obozhina E.P. Physical simulation of nonlinear geomechanical processes in potash ore mining. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(5):75–80. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.11

28. Wu X., Zhang N., Wu X. The effect of depth of the trap zone of an end release avalanche on the depletion of ore loss. *Scientific Reports*. 2025;15:26199. https://doi.org/10.1038/s41598-025-11784-3

29. Zuev B.Yu., Zubov V.P., Fedorov A.S. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals. *Eurasian Mining*. 2019;(1):8–12. https://doi.org/10.17580/em.2019.01.02

30. Zhang X., Tao G., Zhu Z. Laboratory study of the influence of dip and ore width on gravity flow during longitudinal sublevel caving. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018;103:179–185. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.01.039

31. Фирсов А.Н., Журавская А.А. О методах теории подобия и размерности. В кн.: *Козлов В.Н., Фирсов А.Н. (ред.) Системный анализ в проектировании и управлении: сб. науч. тр. 24-й Междунар. науч. и учеб.-практ. конф., Санкт-Петербург, 13–14 окт. 2020 г.* СПб.: Политех-Пресс; 2020. Ч. 2. С. 121–131. https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id20-159

32. Седов Л.И. *Методы подобия и размерности в механике*. 8-е изд., перераб. М.: Наука; 1977. 438 с.

33. Кирпичев М.В. *Теория подобия*. М.: Изд-во Акад. наук СССР; 1953. 96 с.

34. Jia Q., Tao G., Liu Y., Wang S. Laboratory study on three-dimensional characteristics of gravity flow during longitudinal sublevel caving. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021;144:104815. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104815

35. Castro R., Gómez R.E., Pérez Á. Physical modelling as a tool to improve our understanding of mechanisms of cave flow. In: Potvin Y. (ed.) Caving 2022: *Proceedings of the Fifth International Conference on Block and Sublevel Caving, Adelaide, August 30 – September 1, 2022*. Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2022, pp. 1071–1088. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2205_74

36. Lawal A.I. A new modification to the Kuz-Ram model using the fragment size predicted by image analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021;138:104595. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104595

37. Малахов Г.М., Безух В.Р., Петренко П.Д. *Теория и практика выпуска обрушенной руды*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра; 1968. 311 с.

38. Kvapil R. Gravity flow of granular materials in Hoppers and bins in mines – II. Coarse material. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1965;2(3):277–292. https://doi.org/10.1016/0148-9062(65)90029-X

Информация об авторах
Господариков Александр Петрович – доктор технических наук, заведующий кафедрой высшей математики, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-1018-6841; e-mail: kafmatem@spmi.ru
Кириленко Владислав Игоревич – аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; https://orcid.org/0009-0006-3435-3770; e-mail: v453300@ya.ru

Information about the authors
Alexander P. Gospodarikov – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Higher Mathematics, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-1018-6841; e-mail: kafmatem@spmi.ru
Vladislav I. Kirilenko – Postgraduate Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; https://orcid.org/0009-0006-3435-3770; e-mail: v453300@ya.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 10.05.2026
Поступила после рецензирования: 22.06.2026
Принята к публикации: 02.07.2026

Article info
Received: 10.05.2026
Revised: 22.06.2026
Accepted: 02.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-223-228

Вовлечение в дражную разработку мощных продуктивных отложений, превышающих выемочные возможности драги

Н.В. Мурзин ✉, Б.Л. Тальгамер, И.А. Мешков
Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация
✉ murzinnv@istu.edu

Резюме: На фоне сокращения доли россыпного золота в общем объёме его добычи по России в восточных регионах, включая Иркутскую область, сохраняется высокая значимость россыпей. При этом наблюдается ухудшение горно-геологических условий залегания россыпей: увеличивается доля трудноизвлекаемых запасов и количество не выдержанных по мощности и ширине участков. В связи с тем что разработка запасов с непостоянными параметрами вдоль россыпи и участков с большой мощностью продуктивных отложений будет осуществляться существующими драгами, авторы обосновали области применения для двух технологических вариантов подготовки таких месторождений к драгированию с использованием драги типа 250Д. Первый вариант предусматривает перевалку верхней части продуктивного пласта в траншею, пройденную вдоль дражного хода, с использованием экскаватора-драглайна ЭШ 10.70. Второй вариант основан на экскаваторно-автомобильной транспортировке тех же объёмов песков на маломощные или непродуктивные участки россыпи с применением экскаватора ЭКГ-5А, автосамосвалов БелАЗ 7540 и бульдозера Shantui SD-16. Для сравнительного анализа выполнено графоаналитическое моделирование: построено более 200 технологических схем при мощности вскрыши от 2 до 20 м и доле песков выше уровня черпания от 0 до 100% с шагом 5%. На основе вычисленных объёмов работ и удельных затрат получена зависимость общей стоимости подготовки полезного ископаемого к драгированию от доли песков, расположенных за пределами черпающих возможностей драги. Установлено, что эффективность первого варианта существенно зависит от мощности вскрыши и коэффициента переэкскавации. При мощности вскрыши менее 10 м и доле песков выше уровня черпания до 80% перевалка в траншею экономически оправдана. Экономически целесообразная область применения первого варианта ограничена мощностью вскрыши 18–20 м и долей песков, расположенных выше уровня черпания драги, не более 5%. При мощности торфов до 8–10 м подготовка песков драглайном остаётся эффективной даже в случае превышения мощности пласта над глубиной черпания драги до 2,5 раз. Полученные результаты позволяют обоснованно выбирать технологию отработки глубоких россыпей в сложных горно-геологических условиях.

Ключевые слова: россыпные месторождения, дражные работы, глубокие россыпи, подготовка песков, вскрышные работы

Для цитирования: Мурзин Н.В., Тальгамер Б.Л., Мешков И.А. Вовлечение в дражную разработку мощных продуктивных отложений, превышающих выемочные возможности драги. *Горная промышленность*. 2026;(5):223–228. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-223-228

Dredging of thick productive placer deposits that exceed the dredger excavation capacity

N.V. Murzin✉, B.L. Talgamer, I.A. Meshkov
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation
✉ murzinnv@istu.edu

Abstract: In conditions of a decreasing share of the placer gold in the total volume of gold production in the Russian Federation, the importance of placers remains high in the eastern regions, including the Irkutsk Region. At the same time, there is a deterioration in the mining and geological conditions of the placer deposits, i.e. the share of hard-to-recover reserves and the number of sections that are not maintained in terms of their capacity and width is increasing, while construction of new large-capacity dredges in Russia is virtually nonexistent. Bearing in mind the fact that development of reserves with variable parameters along the placer and areas with high productive sediment layer thickness will be carried out using the existing dredges, the authors have justified the scope of application for two technological options for preparing such deposits for dredging using Type 250D dredges. The first option provides for transloading of the upper part of the producing layer into a trench along the dredge cut using an ASH 10.70 dragline excavator. The second option is based on excavator-automobile transportation of the same volumes of sand to the thin or barren placer sites using an EKG-5A excavator, BelAZ 7540 dump trucks and a Shantui SD-16 bulldozer. Tabular-analytical

modeling was performed for comparative analysis, i.e. more than 200 technological schemes were designed with the overburden thickness from 2 to 20 m and the share of sands above the scooping level from 0% to 100% in increments of 5%. Dependences of the total cost of sand preparation on the proportion of sands located above the dredging capabilities were obtained based on the calculated volumes of work and the unit costs. It has been established that the efficiency of the first option significantly depends on the overburden thickness and the rehandling coefficient. With the overburden thickness of less than 10 m and the share of sand above the scooping level of up to 80%, transloading into the trench is economically justified. The economically feasible area of application of the first option is limited by the overburden thickness of 18–20 m and the share of sands located above the dredging depth of no more than 5%. With the peat thickness of up to 8–10 m, sand preparation with a dragline remains efficient even if the producing layer thickness exceeds the dredging depth by up to 2.5 times. The results obtained make it possible to reasonably select a technology for mining deep placers in difficult mining and geological conditions.

Keywords: placer deposits, dredging, deep placers, sand preparation, stripping operations

For citation: Murzin N.V., Talgamer B.L., Meshkov I.A. Dredging of thick productive placer deposits that exceed the dredger excavation capacity. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):*223–228*. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-*223-228*

Введение

Анализ динамики золотодобычи в России указывает на существенную трансформацию сырьевой базы этой подотрасли. В общефедеральном масштабе доля металла, извлекаемого из россыпных месторождений, последовательно сокращается и по актуальным оценкам находится на уровне порядка 20% от общего годового объема его производства [1]. Пространственное распределение россыпной добычи, однако, отличается значительной неоднородностью. В отличие от общероссийской тенденции, в регионах Дальнего Востока и Восточной Сибири количество лицензий, выдаваемых на разработку россыпей, остается практически неизменным, что подчеркивает сохраняющуюся экономическую значимость данного типа объектов для восточных регионов страны.

В контексте регионального распределения минерально-сырьевого потенциала Иркутская область сохраняет статус одного из ключевых субъектов Российской Федерации по величине разведанных и утвержденных запасов россыпного золота [2]. Качественная и технологическая структура этих запасов претерпевает системные изменения. Наблюдается устойчивое сокращение удельного веса запасов, подготовленных для разработки дражным способом: в Иркутской области их доля не превышает 30%, а в среднем по стране оценивается в 15–20% [3], аналогичная ситуация наблюдается и за рубежом [4–6]. Одновременно в балансе нарастает доля ресурсов, характеризующихся пониженной категорией изученности (преимущественно С2), а также запасов, отнесенных к категории «труднодрагируемых» ввиду сложных горно-геологических условий, таких как валунистость, глинистость и льдистость пород. Также растет доля техногенных запасов [7–9], обладающих своими специфическими условиями отработки [10; 11].

Помимо этого, увеличивается доля россыпей с невыдержанными поперечными размерами (ширина, глубина, мощность песков), освоение которых крупными драгами нецелесообразно из-за недостаточного количества запасов, а использование средних и малых драг ограничено их рабочими характеристиками.

Анализ параметров вовлекаемых в разработку россыпей в Восточной Сибири показал, что за последние 20 лет их средняя ширина уменьшилась почти в 2 раза [12], при этом существенно возросло количество запасов, представленных отдельными блоками (прерывистая россыпь), а также увеличилась степень изменчивости основных геометрических размеров продуктивного пласта и торфов (в т.ч. глубина залегания, мощности торфов и песков, ширина). В связи с этим исходя из общепринятых методов проверки соответствия конструктивных размеров драг параметрам россыпи [13] для разных участков россыпи следует принимать разные по типоразмеру драги или же более мощные из них, что сдерживает использование дражного способа разработки.

Ввиду того что перспективы открытия крупных россыпных месторождений малы, а из-за практически полного отсутствия драгостроения в России – строительство уникальных драг в ближайшие годы не предвидится, освоение уже поставленных на баланс запасов может производиться либо существующими драгами, либо новыми драгами серийного производства. Данный факт предопределяет необходимость разработки технических решений по вовлечению в эксплуатацию россыпей с непостоянными горнотехническими параметрами (как по мощности, так и по ширине) небольшими драгами серийного производства.

Результаты

Одним из известных способов подготовки мощных продуктивных пластов к драгированию серийными драгами является перевалка верхней части песков (Vв) в траншею, пройденную вдоль дражного хода [14]. Работы по созданию траншеи, а также по перевалке в нее песков в объеме $V_в$ наиболее целесообразно проводить с использованием экскаватора-драглайна.

С целью установления области применения данного способа подготовки песков к драгированию были проведены изыскания с сопоставлением стоимости реализации этого технического решения с альтернативным, в качестве которого предусматривается отработка верхней части песков ($V_в$) экскаваторно-автомобильным комплексом с их перевозкой на участки россыпи, где мощность пласта меньше допустимой, либо намечен холостой ход драги [15].

К сравнению были приняты следующие технологические схемы:

Вариант 1. Вскрышные породы удаляются экскаватором-драглайном ЭШ 10.70 на борта россыпи, после чего осуществляется проходка траншеи вдоль дражного хода и размещение в ней верхней части продуктивных отложений, расположенных выше уровня черпания драги (рис. 1). Драгирование подготовленных запасов осуществляется драгой 250Д.

При работе по данному варианту при малых значениях $V_в$ (до 10% от объема песков $V_п$) их размещение предполагается осуществлять в пределах разноса бортов дражного разреза [15]. При увеличении $V_в$ и соответственно соотношения $\alpha = V_в / V_п$ предусматривается создание траншеи вдоль контура россыпи, причем на первоначальных эта-



Рис. 1
Технологическая схема отработки мощных продуктивных отложений с предварительной их подготовкой к драгированию экскаватором ЭШ 10.70

Fig. 1
A technological diagram for mining thick productive deposits with preliminary preparation for dredging using an ASH 10.70 excavator

пах траншея создается исходя из условия обеспечения наименьшей ширины по дну с целью снижения объемов вскрышных работ.

Вариант 2. Вскрышные работы осуществляются экскаватором-драглайном с размещением пород на бортах россыпи. Верхняя часть продуктивных отложений разрабатывается с использованием экскаватора типа механическая лопата с погрузкой их в автосамосвалы и транспортировкой на участки дражного хода с меньшей мощностью песков или на непродуктивные участки вдоль хода драги (холостого прохода) и временно размещаются на борту, откуда впоследствии перемещаются на подготовленный полигон (ход драги) с использованием бульдозера (рис. 2).



Рис. 2
Технологическая схема разработки мощных продуктивных отложений с перемещением верхней части песков автотранспортом на маломощный участок полигона

Fig. 2
A technological diagram for mining thick productive deposits with excavator-automobile transportation of a part of sands to a thin placer site

В качестве оборудования, задействованного при реализации данного варианта, принят экскаваторно-автомобильный комплекс, включающий карьерный экскаватор ЭКГ-5А и автосамосвалы БелАЗ 7540. Перевалка перевезенных песков на полигон драги производится бульдозером Shantui SD-16.

Необходимо отметить, что работа по второму варианту имеет ряд ограничений, связанных с размещением перевозимых песков. По второму варианту размещение песков предполагается производить на вскрытых участках россыпи на удалении 1 км от участка подготовки (при этом на практике значительная мощность песков может сохраняться и на более протяженных участках). Существенное опережение вскрышных работ нецелесообразно ввиду промерзания вскрытых песков в холодный период года, тогда как создание выработанного пространства для размещения песков на удаленных участках экскаваторно-автомобильным комплексом приведет к существенному повышению себестоимости данной технологии. Размещение песков на нерудных участках при разработке прерывистых россыпей также будет экономически необоснованным при значительной удаленности таких участков от дражного разреза, поэтому перевалку песков целесообразнее осуществлять в траншею вдоль дражного хода (вариант 1).

Как правило, запасы для дражного способа разработки имеют весьма невысокое содержание ценных компонентов, что связано с низкой себестоимостью добычи металла при данном способе разработки [16–18], в связи с чем проведение работ по пересчету запасов с переводом их в запасы для открытой раздельной разработки чаще всего неосуществимо. Поэтому вариант отработки верхней части песков с использованием промприборов не рассматривается.

В рамках выполнения исследования было отстроено более 200 технологических схем отработки для каждого из рассматриваемых вариантов: для 10 различных мощностей вскрышных пород $H_в$ (от 2 до 20 м с шагом в 2 м) было отстроено по 20 технологических схем с увеличением доли песков, расположенных выше уровня черпания драги α, от 0 до 100% с шагом в 5%.

По отстроенным технологическим схемам определялись объемы работ по удалению торфов, переэкскавации, перевалке (перевозке) песков, а также объем траншеи, для их размещения. Затем были установлены общие затраты по каждому из видов оборудования на основании удельных затрат на разработку 1 м^3 горной массы. Себестоимость работы оборудования принята по данным одного из предприятий Восточной Сибири. По результатам расчета были получены зависимости (рис. 3), по которым определялась область применения способа с предварительной подготовкой песков к выемке путем размещения верхней части продуктивных отложений в траншею, расположенную вдоль дражного хода.

Анализ полученных зависимостей и технологических схем показывает, что эффективность применения данного способа подготовки песков к драгированию в первую очередь определяется мощностью вскрышных пород $H_в$. Зависимость общей стоимости реализации технического решения от объема переэкскавации актуальна при $H_в$ < 10 м. Подготовка песков путем их перевалки в траншею, пройденную вдоль хода драги, становится нецелесообразной при коэффициенте переэкскавации $K_{пэ}$ более 0,7 и $H_в$ = 5 м, при $K_{пэ}$ > 0,4 и $H_в$ = 10 м и не зависит от $K_{пэ}$ при $H_в$ = 15 м, так как стоимость работ по удалению пустых пород, прирастающих на единицу ширины траншеи в последнем случае будет больше, чем затраты на перевозку песков автосамосвалами. При возрастании объема песков выше уровня черпания драги переэкскавация возникает из-за необходимости строительства траншеи большего размера (при доле песков выше уровня черпания драги $\alpha = V_в / V_п \geq 80\%$ объем траншеи соответствует первоначальной ширине дражного разреза) и, как следствие, большему объему работ по перевалке пустых пород. Это отчетливо видно при сравнении стоимости работ между вариантами подготовки для различных мощностей вскрыши (выше горизонтальной оси – положительная разница в стоимости подготовки между первым и вторым вариантами, ниже горизонтальной оси – отрицательная) (рис. 4).

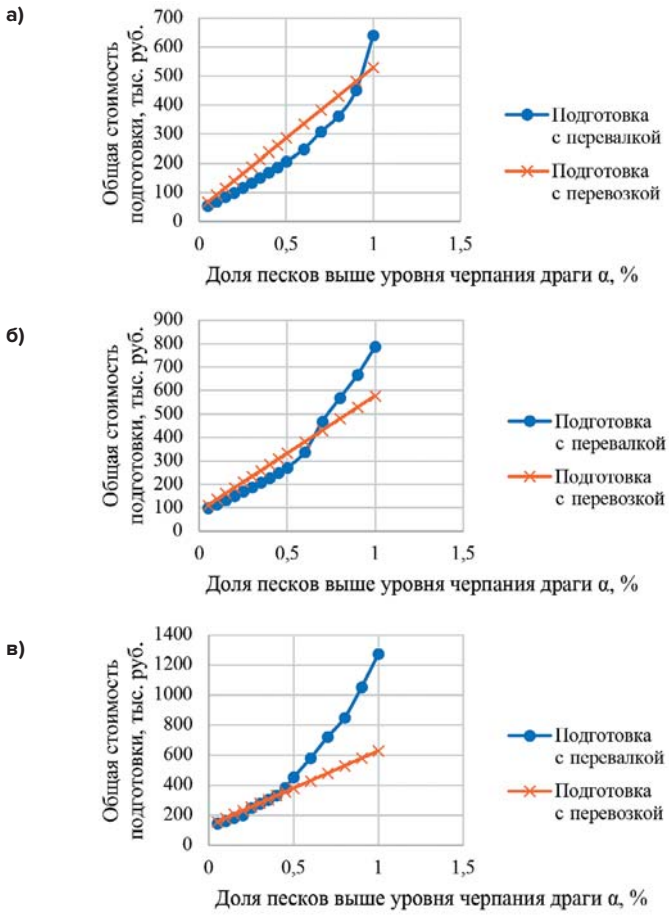


Рис. 3
Зависимость общей стоимости подготовки песков к драгированию от α при мощности вскрыши: а – $H_в$ = 5 м; б – $H_в$ = 10 м; в – $H_в$ = 15 м

Fig. 3
The dependence of the total cost of sand preparation for dredging on α value at the following overburden thickness: а – $H_о$ = 5 m; б – $H_о$ = 10 m; в – $H_о$ = 15 m

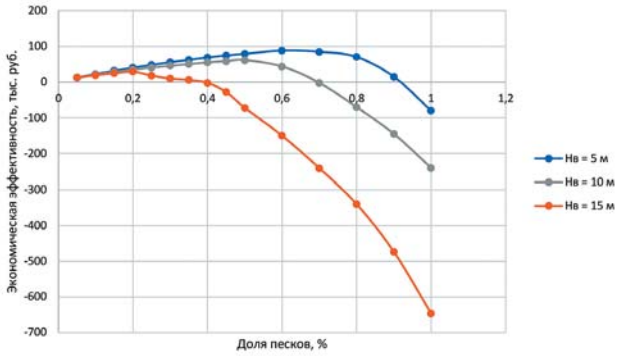


Рис. 4
Экономическая эффективность варианта 1 относительно варианта 2 в зависимости от доли песков выше уровня черпания драги (α) при мощности вскрыши 5, 10 и 15 м

Fig. 4
Economic efficiency of Option 1 relative to Option 2 depending on the share of sand above the dredge scooping level (α) with the overburden thicknesses of 5, 10, and 15 m

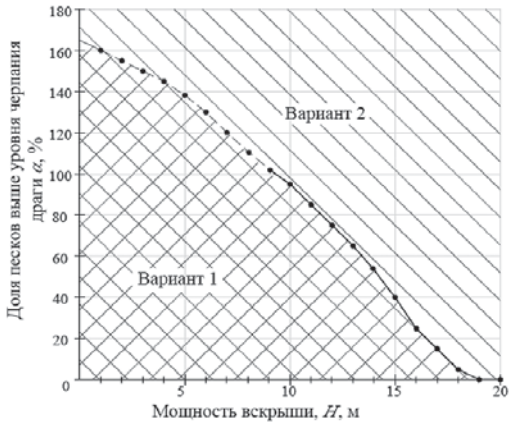


Рис. 5
Области экономически целесообразного применения способов подготовки песков по варианту 1 и варианту 2

Fig. 5
Areas of economically viable application of the sand preparation methods according to Option 1 and Option 2

Анализируя зависимости, приведенные на рис. 4, можно сделать вывод, что с увеличением мощности торфов и соотношения $V_в$ / $V_п$ разница в стоимости работ между первым и вторым вариантом существенно изменяется. При малой мощности торфов (до 10 м) эффективность варианта 1 в зависимости от увеличения α сохраняет положительную динамику до момента появления значительной переэкскавации, в то же время для мощности торфов более 10 м положительная динамика сохраняется лишь до момента, связанного с началом расширения траншеи. Последнее объясняется тем, что при больших значениях мощности торфов возрастает удельный объем работ по перевалке пустых пород на каждый метр расширения траншеи.

При мощности вскрыши 15 м и значениях α = $V_в$ / $V_п$ ≤ 20% размещение песков производится в траншее, развитие которой происходит в глубину. При α ≥ 20% начинается расширение траншеи с постепенным снижением целесообразности перевалки песков и, когда значение α достигает 40%, возникает переэкскавация, которая приводит к резкому сокращению эффективности работы по варианту 1.

Вместе с тем использование более мощного экскаватора-драглайна (например, ЭШ 15.90) позволит повысить экономическую целесообразность варианта 1 с увеличением значений α и мощности вскрыши. Однако применение ЭШ 15.90 не всегда оправдано при эксплуатации россыпей с мощностью торфов до 20 м.

По результатам расчетов была установлена экономически целесообразная область применения способов подготовки песков к выемке драгой 250Д по варианту 1 и варианту 2 для разных мощностей торфов и песков (рис. 5).

Анализ области применения рассмотренных способов подготовки песков показывает, что для условий работы драги 250Д в комплексе с экскаватором ЭШ 10.70 подготовку запасов к драгированию путем размещения верхней части продуктивных отложений в траншею, пройденную вдоль дражного контура, целесообразно осуществлять при мощности вскрыши до 18 м, при этом значение α должно быть не более 5%. Отработка пластов, более чем двукратно превышающих черпающие возможности драги по глубине, может быть экономически оправдана при мощности вскрыши до 9 м. Причем, как указывалось выше, данная граница установлена для экскаватора ЭШ 10.70. При использовании более крупных или мелких экскаваторов данная граница будет смещаться в сторону увеличения/уменьшения соответственно, из-за изменения технических возможностей вскрышного оборудования.

Выводы

1. Отработка россыпей с мощностью продуктивных отложений, превышающей выемочные возможности драг, может эффективно осуществляться с предварительной подготовкой продуктивных отложений путем их частичной перевалки в траншею, пройденную вдоль контура дражного хода.
2. Подготовка песков к выемке для драги 250 Д с использованием траншеи вдоль дражного хода, может быть обеспечена экскаватором ЭШ 10.70 при мощности продуктивного пласта, до 2,5 раз превышающего выемочные возможности драги, и мощности торфов не более 8–10 м.
3. Доля песков, расположенных выше уровня черпания драги, которые могут быть эффективно отработаны с использованием предварительной их подготовки экскаватором ЭШ 10.70, снижается по мере увеличения мощности торфов и при значениях последних 18–20 м составляет не более 5%.

Список литературы / References

1. Лаломов А.В., Владимирцева О.В., Бочнева А.А. Роль россыпных месторождений в золотодобывающей промышленности России. *Золото и технологии*. 2022;(4):36–46. Режим доступа: https://zolteh.ru/regions/rol_rossypnykh_mestorozhdeniy_v_zolotodobyvayushchey_promyshlennosti_rossii_po_materialam_doklada_na/ (дата обращения: 30.01.2026).
Lalomov A. V., Vladimirczeva O. V., Bochneva A. A. The role of alluvial deposits in the Russian gold mining industry. *Zoloto i Tekhnologii*. 2022;(4):36–46. (In Russ.) Available at: https://zolteh.ru/regions/rol_rossypnykh_mestorozhdeniy_v_zolotodobyvayushchey_promyshlennosti_rossii_po_materialam_doklada_na/ (accessed: 30.01.2026).
2. Дорош Е.А., Тальгамер Б.Л. Анализ минерально-сырьевой базы золотодобычи в Ленском золотоносном районе и обоснование направлений развития способов разработки россыпей. *Науки о Земле и недропользование*. 2022;45(3):222–234. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-222-234
Dorosh E.A., Talgamer B.L. Analysis of the mineral resource base of gold mining in the Lena gold-bearing district and substantiation of the development directions of placer mining methods. *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2022;45(3):222–234. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-222-234
3. Куторгин В.И., Сапрыкин А.А., Джобадзе В.А., Тарасов А.С. Перспективы резервного фонда минерально-сырьевой базы россыпного золота России. *Руды и металлы*. 2008;(4):9–15.
Kutorgin V.I., Saprykin A.A., Dzhobadze V.A., Tara-sov A.S. Future views for the placer gold reserve fund of the Russian mineral base. *Ores and Metals*. 2008;(4):9–15. (In Russ.)
4. Christie A.B. Introduction to the Special Issue on South Island detrital gold, from sources to mines. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*. 2025;68(2):241–244. https://doi.org/10.1080/00288306.2025.2475937
5. Lawrence S., Grove J., Davies P., Turnbull J., Rutherfurd I., Macklin M. Historical dredge mining as a significant anthropomorphic agent in river systems: A case study from south-eastern Australia. *The Holocene*. 2021;31(7):1158–1174. https://doi.org/10.1177/09596836211003272
6. Delgado J.P. The archaeology of the gold dredge: The final phase of placer mining. *Journal of Maritime Archaeology*. 2023;18(2):269–295. https://doi.org/10.1007/s11457-023-09363-6
7. Левченко Е.Н., Григорьева А.В. Типоморфные и технологические особенности попутного золота в комплексных россыпных месторождениях. *Обогащение руд*. 2021;(3):24–32. https://doi.org/10.17580/or.2021.03.05
Levchenko E.N., Grigoreva A.V. Typomorphic and processrelated features of associated gold in complex placer deposits. *Obogashchenie Rud*. 2021;(3):24–32. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/or.2021.03.05
8. Hrinchenko O., Yushin O. Potential of mining waste recycling in Ukraine. In: *Monitoring 2019: Conference – monitoring of geological processes and ecological condition of the environment, Kyiv, November 12–15, 2019*. European Association of Geoscientists & Engineers; 2019, pp. 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903172
9. Литвинцев В.С., Усиков В.И., Озарян Ю.А., Алексеев В.С. Метод дистанционного зондирования Земли в составе работ по оценке объемов техногенного сырья и экологической обстановки при эксплуатации россыпей. Г*еоресурсы*. 2021;23(4):116–123. https://doi.org/10.18599/grs.2021.4.13
Litvintsev V.S., Usikov V.I., Ozaryan Yu.A., Alekseev V.S. Remote sensing of the Earth as a part of research of assessing the volume of technogenic raw and the environmental situation during the exploitation of placers. *Georesursy*. 2021;23(4):116–123. (In Russ.) https://doi.org/10.18599/grs.2021.4.13
10. Мурзин Н.В., Тальгамер Б.Л. Анализ структуры техногенных россыпей и оценка опыта их разработки. Известия Томского политехнического университета. *Инжиниринг георесурсов*. 2023;334(2):147–153. https://doi.org/10.18799/24131830/2023/2/3829
Murzin N.V., Talgamer B.L. Analysis of the structure of technogenic placers and evaluation of their development experience. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. *Geo Assets Engineering*. 2023;334(2):147–153. (In Russ.) https://doi.org/10.18799/24131830/2023/2/3829
11. Литвинцев В.С. Проблемы рационального освоения техногенных россыпных месторождений благородных металлов в восточных районах России. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2015;(1):97–104. Режим доступа: https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=163246&ARTICLE_ID=163257 (дата обращения: 30.01.2026).
Litvintsev V.S. Rational development of noble metal placer mining waste in the east of Russia. *Journal of Mining Science*. 2015;51(1):118–123. https://doi.org/10.1134/S1062739115010159

12. Мешков И.А., Лицзюань П., Тальгамер Б.Л. Динамика горнотехнических параметров разрабатываемых россыпей. В кн.: *Перспективы развития горно-металлургической отрасли (Игошинские чтения): материалы Всерос. науч.-практ. конф., г. Иркутск, 26 ноября 2021 г.* Иркутск: Изд-во ИрНИТУ; 2022. Т. 2. С. 27–33.

13. Лешков В.Г. *Разработка россыпных месторождений*. М.: Горная книга; 2007. 906 с.

14. Гуричев А.В., В Кудряшев.А., Тальгамер Б.Л. Способ разработки россыпных месторождений. Патент СССР, SU1802578A1. Опубл. 27.03.1996. Режим доступа: https://patents.google.com/patent/SU1802578A1/ru (дата обращения: 30.01.2026).

15. Тальгамер Б.Л. Способ дражной разработки россыпных месторождений. Патент РФ, RU2629187C1. Опубл. 25.08.2017. Режим доступа: https://patents.google.com/patent/RU2629187C1/ru (дата обращения: 30.01.2026).

16. Talgamer B.L., Dudinskiy F.V., Murzin N.V. Assessment of conditions and experience of technogenic placer dredging. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Scienc*e. 2020;408:12065. https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012065

17. Мирзеханов Г.С., Мирзеханова З.Г. Прогнозная оценка ресурсного потенциала гале-эфельных отвалов россыпных месторождений золота Дальнего Востока России. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2020;(2):111–120. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20200213
Mirzekhanov G.S., Mirzekhanova Z.G. Forward appraisal of potential gold content of dredge and sluice tailings dumps at placers in Russia's Far East. *Journal of Mining Science*. 2020;56(2):259–267. https://doi.org/10.1134/S1062739120026733

18. Helmons R., de Wit L., de Stigter H., Spearman J. Dispersion of benthic plumes in deep-sea mining: What lessons can be learned from dredging? *Frontiers in Earth Science*. 2022;10:868701. https://doi.org/10.3389/feart.2022.868701

Информация об авторах
Мурзин Николай Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-6833-7860; e-mail: murzinnv@istu.edu
Тальгамер Борис Леонидович – доктор технических наук, профессор, кафедра разработки месторождений полезных ископаемых, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-1201-2693
Мешков Иван Анатольевич – аспирант кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация; https://orcid.org/0009-0006-5298-7929

Информация о статье
Поступила в редакцию: 23.05.2026
Поступила после рецензирования: 22.06.2026
Принята к публикации: 08.07.2026

Information about the authors
Nikolay V. Murzin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Mineral Deposits Development, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-6833-7860; e-mail: murzinnv@istu.edu
Boris L. Talgamer – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Mineral Deposits Development, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-1201-2693
Ivan A. Meshkov – Postgraduate Student, Department of Mineral Deposits Development, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; https://orcid.org/0009-0006-5298-7929

Article info
Received: 23.05.2026
Revised: 22.06.2026
Accepted: 08.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-229-234

Применение технологии машинного зрения для определения кинематики мелющих тел в помольной камере вибрационной мельницы

Ю.В. Дмитрак, А.А. Кравцов ✉
Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация
✉ havok.08@mail.ru

Резюме: В статье изложен принципиально новый подход к определению кинематических параметров отдельных мелющих тел в помольной камере вибрационной мельницы, базирующийся на применении алгоритмов машинного зрения. Для определения кинематических параметров была обучена модель YOLO версии *23*. Эта модель позволяет осуществлять слежение за объектом в видеопотоке: идентифицировать объект в одном кадре и определить его перемещения между кадрами. Для определения объектов в кадре была сформирована сверточная нейронная сеть, настроенная на детекцию объектов. В качестве объектов (мелющих тел) были использованы шары. Обучение проводилось на размеченном вручную наборе кадров видео работы вибрационной мельницы с четырьмя шарами-маркерами в загрузке. Всего было размечено 108 кадров, 90 из которых составили обучающий набор, 18 – валидационный набор. Разметка проводилась в программном обеспечении Label Studio. С помощью модели осуществлен автоматический сбор данных о траектории шаров, представлена визуализация траекторий. Получена зависимость средней кинетической энергии объектов от коэффициента заполнения помольной камеры вибромельницы. Установлено, что оптимальный коэффициент заполнения не зависит от наличия сердечника и находится в пределах 0,8–0,9. Результаты проведенных экспериментов позволяют определить направления дальнейших исследований авторов по изучению энергоёмкости процесса измельчения.

Ключевые слова: машинное зрение, схема контроля, кинематические параметры, искусственный интеллект, сверточная нейронная сеть, визуализация траектории объекта, кинетическая энергия, интенсивность соударений

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда №25-67-00009, https://rscf.ru/project/25-67-00009/

Для цитирования: Дмитрак Ю.В., Кравцов А.А. Применение технологии машинного зрения для определения кинематики мелющих тел в помольной камере вибрационной мельницы. *Горная промышленность.* 2026;(5):229–234. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-229-234

Application of machine vision to analyze grinding media kinematics in grinding chambers of vibratory mills

Yu.V. Dmitrak, A.A. Kravtsov ✉
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
✉ havok.08@mail.ru

Abstract: A fundamentally novel approach to determining the kinematic parameters of individual grinding bodies in the grinding chamber of a vibratory mill is presented based on application of machine vision algorithms. The YOLO model, version *23*, was trained to determine the kinematic parameters of the balls in the vibratory mill grinding chamber. The model is able to track objects within a video stream, facilitating both object identification in a single frame and determination of the inter-frame displacements. A convolutional neural network, configured for object detection, was developed to identify objects within the frame. Balls were employed as the target objects (grinding bodies). Training was conducted on a manually annotated dataset comprising video frames captured during the operation of a vibratory mill loaded with four marker balls. A total of 108 frames were annotated, of which 90 constituted the training set and 18 served as the validation set. Annotation was performed using the Label Studio software. Automatic data acquisition on the ball paths was performed using the trained model, and visualization of the trajectories was provided. A dependencies of the average kinetic energy of the balls on the fill factor of the vibratory mill

grinding chamber were obtained. It was established that the optimal fill factor is not dependent of the presence of the core and lies within the range of 0.8–0.9. The results of the conducted experiments provide a basis for determining future research directions aimed at investigating the energy intensity of the grinding process.

Keywords: machine vision, control scheme, kinematic parameters, artificial intelligence, convolutional neural network, object trajectory visualization, kinetic energy, collision intensity
Acknowledgements: The study was financially supported by Grant No. 25-67-00009 of the Russian Science Foundation, https://rscf.ru/project/25-67-00009/
For citation: Dmitrak Yu.V., Kravtsov A.A. Application of machine vision to analyze grinding media kinematics in grinding chambers of vibratory mills. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):229–234. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-229-234

Введение

Для верификации теоретических положений, ранее выдвинутых в рамках аналитического исследования процессов, протекающих в рабочей камере вибрационной мельницы, необходимо создание лабораторной установки, которая, во-первых, соответствует конструктивным признакам промышленного агрегата данного типа, а во-вторых, обеспечивает возможность широкого регулирования его конструктивных и кинематических параметров. Такая гибкость позволит провести комплексное экспериментальное изучение характера движения мелющей среды [1–4].

В то же время только детальное описание кинематики отдельных мелющих тел и их взаимного влияния на формирование макроскопической картины динамики всей мелющей загрузки позволяет корректно интерпретировать динамические явления, происходящие в рабочем пространстве мельницы. Для детального анализа движения отдельных мелющих тел (объектов) целесообразно применение инструментов машинного зрения, позволяющих в автоматизированном режиме собрать большой объем данных о положении объектов, их скоростях и траекториях [5–9].

Материалы и методы

В представленном исследовании в качестве объектов (мелющих тел) в помольной камере вибрационной мельницы были использованы шары.

Для слежения за объектом в видеопотоке при помощи машинного зрения необходимо решить две задачи: задачу определения объекта в одном кадре и задачу определения его перемещения между кадрами. Для определения объектов в кадре, в данном случае шаров в барабане мельницы, была выбрана модель машинного зрения YOLO версии 23. YOLO (You Only Look Once) – это семейство алгоритмов для решения задачи обнаружения объектов на изображениях в реальном времени. Первая версия, YOLOv1, предложенная Джозефом Редмоном и его коллегами в 2015 г., совершила революцию в этой области, кардинально изменив подход к проблеме. В отличие от предшествующих методов (таких как R-CNN и его вариации), которые использовали двухэтапную архитектуру (сначала выделение регионов-кандидатов, затем их классификация), YOLO формулирует задачу обнаружения как единую задачу регрессии. Алгоритм YOLO преобразует входное изображение в тензор, содержащий информацию о координатах рамок и вероятностях классов, причем весь процесс происходит за один проход сети. Входное изображение делится на сетку размером S × S. В оригинальной статье S = 7. Таким образом, создается сетка 7 × 7 = 49 ячеек.

Каждая ячейка сетки отвечает за обнаружение объекта, если центр этого объекта попадает внутрь данной ячейки, и предсказывает фиксированное количество ограничивающих рамок B и один вектор вероятностей классов.

Каждая ограничивающая рамка описывается пятью значениями: нормализованными координатами центра рамки x и y, нормализованными шириной и высотой рамки *w* и *h*, а также оценкой достоверности, вычисляемой по формуле:

$$confidence = \Pr(Object) \times IoU_{pred}^{truth}, \quad (1)$$

где *confidence* – оценка достоверности; Pr(*Object*) – критерий объекта, равный 1, если центр объекта находится в ячейке, и 0 в противном случае; *IoU* – мера Жаккара между предсказанной и реальной рамками объекта. Вектор вероятности классов C имеет вид:

$$C = [P_1, P_2 \dots P_n], \quad (2)$$

где P_i – вероятность того, что объект относится к классу *i*; *n* – общее количество классов [10; 11].

Для получения сверточной нейронной сети, настроенной на детекцию определенных объектов, необходимо провести процесс обучения нейронной сети, заключающийся в итеративном решении задачи оптимизации сети, критериями которой являются точность и полнота определения объектов.

Результаты и их обсуждение

Для оценки результатов и подстройки весов модели используется функция потерь:

$$\begin{aligned} Loss = {} & \lambda_{coord} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^{B} l_{ij}^{obj} \left[\left(x_i - \hat{x}_i \right)^2 + \left(y_i - \hat{y}_i \right)^2 \right] \\ & + \lambda_{coord} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^{B} l_{ij}^{obj} \left[\left(\sqrt{w_i} - \sqrt{\hat{w}_i} \right)^2 + \left(\sqrt{h_i} - \sqrt{\hat{h}_i} \right)^2 \right] + \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^{B} l_{ij}^{obj} \left(C_i + \hat{C}_i \right)^2, \\ & + \lambda_{noobj} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^{B} l_{ij}^{noobj} \left(C_i + \hat{C}_i \right)^2 + \sum_{i=0}^{S^2} l_i^{obj} \sum_{c} \left(p_i(c) - \hat{p}_i(c) \right)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

где l_{ij}^{obj} – индикатор, равный 1, если в ячейке *i* находится объект, и рамка j отвечает за классификацию этого объекта, иначе 0; l_{ij}^{noobj} – индикатор, равный 1, если в ячейке

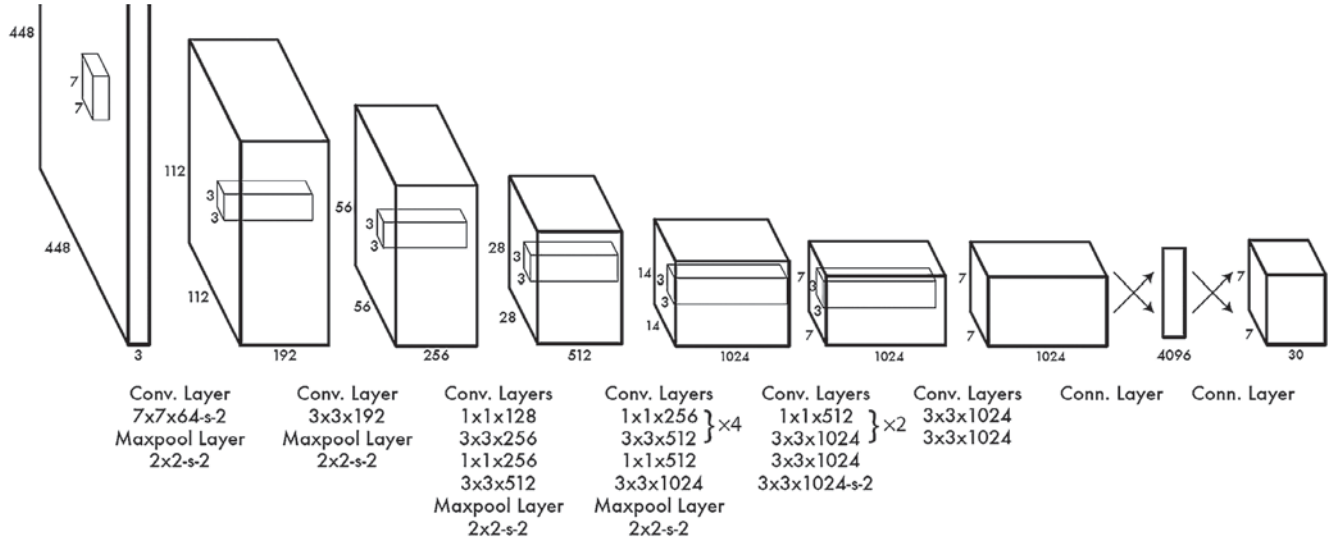


Рис. 1
Архитектура сверточной нейронной сети, используемой в YOLO

Fig. 1
Architecture of the YOLO convolutional neural network

i нет объекта, иначе 0; λ_{coord} и λ_{noobj} – коэффициенты ошибок локализации и отсутствия объекта соответственно. При ошибке локализации центра рамки x, y функция штрафует предсказание с коэффициентом λ_{coord}, но только для рамок, ответственных за объект. Этот же коэффициент отвечает за ошибку локализации ширины и высоты рамки *w* и *h*, при этом в функции потерь используется квадратный корень этих величин ввиду того, что разница в размерах больших и малых объектов имеет разное значение.

Для вычисления тензора, содержащего рамки и вероятности классов, используется сверточная нейронная сеть. Ее архитектура представлена на рис. 1 [12; 13].

Для обучения модели были составлены обучающий и валидационный наборы данных путем разметки кадров видео работы вибрационной мельницы с четырьмя шарами-маркерами в загрузке. Для разметки использовалось программное обеспечение Label Studio. Процесс заключается в ручной обводке искомых шаров рамками на кадрах, которые впоследствии будут использованы для обучения модели. Всего было размечено 108 кадров, 90 из которых составили обучающий набор, 18 – валидационный. Снимок процесса разметки приведен на рис. 2. После обучения модель была применена для отслеживания траектории шара, результат визуализации траектории представлен на рис. 3.

Для экспериментальной проверки полученных заключений использовался полноразмерный образец вибрационной мельницы с программно-управляемой частотой вибраций и возможностью установки прозрачного торца для наблюдения за траекторией мелющей загрузки. Для автоматизированной регистрации траектории шаров использовались шары-маркеры, видеокамера с повышенной частотой съемки кадров и компьютер, отслеживающий положение шаров-маркеров в видеопотоке камеры с помощью обученной ранее модели машинного зрения. Общий вид экспериментального стенда на базе вибрационной мельницы представлен на рис. 4, принципиальная схема вибрационной мельницы, являющейся основой экспериментального стенда, приведена на рис. 5, характеристики мельницы приведены в табл. 1 [14].

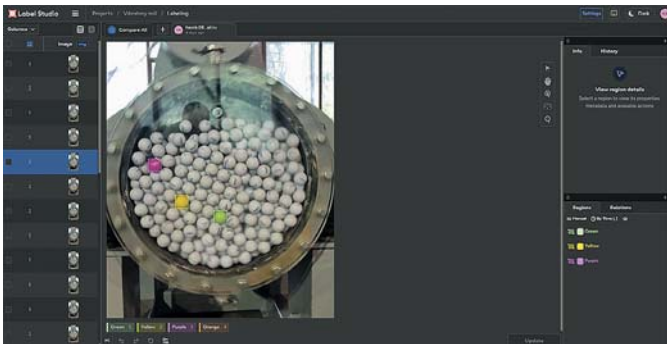


Рис. 2
Процесс разметки кадров работы мельницы в программном обеспечении Label Studio

Fig. 2
The process of labeling video frames of an operating mill in the Label Studio software

а) **б)**



Рис. 3
Визуализация траектории шара, полученная средствами машинного зрения:
а – опыт без сердечника,
б – опыт с сердечником 300 мм

Fig. 3
Ball path visualization obtained with the CV:
a – no core,
б – with the core of 300 mm



Рис. 4
Общий вид экспериментального стенда на базе вибрационной мельницы

Fig. 4
A general view of the vibratory mill test bench

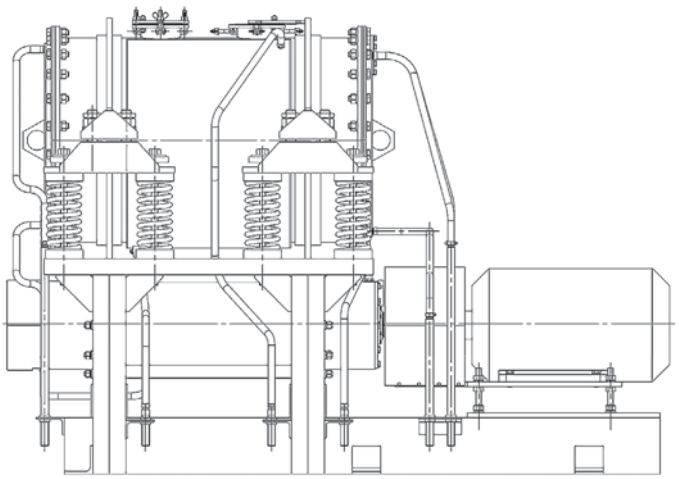


Рис. 5
Принципиальная схема вибрационной мельницы – основы экспериментального стенда

Fig. 5
Schematics of the vibratory mill which was used as the basis of the test bench

Таблица 1
Характеристики экспериментального стенда

Table 1
Technical specifications of the test bench

Параметр	**Значение**
Способ помола	Сухой
Материал исполнения рабочей камеры	Ст3
Внешний диаметр рабочей камеры, не более, мм	850
Длина рабочей камеры с каждой стороны стенда, не более, мм	200
Диаметры шаров, мм	10; 15; 20; 25; 30
Режим работы	Периодический
Способ загрузки и выгрузки	Через лючки в верхней и нижней части камеры
Диаметр стекла для наблюдения за процессом размола, не более, мм	800
Размещение оборудования	В условиях действующего цеха
Температура окружающего воздуха, °С	+15 – +30
Среднемесячная относительная влажность воздуха, %	30–70
Частота колебаний камеры, Гц	5–30
Амплитуда колебаний, мм	2–9
Возможность регулирования амплитуды колебаний	Предусмотрено
Охлаждение подшипников	Водяное
Тип дебаланса	Выносной
Количество пружин, не менее, шт.	8
Пульт управления	Предусмотрено
Исполнение электродвигателя	Общепромышленное
Установленная мощность, не более, кВт	18
Синхронная частота вращения вала электродвигателя, не более, об/мин	1000
Возможность регулировки частоты оборотов электродвигателя	Предусмотрено
Подключение к сети электропитания	380 В, 50 Гц
Габариты вибростенда(Д×Ш×В), не более, мм	1800x1100x1700

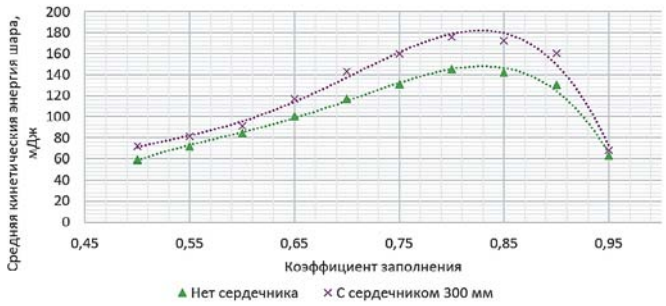


Рис. 4
Общий вид экспериментального стенда на базе вибрационной мельницы

Fig. 4
A general view of the vibratory mill test bench

Далее было проверено предположение о том, что наличие сердечника не влияет на оптимальный коэффициент заполнения помольной камеры, находящийся в пределах 0,8–0,9. Для этого все значения всех факторов, кроме коэффициента заполнения и отношения диаметра сердечника к диаметру камеры, были установлены на основном уровне. Были проведены 2 серии экспериментов – без сердечника и с сердечником диаметром 300 мм, что соответствует dc/D = 0,38. Коэффициент заполнения изменялся от 0,5 до 0,9 с шагом 0,1 и с шагом 0,05 от 0,9 до 0,95. Графики полученной средней кинетической энергии шара представлены на рис. 6.

Заключение

В статье изложен принципиально новый подход к определению кинематических параметров отдельных мелющих тел в помольной камере вибрационной мельницы, базирующийся на применении модели машинного зрения YOLO версии 23. Эта модель позволяет осуществлять слежение за объектом в видеопотоке и решать одновременно две задачи: идентификацию объекта в одном кадре и определение его перемещения между кадрами. Для определения объектов в кадре, в данном случае шаров в помольной камере вибромельницы, была сформирована сверточная нейронная сеть, настроенная на детекцию определенных объектов (в данном случае шаров в помольной камере вибромельницы), проведено обучение нейронной сети, заключающееся в итеративном решении задачи оптимизации сети, критериями которой являются точность и полнота определения объектов. Это позволило авторам исследований впервые получить истинные значения скоростей и траекторий отдельных шаров в помольной камере вибромельницы, что, в свою очередь, определило направления дальнейших исследований по определению энергоёмкости процесса измельчения.

Список литературы / References

1. Tomach P. The influence of the grinding media diameter on grinding efficiency in a vibratory ball mill. *Materials.* 2024;17(12):2924. https://doi.org/10.3390/ma17122924

2. Sidor J. A mechanical layered model of a vibratory mill. *Mechanics and Control.* 2010;29(3):138–148. Available at: https://journals.bg.agh.edu.pl/MECHANICS-CTRL/2010-03/mech07.pdf (accessed: 03.04.2026).

3. Сергеев В.В., Музаев И.Д., Дмитрак Ю.В., Герасименко Т.Е. Математическое моделирование колебательных процессов в вибромельнице нового типа. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2021;(8):114–128. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_8_0_114
Sergeev V.V., Muzaev I.D., Dmitrak Ju.V., Gerasimenko T.E. Mathematical modeling of oscillations in novel-type vibration mills. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2021;(8):114–128. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_8_0_114

4. Матмуродов Ф.М., Расулов Н.Ф., Нематова С.Х. Динамическое моделирование функционирования четырех опорных вибрационных мельниц. *Universum: технические науки.* 2025;(1-2):47–51. https://doi.org/10.32743/UniTech.2025.130.1.19212
Matmurodov F., Rasulov N., Nematova N. Dynamic simulation of the operation of four support vibrators mills. *Universum: Technical Sciences.* 2025;(1-2):47–51. (In Russ.) https://doi.org/10.32743/UniTech.2025.130.1.19212

5. Пыкавая О.А., Боровский Д.Н. Влияние мелющей загрузки на эффективность помола в вибрационной мельнице. В кн.: *Нефтегазохимия – 2024: материалы 7-го Междуна. науч.-техн. форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке, г. Минск, 13–15 ноября 2024 г.* Минск: БГТУ; 2024. С. 229–233. Режим доступа: https://elib.belstu.by/handle/123456789/68326 (дата обращения: 29.03.2026).

6. Пыкавая О.А., Боровский Д.Н. Взаимосвязь технологических параметров вибрационной мельницы с геометрическими и механическими характеристиками загрузки помольной камеры. В кн.: *Нефтегазохимия – 2023: материалы 6-го Междунар. науч.-техн. форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке, г. Минск, 1–3 ноября 2023 г.* Минск: БГТУ; 2023. С. 203–207. Режим доступа: https://elib.belstu.by/handle/123456789/60584 (дата обращения: 29.03.2026).

7. Дмитрак Ю.В., Кравцов А.А., Адамова Л.С., Кутуев Р.Р., Цыганов А.Е. Научный анализ математических моделей движения мелющей загрузки в помольных камерах мельниц различных типов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(9-1):55–74. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2025/9-1/9-1_2025_55-74.pdf (дата обращения: 29.03.2026).
Dmitrak Iu.V., Kravtsov A.A., Adamova L.S., Kutuev R.R., Tsiganov A.E. Scientific analysis of mathematical models of charge motion in grinding chambers of varioustype mills. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(9-1):55–74. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2025/9-1/9-1_2025_55-74.pdf (accessed: 29.03.2026).

8. Рысиков М.С., Богданов Н.Э. Исследование характера движения вибрационной мельницы в системе EDEM при помощи метода дискретного элемента. В кн.: *Молодежь и научно-технический прогресс: сб. докл. 12-й междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Губкин, 18 апреля 2019 г.* Губкин; Старый Оскол: ООО «Ассистент плюс»; 2019. Т. 1. С. 115––119.

9. Калуцкий Д.О. Анализ конструкции вибрационных мельниц тонкого помола. В кн.: *Образование. Наука. Производство: материалы 10-й Междунар. молодежного форума с междунар. участием, г. Белгород, 1–15 октября 2018 г.* Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова; 2018. С. 1227–1232.

10. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You only look once: Unified, real-time object detection. In: *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, June 27–30, 2016*. IEEE; 2016, pp. 779–788. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91

11. Lin X., Peng J., Gan Z., Zhu J., Liu J. YOLO-master: MOE-accelerated with specialized transformers for enhanced real-time detection. In: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2026, Colorado, June 3–7, 2026,* pp. 18440–18449. Available at: https://arxiv.org/html/2512.23273 (accessed: 29.03.2026).

12. Jiang P., Ergu D., Liu F., Cai Y., Ma B. A review of yolo algorithm developments. *Procedia Computer Science*. 2022;199:1066–1073. https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.135

13. Terven J., Córdova-Esparza D.-M., Romero-González J.-A. A comprehensive review of YOLO architectures in computer vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. *Machine Learning and Knowledge Extraction*. 2023;5(4):1680-1716. https://doi.org/10.3390/make5040083

14. Грачева Н.Ю. Разработка лабораторного стенда на базе вибрационной мельницы для экспериментального определения ее рабочих параметров. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(5):202–207.
Gracheva N.Yu. Development of the laboratory stand on the basis of vibratory mill for the experimental determination of its operating parameters. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(5):202–207. (In Russ.)

Информация об авторах
Дмитрак Юрий Витальевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий отделом моделирования и управления горнотехническими системами, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-1278-4845; e-mail: dmitrak@yandex.ru
Кравцов Алексей Александрович – младший научный сотрудник отдела моделирования и управления горнотехническими системами, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: havok.08@mail.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 30.05.2026
Поступила после рецензирования: 06.07.2026
Принята к публикации: 09.07.2026

Information about the authors
Yury V. Dmitrak – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Research Associate, Head of Department of Modelling and Management of Mining Systems, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-1278-4845; e-mail: dmitrak@yandex.ru
Alexey A. Kravtsov – Junior Researcher, Department of Modelling and Management of Mining Systems, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: havok.08@mail.ru

Article info
Received: 30.05.2026
Revised: 06.07.2026
Accepted: 09.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-235-243

Сокращение числа аварийных отказов узлов карьерных автосамосвалов на основании корректировки регламентной периодичности проведения их ремонтных работ

Е.Ю. Ботян[1]✉, И.А. Королев[1], А.Э. Уразбахтина[1], А.Е. Пушкарев[2]
[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ botyan_eyu@pers.spmi.ru

Резюме: В настоящий момент карьерные автосамосвалы являются наиболее широко представленным видом транспортных машин при проведении горных работ открытым способом. Для проведения мероприятий по поддержанию установленного уровня надежности компаниями-производителями горной техники были разработаны соответствующие регламенты, которые не отражают условий эксплуатации техники на конкретном предприятии. Соблюдение регламентов часто приводит к недостаточной готовности ремонтных служб предприятий к возникшему отказу. Цель исследования – установить рациональную периодичность проведения ремонтных работ узлов карьерных автосамосвалов для сокращения числа их аварийных отказов. Авторами была собрана и проанализирована статистика отказов узлов и агрегатов карьерных автосамосвалов на двух предприятиях по добыче железной руды открытым способом в 2020–2023 гг. Наименьшую надежность показали элементы силовой установки, подвесок, колес и рамы. На основе анализа применяемых предприятиями стратегий по поддержанию установленного уровня надежности машин была определена целевая функция рационального межремонтного интервала для рассматриваемых узлов. После преобразования целевой функции были получены два уравнения, которые позволяют найти рациональную периодичность проведения плановых ремонтных работ. Для апробации полученных выражений было произведено сопоставление ожидаемого числа аварийных отказов с фактически зарегистрированными в 2023 г. Использование рассчитанной периодичности регламентных ремонтных работ показывает сокращение числа аварийных отказов в год: для подвесок на 73% (с 48 до 10), для колес на 76% (с 38 до 9), а для элементов силовой установки на 62 % (с 34 до 13).

Ключевые слова: карьерный автосамосвал, причина простоя машины, аварийный отказ узла, плановые ремонтные работы, горное предприятие

Для цитирования: Ботян Е.Ю., Королев И.А., Уразбахтина А.Э., Пушкарев А.Е. Сокращение числа аварийных отказов узлов карьерных автосамосвалов на основании корректировки регламентной периодичности проведения их ремонтных работ. *Горная промышленность.* 2026;(5):235–243. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-235-243

Reducing the number of component failures in open pit dump trucks based on adjustments to the frequency of scheduled maintenance

E.Y. Botyan[1]✉, I.A. Korolyov[1], A.E. Urazbakhtina[1], A.E. Pushkarev[2]
[1] Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
[2] Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ botyan_eyu@pers.spmi.ru

Abstract: Currently, dump trucks are the most widely used type of transport vehicle in open-pit mining operations. To maintain the established level of technical availability, mining equipment manufacturers have developed relevant regulations that fail to reflect the specific operating conditions of each particular company. However, the use of these regulations often leads to insufficient readiness of the company's maintenance services for potential failures. To address this issue, the authors collected and analyzed statistics on failures of components and assemblies of dump trucks from two open-pit iron ore mining operations for the period of 2020–2023. The analysis revealed that the power unit, suspension, wheels, and frame were the least reliable components. Based on analyzing the strategies employed by the companies to maintain the established level of machine technical

availability, we determined the target function for the optimal maintenance interval for the components considered. Upon transforming the target function according to the established laws of failure rate distribution based on the number of failures, we obtained two expressions that allow us to find the optimal maintenance frequency for the components under consideration. When testing these expressions, we compared the expected number of failures per year with the actual number of failures, which showed a significant reduction. The use of the calculated maintenance intervals resulted in a reduction in the number of emergency failures per year, e.g. by 73% (from 48 to 10) for the suspension; by 76% (from 38 to 9) for the wheels; and by 62% (from 34 to 13) for the power plant components.

Keywords: dump truck, cause of machine downtime, unexpected component failure, scheduled maintenance, mining operation
For citation: Botyan E.Y., Korolyov I.A., Urazbakhtina A.E., Pushkarev A.E. Reducing the number of component failures in open pit dump trucks based on adjustments to the frequency of scheduled maintenance. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):235–243. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-235-243

Введение

На горных предприятиях Российской Федерации, производящих разработку месторождений твердых полезных ископаемых открытым способом, основным видом транспорта служат большегрузные карьерные автосамосвалы [1; 2]. По разным оценкам, на их долю приходится в среднем 75% от всей перевезенной горной массы в стране, при этом на многих предприятиях они являются единственным видом транспорта [3; 4]. Несмотря на ряд преимуществ, обусловливающих столь широкое распространение рассматриваемых машин, карьерные автосамосвалы также обладают и существенными недостатками, среди которых одним из наиболее существенных является значительная стоимость перевозки 1 т горной массы [5; 6], вызванная высокой стоимостью самой машины и затратами на ее функционирование [7–9]. Среди последнего в наибольшей степени важным аспектом является организация проведения комплекса мероприятий по поддержанию и восстановлению работоспособного состояния их узлов и агрегатов – технического обслуживания и ремонта, направленного на максимизацию времени нахождения машины в работоспособном состоянии.

Для проведения соответствующих мероприятий компаниями-производителями горной техники были разработаны соответствующие регламенты, которые зачастую служат руководящими документами для ремонтно-механических служб предприятий. Однако подобные регламенты разрабатываются на основе усредненных условий эксплуатации и, следовательно, не учитывают специфики конкретного горного предприятия, что негативно сказывается на показателях надежности применяемого парка техники [10–12].

Во многих исследованиях отмечалось, что на предприятиях с осложненными горнотехническими условиями эксплуатации, обусловленных в первую очередь характеристиками технологических трасс транспортирования, значительное число отказов приходится на подвески, раму, колеса, элементы силовой установки: гидротрансформаторы для автосамосвалов с электромеханической трансмиссией и тяговые электроприводы для автосамосвалов с электромеханической трансмиссией [13; 14]. К тому же фактический срок их службы зачастую значительно меньше назначенного [15–17]. Среди рассматриваемых узлов наибольшее число аварийных отказов приходится на элементы подвески (в среднем 30–40% от общего числа), лидером же по суммарной длительности нахождения в неработоспособном состоянии машины вследствие отказа является силовая установка.

В существующих исследованиях отмечалось, что к факторам, приводящим к снижению показателей надежности указанных узлов, относят следующие: режимы работы самосвалов, срок службы машины, природно-климатические, дорожные и горнотехнические условия эксплуатации, а также качество сервиса [18–23]. К качеству сервиса относится обеспеченность необходимыми и достаточными для проведения соответствующих мероприятий: ремонтной базой (подготовленное место, наличие инструмента и т.п.), материальными ресурсами (запасные части, горюче-смазочные материалы и т.д.), квалифицированным персоналом и вспомогательными машинами (автокран, тягач и др.) [24; 25]. При этом на каждый из рассматриваемых факторов в значительной степени влияет недостаточная готовность ремонтно-механических служб предприятий к возникшему отказу, что вызвано использованием графика проведения регламентных ремонтных и обслуживающих работ, не учитывающего в достаточной степени условия эксплуатации конкретного предприятия, основанного на нерациональной периодичности проведения соответствующих мероприятий (чаще всего ими являются планово-предупредительные ремонты).

Отмеченное выше становится особенно острым в случае горных предприятий, расположенных на значительном удалении от крупных логистических и ремонтных центров, что особенно актуально для горно-обогатительных комбинатов России. Для них дополнительными осложняющими факторами являются невозможность поддержания значительного штата высококвалифицированных работников ремонтных служб, оперативного пополнения склада запасных частей, а также оснащения ремонтной базы всем спектром необходимого оборудования [26; 27].

Цель исследования – установить рациональную периодичность проведения ремонтных работ узлов карьерных автосамосвалов с целью сокращения числа их аварийных отказов.

Материалы и методы

Исследования проводились на двух горных предприятиях по добыче железной руды открытым способом – АО «Ковдорский ГОК» и ПАО «ЕВРАЗ Качканарский ГОК» – в 2020–2023 гг. В качестве объекта исследования были выбраны две модели карьерных автосамосвалов – БЕЛАЗ-75131 и БЕЛАЗ-75303.

На первом этапе были проанализированы выгрузки из систем диспетчеризации и информация из журналов ремонтно-механических служб, где фиксировались отказы узлов и агрегатов, значения наработки до отказа, а также

Таблица 1
Характеристика карьерных автосамосвалов и маршрутов транспортирования, участвующих в исследовании

Table 1
Characteristics of the open-pit dump trucks and transport routes included in the study

ГОК	Модель самосвала	Номер маршрута	Начальная точка маршрута	Конечная точка маршрута	Количество самосвалов
Качканарский	БЕЛАЗ-75303	1	гор. +710 м	Отвал гор. +530 м	2
		2	гор. +710 м	Перегрузочный пункт гор. +495 м	4
		3	гор. +605 м	Отвал гор. +530 м	2
		4	гор. +605 м	Перегрузочный пункт гор. +495 м	3
	БЕЛАЗ-75131	5	гор. +39 м	Перегрузочный пункт гор. +153 м	6
Ковдорский	БЕЛАЗ-75131	6	гор. +130 м	Разгрузочно-доставочный пункт гор. +304 м	2
		7	гор. –184 м		7
	БЕЛАЗ-75303	8	гор. –155 м		5
		9	гор. –184 м		2

причины и длительность простоев при проведении мероприятий по восстановлению работоспособного состояния.

Для дальнейших исследований были выбраны автосамосвалы, задействованные на маршрутах транспортирования горной массы, удовлетворяющие следующим условиям:

1. Постоянные маршруты транспортирования (за исключением подвигания фронта погрузочных и разгрузочных работ).

2. Незначительное варьирование физико-механических свойств перевозимой горной массы.

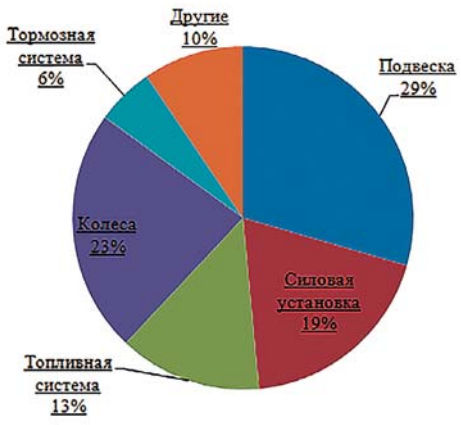
3. Управляются одними и теми же операторами в соответствии с неизменными паспортами ведения работ.

Конечная выборка для исследования составила 33 автосамосвала, которые задействованы на 9 маршрутах транспортирования (табл. 1). Выбранные машины осуществляли транспортирование как только полезного ископаемого, представленного магнетит-гематитовыми рудами (маршруты 2, 4 и 5), так и исключительно вскрышных пород (маршруты 1, 3), сложенных преимущественно штаффелитами. Для маршрутов 6–9 характерно перемещение как полезного ископаемого в виде гематитовых руд, так и вскрыши, состоящей преимущественного из карбонатфторапатитовых пород.

По данным журналов ремонтно-механических служб, выбранных для исследования автосамосвалов, было установлено, что подвески являются узлом с наибольшим потоком отказов, на долю которых приходится 30% от общего числа отказов (рис. 1, *а*), а среди их элементов неисправности шарнирного подшипника являются причиной возникновения 82% отказов. Несмотря на наибольшее число аварийных отказов суммарная длительность пребывания в неработоспособном состояния для этого узла составляет лишь 11% от общего числа. В то же время отказы элементов силовой установки, несмотря на их меньшее число, обусловливают до примерно 75% от суммарной продолжительности восстановительных работ (рис. 1, *б*), что согласуется с ранее проведенными исследованиями [28–30]. Для дальнейших исследований целесообразно выбрать три узла карьерных автосамосвалов, показавших наименьшую надежность: подвески, колеса, силовая установка.

Рассмотрим структуру операций, направленных на восстановление работоспособного состояния объекта на примере узла с наибольшим числом аварийных отказов – подвесок. Исходя из регламентов проведения технического обслуживания и ремонта, принятых предприятиями, нормативный срок службы подвески карьерных автосамосвалов принимается равным 40 000 км, или же примерно

а)



б)

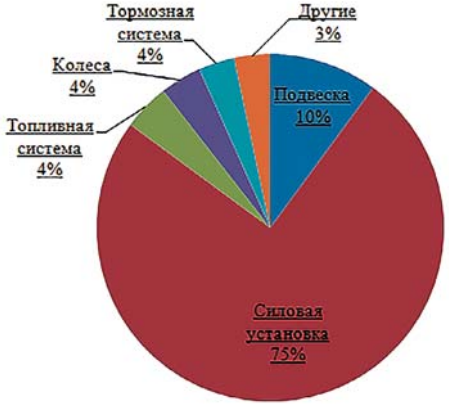


Рис. 1
Структура числа отказов (а) и суммарной длительности пребывания в неработоспособном состоянии вследствие отказа (б) узлов карьерных автосамосвалов, участвующих в исследовании

Fig. 1
A breakdown of the number of failures (a) and the total duration of downtime due to failure (б) of the components of the dump trucks in the study



Рис. 2
Сопоставление наработки до отказа рассматриваемых узлов с числом отказов и длительностью простоев вследствие их

Fig. 2
A comparison of the operating time before suspension failure with the number of failures and the duration of downtime due to these failures

2000 ч, а длительность планового ремонта – 10,2 ч (как сумма времени разборки, поиска неисправности, непосредственного ремонта и сборки). Согласно проанализированной статистике, средняя наработка до отказа рассматриваемого узла составляет 1760 ч. При этом длительность проведения аварийного ремонта (рис. 2, красная линия) значительно выше планового ввиду возникших простоев, обусловленных недостаточной готовностью ремонтных служб к возникшему отказу (рис. 2, синяя линия). Отмеченное особенно заметно на примере 25 отказов (количество отказов за диапазон наработки до отказа обозначено на рис. 2 зеленой линией), которые произошли в диапазоне от 80 до 90% от средней, т.е. значительно раньше нормативного срока службы узла.

Это говорит о том, что принятые предприятиями регламенты проведения технического обслуживания и ремонта карьерных автосамосвалов, основанные на рекомендациях соответствующих производителей горной техники, требуют корректировки периодичности проведения регламентных ремонтных работ с целью сокращения количества их аварийных отказов.

Для установления рациональной периодичности проведения ремонтных работ узлов и агрегатов техники следует предварительно выбрать модель профилактики карьерных автосамосвалов. В настоящее время на предприятиях горной отрасли в России относительно техники, применяемой для открытой добычи твердых полезных ископаемых, сформировались три модели профилактики для рассматриваемых машин [31–33]:

Проведение только аварийных ремонтов. Согласно этой модели ремонтно-механическими службами горного предприятия не производится никаких предварительных операций, направленных на поддержание установленного уровня надежности узлов и агрегатов автосамосвалов, то есть производятся исключительно реактивно, по факту возникшего отказа.

Проведение плановых ремонтов при внеплановых аварийных ремонтах без переноса времени проведения первых. Согласно этой модели ремонтно-механические службы горных предприятий для одних и тех же объектов проводят как ремонты по факту случившегося аварийного отказа, так и планово-предупредительные ремонты: если объект не отказал к назначенному моменту, то производится плановый ремонт, если же отказ произошел раньше, то производится аварийный ремонт. При этом после аварийного ремонта время проведения очередного планового ремонта не изменяется.

Проведение плановых ремонтов при внеплановых аварийных ремонтах с переносом времени проведения первых. При использовании этой модели после проведения аварийного ремонта ремонтно-механические службы предприятий очередной плановый ремонт переносят таким образом, чтобы следующий плановый ремонт был произведен через промежуток времени, равный наработке до аварийного отказа.

Несмотря на наибольшие количество и длительность простоев и, как следствие, экономические потери вследствие аварийного отказа первая модель получила наибольшее распространение ввиду наименьших материальных вложений, направленных на оснащение ремонтной базы, поддержание нужного штата персонала и т.д. В случае достаточного оснащения, обозначенного выше, перед горными предприятиями ставится вопрос выбора между второй и третьей моделью, выраженный в учете конкретных значений трудоемкости замены узлов, стоимости проведения планового и аварийного ремонтов, потерь от часа простоя машины и т.д. [27; 34]. При этом третья модель используется чаще для узлов со значительной стоимостью и сроком службы (рама, кузов и т.д.), к которым нельзя отнести подвески, колеса и силовую установку, но ввиду значительной разницы между фактическими и номинальными сроками службы рассматриваемых узлов для исследования нами принята третья модель.

Результаты и их обсуждение

Так как наработка до отказа любых объектов относится к категории непрерывных случайных величин, т.е. может принимать одно из множества своих значений в каждом конкретном случае, то для дальнейших действий следует установить закон распределения потока отказов рассматриваемых узлов карьерных автосамосвалов. Для элементов подвесок, колес и силовой установки машин, эксплуатируемых на обоих предприятиях, была произведена проверка согласно критерию согласия Пирсона для четырех теоретически описанных законов распределения (табл. 2).

Таким образом, на основе данных, представленных в табл. 2, можно утверждать, что распределение потока отказов колес и подвесок карьерных автосамосвалов, участвующих в исследовании, наиболее близко к нормальному, а элементов силовой установки – к логарифмически нормальному.

В рамках дальнейших действий приняты несколько допущений: время локализации возникшего отказа незначительно, во время проведения плановых и аварийных ремонтов машина находится в неработоспособном состоянии, в стоимость каждого из видов ремонта заложена стоимость необходимой для их проведения ремонтной базы. Следовательно, искомая рациональная периодичность проведения плановых ремонтных работ будет описываться следующей целевой функцией:

$$\frac{A_{ав}\Omega(T_{межс})+A_{пл}}{T_{межс}}=\frac{A_{ав}\Omega(T_{межс})+A_{пл}}{\int_0^{T_{межс}}P(t)dt}\to\min, \quad (1)$$

где $A_{ав}$ и $A_{пл}$ – стоимость проведения аварийного и планового ремонта, руб. [33–35]; $T_{межс}$ – рациональная пери-

Таблица 2
Сопоставление полученных распределений рассматриваемых узлов с теоретически описанными при помощи критерия согласия Пирсона

Table 2
A comparison of the obtained distributions for the considered components with the theoretically described ones using the Pearson's goodness-of-fit test

Закон распределения		Качканарский ГОК			Ковдорский ГОК		
		Силовая установка	Подвески	Колеса	Силовая установка	Подвески	Колеса
Нормальный	χ^2	8,32	4,76	2,72	7,98	3,51	3,02
	α	0,05	0,3	0,5	0,07	0,3	0,5
Логарифмически нормальный	χ^2	3,21	7,67	5,52	2,98	6,51	5,04
	α	0,34	0,1	0,2	0,31	0,1	0,2
Экспоненциальный	χ^2	2789,4	2584,7	2417,1	2321,1	2361,7	2258,1
	α	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Распределение Вейбулла	χ^2	2356,3	1741,1	2153,1	2572,4	1870,7	2218,7
	α	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

одичность проведения плановых ремонтных работ, ч; $\Omega(T_{межд})$ – математическое ожидание числа отказов за межремонтный интервал $T_{межд}$; $\int_0^{T_{межд}} P(t)dt$ – средняя наработка между отказами, ч.

Ввиду того что искомая периодичность проведения плановых ремонтных работ должна стремиться к значению наработки между отказами, становится возможным преобразовать знаменатель следующим образом:

$$\int_0^{T_{межд}} P(t)dt = \int_0^{T_{межд}} t \cdot f(t)dt + T_{межд} P(T_{межд}), \quad (2)$$

где $f(t)dt$ – плотность вероятности возникновения отказа машины; $P(T_{межд})$– требуемый уровень вероятности безотказной работы машины за межремонтный период.

Плотность вероятности возникновения отказа:

– для узлов с нормальным законом распределения числа отказов по их наработке:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{(T_{нi} - T_{н\,ср})^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

где $T_{н\,ср}$ и σ – среднеарифметическая и среднеквадратичная наработка между отказами подвески, ч;

– для узлов с логарифмически нормальным распределением:

$$f(t) = \frac{1}{T_{нi}\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{(\lg T_{нi} - \lg T_{н\,ср})^2}{2\sigma^2}}. \quad (4)$$

Подставив выражения (2) и (3) в выражение (1), получим, что искомая периодичность проведения регламентных ремонтных работ для подвесок и колес, распределение числа отказов которых по наработке принимается нормальным, определяется согласно следующему выражению:

$$T_{межд} = T_{н\,ср} - \sqrt{-2\sigma^2 \ln\left(\sqrt{2\pi}\sigma \frac{(\frac{A_{ав}}{A_{пл}} + 1)/(1 - \frac{A_{ав}}{A_{пл}}) - \Omega(T_{межд})}{T_{н\,ср}}\right)}. \quad (5)$$

Для элементов силовой установки, распределения потока отказов которых принимается логарифмически нормальным, после подстановки выражения (4) и (2) в выражение (1) получим:

$$T_{межд} = T_{н\,ср} + 2\sigma \ln \frac{T_{н\,ср}}{[(\frac{A_{ав}}{A_{пл}} + 1)/(1 - \frac{A_{ав}}{A_{пл}}) - \Omega(T_{межд})]\sigma^2\sqrt{2\pi}}. \quad (6)$$

С целью апробации предлагаемого решения по корректировке периодичности проведения регламентных ремонтных работ карьерных автосамосвалов была установлена вероятность возникновения аварийного отказа путем анализа фактически зарегистрированных за 2023 г. аварийных отказов выбранных автосамосвалов, функционирующих на двух предприятиях, использующих периодичность регламентных ремонтных работ рассматриваемых узлов равной регламентной. Полученные значения были сопоставлены с ожидаемым количеством отказов, полученным при использовании предлагаемой периодичности регламентных ремонтных работ при составлении графика проведения планово-предупредительных ремонтов (табл. 3).

Как следует из табл. 3, при использовании предлагаемой периодичности регламентных ремонтных работ обеспечивается сокращение числа аварийных отказов в год: для подвесок с 48 до 10 (на 73%), для колес – с 38 до 9 (на 76%), а для элементов силовой установки – с 34 до 13 (на 62 %).

Заключение

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Использование периодичности ремонтных работ узлов и агрегатов карьерных автосамосвалов, указанной в регламентах производителей горной техники, является нерациональным, так как приводит к внезапным и аварийным отказам, что увеличивает число и длительность простоев этих машин.

2. Для применяемой предприятиями модели профилактики узлов и агрегатов карьерных автосамосвалов была установлена целевая функция периодичности проведения плановых ремонтных работ для рассматриваемых узлов.

Таблица 3
Сопоставление фактически зарегистрированного числа аварийных отказов за 2023 г. с ожидаемым при использовании предлагаемой периодичности регламентных ремонтов

Table 3
A comparison of the actually registered number of emergency failures in 2023 with the expected number using the proposed frequency of preventive repairs

Узел	Номер маршрута	Периодичность регламентных ремонтных работ узла, ч		Число аварийных отказов, ед.	
		фактическая	предлагаемая	фактически зарегистрированное в 2023 г.	ожидаемое
Подвеска	1	1931	1923	3	1
	2	1909	1899	3	1
	3	1842	1825	5	2
	4	1833	1819	7	2
	5	1674	1658	8	2
	6	1763	1747	3	1
	7	1801	1788	11	3
	8	1624	1609	6	1
	9	1726	1705	2	0
Колеса	1	2157	2143	2	0
	2	2118	2099	5	2
	3	2052	2034	3	1
	4	2048	2027	4	1
	5	1984	1968	6	2
	6	2039	2024	2	0
	7	2075	2058	8	2
	8	1967	1951	6	1
	9	2019	1997	2	0
Силовая установка	1	2271	2256	3	1
	2	2256	2223	5	2
	3	2221	2204	5	2
	4	2211	2187	3	0
	5	2120	2098	4	1
	6	2152	2145	3	1
	7	2174	2156	8	3
	8	2096	2078	6	2
	9	2118	2101	2	1

Согласно известным распределениям числа отказов рассматриваемых узлов по наработке до их отказа была рассчитана рациональная периодичность проведения плановых ремонтных работ.

3. Построение графика регламентных ремонтных работ карьерных автосамосвалов с установленной периодичностью проведения операций по восстановлению работоспособности рассматриваемых узлов карьерных автосамосвалов позволяет сократить число внезапных отказов в год для подвесок с 48 до 10 (на 73%), для колес – с 38 до 9 (на 76%), а для элементов силовой установки – с 34 до 13 (на 62 %).

Вклад авторов
Е.Ю. Ботян – написание текста статьи, сбор данных.
И.А. Королев – анализ результатов исследования, ранжирование и поиск материалов по теме исследования, обработка данных.
А.Э. Уразбахтина – установление целевой функции и создание алгоритма расчета рациональной периодичности регламентных ремонтных работ узлов.
А.Е. Пушкарев – постановка цели и задач исследования, определение методов и материалов исследования.

Authors' contribution
Evgeny Yu. Botyan – writing the article and data collection.
Igor A. Korolyov – analyzing the research results, ranking and searching for materials related to the research topic, and data processing.
Anna E. Urazbakhtina – establishing the objective function and developing an algorithm for calculating the optimal intervals between scheduled maintenance of components.
Aleksandr E. Pushkarev – defining the research objectives and tasks, and determining the research methods and materials.

Список литературы / References

1. Невзоров Д.Н., Труфанова И.С. Повышение эффективности работы конвейерного поезда: исследование влияния параметров приводной станции на силу сцепления. *Горная промышленность*. 2025;(1):184–191. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-184-191
Nevzorov D.N., Trufanova I.S. Improving the efficiency of the conveyor train: investigation of the impact of the drive station parameters on the traction force. *Russian Mining Industry*. 2025;(1):184–191. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-184-191

2. Ворошилов Г.А., Лель Ю.И. Энергоемкость транспортных систем карьеров: оценка и перспективы. *Горная техника*. 2009;(1):42–49. Режим доступа: https://stroit.ru/stati/energoemkost-transportnyh-sistem-karerov-otsenka-i-perspektivy/ (дата обращения: 19.03.2026).
Voroshilov G.A., Lel Yu.I. Energy intensity of quarry transport systems: assessment and prospects. *Gornaya Tekhnika*. 2009;(1):42–49. (In Russ.) Available at: https://stroit.ru/stati/energoemkost-transportnyh-sistem-karerov-otsenka-i-perspektivy/ (accessed: 19.03.2026).

3. Жуковский Ю.Л., Сусликов П.К. Идентификация и классификация электрической нагрузки горных предприятий на основе методов декомпозиции сигналов. *Записки Горного института*. 2025;275:5–17. Режим доступа: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16670 (дата обращения: 19.03.2026).
Zhukovskiy Y.L., Suslikov P.K. Identification and classification of electrical loads in mining enterprises based on signal decomposition methods. *Journal of Mining Institute*. 2025;275:5–17. Available at: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16670 (accessed: 19.03.2026).

4. Nazarychev A., Iliev I., Manukian D., Beloev H., Suslov K., Beloev I. Review of operating conditions, diagnostic methods, and technical condition assessment to improve reliability and develop a maintenance strategy for electrical equipment. *Energies*. 2025;18(21):5832. https://doi.org/10.3390/en18215832

5. Kuznetsov D., Kosolapov A. Dynamic of performance of open-pit dump trucks in ore mining in severe climatic environment. *Transportation Research Procedia*. 2022;63:1042–1048. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.104

6. Hasan H., Octariando R. *The effect of road grade on dump truck fuel consumption*. SAE Technical Paper Series, April 20, 2022, 2022-01-5030. https://doi.org/10.4271/2022-01-5030

7. Kumykova T.M., Kumykov V.Kh. Method of shaping loading-and-transportation system in deep open pit complex ore mines. *Journal of Mining Science*. 2018;53(4):708–717. https://doi.org/10.1134/S1062739117042702

8. Казанин О.И., Сидоренко А.А., Евсюкова А.А., Лю Ц. Обоснование технологий поддержания выемочных выработок при отработке пологих угольных пластов на больших глубинах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):5–21. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_5
Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Evsiukova A.A., Liu Z. Justification of the longwall panel entries support technology when mining gently inclined coal seams at large depths. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):5–21. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_5

9. Афанасьев П.И., Белов А.А. Оценка сейсмовзрывного воздействия на приконтурный массив по амплитудно-частотным характеристикам взрыва. *Горная промышленность*. 2025;(3):138–145. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-138-145
Afanasev P.I., Belov A.A. Assessment of the seismic-blast effects on the marginal rock mass due to the amplitude-frequency characteristics of the blast. *Russian Mining Industry*. 2025;(3):138–145. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-138-145

10. Шешукова Е.И., Шибанов Д.А., Иванов С.Л., Шишкин П.В. Оценка нагрузок приводов рабочего оборудования карьерного экскаватора (часть 2). *Горная промышленность*. 2024;(4):108–114. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-108-114
Sheshukova E.I., Shibanov D.A., Ivanov S.L., Shishkin P.V. Assessment of loads at the working attachment of a mine shovel (Part 2). *Russian Mining Industry*. 2024;(4):108–114. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-108-114

11. Глебов А.В., Кармаев Г.Д. Определение предельных сроков эксплуатации карьерных самосвалов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(1):50–61. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2015/01/09-50-61_Glebov.pdf (дата обращения: 19.03.2026).
Glebov A.V., Karmaev G.D. Estimation of service life limit for open pit dump-trucks. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(1):50–61. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2015/01/09-50-61_Glebov.pdf (accessed: 19.03.2026).

12. Федорина А.В., Шаронова А.А., Осинцев Н.А., Пыталев И.А. Использование системы диспетчерского управления для повышения производительности работы автосамосвалов (на примере угольного разреза). *Современные проблемы транспортного комплекса России*. 2015;5(1):29–33. Режим доступа: https://transcience.ru/index.php/MPRTC/article/view/36/0 (дата обращения: 19.03.2026).
Fedorina A.V., Sharonova A.A., Osintsev N.A., Pytalev I.A. The usage of dispatch control system to improve productivity of dump trucks (on the example of the coal mine). *Modern Problems of Russian Transport Complex*. 2015;5(1):29–33. (In Russ.) Available at: https://transcience.ru/index.php/MPRTC/article/view/36/0 (accessed: 19.03.2026).

13. Андреева Л.И., Ушаков Ю.Ю. Исследование эксплуатационной надежности карьерных автосамосвалов. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2016;(3):74–77. Режим доступа: https://www.iuggu.ru/download/Andreeva-3-16.pdf (дата обращения: 19.03.2026).
Andreeva L.I., Ushakov Yu.Yu. Research of operational reliability of quarry dump trucks. *News of the Ural State Mining University*. 2016;(3):74–77. (In Russ.) Available at: https://www.iuggu.ru/download/Andreeva-3-16.pdf (accessed: 19.03.2026).

14. Yan Q.-D., Chen X.-Q., Jian H.-C., Wei W., Wang W.-D., Wang H. Design of a deep inference framework for required power forecasting and predictive control on a hybrid electric mining truck. *Energy*. 2022;238:121960. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121960

15. Lagunova Yu., Bochkov V., Horoshavin S. Analysis of the operational characteristics of the main units of BelAZ vehicles in a coal mine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;709:022048. https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/2/022048

16. Воронов А.Ю., Воронов Ю.Е. Мультиуровневая модель управления экскаваторно-автомобильными комплексами разрезов. *Горное оборудование и электромеханика*. 2019;(5):8–15. https://doi.org/10.26730/1816-4528-2019-5-8-15
Voronov A.Yu., Voronov Yu.E. Multistage model for shovel-truck system management at open-pit coal mines. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2019;(5):8–15. (In Russ.) https://doi.org/10.26730/1816-4528-2019-5-8-15

17. Бурмистров К.В., Гавришев С.Е., Заляднов В.Ю. Выбор и оценка системы вскрытия при разработке крутопадающих месторождений открытым способом. *Записки Горного института*. 2025;274:95–103. Режим доступа: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16370 (дата обращения: 19.03.2026).
Burmistrov K.V., Gavrishev S.E., Zalyadnov V.Y. Selection and assessment of the stripping system in open pit mining of steeply dipping deposits. *Journal of Mining Institute*. 2025;274:95–103. Available at: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16370 (accessed: 19.03.2026).

18. Umirzokov A.M., Mallaboev U.M., Saidullozoda S.S., Khabibullozoda Kh.Kh. Classification of factors influencing the reliability of the driver-vehicle-road-environment (DVRE) system in the conditions of mountain quarries. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;817:012036. https://doi.org/10.1088/1757-899X/817/1/012036

19. Maior G.R.S., Peroni R.L., Mariz J.L.V. Assessing the impact of road geometry and rolling resistance on transportation costs and productivity in an iron ore mine in Brazil. *REM – International Engineering Journal*. 2025;78(4):e250002. https://doi.org/10.1590/0370-44672025780002

20. Яковлев В.Л., Яковлев В.А. Формирование транспортных систем карьеров с учетом адаптации к изменяющимся условиям разработки глубокозалегающих сложноструктурных месторождений. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2018;(6):118–126. https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-6-118-126
Iakovlev V.L., Iakovlev V.A. Open pit transport systems formation with the account of adaptation to deep-lying complex-structured deposits development changing conditions. I*zvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2018;(6):118–126. (In Russ.) https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-6-118-126

21. Ramesh Kumar A., Krishnan V. A study on reliability analysis of haul trucks. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. 2017;4(3):76–85. https://doi.org/10.17148/IARJSET.2017.4317

22. Клюев Р.В., Босиков И.И., Егорова Е.В., Гаврина О.А. Оценка горно-геологических и горнотехнических условий карьера «Северный» с помощью математических моделей. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2020;12(3):418–427.
Klyuev R.V., Bosikov I.I., Egorova E.V., Gavrina O.A. Assessment of mining-geological and mining technical conditions of the Severny pit with the use of mathematical models. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020;12(3):418–427. (In Russ.)

23. Bochkaryov Yu.S., Ishkov A.M. The operational reliability of quarry dump trucks BELAZ-7540 in the placer deposits. In: *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings SGEM 2020, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Albena, August 18–24, 2020*. Sofia: STEF92 Technology; 2020, pp. 325–332. https://doi.org/10.5593/sgem2020/1.2/s03.042

24. Pryalukhin A.F., Martyushev N.V., Malozyomov B.V., Klyuev R.V., Filina O.A., Konyukhov V.Y., Makarov A.A. Improvement of operational reliability of units and elements of dump trucks taking into account the least reliable elements of the system. *World Electric Vehicle Journal*. 2024;15(8):365. https://doi.org/10.3390/wevj15080365

25. Цупкина М.В., Кирков А.Е., Клебанов Д.А., Радченко Д.Н. Обоснование необходимости улучшения стратегии управления функционированием горно-технической системы на основе анализа данных об отработке сложноструктурных блоков. *Записки Горного института*. 2024;266:316–325. Режим доступа: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16302 (дата обращения: 19.03.2026).
Tsupkina M.V., Kirkov A.E., Klebanov D.A., Radchenko D.N. Justification of the approaches to improve management strategy of the mining system based on the analysis of data on the mining of complex structural rock blocks. *Journal of Mining Institute*. 2024;266:316–325. Available at: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16302 (accessed: 19.03.2026).

26. Бердников И.Е., Озорнин С.П. Математические модели определения количества отказов транспортно-технологических машин в зависимости от факторов условий эксплуатации. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2017;(2):134–141.
Berdnikov I.E., Ozornin S.P. Mathematical models for determining the transport-technological machines failure rate depending on the factors of operating conditions. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2017;(2):134–141. (In Russ.)

27. Мариев П.Л., Егоров А.Н., Войтов В.Т. Особенности работы карьерных самосвалов в условиях глубоких карьеров и повышенных уклонов карьерных дорог. *Горный журнал*. 2011;(10):63–66.
Mariev P.L., Egorov A.N., Voytov V.T. Features of mine dump truck working in the conditions of deep quarry and higher slopes of pit roads. *Gornyi Zhurnal*. 2011;(10):63–66. (In Russ.)

28. Бочкарев Ю.С., Зырянов И.В. Повышение эффективности эксплуатации карьерных автосамосвалов при разработке россыпных месторождений Севера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(5-2):80–90. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_52_0_80
Bochkaryov Yu.S., Zyryanov I.V. Improving the efficiency of operation quarry dump trucks on placer deposits in the north conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(5-2):80–90. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_52_0_80

29. Тарасов П.И., Хазин М.Л., Голубев О.В. Эволюция карьерного автотранспорта. *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2021;(2):67–74. https://doi.org/10.20291/2079-0392-2021-2-67-74
Tarasov P.I., Khazin M.L., Golubev O.V. The evolution of quarry vehicles. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2021;(2):67–74. https://doi.org/10.20291/2079-0392-2021-2-67-74

30. Wang H. Underground mine planning optimization process to improve values and reduce risks. In: Mueller C., Assibey-Bonsu W., Baafi E., Dauber C., Doran C., Jaszczuk M., Nagovitsyn O. (eds) Mining goes Digital: *Proceedings of the 39th International Symposium "Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry" (APCOM 2019), Wroclaw, June 4-6, 2019*. London: CRC Press; 2019, pp. 335–343. https://doi.org/10.1201/9780429320774-39

31. Novak D., Kozhubaev Y., Kang H., Cheng H., Ershov R. Intelligent system study for asymmetric positioning of personnel, transport, and equipment monitoring in coal mines. *Symmetry*. 2025;17(5):755. https://doi.org/10.3390/sym17050755

32. Лель Ю.И., Глебов И.А., Буднев А.Б., Исаков С.В., Ганиев Р.С. К обоснованию параметров крутонаклонных автосъездов при вскрытии глубоких горизонтов кимберлитовых карьеров. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2020;(7):21–32. https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-7-21-32
Lel Iu.I., Glebov I.A., Budnev A.B., Isakov S.V., Ganiev R.S. Rationale for the parameters of steeply inclined ramps of kimberlite pits deep horizons exposing. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2020;(7):21–32. https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-7-21-32

33. Filatova I., Shabalov M., Nikolaichuk L. Regulation methods in natural monopoly markets case of Russian gas network companies. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2019;12(5):624–630. Available at: http://www.irphouse.com/ijert19/ijertv12n5_06.pdf (accessed: 19.03.2026).

34. Зайцева Е.В., Кочнева А.А., Катунцов Е.В. Оптимизация технологического процесса повышения контрастности на изображениях, полученных в шахтах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(7):115–130. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_7_0_115
Zaitseva E.V., Kochneva A.A., Katuntsov E.V. Optimization of contrast enhancement in images obtained in mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(7):115–130. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_7_0_115

Информация об авторах
Ботян Евгений Юрьевич – кандидат технических наук, ассистент кафедры информатики и компьютерных технологий, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-3395-935X; e-mail: botyan_eyu@pers.spmi.ru
Королев Игорь Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-0337-3999
Уразбахтина Анна Эдуардовна – кандидат технических наук, ассистент кафедры информатики и компьютерных технологий, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
Пушкарев Александр Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры наземных транспортно-технологических машин, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Информация о статье
Поступила в редакцию: 19.05.2026
Поступила после рецензирования: 01.07.2026
Принята к публикации: 10.07.2026

Information about the authors
Evgeny Yu. Botyan – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Department of Informatics and Computer Technologies, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-3395-935X; e-mail: botyan_eyu@pers.spmi.ru
Igor A. Korolyov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-0337-3999
Anna E. Urazbakhtina – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Department of Informatics and Computer Technologies, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
Aleksandr E. Pushkarev – Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Surface Transport and Technological Machines, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation

Article info
Received: 19.05.2026
Revised: 01.07.2026
Accepted: 10.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-244-250

Подход к обеспечению устойчивого функционирования горнодобывающих предприятий за счет адаптации параметров горнотехнической системы к условиям изменения внешних и внутренних факторов

В.Ю. Заляднов[1], С.Е. Гавришев[1], И.В. Зырянов[2] ✉
[1] Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация
[2] Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного Федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном, г. Мирный, Российская Федерация
✉ zyryanoviv@inbox.ru

Резюме: Разработка месторождений полезных ископаемых открытым способом характеризуется постоянным усложнением горно-геологических и горнотехнических условий на фоне высокой изменчивости цен и спроса на производимое сырье. Для компенсации негативных факторов и обеспечения устойчивого функционирования горных предприятий необходимо периодическое обновление организационных и технологических проектов по освоению участка недр с изменением параметров горнотехнической системы. С этой целью в исследовании рассматривается инженерное решение по организации и формированию в рабочей зоне карьера участков с конструктивными параметрами, адаптированными под использование оборудования малой мощности, в том числе гидравлических экскаваторов с емкостью ковша до 5–6 м³. В статье показано влияние геометрических характеристик гидравлических экскаваторов на параметры горнотехнической системы. Авторы установили, что с увеличением геометрических (линейных) параметров и единичной производственной мощности гидравлических экскаваторов возрастает их абсолютная производительность и снижается удельная производительность на 1 м³ емкости ковша. Соответственно, интенсивность отработки участка экскаваторами с меньшей емкостью ковша будет выше, чем при использовании экскаваторов с большой емкостью ковша, при условии равного суммарного объема емкости ковшей всех сравниваемых экскаваторов. Для ряда рудных и угольных месторождений в условиях изменения внешних и внутренних факторов предложенное инженерное решение позволяет обеспечить гибкое регулирование производительности карьера, номенклатуры товарной продукции и услуг, а также качества и объема вовлекаемых в разработку запасов.

Ключевые слова: интенсивность отработки участка карьера, рабочая зона карьера, высота уступа, угол откоса рабочего борта, концентрация оборудования, гидравлический экскаватор, емкость ковша экскаватора, производительность карьера, качество добываемого сырья

Для цитирования: Заляднов В.Ю., Гавришев С.Е., Зырянов И.В. Подход к обеспечению устойчивого функционирования горнодобывающих предприятий за счет адаптации параметров горнотехнической системы к условиям изменения внешних и внутренних факторов. *Горная промышленность.* 2026;(5):244–250. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-244-250

An approach to ensuring sustainable operation of mining companies by adapting parameters of the mining system to changing external and internal factors

V.Yu. Zalyadnov[1], S.E. Gavrishev[1], I.V. Zyryanov[2] ✉
[1] Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation
[2] Mirny Polytechnic Institute (branch) of North-Eastern Federal University, Mirny, Russian Federation
✉ zyryanoviv@inbox.ru

Abstract: Surface mining of mineral deposits is characterized by increasingly complex mining-geological and mining-engineering conditions, against a backdrop of high volatility in prices and demand for the raw materials produced. To offset negative factors and ensure sustainable operation of mining companies, it is essential to periodically update organizational and technological plans for developing the mineral deposit by adjusting parameters of the mining system. For this purpose, the study examines an engineering solution for organizing and creating areas within the open-pit mine's working zone with design parameters adapted for utilization of low-power equipment, including hydraulic excavators with the bucket capacity of up to 5–6 m³. The paper demonstrates the impact of geometric specifications of the hydraulic excavators on the parameters of the mining system. The authors discovered that as the geometric (linear) parameters and the unit output of the hydraulic excavators increase, their absolute output increases, while their specific output per 1 m³ of the bucket capacity decreases. Accordingly, the efficiency

of excavating a block using excavators with smaller bucket capacities will be higher than when using excavators with larger bucket capacities, provided that the total bucket capacity of all the excavators being compared is equal. For a number of ore and coal deposits, the proposed engineering solution allows for flexible control of the open-pit output, the range of commercial products and services, as well as the quality and volume of the reserves involved in mining, even in conditions of changing external and internal factors.

Keywords: efficiency of excavating an open-pit block, open-pit working area, bench height, highwall slope angle, equipment concentration, hydraulic excavator, excavator bucket capacity, open-pit mine output, quality of mined raw materials

For citation: Zalyadnov V.Yu., Gavrishev S.E., Zyryanov I.V. An approach to ensuring sustainable operation of mining companies by adapting parameters of the mining system to changing external and internal factors. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):244–250. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-244-250

Введение

Современный рынок минеральных ресурсов характеризуется непрерывными колебаниями и трансформациями, что обусловливает необходимость поиска решений, позволяющих горнодобывающим предприятиям находиться в состоянии, обеспечивающем способность к быстрой адаптации к изменяющимся условиям для сохранения эффективной работы. При этом открытая разработка месторождений полезных ископаемых осуществляется в постоянно усложняющихся горнотехнических и горно-геологических условиях. Увеличивается глубина и площадь карьеров, растет протяженность вскрывающих выработок, снижается содержание полезного компонента в разрабатываемых рудах, ухудшается качество добываемых углей и других твердых полезных ископаемых, что в целом приводит к повышению издержек производства. Ухудшение условий освоения участка недр и истощение балансовых запасов в изменяющейся конъюнктуре рынка без соответствующего изменения параметров горнотехнической системы снижает устойчивость функционирования горнодобывающих предприятий и может приводить к полному прекращению их хозяйственной деятельности [1]. Таким образом, совершенствование принципов и подходов, на которых базируются существующие методики обоснования структуры и значений применяемых параметров горнотехнических систем, является актуальной научно-практической задачей.

Чтобы поддерживать эффективную деятельность в условиях влияния внешних и внутренних факторов, горнодобывающим компаниям целесообразно создавать новые конкурентные производственные мощности на основе действующих объектов недропользования, ориентируясь преимущественно на продукцию и услуги, стабильно востребованные рынком. Такой подход позволяет диверсифицировать риски низкой прибыльности отдельных сегментов производства посредством получения прибыли от других направлений, обеспечивая таким образом полное и комплексное использование ресурсов месторождения и продлевая жизненный цикл предприятия [2–4]. Данный подход реализуется, в частности, на основе направленного усовершенствования многоцелевого применения открытой геотехнологии. Следует расширять область её использования от комплексного освоения запасов месторождения полезного ископаемого до комплексного освоения целенаправленно преобразуемого участка недр и его инфраструктуры, которые необходимо рассматривать исключительно в совокупности с параметрами формируемой горнотехнической системы. При этом динамика изменения параметров открытой геотехнологии определяет устойчивость функционирования горнодобывающего предприятия [5].

Сегодня к продукции горнодобывающего предприятия следует относить не только природные полезные ископаемые, но и техногенные георесурсы, а также производственную инфраструктуру с возможностью выполнения горнотехнических услуг оборудованием и персоналом для сторонних организаций. В целом расширение номенклатуры товарной продукции и услуг предприятия с открытой геотехнологией на всех этапах развития горных работ обеспечивается за счет заблаговременного формирования перспективных горных возможностей путем оперативного управления параметрами горнотехнической системы, оптимизация которых производится на основе заданного критерия экономической эффективности. Номенклатуру выпускаемой продукции предлагается рассматривать наряду с основными показателями горнотехнической системы, такими как объем вовлекаемых запасов полезного ископаемого, производительность и качество добываемого сырья [5]. Так, устойчивость функционирования горнодобывающего предприятия достигается за счет оперативного изменения параметров горнотехнической системы, обеспечивающих гибкое регулирование комплекса значений её основных показателей.

Реализация предложенной модели обеспечения устойчивого функционирования горнодобывающего предприятия возможна на основе установления зависимостей между комплексом основных показателей и применяемых параметров горнотехнической системы для выбора оптимального сочетания их значений, позволяющих осуществлять одновременное развитие нескольких перспективных направлений освоения участка недр и сохранять требуемую эффективность.

С этой целью в данной работе рассматривается инженерное решение по организации и формированию в рабочей зоне карьера участков с конструктивными параметрами, адаптированными под использование оборудования малой мощности, в том числе гидравлических экскаваторов с емкостью ковша до 5–6 м^3. Для ряда рудных и угольных месторождений данное решение обеспечивает возможность для оперативного регулирования таких показателей, как производительность, качество и номенклатура продукции. Так, в случае положительного изменения конъюнктуры рынка использование на отдельных участках экскаваторов с малой емкостью ковша позволяет повысить селективную выемку различных типов и сортов полезного ископаемого, включая попутное сырье, имеющее высокую ценность [6–9]. Таким образом, возможно расширение ассортимента и номенклатуры продукции. Кроме того, гидравлические экскаваторы малой мощности, в том числе с емкостью ковша до 5–6 м^3, в случае изменения конъюнктуры рынка могут быть использованы при разработке техногенных месторождений или для строительства различных горнотехнических сооружений собственного производства, а также для нужд сторонних организаций [10–14]. В целом

горнодобывающее предприятие, имея соответствующее оборудование и инфраструктуру, может осуществлять достаточно широкий спектр услуг сторонним потребителям, обеспечивая тем самым дополнительную доходность. В качестве аутсорсинговых услуг для сторонних организаций горнодобывающее предприятие может выполнять разведку, проектирование, экскавацию, буровзрывные работы, транспортировку и другие уникальные, соответствующие специфике открытой геотехнологии виды работ [15–19].

В настоящей статье представлены исследования влияния геометрических характеристик используемых на карьерах гидравлических экскаваторов на параметры системы разработки, производительность и интенсивность отработки участков карьера.

Результаты

Обеспечение требуемого повышения производительности карьера, обусловленное изменением конъюнктуры рынка, производится за счет вовлечения дополнительного горнотранспортного оборудования или модернизации используемых моделей, изменения параметров системы разработки и участков активной рабочей зоны, а также концентрации и интенсивности горных работ на основе сбалансированности их значений в зависимости от полноты и комплексности освоения участка недр. В настоящее время на рынке предлагается достаточно широкая линейка моделей гидравлических экскаваторов с различными характеристиками [20; 21]. При этом в условиях модернизации оборудования имеет место тенденция его замены на модели с большой единичной производственной мощностью. Это обусловлено, как правило, необходимостью интенсивного разноса вскрышных горизонтов и в целом выполнения значительных объемов вскрышных работ для обеспечения требуемой производительности предприятия [22–24]. Однако в добычной рабочей зоне на отдельных участках для обеспечения возможности гибкого регулирования значений основных показателей горнотехнической системы и для создания условий применения выемочного оборудования на других видах работ в случае необходимости более перспективным представляется использование экскаваторов с емкостью ковша до 5–6 м³.

Установлено, что с увеличением геометрических (линейных) параметров и единичной производственной мощности гидравлических экскаваторов возрастает их абсолютная производительность и снижается удельная производительность на 1 м³ емкости ковша. На рис. 1 представлен теоретический расчет абсолютной и удельной производительности, а также фактические значения удельной производительности гидравлических экскаваторов, применяемых на различных российских горнодобывающих предприятиях.

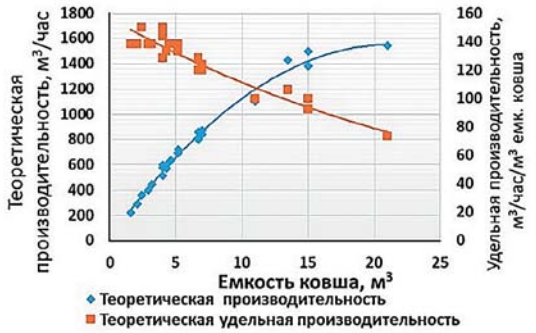
Таким образом, доказано, что удельная производительность современных карьерных гидравлических экскаваторов с объемом ковша $E_к$ до 5–6 м³ превышает в 1,5–2 раза значение этого же показателя у экскаваторов с ковшами вместимостью $E_к$ свыше 20–22 м³. Соответственно, интенсивность отработки участка экскаваторами с меньшей емкостью ковша будет выше, чем при использовании экскаваторов с большой емкостью ковша при условии равного суммарного объема емкости ковшей всех сравниваемых экскаваторов.

С параметрами применяемого выемочного оборудования связаны параметры системы разработки. Экскаваторы в зависимости от своих геометрических (линейных) параметров имеют ограничения использования по высоте и глубине черпания, а также по ширине рабочей площадки, определяющих их производительность. Для серийно выпускаемых гидравлических экскаваторов на основе анализа технических характеристик и паспортов экскавации горной массы установлена зависимость усредненных значений высоты рабочего уступа и ширины рабочей площадки от емкости ковша (рис. 2).

Данные представленных зависимостей заложены в расчет максимальной концентрации оборудования и интенсивности отработки участка активной рабочей зоны при моделировании вариантов использования гидравлических экскаваторов с различными характеристиками в рабочей зоне карьера.

Под интенсивностью разработки наклонных и крутых месторождений понимается скорость понижения горных работ в карьере. Под управлением интенсивностью

а)



б)

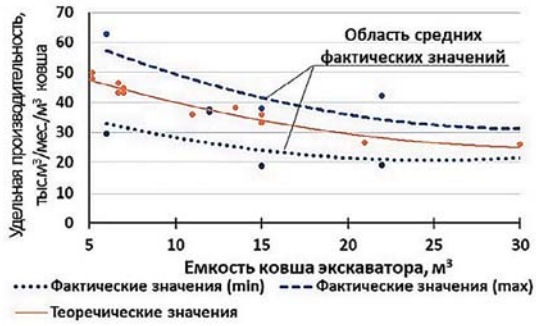


Рис. 1
Теоретическая и удельная производительность гидравлических экскаваторов:
а – расчетные теоретические значения;
б – фактические значения

Fig. 1
Theoretical and specific output of hydraulic excavators:
a – calculated theoretical values;
б – actual values

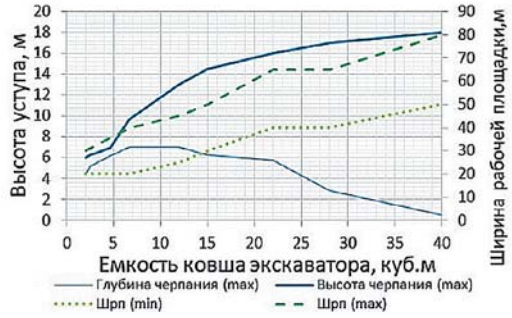


Рис. 2
Зависимость усредненных значений высоты рабочего уступа и ширины рабочей площадки от емкости ковша гидравлических экскаваторов

Fig. 2
A dependence of the average values of the bench height and the width of the working area on the bucket capacity of hydraulic excavators

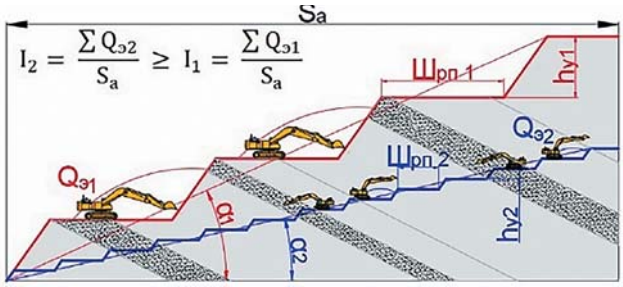


Рис. 3
Участок активной рабочей зоны S_a с вариантами угла наклона рабочего борта α_1 и α_2 с соответствующими им высотой уступа h_{y1} и h_{y2} и шириной рабочей площадки $Ш_{рп1}$ и $Ш_{рп2}$; $Q_э$ – производительность экскаваторов

Fig. 3
A section of the active working zone S_a with different highwall slope angles α_1 and α_2 with the corresponding bench height h_{y1} and h_{y2} and the widths of the working area $Ш_{рп1}$ and $Ш_{рп2}$; $Q_э$ – excavator output

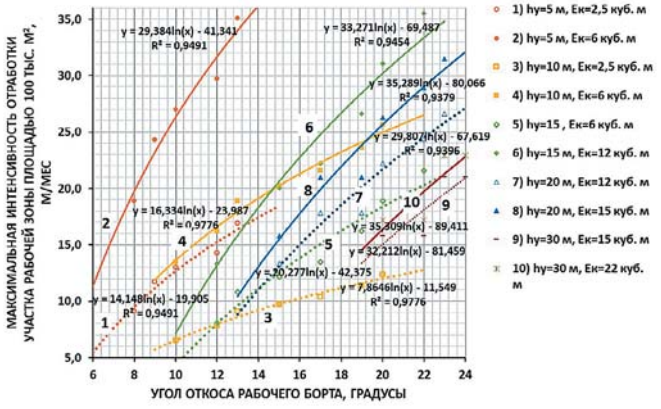


Рис. 4
Зависимость интенсивности отработки участка активной рабочей зоны от высоты уступа, угла откоса рабочего борта и емкости ковша применяемых экскаваторов при максимальной их концентрации

Fig. 4
A dependence of the efficiency of excavating a block in the active working zone on the bench height, the highwall slope angle, and the bucket capacity of the excavators used at their maximum concentration

разработки понимается совокупность последовательных операций по оценке состояния горных работ, целенаправленному изменению концентрации горных работ и оборудования в рабочей зоне, организации горных работ на смежных горизонтах и контролю заданных технологических параметров. Концентрация горных работ, повышение интенсивности отработки отдельных участков и месторождений является важным резервом сокращения текущих объемов вскрыши, улучшения режима горных работ [25–27]. Интенсивность ведения горных работ на отдельном участке рабочей зоны можно оценить с помощью формулы:

$$I_г = \frac{\Sigma Q_э}{S_a}, \quad (1)$$

где $\Sigma Q_э$ – суммарная производительность экскаваторов, работающих на анализируемом участке рабочей зоны, м³; S_a – активная площадь участка рабочей зоны, м².

Под активной площадью рабочей зоны понимается часть рабочей зоны карьера (участка карьера), которая вовлекается в разработку в течение планируемого периода.

В результате исследований выявлено, что на ограниченном участке активной рабочей зоны при переходе на уступы меньшей высоты с сохранением или уменьшением угла откоса рабочего борта, при максимальной концентрации выемочного оборудования, соответствующего параметрам системы разработки, возможно сохранение или повышение интенсивности отработки с одновременным повышением селекции вынимаемой из массива горной массы (рис. 3, 4).

Технологически одно и то же значение угла откоса рабочего борта возможно получить путем различного сочетания высоты уступа и ширины рабочей площадки.

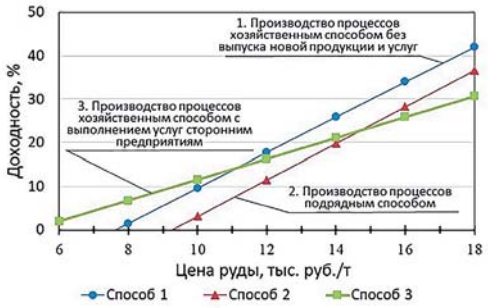
Исследования показывают, что на активной части добычной рабочей зоны возможно получение заданного значения интенсивности как при использовании экскаваторов с большой емкостью ковша, так и с малой при соответствующих выемочному оборудованию параметрах системы разработки и его максимальной концентрации (см. рис. 4).

Из графика видно, что область эффективного использования гидравлических экскаваторов с емкостью ковша 15–22 м³ в активной части добычной рабочей зоны ограничена углом откоса рабочего борта в пределах 18–24° и высотой уступа до 20–30 м, отрабатываемых подуступами. Интенсивность углубки при этом в условиях максимальной концентрации оборудования может достигать 15–20 м/мес. Сопоставимая по значению интенсивность достигается в активной части добычной рабочей зоны с уступами высотой до 5–10 м и результирующим углом его откоса 8–14° при максимальной концентрации оборудования с емкостью ковша 2,5–6 м³.

Следует учитывать, что уменьшение высоты уступа и угла откоса рабочего борта и использование экскаваторов с малой емкостью ковша сопровождается увеличением текущего коэффициента вскрыши, а также повышением затрат на разработку месторождения. Таким образом, доказано, что достижение высокой интенсивности при использовании экскаваторов с малой емкостью ковша целесообразно в условиях положительной конъюнктуры рынка полезных ископаемых высокой ценности. При этом обеспечиваются возможность снижения потерь и разубоживания, повышения товарной стоимости продукции за счет селективной выемки или увеличения ее ассортимента и в целом повышение доходности предприятия и полнота освоения запасов.

Частично реализация предлагаемого подхода и геотехнологических решений по управлению параметрами горнотехнической системы в рамках развития блока показателей – «качество», рассмотрена на примере условий разработки Бейского каменноугольного месторождения. Особо ценной продукцией для данного месторождения является товарный продукт с приведенной теплотой сгорания угля более 5600 ккал/кг. При этом основная часть месторождения представлена запасами угля с приведенной теплотой сгорания в пределах 4100–5500 ккал/кг. Непосредственно для Бейского каменноугольного месторождения установлено, что уменьшение высоты уступа, емкости ковша применяемого экскаватора и параметров скважинных зарядов, повышающих селективность выемки и значений качественных показателей товарной продукции, позволяют увеличить товарную стоимость продукции на отдельных участках более чем в 2,4 раза. Что в целом обеспечивает вовлечение в разработку других участков месторождения с низкими качественными показателями, отработка которых ранее была нерентабельной.

а)



б)

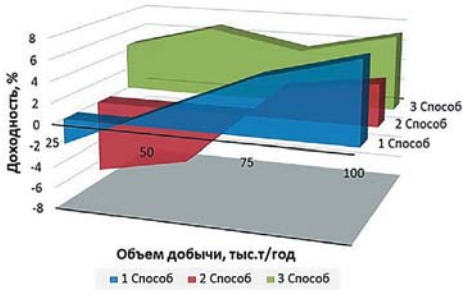


Рис. 5
Оценка влияния способа организации производственной деятельности на доходность и устойчивость предприятия в зависимости от цены и производительности:
а – при производительности карьера 50 тыс. т/год;
б – при цене на руду 8000 руб/т

Fig. 5
An assessment of the impact of the production organization method on the company's profitability and sustainability depending on the price and output:
a – with the open-pit mine output of 50,000 metric tons/year;
б – with the ore price of 8,000 Rubles/metric ton

Предложенный подход по обеспечению устойчивости функционирования горнотехнической системы на основе формирования производственной инфраструктуры, позволяющей выполнять технологические процессы сторонним предприятиям, апробирован на примере разработки небольшого месторождения хромовых руд. Для данного предприятия были рассчитаны различные экономические показатели, в том числе и доходность, в зависимости от цены на добываемое сырье и производительности. При расчете экономических показателей были рассмотрены три принципиально отличающихся способа организации деятельности по освоению участка недр с использованием: 1 – собственных ресурсов без расширения видов деятельности (хозяйственный); 2 – ресурсов сторонних организаций (подрядный); 3 – собственных ресурсов и расширением видов деятельности с оказанием горнотехнических услуг сторонним предприятиям. В комплекс деятельности, предусматривающий выполнение услуг сторонним предприятиям, кроме экскавации, также было заложено производство буровзрывных работ и транспортирования в объеме, соответствующем объемам производства собственного предприятия. Оценка влияния способа организации производственной деятельности на доходность и устойчивость предприятия в зависимости от цены на руду представлена на рис. 5.

В целом результаты исследований показывают, что при ухудшении рыночных условий предложенный подход обеспечивает положительную доходность и соответственно устойчивость функционирования предприятия.

Заключение

Устойчивость функционирования горнотехнической системы в условиях постоянно изменяющейся конъюнктуры рынка достигается на этапе ее проектирования путем формирования резервов для возможности управления параметрами горнотехнической системы с варьированием производительности карьера, качеством добываемого сырья и номенклатуры товарной продукции, включая объем выполнения услуг сторонним предприятиям на основе заданного критерия эффективности.

Одним из геотехнологических решений, расширяющим горные возможности предприятий по обеспечению их устойчивого функционирования, является планирование и организация в рабочей зоне карьера участков с конструктивными параметрами, адаптированными под использование гидравлических экскаваторов с малой емкостью ковша. Это позволяет в условиях изменения конъюнктуры рынка обеспечить гибкое регулирование производительности карьера, качества и объема вовлекаемых в разработку запасов. Изменение конструктивных параметров карьера с уменьшением высоты уступа и угла откоса рабочего борта при применении маломощного выемочно-погрузочного оборудования с обеспечением его высокой концентрации на ограниченном участке активной добычной рабочей зоны при разработке высокоценных полезных ископаемых позволяет при необходимости интенсифицировать отработку месторождения с одновременным повышением селективности выемки из массива горных пород, что обеспечивает увеличение товарной стоимости продукции и расширение ее номенклатуры.

Список литературы / References

1. Заляднов В.Ю. Оценка устойчивости функционирования горнотехнической системы открытой геотехнологии на основе интегрального показателя горных возможностей. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2024;22(2):5–13. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-5-13
Zalyadnov V.Yu. Assessing sustainability of the operation of the mining system of open geotechnology based on an integral indicator of mining capabilities. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2024;22(2):5–13. (In Russ.) https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-5-13
2. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Развитие научно-методических основ устойчивости функционирования горнотехнических систем в условиях внедрения нового технологического уклада. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2020;(4):24–39.
Kaplunov D. R., Rylnikova M.V. Development of scientific and methodological foundations for the sustainability of mining systems in the context of the introduction of a new technological structure. *Izvestiya Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2020;(4):24–39. (In Russ.)
3. Рыльникова М.В. Условия и принципы устойчивого развития горнодобывающих предприятий в период повышенных рисков и глобальных вызовов. *Горная промышленность*. 2022;(3):69–73. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-69-73
Rylnikova M.V. Conditions and principles for sustainable development of mining companies during a period of higher risks and global challenges. *Russian Mining Industry*. 2022;(3):69–73. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-69-73

4. Rakhmangulov A., Burmistrov K., Osintsev N. Selection of open-pit mining and technical system's sustainable development strategies based on MCDM. *Sustainability.* 2022;14(13):8003. https://doi.org/10.3390/su14138003

5. Гавришев С.Е., Заляднов В.Ю., Курочкин А.И., Мельник В.В., Пыталев И.А. Методика управления параметрами горнотехнической системы в динамике развития горных работ для обеспечения устойчивого функционирования горнодобывающего предприятия в изменяющихся условиях рынка. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2024;22(4):5–14. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-5-14
Gavrishev S.E., Zalyadnov V.Yu., Kurochkin A.I., Melnik V.V., Pytalev I.A. Method of managing the parameters of a mining system in the dynamics of mining operations development to ensure the sustainable functioning of a mining enterprise in changing market conditions. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2024;22(4):5–14. (In Russ.) https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-5-14

6. Рыльникова М.В., Струков К.И., Федотенко Н.А. Влияние фактора распределения ценных компонентов в массиве месторождения «светлинское» на структуру производственной мощности золотодобывающего предприятия АО «Южуралзолото». *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2022;(2):375–387.
Rylnikova M.V., Strukov K.I., Fedotenko N.A. The influence of the distribution factor of valuable components in the Svetlinskoye deposit array on the structure of the production capacity of the Yuzhuralzoloto gold mining enterprise. *Izvestiya Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2022;(2):375–387. (In Russ.)

7. Голик В.И., Лукьянов В.Г., Качурин Н.М., Стась Г.В. Эффективность комбинирования технологий выемки руд в пределах рудного поля. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020;331(10):32–39. https://doi.org/10.18799/24131830/2020/10/2847
Golik V.I., Lukyanov V.G., Kachurin N.M., Stas G.V. Efficiency of combining ore mining technologies within an ore field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering.* 2020;331(10):32–39. (In Russ.) https://doi.org/10.18799/24131830/2020/10/2847

8. Секисов А.Г., Чебан А.Ю. Кристаллосберегающая технология открытой разработки сложноструктурных кимберлитовых месторождений. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2021;19(2):5–13. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-5-13
Sekisov A.G., Cheban A.Yu. Crystal-saving technology of open mining of complex structure kimberlite deposits. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2021;19(2):5–13. (In Russ.) https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-5-13

9. Xu R., Sellers E.J., Fathi-Salmi E. Rock recognition and identification for selective mechanical mining: a self-adaptive artificial neural network approach. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment.* 2023;82(7);267. https://doi.org/10.1007/s10064-023-03311-3

10. Жариков С.Н. О вовлечении отвалов горной массы в хозяйственный оборот и месте в этом процессе буровзрывных работ. *Горная промышленность*. 2021;(1):110–113. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-1-110-113
Zharikov S.N. On commercialization of waste rock dumps and the role of drilling and blasting operations in this process. *Russian Mining Industry*. 2021;(1):110–113. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-1-110-113

11. Kostromin M.V., Panina T.Yu. Ways of solving the problems of rational nature management in the areas of alluvial deposits development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;962:012053. https://doi.org/10.1088/1755-1315/962/1/012053

12. Kalisz S., Kibort K., Mioduska J., Lieder M., Małachowska A. Waste management in the mining industry of metals ores, coal, oil and natural gas – A review. *Journal of Environmental Management.* 2022;304:114239. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114239

13. de Carvalho F.A., Nobre J.N.P., Cambraia R.P., Silva A.C., Fabris J.D., dos Reis A.B., Prat B.V. Quartz mining waste for concrete production: environment and public health. *Sustainability.* 2022;14(1):389. https://doi.org/10.3390/su14010389

14. Тараканов ский В.И. Техногенные образования – важный источник пополнения МСБ для россыпных предприятий. В кн.: *Золото. Полиметаллы. XXI век: Устойчивое развитие в условиях внешних и внутренних вызовов: материалы 4-й Междунар. науч.-техн. конф., г. Челябинск, 27–30 марта 2024 г.* М.: ИПКОН РАН; 2024. С. 128–135.

15. Заляднов В.Ю., Гавришев С.Е., Михайлова Г.В., Кадеров С.С., Коваленко Н.В. Обоснование стратегии развития горнодобывающих предприятий на основе анализа доходности и риска при аутсорсинге и диверсификации. *Горная промышленность*. 2021;(4):134–139. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-4-134-139
Zalyadnov V.Yu., Gavrishev S.E., Mihailova G.V., Kaderov S.S., Kovalenko N.V. Justification of the development strategy of mining enterprises on the basis of analysis of profitability and risk in outsourcing and diversification. *Russian Mining Industry.* 2021;(4):134–139. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-4-134-139

16. Кондратьев В.Б. Горная промышленность, инновации и экономический рост: опыт развивающихся стран. Горная промышленность. 2020;(3):98–104. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-3-98-104
Rylnikova M.V., Aynbinder G.I., Esina E.N. Systematization of technological methods for prevention, containment and elimination of sulfides fire sources. Russian Mining Industry. 2020;(3):98–104. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-3-98-104

17. Емельянов А.А., Кельчевская Н.Р., Пелымская И.С. Оценка конкурентоспособности региональных горно-металлургических кластеров. *Экономика региона*. 2020;16(1):213–227. https://doi.org/10.17059/2020-1-16
Emelyanov A.A., Kelchevskaya N.R., Pelymskaya I.S. Assessment of competitiveness of regional mining and metallurgical clusters. *Economy of Regions.* 2020;16(1):213–227. (In Russ.) https://doi.org/10.17059/2020-1-16

18. Косарева Е.Е. Особенности диверсификации экономики горнодобывающего региона. *Экономика и предпринимательство.* 2024;(5):626–629. https://doi.org/10.34925/EIP.2024.166.5.125
Kosareva E.E. Features of diversification of the economy of the mining region. *Economy & Entrepreneurship*. 2024;(5):626–629. (In Russ.) https://doi.org/10.34925/EIP.2024.166.5.125

19. Вагин С.Г. Диверсификация добывающих отраслей промышленности и её влияние на экономику региона на примере горной. *Вестник академии знаний*. 2025;(2):165–171.
Vagin S.G. Diversification of extractive industries and its impact on the regional economy using the example of mining. Bulletin of the Academy of Knowledge. 2025;(2):165–171. (In Russ.)

20. Логинов Е.В., Масальский С.С. Исследование технических характеристик серийно выпускаемых моделей выемочно-погрузочного оборудования разных типов. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2023;21(1):15–23. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-15-23
Loginov E.V., Masalskiy S.S. Research on technical characteristics of mass-produced models of extraction and loading equipment of various types. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2023;21(1):15–23. (In Russ.) https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-15-23

21. Бураков А.М., Панишев С.В., Алькова Е.Л., Хосоев Д.В. Опыт применения гидравлических экскаваторов в сложных горно-геологических и климатических условиях. *Горная промышленность*. 2022;(2):90–96. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-2-90-96
Burakov A.M., Panishev S.V., Alkova E.L., Khosoev D.V. Experience of using hydraulic excavators in difficult mining, geological and climatic conditions. *Russian Mining Industry*. 2022;(2):90–96. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-2-90-96

22. Журавлев А.Г., Глебов И.А., Черепанов В.А. К вопросу повышения производительности и технической готовности мощных отечественных экскаваторов. *Проблемы недропользования*. 2023;(4):76–88. https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.04.076
Zhuravlev A.G., Glebov I.A., Cherepanov V.A. On the issue of development of productivity and technical readiness of powerful domestic excavators. *Problems of Subsoil Use*. 2023;(4):76–88. (In Russ.) https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.04.076

23. Журавлев А.Г., Глебов И.А., Черепанов В.А. Поиск резервов повышения производительности экскаваторно-автомобильных комплексов с применением компьютерного моделирования. *Горная промышленность*. 2023;(6):148–154. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-148-154
Zhuravlev A.G., Glebov I.A., Cherepanov V.A. Searching for reserves to increase productivity of excavator-automobile complexes using computer simulation. *Russian Mining Industry*. 2023;(6):148–154. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-148-154

24. Пыталев И.А., Доможиров Д.В., Борисенко Е.В., Ильтинин Ю.К. Оценка влияния параметров технологии взрывной подготовки горных пород к выемке на производительность погрузочно-доставочного комплекса на угольных разрезах Кузбасса. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2024;(2):292–306.
Pytalev I.A., Domozhirov D.V., Borisenko E.V., Iltinin Yu.K. Assessment of the influence of the parameters of the technology of explosive preparation of rocks for excavation on the productivity of the loading and delivery complex at the Kuzbass coal mines. *Izvestiya Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2024;(2):292–306. (In Russ.)

25. Бурмистров К.В., Колонюк А.А., Цыганов А.В. Организационно-технологические схемы ведения горных работ при интенсификации работ на участках карьера. В кн.: *Материалы 63-й научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 2003–2004 гг., г. Магнитогорск, 19–23 апреля 2004 г.* Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова; 2004. С. 165–169.

26. Кузнецов Д.В., Косолапов А.И. Исследование динамики концентрации горного оборудования в условиях глубоких карьеров Севера. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2018;(1):22–29. https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-1-22-29
Kuznetsov D.V.1, Kosolapov A.I. The study of mining equipment concentration dynamics in conditions of deep open pits of the North. *Izvestiya vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2018;(1):22–29. (In Russ.) https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-1-22-29

27. Фомин С.И., Овсянников М.П. Особенности технологии открытой разработки крутопадающих рудных месторождений этапами. *Маркшейдерия и недропользование*. 2020;(1):41–44.
Fomin S.I., Ovsyannikov M.P. Particularities of the technology of the staged open-pit mining of steep deposits. *Mine Surveying and Subsoil Use*. 2020;(1):41–44. (In Russ.)

Информация об авторах
Заляднов Вадим Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Российская Федерация; e-mail: zalyadnov@mail.ru
Гавришев Сергей Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки месторождений полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Российская Федерация; e-mail: ormpi-cg@mail.ru
Зырянов Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры горного дела, Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного Федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном, г. Мирный, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-2943-0138; e-mail: zyryanoviv@inbox.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 22.05.2026
Поступила после рецензирования: 06.07.2026
Принята к публикации: 15.07.2026

Information about the authors
Vadim Yu. Zalyadnov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Mining Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; e-mail: zalyadnov@mail.ru
Sergey E. Gavrishev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Mining Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, Magnitogorsk, Russian Federation; e-mail: ormpi-cg@mail.ru
Igor V. Zyryanov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Mining Engineering, Mirny Polytechnic Institute (branch) of North-Eastern Federal University, Mirny, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-2943-0138; e-mail: zyryanoviv@inbox.ru

Article info
Received: 22.05.2026
Revised: 06.07.2026
Accepted: 15.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-251-257

Геомеханические резервы оптимизации конструкции борта карьера на этапе доработки месторождения

А.Л. Билин, А.С. Калюжный✉
Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация
✉ a.kalyuzhny@ksc.ru

Резюме: В статье рассматриваются возможности дополнительной геомеханической оптимизации конструкции борта глубокого карьера на завершающем этапе эксплуатации. На примере Коашвинского месторождения обосновано применение пониженных коэффициентов запаса устойчивости (КЗУ = 1,2) для участков борта со сроком отработки до 3 лет. Детально проанализированы риски, связанные с трещиноватостью массива, наличием карбонатных пород, процессами окисления и обводненностью. Выполнена оценка возможности смещения верхней кромки борта и снижения объемов вскрыши при выделении этапа доработки. Расчёты устойчивости выполнены методом предельного равновесия с использованием круглоцилиндрических поверхностей скольжения для критических профилей висячего борта залежи, где исходный КЗУ составляет 1,31. Показано, что при смещении верхней кромки борта внутрь рудного тела на 28,4–31,5 м достигается совпадение координат борта на отметке –188 м с проектным положением при существенном приросте извлекаемых запасов на нижних горизонтах. Для скорректированного контура на горизонте этапа доработки расчётный КЗУ составляет 1,24–1,26, что удовлетворяет нормативным требованиям. Показано, что комплексный подход, включающий уточнение геомеханической модели, оптимизацию буровзрывных работ и иерархическую систему мониторинга, позволяет существенно снизить коэффициент вскрыши без ущерба для промышленной безопасности. Экономический эффект от оптимизации борта в рассматриваемом участке оценивается в 4,5 млрд руб., что эквивалентно исключению 22,9 млн м³ условной вскрыши.

Ключевые слова: Коашвинское месторождение, устойчивость бортов карьера, этап доработки, коэффициент запаса устойчивости, трещиноватость, обводненность, объем вскрыши

Для цитирования: Билин А.Л., Калюжный А.С. Геомеханические резервы оптимизации конструкции борта карьера на этапе доработки месторождения. *Горная промышленность*. 2026;(5):251–257. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-251-257

Geomechanical reserves for optimizing open-pit slope design during the final mine development stage

A.L. Bilin, A.S. Kalyuzhny ✉
Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation
✉ a.kalyuzhny@ksc.ru

Abstract: This study explores the potential for additional geomechanical optimization of the slope design for deep open-pit mines during the final operational stage. Feasibility of applying a reduced safety factor of 1.2 for slope sections with the remaining service life of up to three years is justified in accordance with current federal industrial safety regulations using the Koashva deposit as a case study. The research provides a detailed analysis of the risks associated with rock mass fracturing, presence of carbonate rock, oxidation processes, and groundwater inflow. An assessment is conducted regarding the inward shift of the top edge of the slope and the consequent reduction in the overburden volume through implementation of a dedicated final development phase. Slope stability calculations were performed using the limit equilibrium method with circular slip surfaces for critical profiles of the hanging wall, where the initial safety factor equals 1.31. Results indicate that shifting the top edge into the ore body by 28.4 to 31.5 meters aligns the slope coordinates at the minus 188 meter level with the design configuration while significantly increasing recoverable reserves at the lower levels. For the adjusted contour during the final development stage, the calculated safety factor ranges from 1.24 to 1.26, fully complying with the regulatory requirements. An integrated

approach that combines refined geomechanical modeling, optimized blasting operations, and a hierarchical monitoring system, enables a substantial reduction in the stripping ratio without compromising industrial safety. The economic benefit from the slope optimization in the analyzed sector is estimated at 4.5 billion Rubles, which is equivalent to eliminating 22.9 million cubic meters of conditional overburden.

Keywords: Koashva deposit, open-pit mine slope stability, final development stage, factor of safety, rock mass fracturing, groundwater inflow, overburden volume

For citation: Bilin A.L., Kalyuzhny A.S. Geomechanical reserves for optimizing open-pit slope design during the final mine development stage. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):251–257. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-251-257

Введение

Мировая практика ведения горных работ с применением открытой геотехнологии показывает, что большинство крупных карьеров в процессе эксплуатации сталкиваются с необходимостью модернизации конечного контура. Это обусловлено доразведкой месторождения, совершенствованием технологии переработки и внедрением современных горнотехнических решений, позволяющих добывать руду с больших глубин [1–4]. Для крупных карьеров глубиной 500–800 м и более повышение угла наклона конечного борта даже на 5 град приводит к экономии 24–61 млн м^3 вскрышных пород на каждый километр периметра карьера [5]. Эти сэкономленные объемы не требуется извлекать, транспортировать и складировать во внешние отвалы, что напрямую влияет на себестоимость добычи. Однако следует отметить, что эта экономия не дается легко: она требует наличия надежных систем мониторинга, отслеживающих состояние участков борта в реальном времени [6; 7].

В 2021–2022 гг. Горным институтом Кольского научного центра РАН было выполнено комплексное обоснование конструкции борта Коашвинского карьера на конец отработки, в рамках которого был предложен карьерный контур с коэффициентом запаса устойчивости (КЗУ) ≥ 1,3 при отметке дна –300 м [5]. В данной работе была обоснована возможность долгосрочной эксплуатации карьера. Вместе с тем действующие Федеральные нормы и правила (ФНиП) предусматривают возможность снижения коэффициента запаса устойчивости до 1,2 для проектов доработки карьера сроком до 3 лет [1]. Это открывает дополнительные резервы для оптимизации вскрышных работ на финальной стадии «жизни» карьера.

Целью данной работы является оценка геомеханических и технологических резервов применительно к Коашвинскому карьеру при выделении этапа доработки, включающего пересчет устойчивости критических профилей при КЗУ = 1,2, анализ рисков деградации массива и оценку экономического эффекта. Для выполнения цели работы необходимо было решить следующие задачи:

– определить возможное смещение верхней кромки борта при снижении требуемого КЗУ с 1,3 до 1,2;

– оценить запас устойчивости при углубке дна карьера до отметки –188 м (горизонт основного карьера по борту, с которого начинается этап доработки);

– рассчитать объем вскрыши, который может быть исключен из разработки.

Материалы и методы

Важным вопросом при определении границ карьеров является обоснование угла наклона конечного борта. Для снижения риска нормативно закреплено, что коэффициент запаса устойчивости борта должен составлять не менее 1,3. Однако ФНиП выделяют условия для проектов доработки карьера сроком до 3 лет, для которых возможное КЗУ установлено на уровне 1,2[2]. Данное положение открывает возможность формирования отдельной главы горной части проекта разработки месторождения, условно называемой «этап доработки карьера».

Обоснованность снижения запаса устойчивости в данном случае опирается на следующие факторы. Детальность изученности: к началу этапа доработки свойства пород прибортового массива и характер трещиноватости установлены уже более детально и полно. Временной фактор: деградация несущих свойств массива, даже находящегося в околопредельном состоянии, происходит не одномоментно, а развивается постепенно [8]. Короткий срок существования откосов (до 3 лет) минимизирует риски потери устойчивости. Технологическая интенсивность: при приближении к дну карьера возрастает темп углубки карьера до 2–3 уступов в год (24–36 м/год для рассматриваемого карьера) вместо обычных 10–15 м/год. Скорость понижения вскрышных работ также становится предельной, составляя до 4 уступов в год. При этом «долгосрочный» борт карьера может отличаться от предельной глубины этапа доработки до 100 м по дну и до 140 м по высоте борта. При этом проект доработки должен включать расчеты, обосновывающие такие высокие темпы углубки.

Геомеханическое состояние массива, слагающего борт, носит вероятностный характер. Многие проектные решения принимаются в условиях недостатка информации, и всегда присутствует риск наличия незамеченных опасных поверхностей ослабления (разломов, даек), которые могут вызвать нарушение проектной конструкции [9]. Следует различать низкоранговую трещиноватость (разломы), оказывающую влияние на устойчивость значительных участков борта, и высокоранговую трещиноватость, влияющую на устойчивость отдельных участков уступов и блоков, которые могут нависать над транспортными коммуни-

1 Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов»: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 13.11.2020 г. №439. Режим доступа: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012210121 (дата обращения: 20.05.2025).

2 Там же.

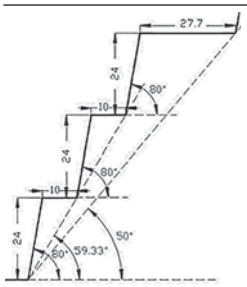
Таблица 1
Конструкция уступов

Table 1
The bench design

Параметры	Тип горной породы					
	Крепкая скала				Выветрелая скала (плитчатая отдельность)	Морена и отвальная масса
	Исходная конструкция		Рассматриваемая конструкция			
Распространение	Ниже +100 м	Выше +100 м	Ниже +100 м	Выше +100 м		
Берма безопасности	11 м	10 м	12,9 м	11,85 м	15 м	8 м
Высота уступа	24 м	20 м	24 м	20 м	20 м	10 м
Угол наклона откоса уступа	80°	80°	90°	90°	70°	39°
Размещение бермы зачистки через	3 уступа / 72 м	4 уступа / 80 м	3 уступа / 72 м	4 уступа / 80 м	4 уступа / 80 м	7 уступов / 70 м
Берма зачистки	25,7 м	23 м	27 м	24,5 м	23 м	Дневная поверхность

Таблица 2
Результаты оценки устойчивости конструкций группы уступов (с учетом расположения на транспортной берме карьерного самосвала грузоподъемностью 200 т)

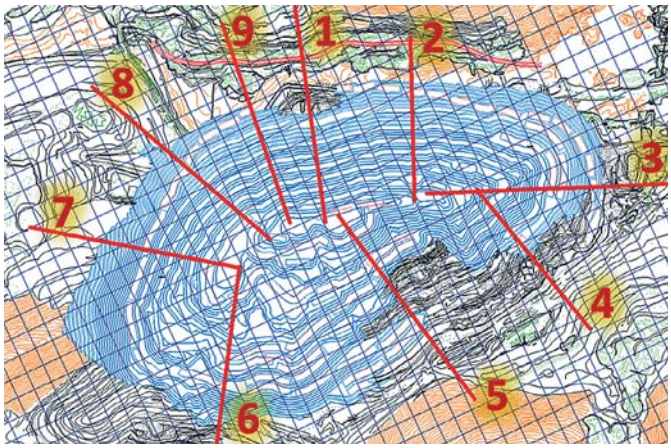
Table 2
Results of assessing the stability of the bench structures (with account of placing a 200-metric-ton open-pit dumptruck on the haulage bench)

Конструкция уступа	Наименование пород	Коэффициент запаса устойчивости	Состояние устойчивости (КЗУ ≥ 1,3)
	Ийолиты	2,04	Устойчив
	Уртиты	2,50	Устойчив
	Лявочоррит	2,10	Устойчив
	Ювиты	2,51	Устойчив
	Руда	2,12	Устойчив
	Ийолиты	2,44	Устойчив
	Уртиты	2,57	Устойчив
	Лявочоррит	2,14	Устойчив
	Ювиты	2,54	Устойчив
	Руда	2,07	Устойчив
Высота уступа = 10 м Угол откоса уступа = 39° Ширина бермы = 8 м	Морена	1,55	Устойчив

При формировании борта карьера обнажаются всё новые участки массива, которые начинают подвергаться физическому выветриванию. Атмосферные воды проникают в трещины и, промерзая, создают условия для возможного отрыва блоков от массива. Сезонные циклы промерзания и оттаивания приводят к прорастанию трещин. Отдельным фактором деградации прочностных свойств является наличие карбонатных пород, подверженных выщелачиванию и карстообразованию [11]. Например, на Ковдорском ГОКе процессы растворения кальцита и карбонатита в трещиноватых зонах при сезонном обводнении способствуют снижению сцепления по плоскостям ослабления. Дополнительно, в зонах сульфидной минерализации процессы окисления могут приводить к образованию вторичных минералов и изменению прочностных характеристик контактов. В связи с этим вопрос безопасной эксплуатации борта и располагающихся на нем транспортных и энергетических коммуникаций, а также водоводов проявляется на всех карьерах независимо от угла наклона борта.

кациями. При этом далеко не все даже крупные трещины и разломы могут быть выявлены заранее. Такие участки следует выявлять по мере обнаружения, анализировать на предмет потенциальной неустойчивости и разрабатывать экстренные мероприятия по их стабилизации. При этом важно различать меры по закреплению участков борта от обрушения (анкера, сваи) и меры по предохранению откоса от просыпей (сетки, бетонирование). Мероприятия по обеспечению безопасности не защищают участки борта от обрушений, а лишь защищают инфраструктуру [10].

Массив горных пород Коашвинского месторождения отличается сложными гидрогеологическими условиями. Несмотря на закрытость трещин в скальной части отдельные вертикальные разломы могут пропускать воду. Проект доработки должен быть дополнен анализом водопритоков и обводненности массива, подтверждающим принятые прочностные свойства. Для данного месторождения критически важна реконструкция системы



№ профиля	1	2	3	4	5	6	7	8	9
КЗУ	1,35	1,31	1,81	1,67	1,62	1,69	1,34	1,38	1,31

Рис. 1
План исходного контура карьера с расположенными на нем расчетными профилями

Fig. 1
A map of the open-pit initial contour with the design profiles shown

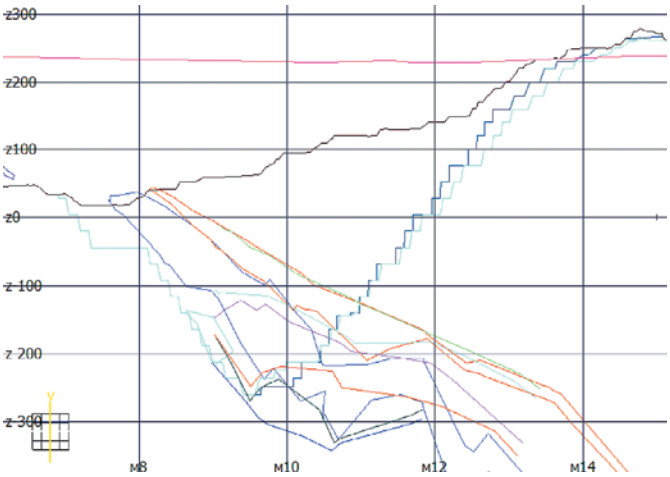


Рис. 2
Сечение моделей исходного и скорректированного контуров для профиля N°2

Fig. 2
A cross-section of the original and adjusted contour models for Profile No. 2

осушения, включая водопонизительные скважины и прибортовой дренаж [5].

Принято считать, что чем круче борт карьера, тем выше риск его частичного разрушения. Однако современные технологии позволяют минимизировать техногенное воздействие и снизить вероятность реализации описанных выше рисков. Ранее на конечном контуре взрывные работы никак не ограничивались, из-за чего глубина нарушенности законтурного массива достигала 3–4 м. На рубеже веков сотрудником Горного института КНЦ РАН, д.т.н. В.А. Фокиным были проведены специальные исследования [12], по результатам которых рекомендовано выделение приконтурных и предконтурных взрывных блоков с ограничением зарядов одновременно взрываемых взрывчатых веществ 2–3 тоннами, что позволило снизить глубину нарушенной зоны законтурного массива до 1–2 м. Помимо этого, в настоящее время широко применяется внутрискважинное замедление на 300 или 500 мс, что обеспечивает фактически индивидуальное посскважинное сейсмическое воздействие на массив и снижает зону нарушенности еще вдвое, что важно для сохранения прочности законтурного массива [13].

Уступы ставятся на конечный контур с использованием контурного щелеобразования со сдваиванием рабочих уступов. В сочетании с ограничением воздействия взрывов на массив это дает возможность повышения углов откосов уступов до 80–90 град [14]. Субвертикальные уступы позволяют применять относительно широкие предохранительные бермы. Рекомендовано сочетание узких необслуживаемых берм и располагающихся через 3–4 уступа широких берм зачистки (табл. 1). Оценка устойчивости отдельных сдвоенных уступов (высотой 20–24 м) подтверждает возможность формирования крутых откосов уступов (табл. 2).

В рамках данной работы выполнена серия расчетов устойчивости для критических участков борта Коашвинского карьера, выявленных в предыдущих исследованиях (профили №2 и №9 в висячем боку залежи) [5]. Выбор данных профилей обусловлен тем, что они имеют наименьшие значения КЗУ (1,31) и являются наиболее ответственными участками борта. Расчеты выполнены методом предельного равновесия с использованием круглоцилиндрических поверхностей скольжения.

Результаты

Для базового варианта, обоснованного в работе [5], (для КЗУ ≥ 1,3) наиболее критическими были установлены профили №2 и №9 по северному борту в долинной части карьера (рис. 1).

Конфигурация рудных тел на Коашвинском месторождении апатитовых руд такова, что если работать по проектной конструкции борта (без его смещения контура), а при подходе горных работ по борту к отметке –188 м перейти на новую конструкцию уступов, то прирост запасов руды будет незначительным. Если же изначально изменить конструкцию уступов до геомеханически допустимой, несколько сместив борт в сторону карьерного пространства, то на отметке –188 м борт придет в прежние координаты, а на нижних горизонтах будет обеспечен прирост запасов руды. При этом будет наблюдаться как экономия по вскрыше, так и прирост запасов руды (рис. 2).

В целом в секторе висячего бока залежи произошло смещение верхних уступов, конструкция которых была оставлена прежней, на 28–32 м. Расчеты показали, что при отметке дна –188 м (промежуточный горизонт основного карьера) для уточненной конструкции борта расчетный КЗУ составляет 1,31 для профиля №2 и 1,3 для профиля №9. Для контуров этапа доработки (с отметкой дна карьера –300 м) КЗУ составляют соответственно 1,26 и 1,24. Данные значения удовлетворяют требованиям ФНиП для этапа доработки (КЗУ ≥ 1,2), однако требуют усиленного мониторинга [6; 15].

По результатам компьютерного пространственного моделирования в системе ГГИС MineFrame [16] и сопоставления исходного и уточненного контуров уменьшение объемов вскрыши составило 10,36 млн м^3 при приразке запасов

руды на 2,4 млн т. Эквивалентный условный приведенный эффект (для учета дополнительной руды) при граничном экономически допустимом коэффициенте вскрыши 15 м³/м³ составит 22,9 млн м³ условной вскрыши, что при стоимости вскрышных работ 200 руб/м³ обеспечивает экономию на выемке, транспортировке и складировании пустых пород около 4580 млн руб. или 57 млн долл. США при курсе 80 руб/долл.

Обсуждение результатов

Применение на этапе доработки месторождения открытым способом КЗУ ≥ 1,2 накладывает повышенные требования к системе контроля, так как запас устойчивости снижается и требуется более оперативное выявление критических деформаций. Система контроля должна включать региональный и локальный уровни. На региональном уровне осуществляется контроль перемещений в районе критических профилей №2, №9 с применением наземной радарной интерферометрии [17–19]. На локальном уровне выполняется инструментальный контроль отдельных уступов. Визуальный контроль состоит в регулярных осмотрах поверхности уступов на предмет трещинообразования, особенно после циклов замерзания-оттаивания. Для практической организации мониторинга и разработки мероприятий по обеспечению безопасности при обнаружении критических деформаций необходима организация геомеханической службы [6].

Данные значения КЗУ удовлетворяют нормативным требованиям, однако требуют усиленного мониторинга [6; 19; 20]. Комплексный подход, включающий сочетание нормативных возможностей, современных технологий БВР и системного мониторинга, позволяет безопасно реализовать геомеханические резервы на финальной стадии жизни карьера. Технологическая база буровзрывных работ, сформированная на основе научных разработок, обеспечивает сохранность законтурного массива, необходимую для формирования откосов уступов с углами до 90°.

Вопросы контроля проектных решений и фактического состояния прибортового массива решаются в условиях недостатка информации об окружающем карьер массиве, что требует организации геомеханической службы для оперативного реагирования и подтверждения проектных конструктивных решений. Проектная документация по доработке должна опираться на актуальные данные о физико-механических свойствах горных пород, полученные непосредственно в зоне смещения контура, а также включать мероприятия по инженерному укреплению потенциально неустойчивых участков, а также меры по предотвращению просыпей на откосах уступов.

Для практической реализации рекомендуется:

– формировать этап доработки как отдельную главу проекта с обязательным разделом по геомеханическому мониторингу;

– применять внутрискважинное замедление 300–500 мс и контурное щелеобразование при отработке приконтурных зон;

– создавать специализированную геомеханическую службу с регламентом оперативного реагирования на превышение пороговых значений перемещений;

– применять комбинацию мер локального закрепления для защиты инфраструктуры от просыпей, не смешивая их с мероприятиями по обеспечению общей устойчивости борта.

Выводы

1. Действующие ФНиП позволяют обоснованно использовать коэффициент запаса устойчивости 1,2 для этапа доработки карьера сроком до 3 лет, что создаёт некий резерв для оптимизации конструкции борта.
2. Для Коашвинского карьера применение данного подхода на критических профилях №2 и №9 (висячий бок залежи) позволяет сдвинуть верхнюю кромку борта в контур карьера и снизить объём вскрышных работ без ущерба для безопасности на короткий период.
3. Технологическая база (внутрискважинное замедление 300–500 мс при массовых взрывах и контурное щелеобразование) обеспечивает сохранность законтурного массива, необходимую для формирования крутых откосов уступов до 90 град.
4. Обязательным условием реализации проекта является функционирование комплексной системы мониторинга и учёт факторов выветривания. Деградация несущих свойств массива происходит постепенно, что позволяет своевременно выявлять возможные критические деформации.
5. Вопросы контроля проектных решений и фактического состояния прибортового массива решаются в условиях недостатка информации об окружающем карьер массиве, что требует организации геомеханической службы для оперативного реагирования на изменяющуюся горнотехническую ситуацию в карьере.
6. Проектная документация по доработке должна опираться на актуальные данные о физико-механических свойствах горных пород, полученные непосредственно в зоне смещения контура, а также включать мероприятия по инженерному укреплению потенциально неустойчивых участков и меры по предотвращению просыпей на откосах уступов.
7. Экономический эффект от изменения конструкции борта в рассматриваемом секторе оценивается в 4,5 млрд руб. При распространении данного решения на другие участки карьера, где исходный коэффициент запаса устойчивости превышает минимально допустимый уровень, общий экономический результат может быть увеличен более чем вдвое.
8. Кроме того, после завершения реконструкции борта и выхода горных работ на «подкарьерные» запасы массивных руд появляется возможность повышения производительности карьера до 8–12 млн т руды в год. Такое решение экономически целесообразно, поскольку текущие условно-постоянные расходы на эксплуатацию Коашвинского карьера остаются значительными – в частности, ежегодный водоотлив составляет 50–60 млн м³.

Предложения по направлению будущих исследований

Дальнейшие исследования должны быть направлены на детализацию гидрогеологического прогноза и разработку регламентов оперативного реагирования геомеханической службы на этапе доработки.

Список литературы / References

1. Решетняк С.П., Авраамова Н.С. Обоснование и реализация рациональных технологических схем автомобильно-конвейерного транспорта скальных горных пород для глубоких карьеров. Рациональное освоение недр. 2022;(1):32–39. https://doi.org/10.26121/RON.2022.59.77.005
Reshetnyak S.P., Avraamova N.S. Rational in-pit crushing and conveying schemes for hard-rocks in deep open pits: justification and implementation. *Ratsionalnoe Osvoenie Nedr.* 2022;(1):32–39. (In Russ.) https://doi.org/10.26121/RON.2022.59.77.005

2. Бурмистров К.В., Гавришев С.Е., Рахмангулов А.Н. Оценка устойчивости функционирования системы вскрытия карьеров. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2020;(4):132–141.
Burmistrov K.V., Gavrishev S.E., Rakhmangulov A.N. Assessment of opening-up system operation stability. *Izvestiya Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2020;(4):132–141. (In Russ.)

3. Пыталев И.А., Бурмистров К.В., Юсупов М.Э., Головей С.И. Развитие циклично-поточной технологии на высокопроизводительных глубоких карьерах с учетом динамики формирования рабочей зоны. *Маркшейдерия и недропользование*. 2022;(5):34–40. https://doi.org/10.56195/20793332_2022_5_34
Pytalev I.A., Burmistrov K.V., Yusupov M.E., Golovey S.I. Development of cyclic-flow technologies at high-performance deep open pits with dynamic working area. Mine Surveying and Subsoil Use. 2022;(5):34–40. (In Russ.) https://doi.org/10.56195/20793332_2022_5_34

4. Afum B.O., Ben-Awuah E. A review of models and algorithms for surface-underground mining options and transitions optimization: some lessons learnt and the way forward. *Mining*. 2021;1(1):112–134. https://doi.org/10.3390/mining1010008

5. Корчак П.А., Рыбин В.В., Билин А.Л., Жиров Д.В. Комплексное обоснование конструкции борта Коашвинского карьера на конец отработки. *Горный журнал*. 2024;(10):72–76. https://doi.org/10.17580/gzh.2024.10.10
Korchak P.A., Rybin V.V., Bilin A.L., Zhirov D.V. Comprehensive justification of the final Koashva pit wall design. *Gornyi Zhurnal*. 2024;(10):72–76. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2024.10.10

6. Read J., Stacey P. (eds) *Guidelines for Open Pit Slope Design*. Collingwood, Vic.: CSIRO Publishing; 2009. 496 p. https://doi.org/10.1071/9780643101104

7. Shults R., Nurpeissova M., Burlibayeva S., Umirbayeva A., Turumbetov T. Geomonitoring of the open-pit mine slopes during subsoil development. *Civil Engineering Journal*. 2024;*33*(1):50–64. https://doi.org/10.14311/CEJ.2024.01.0004

8. Рыбин В.В., Константинов К.Н., Калюжный А.С. Оценка устойчивости борта карьера комплексом инструментально-расчетных методов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2024;(6):23–29. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20240603
Rybin V.V., Konstantinov K.N., Kalyuzhny A.S. Slope stability assessment by computational and instrumental methods. *Journal of Mining Science*. 2024;60(6):897–903. https://doi.org/10.1134/S1062739124060036

9. Stead D., Wolter A. A critical review of rock slope failure mechanisms: The importance of structural geology. *Journal of Structural Geology*. 2015;74:1–23. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.02.002

10. Budetta P. Assessment of rockfall risk along roads. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2004;4(1):71–81. https://doi.org/10.5194/nhess-4-71-2004

11. Waltham T., Bell F.G., Culshaw M.G. *Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2005. 384 p. https://doi.org/10.1007/b138363

12. Фокин В.А. *Проектирование и производство буровзрывных работ при постановке уступов в конечное положение на предельном контуре глубоких карьеров*. Апатиты: Изд-во Кол. науч. центра РАН; 2004. 231 с.

13. Козырев С.А., Власова Е.А., Усачев Е.А. Сейсмическое и акустическое воздействие массовых взрывов при ведении взрывных работ в карьере. *Горная промышленность*. 2025;(6):199–205. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-199-205
Kozyrev S.A., Vlasova E.A., Usashev E.A. Seismic and acoustic impact of large-scale blasts during blasting operations in an open pit mine. *Russian Mining Industry*. 2025;(6):199–205. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-199-205

14. Билин А.Л., Казачков С.В. Основные технологические принципы конструирования бортов карьеров с уступами, имеющими вертикальные откосы. В кн.: Мельников Н.Н. (ред.) *Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли – формирование нового мировоззрения в освоении природных ресурсов: сб. ст. Всерос. науч.-техн. конф. с участием иностранных специалистов, г. Апатиты, 13–15 октября 2014 г.* Апатиты; СПб.: ООО «Реноме»; 2014. Т. 1. С. 84–92.

15. Наговицын О.В., Лукичев С.В., Алисов А.Ю. Решение задач проектирования и планирования открытых горных работ в системе Mineframe. *Записки Горного института*. 2012;198:49–54. Режим доступа: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5913 (дата обращения: 10.04.2026).
Nagovitsyn O.V., Lukichev S.V., Alisov A.Y. Problem solving of design and planning of open pit mining in Mineframe system. *Journal of Mining Institute*. 2012;198:49–54. (In Russ.) Available at: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5913 (accessed: 10.04.2026).

16. Рыбин В.В., Константинов К.Н., Каган М.М., Панасенко И.Г. Принципы организации комплексной системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия. *Горный журнал*. 2020;(1):53–57. https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.10
Rybin V.V., Konstantinov K.N., Kagan M.M., Panasenko I.G. Methodology of integrated stability monitoring in mines. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):53–57. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.10

17. Carlà T., Farina P., Intrieri E., Ketizmen H., Casagli N. Integration of ground-based radar and satellite InSAR data for the analysis of an unexpected slope failure in an open-pit mine. *Engineering Geology*. 2018;235:39–52. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.01.021

18. Haupt S., Engelbrecht J., Sibolla B., Mdakane L.W. Time series InSAR analysis for slope stability monitoring using Sentinel-1 in open pit mining. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*s. 2023;XLVIII-1/W2-2023:945–951. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W2-2023-945-2023

19. Le Roux R., Sepehri M., Khaksar S., Murray I. Slope stability monitoring methods and technologies for open-pit mining: A systematic review. *Mining*. 2025;5(2):32. https://doi.org/10.3390/mining5020032

20. Козырев А.А., Рыбин В.В., Билин А.Л., Фокин В.А., Мелик-Гайказов И.В. Обоснование конструкций устойчивых бортов карьеров в массивах скальных тектонически напряженных пород. *Горный журнал*. 2010;(9):24–27.
Kozyrev A.A., Rybin V.V., Bilin A.L., Fokin V.A., Melik-Gaykazov I.V. Substantiation of constructions of stable pits sides in massifs of tectonically intensive rocks. *Gornyi Zhurnal*. 2010;(9):24–27. (In Russ.)

Информация об авторах
Билин Андрей Леонидович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-0744-6593; e-mail: a.bilin@ksc.ru
Калюжный Антон Сергеевич – научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-5178-6993; e-mail: a.kalyuzhny@ksc.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 10.05.2026
Поступила после рецензирования: 22.06.2026
Принята к публикации: 13.07.2026

Information about the authors
Andrey L. Bilin – Cand. Sci. (Eng.), Leading Research Associate, Mining Institute, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-0744-6593; e-mail: a.bilin@ksc.ru
Anton S. Kalyuzhny – Research Associate, Mining Institute, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-5178-6993; e-mail: a.kalyuzhny@ksc.ru

Article info
Received: 10.05.2026
Revised: 22.06.2026
Accepted: 13.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-258-264

Исследование изменения физико-механических свойств скальных горных пород и их трещиноватости с глубиной на примере Хибинского массива

Н.Н. Кузнецов, М.С. Кулькова✉
Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация
✉ m.kulkova@ksc.ru

Резюме: С увеличением масштабов ведения горных работ все более актуальным становится вопрос о закономерностях изменения физико-механических свойств горных пород и параметров их трещиноватости с глубиной залегания. Имеющаяся в литературных источниках информация не позволяет сформировать четкое представление об изменении этих характеристик, что обусловливает необходимость проведения натурных и лабораторных исследований в процессе отработки месторождений. В работе приведены результаты комплексного анализа структурной трещиноватости и физико-механических свойств кернового материала, отобранного из субвертикальной скважины на одном из месторождений Хибинского массива. В интервале от 340,0 до 841,0 м от дневной поверхности определены индекс качества массива, линейная частота трещин, плотность четырех типов скальных пород и пределы их прочности при одноосном сжатии и растяжении, выявлены разломные структуры и зоны дискования керна. Показано, как изменяются физико-механические свойства исследуемых пород и их трещиноватость с увеличением глубины залегания.

Ключевые слова: скальные горные породы, глубина залегания, физико-механические свойства, трещиноватость, прочность, плотность.

Благодарности: Авторы выражают благодарность ведущему технологу лаборатории №26.2 отдела геомеханики Горного института Кольского научного центра РАН Ольге Николаевне Целовальниковой за совместное участие в геотехническом описании керна исследуемой скважины и отборе проб для определения физико-механических свойств горных пород.

Для цитирования: Кузнецов Н.Н., Кулькова М.С. Исследование изменения физико-механических свойств скальных горных пород и их трещиноватости с глубиной на примере Хибинского массива. *Горная промышленность*. 2026;(5):258–264. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-258-264

Study of change in the physical-mechanical properties of hard rocks and their fracturing with depth using the example of the Khibiny massif

N.N. Kuznetcov, M.S. Kulkova✉
Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation
✉ m.kulkova@ksc.ru

Abstract: As the mining operations expand, the issue of the change patterns in the physical and mechanical properties of rocks and parameters of their fracturing with burial depth is becoming increasingly relevant. Information available in the published literature does not provide a clear understanding of how these characteristics vary, thereby explaining the need for field and laboratory investigations during the deposit development. This paper presents the results of a comprehensive analysis of structural fracturing and physical and mechanical properties of the core material taken from a subvertical borehole at one of the deposits within the Khibiny massif. In the interval from 340.0 to 841.0 m below the ground surface, the rock mass quality index, linear fracture frequency, density of four rock types and their uniaxial compressive and tensile strength were determined; fault structures and core discing zones were also identified. It is shown how the physical-mechanical properties of the investigated rocks and their fracturing vary with increasing burial depth.

Keywords: hard rocks, burial depth, physical-mechanical properties, fracturing, strength, density.
Acknowledgements: The authors express their gratitude to Olga Nikolaevna Tselovalnikova, Lead Technologist at Laboratory No. 26.2 of the Geomechanics Department at the Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, for her collaboration in the geotechnical description of the core from the test borehole and in collection of samples to identify the physical and mechanical properties of the rocks.
For citation: Kuznetcov N.N., Kulkova M.S. Study of change in the physical-mechanical properties of hard rocks and their fracturing with depth using the example of the Khibiny massif. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):258–264. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-258-264

Введение

Развитие крупномасштабных горных работ в современных условиях неизбежно связано с вовлечением в разработку всё более глубоких горизонтов. В этой связи возрастает актуальность исследований, направленных на изучение закономерностей изменения физико-механических свойств горных пород с глубиной. Данная проблематика неразрывно связана с задачами оценки устойчивости горных выработок, определения напряжённо-деформированного состояния породных массивов, прогнозирования динамических проявлений горного давления, а также обоснования рациональных параметров крепи. Наряду с этим при определении физико-механических свойств массива пород существенную роль играет учёт его качественных характеристик, в частности, количественная оценка степени его структурной нарушенности (трещиноватости).

Анализируя имеющуюся в литературных источниках информацию об изменении физико-механических свойств пород с глубиной, можно отметить следующие особенности. В работе [1] на примере Сорского карьера установлено, что с увеличением глубины от 0 до 500 м объемный вес пород увеличивается, сцепление возрастает, угол внутреннего трения почти не меняется [1]. В работах [2; 3] выявлено, что для осадочных пород с увеличением глубины их залегания значения модуля упругости, предела прочности при сжатии и плотности нелинейно увеличиваются, тогда как значения коэффициента Пуассона уменьшаются. Схожие результаты, показывающие возрастание с глубиной залегания значений прочности и модуля упругости, получены в ходе испытаний образцов доломита [4] и песчаника [5]. Для ряда месторождений на образцах гранита установлено, что с возрастанием глубины увеличиваются их прочностные и деформационные характеристики [6–8]. При этом в интервале от 950 до 1250 м наоборот происходит уменьшение значений этих характеристик, что связывают с уменьшением содержания кварца в граните [7]. Для образцов угля на примере одной из шахт Китая выявлено, что на глубине от 300 до 1050 м происходит постепенное увеличение значений модуля упругости, а прочность, коэффициент Пуассона и объемная деформация образцов увеличиваются нелинейно [9]. На примере свинцово-цинкового месторождения показано, что с возрастанием глубины от 900 до 1200 м увеличиваются значения плотности пород, прочности при одноосном сжатии и растяжении, модуля упругости, тогда как значения коэффициента Пуассона изначально увеличиваются, а затем уменьшаются [10]. На основе этой информации можно отметить, что для ряда месторождений характерно возрастание плотностных, прочностных и деформационных свойств пород с увеличением глубины их залегания. Тем не менее имеются и противоположные результаты, показывающие уменьшение значений этих свойств с глубиной [2; 7; 10].

Что касается трещиноватости массива пород, то на примере Ковдорского апатит-магнетитового месторождения [11] и Удерейского золото-сурьмяного месторождения [12] показано, что интенсивность трещиноватости уменьшается с увеличением глубины залегания пород. Также на основе анализа образцов керна отмечается, что с глубиной может происходить уменьшение микротрещиноватости пород [13]. Это может быть связано с выходом из приповерхностной зоны разгрузки и выветривания, которая зачастую характеризуется повышенной интенсивностью трещиноватости [14]. Однако на примере Горевского свинцово-цинкового месторождения выявлено, что в пределах карьера на глубине порядка 200–300 м и ниже изменения трещиноватости с глубиной не прослеживается [15]. В работе [16] приводится информация, согласно которой с глубиной изменяется не только количество трещин, но и их направление. Следовательно, имеющаяся информация не позволяет составить однозначного представления о характере изменения трещиноватости массивов пород с глубиной.

Целью настоящей работы является исследование особенностей изменения физико-механических свойств горных пород и их трещиноватости с глубиной их залегания на примере Хибинского массива.

Материалы и методы

Объектом исследования в настоящей работе является массив горных пород. На примере одного из апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива выполнен анализ изменения физико-механических свойств пород, а также их трещиноватости по мере увеличения глубины залегания. С этой целью изучен керн субвертикальной скважины протяжённостью 501,0 м, заложенной на глубине 340,0 м от дневной поверхности. Диаметр бурения соответствовал NQ (75,7 мм), диаметр извлечённого керна составил 47,5 мм, керн не ориентирован.

В пределах исследуемого интервала отбора керна 340,0–841,0 м (далее по тексту – 0,0–501,0 м относительно устья скважины) выделены четыре литологических типа скальных пород (рис. 1): ювит среднезернистый массивный (0,0–28,5 м), рисчоррит среднезернистый массивный

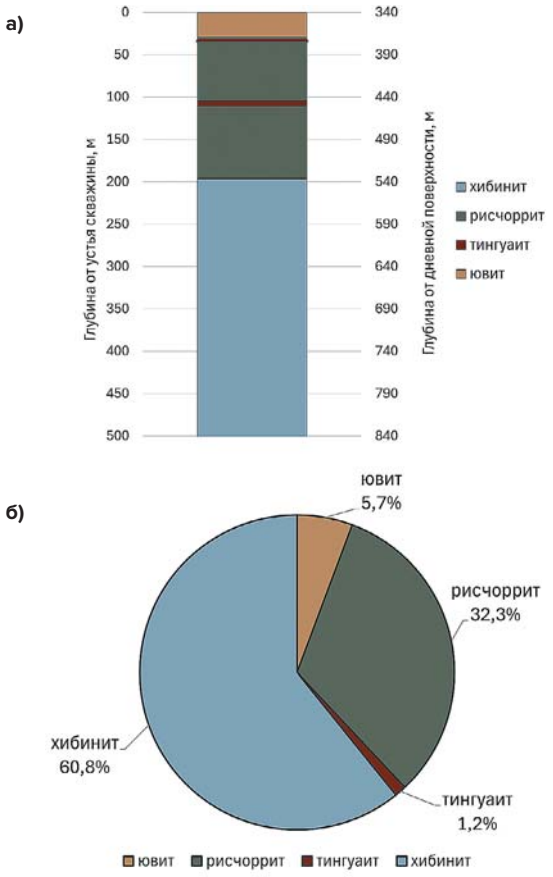


Рис. 1
Характеристика керна субвертикальной скважины апатит-нефелинового месторождения Хибинского массива:
а – литологическая колонка скважины;
б – литологический состав скважины

Fig. 1
A description of the core from the subvertical borehole in the apatite-nepheline deposits of the Khibiny massif:
a – a lithological column of the borehole;
б – lithological composition of the borehole

(28,5–104,9 и 110,6–195,9 м), дайка тингуаита (33,7–34,1 и 104,9–110,6 м), а также хибинит среднезернистый массивный (196,5–501,0 м).

На первом этапе исследования выполнено сплошное геомеханическое описание керна, в ходе которого проанализированы параметры, характеризующие структурную нарушенность массива пород: индекс качества массива (RQD) и линейная частота трещин (FF/m). Значение RQD определяется как процентное отношение суммарной протяжённости кусков керна между естественными трещинами размером свыше 100 мм к длине описываемого интервала. Для определения значения FF/m подсчитывается количество открытых естественных трещин на 1 пог. м керна.

На втором этапе исследования отобраны 20 керновых проб равномерно по всей длине скважины. Каждая проба представлена одним литотипом и имеет протяженность порядка 2 м. Лабораторные исследования проводили на образцах керна правильной формы (цилиндрической) с отношением высоты к диаметру равным 2 (95,0x47,5 мм) и с использованием следующего экспериментального оборудования: штангенциркуль Micron, весы неавтоматического действия EJ-6100, машина испытательная ИП-1250М-авто. Для каждой пробы было изготовлено в среднем по 20 образцов. По результатам испытаний определены значения таких физико-механических свойств пород, как плотность (ГОСТ 30629–2011), предел прочности при одноосном сжатии (ГОСТ 21153.2–84), предел прочности при одноосном растяжении (метод сжатия по образующим, ГОСТ 21153.3–85).

Результаты

Анализ изменения структурной нарушенности массива пород с глубиной

В ходе работы изучено 335 интервалов керна субвертикальной скважины, общий выход которого (TCR) составил 99,7%. Общее распределение пород согласуется с литологическим строением района (рис. 2). Анализ литолого-геотехнической колонки и распределения показателей RQD и FF/m по разрезу скважины позволяет выявить особенности изменения структурного состояния массива пород с глубиной (рис. 3).

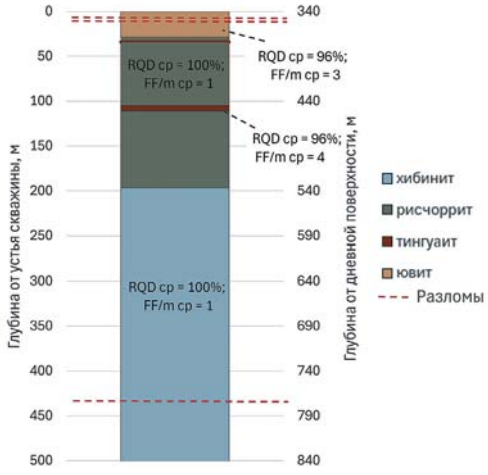


Рис. 2
Характеристика параметров структурной нарушенности массива пород в окрестности субвертикальной скважины

Fig. 2
Characterization of the structural disturbance parameters of the rock mass in the vicinity of the subvertical borehole

Верхняя часть разреза (до ~30 м), представленная преимущественно ювитами, характеризуется наибольшей изменчивостью параметров. Значения RQD варьируют в диапазоне от 80 до 100% при среднем значении 96%, интенсивность трещиноватости 2–4 трещ/м. На глубинах 7,4 и 14,0 м фиксируются кратковременные зоны тектонических нарушений, где наблюдается резкое ухудшение качества керна вплоть до его полной дезинтеграции (RQD = 0%). Таким образом, для верхней части разреза характерно сочетание относительно высокой сохранности массива с локальными зонами повышенной трещиноватости.

В интервале глубин 30–190 м, сложенном преимущественно рисчорритами, отмечается резкое повышение однородности геомеханических характеристик. Значения RQD стабилизируются на уровне 95–100%, а интенсивность трещиноватости не превышает 1–3 трещ/м. Это свидетельствует о формировании практически монолитного массива с минимальной степенью нарушенности. Исключение составляют интервалы, связанные с внедрением тингуаитовых даек мощностью 0,4 и 5,7 м, располо-

а) б)

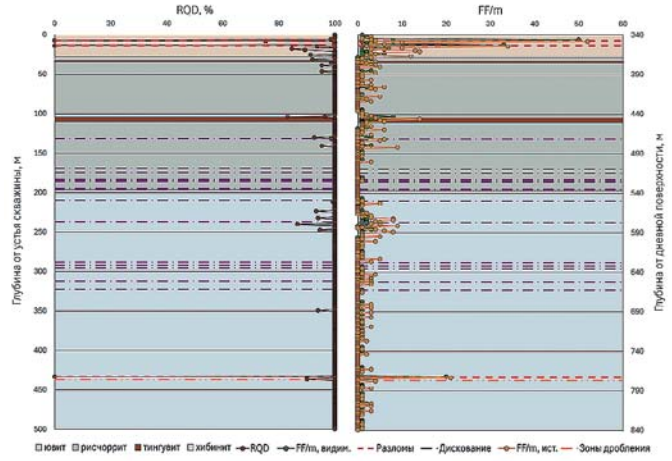


Рис. 3
Распределение значений RQD (а) и FF/m (б) вдоль профиля скважины

Fig. 3
Distribution of the RQD (a) and FF/m (б) values along the borehole profile

женных в рисчорритах на глубинах 33,7 и 104,9 м, для которых характерно некоторое увеличение трещиноватости (до 4 трещ/м) и снижение RQD до ~96%. Таким образом, дайки, несмотря на их высокие прочностные характеристики, в этом случае выступают локальными зонами ослабления, контрастирующими с вмещающими породами.

Начиная с глубины 196,5 м, где разрез представлен хибинитами, фиксируются наиболее благоприятные показатели качества массива: RQD устойчиво равен 100%, а FF/m, как правило, не превышает 1 трещ/м. Подобные значения соответствуют категории *excellent rock quality* по классификации Deere [17] и характеризуют массив как высокопрочный и практически ненарушенный. Даже на значительных глубинах (до забоя скважины) изменения этих параметров носят минимальный характер, что указывает на высокую степень монолитности пород. Отдельного внимания заслуживают локальные нарушения, выявленные на глубине 433,0 м (773 м от дневной поверхности), где отмечается маломощная зона дробления. Несмотря на ограниченную мощность подобные структуры свидетельствуют о влиянии тектонической активности на глубине и могут локально оказывать влияние на фильтрационные и прочностные свойства массива.

В интервале 130–320 м в рисчорритах и хибинитах выявлены зоны дискования керна, проявляющиеся в виде системы субпараллельных трещин с малым углом к оси скважины. С учётом морфологии и пространственного положения данные структуры интерпретируются как результат перераспределения напряжений при бурении, а не как проявление естественной трещиноватости массива. Примечательно, что зоны дискования не обнаруживают пространственной приуроченности к интервалам с повышенными значениями FF/m, что свидетельствует об отсутствии прямой связи между интенсивностью дискования и степенью естественной нарушенности массива. Вместе с тем их присутствие косвенно указывает либо на повышенный уровень напряжений, либо на снижение прочностных характеристик пород в этом диапазоне глубин.

Таким образом, исследуемый разрез характеризуется выраженной вертикальной зональностью трещиноватости. Общая тенденция к снижению интенсивности нарушенности с глубиной обусловлена прежде всего последовательной сменой литотипов (от ювитов через рисчорриты к хибинитам), тогда как локальные отклонения от этой тенденции определяются тектоническими нарушениями и структурными особенностями отдельных разновидностей пород.

Анализ изменения физико-механических свойств пород с глубиной их залегания

По результатам испытаний образцов 20 керновых проб (пробы пронумерованы по порядку с увеличением глубины) определены значения их плотности, пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении. Распределение этих значений в зависимости от глубины залегания пород показано на рис. 4–6.

На основе полученных экспериментальных данных установлено, что плотность изучаемых скальных пород (рис. 4) незначительно варьируется с глубиной (в среднем в пределах от 2,60 до 2,70 г/см³) и не имеет выраженной тенденции изменения. Исключение составляет дайка тингуаита, значение плотности которой равно в среднем

а) б)

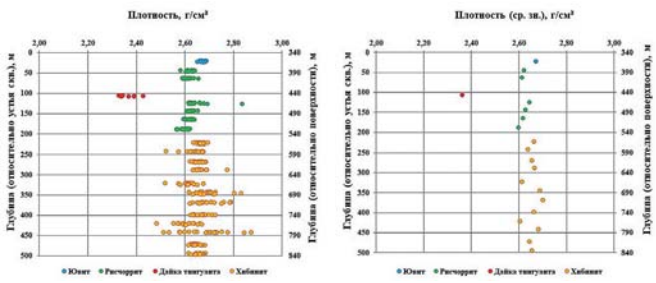


Рис. 4
Изменение значений плотности изучаемых скальных пород в зависимости от глубины залегания:
а – полный набор данных;
б – усредненные значения по пробам

Fig. 4
Changes in the density values of the studied hard rocks as a function of the burial depth:
а – complete data set;
б – average values or sample tests

а) б)

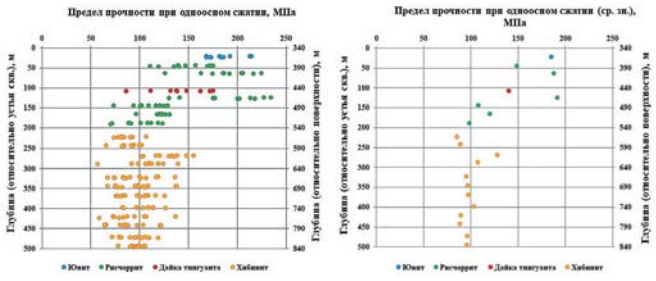


Рис. 5
Изменение значений пределов прочности при одноосном сжатии изучаемых скальных пород в зависимости от глубины залегания:
а – полный набор данных;
б – усредненные значения по пробам

Fig. 5
Changes in the uniaxial compressive strength values of the studied hard rocks as a function of the burial depth:
а –complete data set;
б – average values for sample tests

а) б)

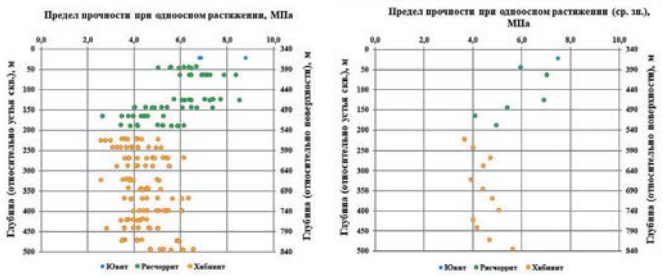


Рис. 6
Изменение значений пределов прочности при одноосном растяжении изучаемых скальных пород в зависимости от глубины залегания: а – полный набор данных; б – усредненные значения по пробам

Fig. 6
Changes in the tensile strength values of the studied hard rocks as a function of the burial depth: a – complete data set; б – average values for sample tests

2,36 г/см^3. Коэффициенты вариации значений изучаемого параметра по пробам изменяются от 0,4–0,6% (ювит, часть проб рисчоррита и хибинита) до 3,4% (проба №18, хибинит). В целом, плотность скальных пород в пределах отобранных проб изменяется незначительно (среднее значение коэффициента вариации по всем пробам составляет 1,1%), а коэффициент вариации, равный 3,4% для пробы №18, может свидетельствовать о наличии как более, так и менее плотных включений.

По результатам испытаний образцов пород при одноосном сжатии выявлено (см. рис. 5), что на глубине от 20,0 до 140,0 м находится зона с высокопрочными ювитами и рисчорритами. Значения их пределов прочности в среднем изменяются от 150 до 192 МПа. Дайка тингуаита на этом участке имеет прочность при сжатии 141 МПа. На глубине от 140,0 до 501,0 м наблюдается уменьшение прочностных свойств исследуемых пород. Значение прочности при сжатии пород на этом участке в среднем составляет порядка 100 МПа. Коэффициент вариации значений прочности на глубине от 20,0 до 140,0 м изменяется в пределах от 9,1 (ювит) до 15,0–18,5% для проб рисчоррита и 20,4% для дайки тингуаита, а на глубине ниже 140,0 м – от 8,0 (пробы рисчоррита и хибинита) до 24,6% (проба №17, хибинит).

В ходе испытаний образцов пород при растяжении установлено (см. рис. 6), что наиболее прочные породы (ювит и рисчоррит) залегают на глубине от 20,0 до 140,0 м. Значения их пределов прочности при растяжении составляют в среднем от 6,0 до 7,5 МПа. На глубине ниже 140,0 м прочность исследуемых пород уменьшается и в среднем составляет 4,6 МПа. Коэффициент вариации значений прочности при растяжении изменяется в пределах от 9,2 (рисчоррит) до 15,1% (ювит) на глубине залегания от 20,0 до 140,0 м, а на глубине от 140,0 до 501,0 м – от 8,3 до 23,2% (хибинит). Средняя величина коэффициентов вариации значений прочности при сжатии и растяжении составила 16,0 и 15,7% соответственно, что, в целом, свидетельствует об умеренной вариабельности прочностных показателей и относительной неоднородности изучаемых проб скальных пород.

Обсуждение результатов

По результатам геомеханического описания керна субвертикальной скважины глубиной заложения 340,0 м от дневной поверхности и длиной 501,0 м выявлено, что изучаемый скальный массив характеризуется высоким качеством пород и низкой степенью структурной нарушенности, что подтверждается соотношением интервалов со значением RQD больше 90% (более 90% длины скважины) и количеством трещин на метр в среднем не превышающим 1–4 шт. При этом выделяются три локальные разломные зоны (зоны дробления) мощностью до 1,0–2,0 м в ювитах (на глубинах 7,4 и 14,0 м) и хибинитах (на глубине 433,0 м) с резким снижением значений RQD и, соответственно, ростом количества трещин FF/m.

Отдельного внимания заслуживают участки с признаками дискования керна, выявленные в рисчорритах и хибинитах. Они прослеживаются в интервалах глубин от 130,0 до 320,0 м от устья скважины, при этом не имеют пространственной приуроченности к участкам повышенных значений FF/m: массив в таких зонах можно охарактеризовать как монолитный. Таким образом, прямая связь между интенсивностью дискования и частотой трещин в пределах изученного разреза отсутствует.

По результатам проведенных лабораторных исследований керна установлено, что значения плотности изучаемых скальных пород с увеличением глубины залегания варьируются незначительно в среднем от 2,60 до 2,70 г/см^3 и не имеют четко выраженной тенденции изменения. Значения же пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении с глубиной уменьшаются.

На рис. 7 представлено распределение значений пределов прочности при сжатии пород вдоль профиля скважины с наложением зон разломов, дробления и дискования.

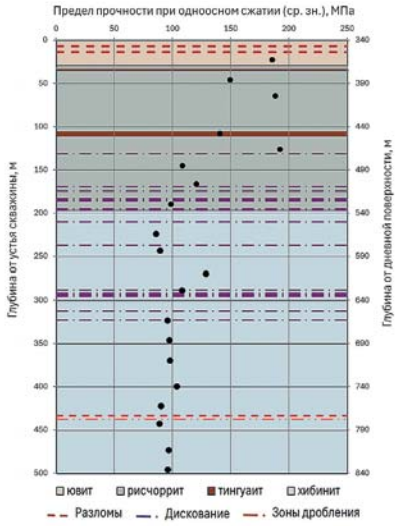


Рис. 7
Распределение значений пределов прочности при одноосном сжатии пород вдоль профиля субвертикальной скважины апатит-нефелинового месторождения Хибинского массива

Fig. 7
Distribution of uniaxial compressive strength values of rocks along the borehole profile of the apatite-nepheline deposit of the Khibiny massif

При анализе распределения значений прочности пород с глубиной (см. рис. 7) можно отметить, что начиная с глубины порядка 140,0 м от устья скважины предел прочности пород при одноосном сжатии снижается в среднем на 40%. Такое изменение прочности главным образом связано со сменой литотипов пород (с рисчоррита на хибинит). Однако оно фиксируется и в пределах однородной толщи

рисчорритов, в частности, совпадающей с зоной дискования пород. Это позволяет предположить, что причиной дискования является ослабление породного массива, обусловленное иными факторами (вероятно, влиянием механизмов выветривания и структурными особенностями пород).

Таким образом, с увеличением глубины для условий Хибинского массива в окрестности исследуемой субвертикальной скважины возрастает индекс качества массива, уменьшается количество трещин на метр, снижаются значения пределов прочности пород при сжатии и растяжении, тогда как их значения плотности в среднем составляют 2,64 г/см^3 и не претерпевают значительных изменений (за исключением дайки тингуаита).

Заключение

В результате выполненной работы на примере одного из апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива получены новые данные об изменении физико-механических свойств горных пород и их трещиноватости с глубиной залегания.

Установлено, что изучаемый скальный массив характеризуется высоким качеством пород и низкой степенью структурной нарушенности (интервалы со значением RQD больше 90% составляют более 90% длины всей скважины). По мере углубления наблюдается переход от умеренно трещиноватых и неоднородных пород верхней части разреза к практически монолитным породам нижних горизонтов, что связано со сменой литотипов: наиболее трещиноватые интервалы приурочены к ювитам и тингуаитовым дайкам, тогда как рисчорриты и особенно хибиниты характеризуются высокой степенью монолитности, что важно при перспективной оценке условий ведения горных работ и проектировании подземных сооружений.

Выявлены три локальные разломные зоны (зоны дробления) мощностью до 1,0–2,0 м в ювитах (на глубинах 7,4 и 14,0 м) и хибинитах (на глубине 433,0 м) с резким снижением значений RQD и, соответственно, ростом количества трещин FF/m.

Показано, что дискование керна наблюдается в интервалах участков пород с пониженными значениями прочности и практически не коррелирует с наличием естественной трещиноватости, что дополняет базу знаний о существующих геомеханических условиях в пределах месторождения и массива пород.

По результатам проведенных лабораторных исследований керна установлено, что значения плотности изучаемых скальных пород с увеличением глубины залегания варьируются незначительно и не имеют четко выраженной тенденции изменения, а значения пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении пород уменьшаются на глубине от 340,0 до 480,0 м от дневной поверхности, а затем до глубины 841,0 м остаются в среднем на одном уровне (100 и 4,6 МПа соответственно). Изменение прочностных свойств главным образом связано со сменой литотипов пород, но также возможно влияние механизмов выветривания и структурных особенностей пород.

Полученные данные справедливы для исследуемого участка массива пород в окрестности субвертикальной скважины. Для выявления закономерностей изменения физико-механических свойств пород и их трещиноватости с увеличением глубины залегания планируется проведение дополнительных исследований в пределах Хибинского массива и месторождений Кольского региона.

Список литературы / References

1. Попов В.Н., Сильченко О.Б., Парамонова М.С. Об изменении физико-механических свойств горных пород с глубиной залегания. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2011;(5):108–117. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2011/5/Popov_5_2011.pdf (дата обращения: 14.04.2026).
Popov V.N., Silchenko O.B., Paramonova M.S. On the changes of physico-mechanical properties of rocks with depth of a lying. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2011;(5):108–117. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2011/5/Popov_5_2011.pdf (accessed: 14.04.2026).
2. Цой П.А., Усольцева О.М. Изменение механических свойств горных пород в зависимости от глубины залегания. В кн.: *Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии: тезисы докладов междунар. конф., г. Томск, 6–10 сентября 2021 г.* Томск: Изд-во ТГУ; 2021. С. 80. https://doi.org/10.17223/978-5-907442-03-0-2021-046
3. Lu Y., Li C., He Z., Gao M., Zhang R., Li C., Xie H. Variations in the physical and mechanical properties of rocks from different depths in the Songliao Basin under uniaxial compression conditions. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources.* 2020;6(3):43. https://doi.org/10.1007/s40948-020-00163-z
4. Wang H., Sun B., Cao C., Yu S., Wang H., Yuan Y., Zhong H. A comprehensive study on in situ stress field characteristics and changes in rock mechanical properties in deep mines in northeastern Yunnan, China. *Deep Underground Science and Engineering*. 2024;4(2):241–254. https://doi.org/10.1002/dug2.12124
5. Zhao Y., Wang X., Guo Y., Danesh N.N., Jiang Y. Mechanical properties and brittleness characteristics of sandstone from different burial depths. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources.* 2022;8(5):165. https://doi.org/10.1007/s40948-022-00470-7
6. Lanaro F., Sato T., Nakama S. Depth Variability of compressive strength test results of Toki Granite from Shobasama and Mizunami construction sites, Japan. *Rock Mechanics and Rock Engineering.* 2009;42(4):611–629. https://doi.org/10.1007/s00603-008-0017-x
7. Peng K., Liu Z., Zou Q. et al. Static and dynamic mechanical properties of granite from various burial depths. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019;52(10):3545–3566. https://doi.org/10.1007/s00603-019-01810-y

8. Abd El Aal A., Al Zamana Y., Dunquwah T., Alsalmi O., Hussain J., Iqbal J. et al. Depth variations as effective indicators for strength variation of Najran granites, Najran region, Saudi Arabia. *Frontiers in Materials.* 2025;12:1382313. https://doi.org/10.3389/fmats.2025.1382313

9. Zhang Z., Xie H., Zhang R., Zhang Z., Gao M., Jia Z., Xie J. Deformation damage and energy evolution characteristics of coal at different depths. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019;52(5):1491–1503. https://doi.org/10.1007/s00603-018-1555-5

10. Li D., Luo P., Zhu Z., Fang X., Zhou A., He X., Ma J. Experimental study on tensile and compressive mechanical properties of rocks from different depths at a deep mine. *Journal of Engineering Geology.* 2022;32(01):86–95. (In Chinese) https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2022-0460

11. Дунаев А.В. Характер изменения трещиноватости пород ковдорского апатит-магнетитового месторождения с глубиной. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2010;(3):130–136. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2010/3/Dunaev_3_2010.pdf (дата обращения: 14.04.2026).
Dunaev A.V. The behavior of fracturing of apatite-magnetite deposit of Kovdorskiy deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2010;(3):130–136. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2010/3/Dunaev_3_2010.pdf (accessed: 14.04.2026).

12. Боос И.Ю., Патачаков И.В., Гришин А.А., Абдуллаева А.А., Разин А.И., Актелова А.Ю. Изменчивость интенсивности трещиноватости с глубиной на Удерейском месторождении. *Московский экономический журнал*. 2020;(9):115–124.
Boos I.Yu., Putchkov I.V., Grishin A.A., Abdullayeva A.A., Razin A.I., Akalova A. Variability of fracture intensity with depth at Udereyskoe field. *Moscow Economic Journal*. 2020;(9):115–124. (In Russ.)

13. Song F., Dong Y.-H., Xu Z.-F., Zhou P.-P., Wang L.-H., Tong S.-Q., Duan R.-Q. Granite microcracks: Structure and connectivity at different depths. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2016;124:156–168. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.04.023

14. Жиров Д.В. Морфоструктурные критерии контроля трещиноватости интрузивных пород: методические и прикладные аспекты реконструкции стресс-состояний. В кн.: *Сашурин А.Д. (ред.) Геомеханика в горном деле: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, г. Екатеринбург, 1–3 октября 2013 г.* Екатеринбург: ИГД УрО РАН; 2014. С. 96–105.

15. Шпаков П.С., Юнаков Ю.Л., Шпакова М.В., Чумляков В.А. Влияние трещиноватости на устойчивость бортов карьера и ее изменчивость по площади и глубине на Горевском месторождении. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(11):32–40. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2015/11/32_40_11_2015.pdf (дата обращения: 14.04.2026).
Shpakov P.S., Yunakov Yu.L., Shpakova M.V., Chumliakov V.A. Influence on stability fractured pit and its variability in size and depth on Gorevsky field. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(11):32–40. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2015/11/32_40_11_2015.pdf (accessed: 14.04.2026).

16. Сергунин М.П., Дарбинян Т.П. Выделение параметров трещиноватости массива горных пород из геологических моделей, построенных в современных геоинформационных системах (на примере Micromine). *Горный журнал*. 2020;(1):39–42. https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.07
Sergunin M.P., Darbinyan T.P. Identification of rock mass jointing parameters in geological models in modern geoinformation systems (in terms of Micromine). *Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):39–42. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.07

17. Deere D.U. Technical description of rock cores for engineering purpose. *Rock Mechanics and Engineering Geology*. 1963;1(1):16–22.

Информация об авторах
Кузнецов Николай Николаевич – кандидат технических наук, руководитель лаборатории инструментальных исследований состояния горных пород Арктической зоны РФ, отдел геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-0624-4351; e-mail: n.kuznecov@ksc.ru
Кулькова Мария Сергеевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории прогноза удароопасности рудных месторождений, отдел геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-4417-0223; e-mail: m.kulkova@ksc.ru

Information about the authors
Nikolai N. Kuznetcov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Instrumental Study of Rock's State of the Russian Arctic Region, Department of Rock Mechanics, Mining Institute, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-0624-4351; e-mail: n.kuznecov@ksc.ru
Maria S. Kulkova – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Associate, Laboratory for Forecasting the Rockburst hazard of ore deposits, Department of Rock Mechanics, Mining Institute, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-4417-0223; e-mail: m.kulkova@ksc.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 17.05.2026
Поступила после рецензирования: 22.06.2026
Принята к публикации: 13.07.2026

Article info
Received: 17.05.2026
Revised: 22.06.2026
Accepted: 13.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-265-271

Исследование сейсмического режима и удароопасности Кукисвумчоррского месторождения на глубоком горизонте +10 м

С.А. Жукова[1, 2] ✉, В.С. Онуприенко[3], А.А. Стрешнев[3]
[1] Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация
[2] Мурманский арктический университет, Апатитский филиал, г. Апатиты, Российская Федерация
[3] Кировский филиал АО «Апатит», г. Кировск, Российская Федерация
✉ svetlana.zhukowa@yandex.ru

Резюме: В статье представлены результаты исследования сейсмичности при увеличении глубины горных работ на примере Кукисвумчоррского апатит-нефелинового месторождения (Хибинский массив). Исследование основано на статистической оценке сейсмического режима месторождения в целом и прогнозной оценке состояния блока 9/12 на глубоком горизонте +10 м. Для описания состояния динамики сейсмического режима использованы основные уровни сейсмичности: экстремально высокий, высокий, фоновый повышенный, фоновый средний и фоновый пониженный. Для прогноза состояния блока 9/12 проанализирована геомеханическая ситуация на соседних блоках 12/15 и 15/18, где ведутся горные работы. С помощью методов регионального прогноза удароопасности: аналитическое (численное) моделирование напряженного состояния, визуальное обследование горных выработок и по результатам непрерывного контроля сейсмичности были выявлены зоны с повышенной сейсмической активностью и высоким уровнем напряженно-деформированного состояния приконтурной части массива на глубоких горизонтах отработки (+25 м; +50 м; +75 м гор. +10 м). Визуальный осмотр выработок подтвердил образование локальных участков с признаками проявления горного давления. В ходе пространственно-временной оценки аномалий сейсмичности установлено, что сейсмичность мигрирует вместе с продвижением фронта горных работ, в том числе и на глубину. За последние 9 лет при переходе горных работ на глубокие горизонты наблюдается проявление мощных геодинамических явлений на нижних горизонтах отработки. Предложены профилактические мероприятия для снижения удароопасности.

Ключевые слова: удароопасность, геодинамическая безопасность, сейсмический мониторинг, наведенная сейсмичность, фоновая сейсмичность, подземные горные работы, Хибинский массив, Кукисвумчоррское месторождение, уровни сейсмичности

Для цитирования: Жукова С.А., Онуприенко В.С., Стрешнев А.А. Исследование сейсмического режима и удароопасности Кукисвумчоррского месторождения на глубоком горизонте +10 м. *Горная промышленность*. 2026;(5):265–271. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-265-271

A study into the seismic settings and rock-bump hazard at the Kukisvumchorr apatite-nepheline deposit at the deep +10 m level

S.A. Zhukova[1, 2] ✉, V.S. Onuprienko[3], A.A. Streshnev[3]
[1] Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation
[2] Murmansk Arctic University, Branch, Apatity, Russian Federation
[3] Kirovsk Branch of JSC Apatit, Kirovsk, Russian Federation
✉ svetlana.zhukowa@yandex.ru

Abstract: This article presents the results of studying seismic activity with increasing mining depth using the Kukisvumchorr apatite-nepheline deposit (the Khibiny Mountain Range) as a case study. The study is based on a statistical assessment of the seismic settings of the deposit as a whole and a predictive assessment of the state of Block 9/12 at the deep +10 m level. The following main seismicity levels were used to describe the dynamics of the seismic settings: extremely high, high, elevated background, average background, and reduced background. Geomechanical situation in adjacent Blocks 12/15 and 15/18, where mining operations are underway, was analyzed to forecast the condition of Block 9/12. Zones with higher seismic activity and

a high level of stress-and-strain state in the boundary part of the mass at deep mining levels (+25 m; +50 m; +75 m; +10 m) were identified using the methods of regional rock-burst hazard forecasting, i.e. analytical (numerical) stress state modeling, visual inspection of the mine workings, and the results of continuous seismic monitoring. A visual inspection of the mine workings confirmed the development of localized areas showing signs of rock pressure. A spatiotemporal assessment of the seismic anomalies has shown that seismicity moves along with the advance of the mining front, including the depth changes. Significant geodynamic phenomena have been observed in the lower mining levels over the past 9 years, as mining operations have progressed to the deeper mine levels. Preventive measures have been proposed to reduce the risk of rock bumps.

Keywords: risk of rock bumps, geodynamic safety, seismic monitoring, induced seismicity, background seismicity, underground mining, Khibiny Mountain Range, Kukisvumchorr deposit, seismicity levels

For citation: Zhukova S.A., Onuprienko V.S., Streshnev A.A. A study into the seismic settings and rock-bump hazard at the Kukisvumchorr apatite-nepheline deposit at the deep +10 m level. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):265–271. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-265-271

Введение

Удароопасность пород возникает при совместном влиянии природных и техногенных условий. Базовой причиной служит сочетание высокой хрупкости пород с аномальным тектоническим напряжением массива. На эту основу накладывается комплекс природных факторов (структурно-тектонические, физико-механические и гидрогеологические особенности) и техногенных воздействий (параметры ведения горных работ), что создает итоговое геомеханическое состояние и риск возникновения динамических явлений [1–9]. По мере углубления горных выработок и наращивания интенсивности добычи ожидается существенное изменение геомеханической обстановки в массиве пород. С увеличением глубины разработки природные напряжения в толще горных пород неизбежно меняются. Кукисвумчоррское месторождение, отрабатываемое Кировским рудником Кировского филиала (КФ) АО «Апатит», отнесено к склонным и опасным по горным ударам с высотной отметки +322 м. В настоящее время очистные горные работы ведутся на глубине от поверхности около 720–750 м. Наблюдения подтверждают прямую зависимость между глубиной горных работ и масштабами геомеханических нарушений. Мощность зон хрупкого разрушения в кровле выработок возрастает с 0,5–0,7 м на верхних горизонтах до 1,5–2 м на глубоких, одновременно увеличиваются распространенность и частота динамических проявлений горного давления. Прогноз удароопасности проводится для того, чтобы обнаружить участки горного массива, где существует риск возникновения горных ударов. Эту работу выполняют специалисты службы прогноза и предотвращения горных ударов (СППГУ) КФ АО «Апатит».

Организация работ по оценке удароопасности осуществляется с учётом нескольких важных факторов. Прежде всего учитываются результаты регионального прогноза, который даёт общее представление о состоянии горного массива. Кроме того, важную роль играют визуальные наблюдения за состоянием горных выработок.

Эксплуатация глубоких горизонтов определяет также эффект взаимного влияния удароопасных зон, что требует проведения анализа не изолированно, а в масштабе всего района наблюдений. Следовательно, при оценке региональной удароопасности прогноз должен быть направлен не только на предсказание единичного сильного события, но и на анализ кумулятивного эффекта от множества слабых явлений. Критически важными прогностическими параметрами становятся пиковые значения мощности сейсмической активности и точные пространственные координаты формирующихся опасных участков. Целью работы является исследование геомеханического состояния, сейсмического режима и удароопасности Кукисвумчоррского месторождения при увеличении глубины отработки. Для достижения цели выполнена статистическая оценка сейсмического режима месторождения и прогнозная оценка состояния блока 9/12 на глубоком горизонте +10 м Кукисвумчоррского месторождения. Для описания состояния сейсмичности построена эмпирическая функция распределения выделившейся сейсмической энергии для определенных временных интервалов и слоев шахтного поля, использованы основные уровни сейсмичности: экстремально высокий, высокий, фоновый повышенный, фоновый средний и фоновый пониженный [10]. Для прогноза состояния блока 9/12 проанализирована геомеханическая ситуация на соседних блоках 12/15 и 15/18, где активно ведутся горные работы.

Материалы и методы

Кукисвумчоррское месторождение апатит-нефелиновых руд открыто в 1921 г., добыча полезного ископаемого началась с 1929 г. Кировским рудником. Северная граница месторождения детерминирована зоной Кукисвумчоррского радиального разлома. К югу от него наблюдается постепенный и непрерывный переход рудного тела сначала в месторождение Юкспоррское, а затем в «Апатитовый Цирк» и «Плато Расвумчорр» [11]. В совокупности эта система образует единую залежь, простирание которой в общей протяженности достигает приблизительно 12 км.

Важнейшим фактором, определяющим современное напряженно-деформированное состояние района, является развитие сдвиговой тектоники. Именно она, вероятно, послужила основной причиной формирования устойчивого поля повышенных субгоризонтальных напряжений, ориентированных согласно простиранию рудных тел. На месторождениях Кировского рудника смещения по сдвиговым нарушениям также имели преимущественно субгоризонтальный кинематический характер [12].

Общая тенденция для всех месторождений Хибинского массива – увеличение действующих напряжений с глубиной. На Кукисвумчоррском месторождении это проявляется следующим образом: на горизонте +320 м максимальные напряжения составляют около 30 МПа, на +250 м – около 40 МПа, а на горизонтах +170 и +90 м – около 50 и

60 МПа соответственно. Согласно нормативным документам, месторождение считается опасным по проявлению горных ударов, начиная с высотной отметки +322 м. Все действующие горизонты относятся к глубоким.

В период с 2017 по 2025 г. на Кукисвумчоррском месторождении добыча велась на горизонтах +250, +170 +90 и +10 м. В настоящее время на Кировском руднике используется система подэтажного обрушения с торцевым выпуском руды. Важнейшим фактором, определяющим устойчивость горных выработок и эффективность систем разработки на подземных рудниках КФ АО «Апатит», является высокий уровень тектонической напряженности массива горных пород. Вокруг отработанного пространства в массиве формируются области повышенных напряжений. Методика оценки напряженного состояния для целей проектирования горных работ основывается на последовательном определении главных напряжений. Интенсивность динамических проявлений горного давления (стреляние, шелушение, динамическое заколообразование) распределяется крайне неоднородно не только в пределах месторождения, но и на разных горизонтах. Наиболее активные формы деструкции наблюдаются на локальных участках, приуроченных преимущественно к ийолит-уртитам лежачего бока рудного тела. Эта литологическая ассоциация демонстрирует повышенную склонность к хрупкому разрушению в условиях действующего поля напряжений.

Результаты

В работе использованы каталоги с 2017 по 2025 г., полученные по данным непрерывного мониторинга сейсмичности подземных рудников КФ АО «Апатит», который осуществляется с помощью автоматизированной системы контроля сейсмичности массива (АСКСМ), способной регистрировать геодинамические явления с энергией от 10^3 Дж [13].

Для исследования динамики сейсмического режима в работе применялась адаптированная методика В.А. Салтыкова на основе статистической оценки уровня сейсмичности [10]. Для оценки состояния сейсмичности построена эмпирическая функция распределения выделившейся сейсмической энергии для разных временных и пространственных интервалов. Шахтное поле рудника было разделено на слои по высотным отметкам, соответствующим горизонтам отработки. Для статистической оценки уровня сейсмичности рассчитаны значения функции распределения:

$$F(K) = P(\lg E < K),$$

где E – сейсмическая энергия, выделившаяся за определённый временной интервал. Интервалы между квантилями функции распределения выделившейся сейсмической энергии формируют шкалу, включающую пять уровней сейсмичности для Хибинских месторождений в условиях техногенного воздействия:

– экстремально высокий: $F(0{,}995) < \lg E$;
– высокий: $F(0{,}975) < \lg E < F(0{,}995)$;
– фоновый повышенный: $F(0{,}85) < \lg E < F(0{,}975)$;
– фоновый средний: $F(0{,}15) < \lg E < F(0{,}85)$;
– фоновый пониженный: $F(0{,}025) < \lg E < F(0{,}15)$.

Построены номограммы распределения сейсмической энергии для разных временных интервалов и пространственных слоев: на рис. 1, *а* представлены уровни сейсмичности для всей зоны контроля АСКСМ (выс. отм. –50 – +550 м) на Кукисвумчоррском месторождении, на остальных – для глубоких горизонтов отработки. На графиках показаны нижние границы уровней, т.е. при каких значениях энергии происходит переход на тот или иной уровень сейсмичности. По всей зоне контроля месторождения рост экстремально высокого уровня сейсмоактивности наблюдается в 2018, 2020, 2022 и 2025 гг.

Если ранее экстремальным уровнем считали происходящие события с энергетическим классом $K = 6$, то за годы углубления горных работ наблюдается повышение энергии событий и теперь чаще события с $K = 7–8$ и даже 9 происходят на нижних горизонтах отработки пока в глубине массива.

По всплескам на графиках можно отметить повышение нижней границы высокого уровня сейсмичности: на гор. +250 м в 2018, 2022 и в 2024 гг., на гор. 170 м в 2018, 2022,

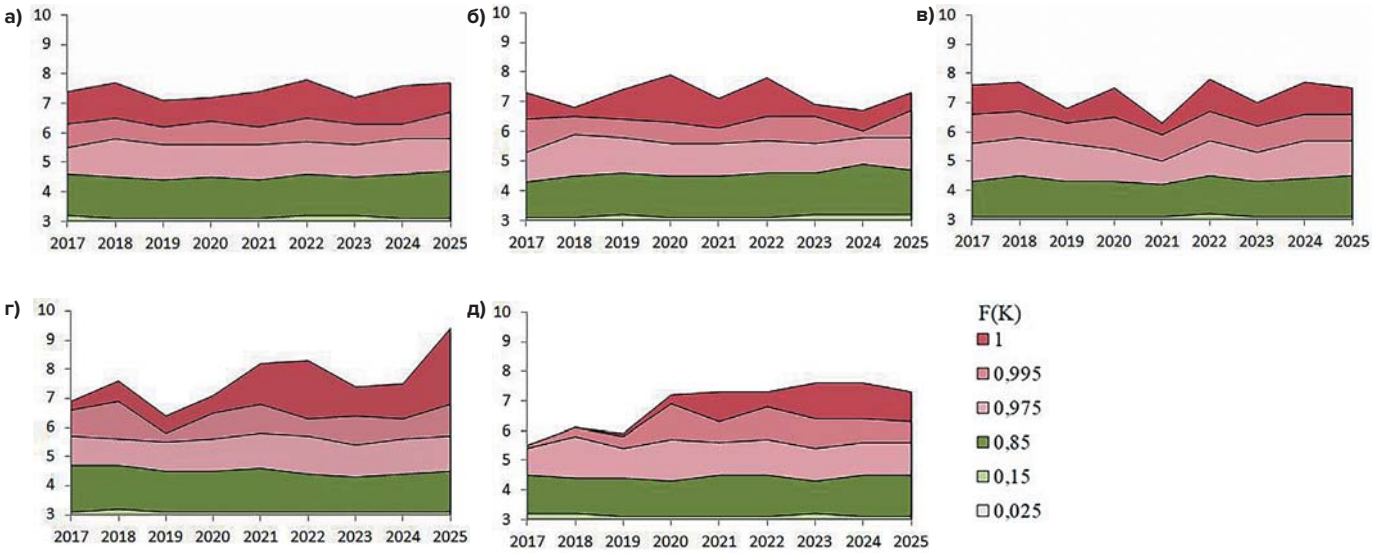


Рис. 1
Номограммы распределения сейсмической энергии (по оси Y – энергетический класс сейсмособытий): а – зона контроля; б – гор. +250 м; в – гор. +170 м; г – гор. +90 м; д – гор. +10 м

Fig. 1
Nomographic charts of seismic energy distribution (along the Y-axis: energy class of seismic events): а – the monitored zone; б – +250 m Level; в – +170 m Level; г – +90 m Level; д – +10 m Level

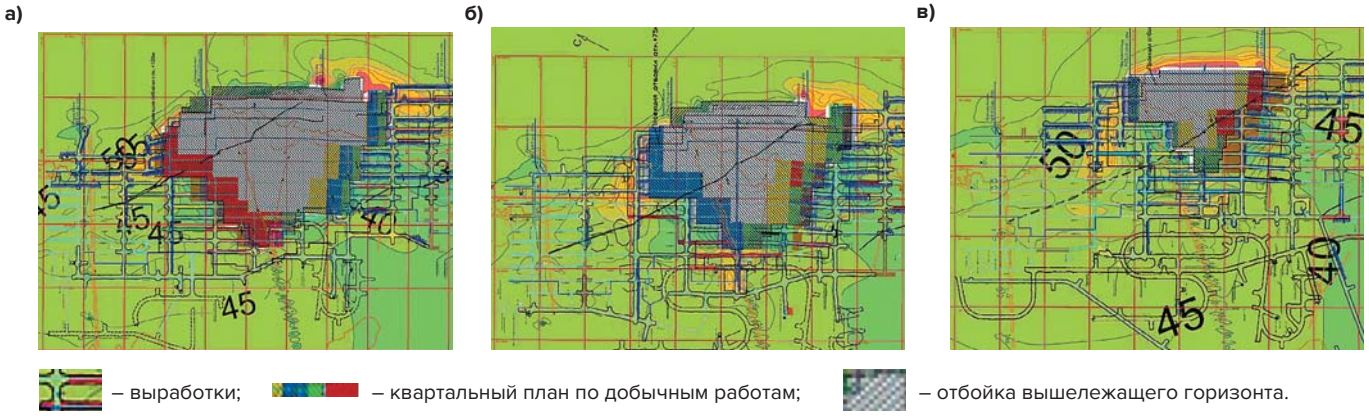


Рис. 2
Результаты численного моделирования напряженного состояния массива на конец ноября 2025 г. с зонами различного уровня напряжений (гор. +10 м): а – отм. +75 м; б – отм. +50 м; в – отм. +25 м

Fig. 2
Results of numerical modeling of the stress state of the rock mass as of the end of November 2025, showing zones with different stress levels (+10 m Level): а – +75 m Level; б – +50 m Level; в – +25 m Level

2024 гг., на гор. +90 м в 2021, 2022, в 2024 и 2025 гг., на гор. +10 м – в 2018, 2020, 2022, 2024 гг. Видно, что при переходе горных работ на глубокие горизонты отработки с годами растет уровень и фоновой сейсмичности: на гор. +250 м в 2017 г. нижнюю границу повышенного фонового уровня сейсмичности составляли события с $K = 4{,}3$ и к 2024 г. энергия событий выросла до $K = 4{,}9$. На гор. +170 м нижняя граница повышенного фонового уровня сейсмичности с 2017 по 2025 г. изменилась с $K = 4{,}3$ до $K = 4{,}5$. На более глубоких горизонтах отработки это прослеживается еще более явно: на гор. +90 м в 2017 г. граница повышенного фонового уровня сейсмичности уже – $K = 4{,}7$, однако к 2025 г. энергия событий снизилась до $K = 4{,}5$, видимо, в связи с миграцией сейсмичности на нижний горизонт +10 м, здесь события повышенного фонового уровня имеют энергетический класс $K = 4{,}5$ с 2017 г.

В ходе пространственно-временной оценки аномалий сейсмичности установлено, что сейсмичность мигрирует вместе с продвижением фронта горных работ, в том числе и на глубину. Установлено, что за последние 9 лет при переходе горных работ на глубокие горизонты наблюдается проявление мощных геодинамических явлений на нижних горизонтах отработки.

Известно, что частота возникновения во времени и в пространстве очагов сейсмических событий разной мощности напрямую зависит от изменения геомеханического состояния массива горных пород [14; 15].

По данным численного моделирования напряженного состояния массива горных пород Кукисвумчоррского месторождения для высотных отметок +25 м, +50 м, +75 м на сентябрь, октябрь и ноябрь 2025 г. выделены зоны с различным уровнем сжимающих напряжений: зона с высоким уровнем напряжений – 60 МПа и выше (на карте выделена красным цветом); среднего уровня напряжений – 50–55 МПа (желтым цветом); умеренно низких напряжений – 45 МПа (светло-зеленым цветом); минимальные напряжения – 40 МПа и ниже (зеленым цветом). Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород получены в программной среде Sigma GT [16].

Зона высоких напряжений на отм. +25 м с сентября по ноябрь приурочена к висячему боку рудного тела и охватывает наибольшую площадь (особенно в ноябре). На отм. +50 м данная зона расположена на правом фланге шахтного поля в области отбойки на границе извлечённого рудного тела и вмещающих пород и незначительно изменяется в размерах. На отм. +75 м в сентябре зона высоких напряжений в этом же районе охватывает три локальные области малого размера, в октябре две из них объединяются и тем самым увеличивают площадь высоких напряжений, которая в ноябре еще больше увеличивается. На рис. 2 представлены результаты численного моделирования напряженного состояния массива на конец ноября 2025 г.

Зоны со средним уровнем напряжений отмечены в районе разломных нарушений слева от границы отбойки, их образование, видимо, связано с ведением проходческих работ.

Таким образом, прослеживается тенденция формирования зон с высоким и средним уровнем напряжений в области очистного пространства, в висячем боку рудной залежи и в области влияния геологических нарушений.

Примером проявления повышенного напряженного состояния в массиве служат различные нарушения контура выработок. Специалистами СППГУ проведен визуальный осмотр выработок на исследуемом горном участке. На сопряжении выработок были выявлены признаки в виде отслоений горной массы, большей частью представленной нединамическими заколами изометрической формы, приуроченных к системам разноориентированных трещин. Следует отметить, что часто выработки с внешними признаками проявления горного давления в динамической форме проходят вблизи тектонических нарушений, представленных окисленными зонами различной мощности, мончикитовыми дайками или эгириновыми жилами. Такие участки массива являются зонами реализации геодинамических явлений, в связи с этим необходимо проводить непрерывный сейсмический мониторинг.

Проанализирован сейсмический режим исследуемого участка. В сентябре, октябре и ноябре 2025 г. АСКСМ зарегистрировано 33, 38 и 53 сейсмособытия с энергией $E \geq 10^3$ Дж, суммарная выделившаяся сейсмическая энергия составляет $2{,}7 \cdot 10^5$, $8 \cdot 10^5$ и $2{,}7 \cdot 10^6$ Дж соответственно.

7 сентября 2025 г. произошло сейсмособытие с энергией

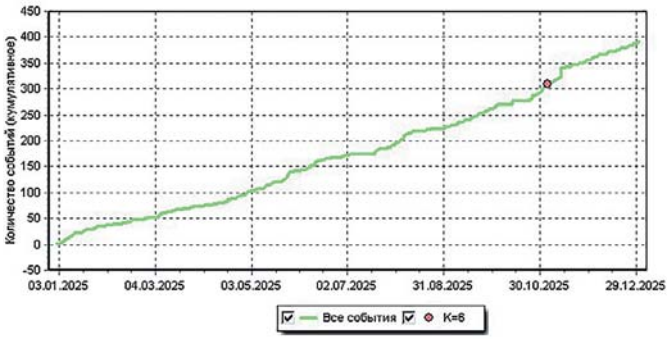


Рис. 3
Временной ход сейсмичности в районе Кукисвумчоррского месторождения в 2025 г.

Fig. 3
Time variations in seismicity in the area of the Kukisvumchorr deposit in 2025.

1,3·10^5 Дж, 12 и 30 октября слоцировано два сейсмособытия с E = 10^5 Дж, 4 ноября произошло сильное сейсмособытие с E = 2,1·10^6 Дж. На рис. 3 показан временной ход сейсмичности исследуемого района горизонта +10 м – кумулятивный график, на котором отмечен момент проявления сильного сейсмического события. На протяжении всего периода наблюдается возрастание сейсмичности.

Концентрация сейсмических событий приурочена к лежачему боку рудной залежи. Количество событий с сентября по ноябрь увеличивается в области, ограниченной субвертикальными структурными нарушениями (рис. 4) в блоках 12/15 и 15/18, где ведутся горные работы. Схожая ситуация прослеживается и в блоке 9/12, где у геологического нарушения уже возникают сейсмические события. Можно ожидать развитие сейсмичности при приближении фронта горных работ к блоку 9/12.

Таким образом, были выявлены зоны с повышенной сейсмической активностью и высоким уровнем напряженно-деформированного состояния приконтурной части массива на глубоких горизонтах отработки (+25 м; +50 м; +75 м гор. +10 м). Визуальный осмотр выработок подтвердил образование локальных участков с признаками проявления горного давления. Исследование аномалий сейсмичности и данных об изменении НДС для выявления опасных участков важно для обеспечения безопасного ведения горных работ.

В связи с этим для работ в блоке 9/12 по методике регионального прогноза удароопасности рекомендуется:

– применить метод разгрузочной щели;

– обеспечить проведение периодического контроля по оценке удароопасности массива горных пород инструментальным методом на период отработки запасов;

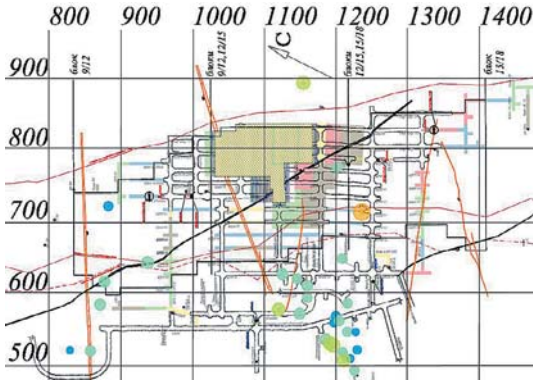
– обеспечить проведение визуального осмотра состояния горных выработок после производства работ по обезопашиванию;

– повысить частоту обследования зоны (в случае ухудшения состояния горной выработки по фактору горного давления, интенсификации внешних признаков динамических проявлений горного давления незамедлительно ставить в известность специалистов отдела СППГУ);

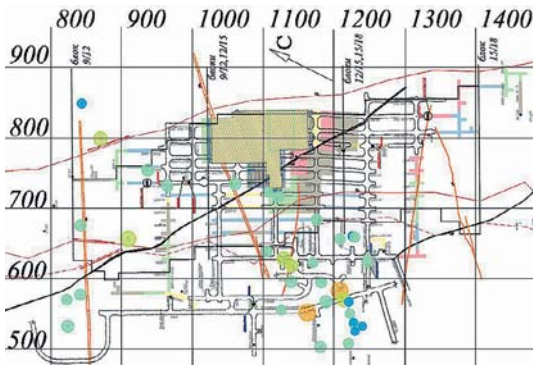
– при ведении работ проводить своевременные расчеты действующих напряжений;

– проводить опережающее бурение разгрузочных скважин и усилить выработку при помощи анкерной и набрызг-бетонной крепи.

а)



б)



в)

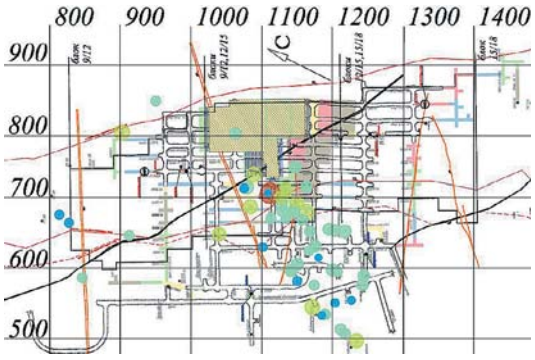


Рис. 4
Распределение эпицентров сейсмических событий в 2025 г. в пространстве шахтного поля на отм. +25 м гор. +10 м (синие сферы – события с E = 10^3 Дж; зеленые – 10^4 Дж; желто-оранжевые – 10^5 Дж; красные – 10^6 Дж): а – сентябрь; б – октябрь; в – ноябрь

Fig. 4.
istribution of the seismic event foci in 2025 within the mine field at Level of +25 m, +10 m (blue circles – events with E = 10^3 J; green circles – 10^4 J; yellow-orange circles – 10^5 J; red circles – 10^6 J): a – September; б – October; в – November

Заключение

Для оценки и качественного описания сейсмической активности при переходе горных работ на глубокие горизонты для условий подземных рудников КФ АО «Апатит» предложена классификация уровней сейсмичности по адаптированной методике В.А. Салтыкова на основе статистической оценки уровня сейсмичности. По всей зоне контроля месторождения рост экстремально высокого уровня сейсмоактивности отмечен в 2018, 2020, 2022 и в 2025 гг.

Выявлена миграция сейсмичности вместе с продвижением фронта горных работ, в том числе и на глубину. Установлено, что за последние 9 лет при переходе горных работ на глубокие горизонты наблюдается проявление мощных геодинамических явлений энергетического класса K = 7–9 на нижних горизонтах отработки.

Для прогноза состояния блока 9/12 проанализирована геомеханическая ситуация на соседних блоках 12/15 и 15/18, где ведутся горные работы. С помощью методов регионального прогноза удароопасности были выявлены зоны с повышенной сейсмической активностью и высоким уровнем напряженно-деформированного состояния приконтуроной части массива на глубоких горизонтах отработки (+25 м; +50 м; +75 м гор. +10 м).

Выявлены зоны с высоким и средним уровнем напряжений в области очистного пространства, в висячем боку рудной залежи и в области влияния геологических нарушений. Данные зоны характеризуются различным режимом проявления горного давления: во вмещающих породах и в рудной залежи. Установлено, что вокруг отработанного пространства в массиве формируются области повышенных напряжений.

Анализ сейсмического режима исследуемого района показал, что концентрация сейсмических событий приурочена к лежачему боку рудной залежи. Отмечена активизация сейсмичности с сентября по ноябрь в области, ограниченной субвертикальными структурными нарушениями, следует ожидать аналогичной ситуации в блоке 9/12 при приближении фронта горных работ, где у геологического нарушения уже происходят сейсмические события.

Выявленные тенденции формирования сейсмоактивных зон могут быть характерны в дальнейшем и для более глубоких горизонтов.

Проанализировано геомеханическое состояние массива в блоках 12/15, 15/18, на основе этого сделана оценка состояния массива в блоке 9/12 и предложены рекомендации по выбору профилактических мероприятий по снижению удароопасности.

Таким образом, для прогноза геомеханического состояния массива в блоках, к которым подходит фронт работ, необходимо учитывать геологическое строение, зоны концентрации напряжений, сейсмических событий и положения участков активного ведения горных работ. Данная информация способствует положительному результату планирования своевременных профилактических мероприятий по снижению горного давления.

Список литературы / References

1. Козырев А.А., Семенова И.Э., Жукова С.А., Журавлева О.Г. Факторы изменения сейсмического режима и локализации опасных зон при крупномасштабном техногенном воздействии. *Горная промышленность*. 2022;(6):95–102. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-95-102
Kozyrev A.A., Semenova I.E., Zhukova S.A., Zhuravleva O.G. Factors of seismic behavior change and localization of hazardous zones under a large-scale mining-induced impact. *Russian Mining Industry*. 2022;(6):95–102. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-95-102
2. Батугин А.С. Общие закономерности проявления сильных горных ударов и индуцированных землетрясений на участках с предельно напряженным состоянием земной коры. *Горный журнал*. 2021;(1):22–27. https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.04
Batugin A.S. General features of strong rock bursts and induced earthquakes in critical-stress areas of the Earth's crust. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(1):22–27. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.04
3. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г., Куприш О.В. Наведённая сейсмичность в угольных и железорудных районах Кузбасса. *Российский сейсмологический журнал*. 2020;2(3):88–96. https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.3.08
Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Shevkunova E.V., Podkorytova V.G., Kuprish O.V. Induced seismicity in coal and iron ore regions of Kuzbass. *Russian Journal of Seismology*. 2020;2(3):88–96. (In Russ.) https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.3.08
4. Еременко А.А., Мулев С.Н., Штирц В.А. Мониторинг геодинамических явлений микросейсмическим методом при освоении удароопасных месторождений. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2022;(1):12–22. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20220102
Eremenko A.A., Mulev S.N., Shtirts V.A. Microseismic monitoring of geodynamic phenomena in rockburst-hazardous mining conditions. *Journal of Mining Science*. 2022;58(1):10–19. https://doi.org/10.1134/s1062739122010021
5. Ghasemi E., Gholizadeh H., Adoko A.C. Evaluation of rockburst occurrence and intensity in underground structures using decision tree approach. Engineering with Computers. 2020;36(1):213–225. https://doi.org/10.1007/s00366-018-00695-9
6. Song D., He X., Wang E., Li Z., Liu J. *Rockburst Evolutionary Process and Energy Dissipation Characteristics*. Singapore: Springer; 2020. 248 p. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6279-8
7. He M., Cheng T., Qiao Y., Li H. A review of rockburst: Experiments, theories, and simulations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023;15(2):1312–1353. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.07.014
8. Sibson R.H. Preparation zones for large crustal earthquakes consequent on fault-valve action. *Earth, Planets and Space*. 2020;72(1):31. https://doi.org/10.1186/s40623-020-01153-x
9. Nordström E., Dineva S., Nordlund E. Back analysis of short-term seismic hazard indicators of larger seismic events in deep underground mines (LKAB, Kiirunavaara Mine, Sweden). *Pure and Applied Geophysics*. 2020;177(2):763–785. https://doi.org/10.1007/s00024-019-02352-8

10. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки. *Вулканология и сейсмология*. 2011;(2):53–59.
Saltykov V.A. A statistical estimate of seismicity level: the method and results of application to Kamchatka. *Journal of Volcanology and Seismology.* 2011;5(2):123–128. https://doi.org/10.1134/S0742046311020060

11. Иванюк Г.Ю., Горяинов П.М., Пахомовский Я.А., Коноплева Н.Г., Яковенчук В.Н., Базай А.В., Калашников А.О. *Самоорганизация рудных комплексов. Синергетические принципы прогнозирования и поисков полезных ископаемых*. М.: Геокарт-Геос; 2009. 392 с. Режим доступа: https://www.geokniga.org/books/3219 (дата обращения: 19.05.2026).

12. Онохин Ф.М. *Особенности структуры Хибинского массива и апатит-нефелиновых месторождений*. Л.: Наука, Ленингр. отд.; 1975. 106 с. Режим доступа: https://www.geokniga.org/books/9015 (дата обращения: 19.05.2026).

13. Абрашитов А.Ю., Онуприенко В.С., Корчак П.А. Трехуровневая система сейсмического мониторинга массива горных пород Хибинских месторождений апатит-нефелиновых руд. *Горная промышленность*. 2023;(S1):36–42. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-36-42
Abrashitov A.Yu., Onuprienko V.S., Korchak P.A. A three-tier system of seismic rock mass monitoring in the Khibiny apatite-nepheline ore deposits. *Russian Mining Industry.* 2023;(1 Suppl.):36–42. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-36-42

14. Жукова С.А., Журавлева О.Г., Онуприенко В.С., Стрешнев А.А. Оценка уровня сейсмичности по распределению потока сейсмической энергии на глубоких горизонтах Кукисвумчоррского месторождения. *Горная промышленность*. 2024;(5):108–114. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-108-114
Zhukova S.A., Zhuravleva O.G., Onuprienko V.S., Streshnev A.A. Assessment of seismicity level based on seismic energy flow distribution at deep levels of the Kukisvumchorr deposit. *Russian Mining Industry.* 2024;(5):108–114. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-108-114

15. Козырев А.А., Савченко С.Н., Панин В.И., Семенова И.Э., Рыбин В.В., Федотова Ю. В. и др. *Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками*. Апатиты: КНЦ РАН; 2019. 431 с. https://doi.org/10.37614/978.5.91137.391.7

16. Дмитриев С.В., Семенова И.Э., Шестов А.А. Развитие CAE системы численного моделирования НДС SIGMA GT. *Горная промышленность*. 2023;(5S):135–141. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-135-141
Dmitriev S.V., Semenova I.E., Shestov A.A. Advancement of the SIGMA GT CAE system for numerical modeling of the stress-and-strain states. *Russian Mining Industry.* 2023;(5S):135–141. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-135-141

Информация об авторах
Жукова Светлана Александровна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории прогноза удароопасности рудных месторождений, отдел геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; доцент кафедры горного дела, наук о Земле и природообустройства, Апатитский филиал Мурманского арктического университета, г. Апатиты, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-0769-6584; e-mail: svetlana.zhukowa@yandex.ru
Онуприенко Вячеслав Сергеевич – главный инженер, Кировский филиал АО «Апатит», г. Кировск, Российская Федерация; e-mail: VOnuprienko@phosagro.ru
Стрешнев Анатолий Александрович – начальник службы прогноза и предотвращения горных ударов, Кировский филиал АО «Апатит», г. Кировск, Российская Федерация; e-mail: astreshnev@phosagro.ru

Information about the authors
Svetlana A. Zhukova – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Prediction of rockburst hazard of rock deposits, Rock Mechanics Department, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Mining, Earth Sciences and Environmental Management, branch of the Murmansk Arctic University, Apatity, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-0769-6584; e-mail: svetlana.zhukowa@yandex.ru
Vyacheslav S. Onuprienko – Chief Engineer, Kirovsk Branch of JSC Apatit, Kirovsk, Russian Federation; e-mail: VOnuprienko@phosagro.ru
Anatoly A. Streshnev – Department of Rockburst Forecasting and Prevention, Kirovsk Branch of JSC Apatit, Kirovsk, Russian Federation; e-mail: astreshnev@phosagro.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 15.05.2026
Поступила после рецензирования: 23.06.2026
Принята к публикации: 14.07.2026

Article info
Received: 15.05.2026
Revised: 23.06.2026
Accepted: 14.07.2026

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-272-278

Системы среднесрочного планирования открытых и подземных горных работ: единая методика и опыт импортозамещения в компании «АЛРОСА»

В.В. Лаптев[1]✉, Е.Д. Зикрацкая[2]
[1] Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация
[2] АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, Российская Федерация
✉ v-laptev@ksc.ru

Резюме: Статья посвящена разработке и промышленной апробации комплексного подхода к среднесрочному планированию открытых и подземных горных работ в горно-геологической информационной системе «Майнфрэйм». На среднесрочном горизонте предприятие должно одновременно учитывать множество факторов: положение фронта работ, запасы и качество полезного ископаемого, производительность оборудования, транспортную схему, технологические связи, календарные ограничения, требования к объёмам добычи. При ручной подготовке среднесрочного плана эти данные часто собираются из разных источников, что усложняет проверку альтернативных сценариев и приводит к необходимости оперативного перепланирования. В статье представлен единый методический подход, основанный на объектном представлении элементов горной технологии, комплексном учёте исходных данных и итерационном цикле «исходные данные – целевые показатели – расчёт – анализ – корректировка – перепланирование». Расчётная процедура включает оптимизацию последовательности вовлечения объектов и имитационное моделирование развития горных работ. Требования к системе формировались исходя из практики централизованного планирования и необходимости быстро оценивать альтернативные варианты при изменении производственных условий. Практическая ценность подхода определяется: 1) автоматизацией расчёта, 2) сокращением ручной подготовки данных, 3) повышением прозрачности предпосылок плана, 4) возможностью быстрее оценивать последствия производственных изменений.

Ключевые слова: среднесрочное планирование горных работ, открытые горные работы, подземные горные работы, горно-геологическая информационная система, комплексный учет данных, сценарное планирование, имитационное моделирование, оптимизация последовательности работ, единая цифровая модель, промышленная апробация

Благодарности: Авторы выражают благодарность специалистам Управления планирования производства АК «АЛРОСА» (ПАО), участвовавшим в работе над проектом, а также команде разработки ООО «Лаборатория Майнфрэйм», преобразовавшей методики и требования в программное решение.

Для цитирования: Лаптев В.В., Зикрацкая Е.Д. Системы среднесрочного планирования открытых и подземных горных работ: единая методика и опыт импортозамещения в компании «АЛРОСА». *Горная промышленность.* 2026;(5):272–278. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-272-278

Medium-term planning systems for open-pit and underground mining operations: a unified methodology and import substitution experience at ALROSA

V.V. Laptev[1] ✉, E.D. Zikratskaya[2]
[1] Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation
[2] ALROSA PJSC, Mirny, Russian Federation
✉ v-laptev@ksc.ru

Abstract: The article presents the development and industrial testing of medium-term planning systems for open-pit and underground mining operations implemented in Mineframe. The relevance of such systems is determined by the need to simultaneously account for the position of the mining front, mineral reserves and grades, equipment capacity, haulage schemes, technological dependencies, calendar constraints, and production targets within a medium-term planning time-frame. In manual planning workflows, these data are often collected from multiple sources, which makes it difficult to compare alternative scenarios and perform timely replanning when production conditions change. A unified methodological approach is proposed

based on an object-oriented representation of the mining method elements, integrated use of the input data, and an iterative planning cycle: input data – target indicators – calculation – analysis – adjustment – replanning. The computational procedure combines optimization of the sequence in which the mining objects are brought into operation with simulation modelling of the mining progress. The system requirements were formulated in cooperation with specialists from the Production Planning Department of ALROSA, taking into account the practical experience of centralized planning and the need for rapid assessment of "what-if" scenarios under changing production conditions. The results show that the practical value of the proposed approach is not limited to automating calculations. It also reduces manual data preparation, improves the transparency of planning assumptions, and provides a basis for faster assessment of the consequences of production changes.

Keywords: medium-term mine planning, surface mining, underground mining, mining and geological information system, integrated data accounting, scenario planning, discrete-event simulation, production sequence optimization, unified digital model, industrial validation

Acknowledgements: The authors express their gratitude to the specialists from the Production Planning Department of ALROSA who participated in the project, as well as to the development team at Mineframe Laboratory, who translated the methods and requirements into a software solution.

For citation: Laptev V.V., Zikratskaya E.D. Medium-term planning systems for open-pit and underground mining operations: a unified methodology and import substitution experience at ALROSA. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):272–278. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-272-278

Введение

Цифровая трансформация горнодобывающих предприятий постепенно смещается от автоматизации отдельных операций к формированию единых цифровых контуров управления горным производством, в которых инженерные модели используются не только для отдельных процессов, но и для комплексного обоснования производственных решений [1; 2]. В российских условиях к этому добавляется задача технологической независимости: замещение зарубежного программного обеспечения должно обеспечивать не формальное воспроизведение интерфейсов и функций, а сохранение и дальнейшее развитие критически важных производственных процессов [3].

Среднесрочное планирование занимает ключевое положение между стратегическими проектными решениями и оперативным управлением. На данном горизонте требуется согласовать положение и состояние фронта работ, запасы и качество полезного ископаемого, последовательность подготовки и отработки объектов, ограничения транспортной сети и производительности оборудования, графики работы и целевые показатели. На практике эти сведения формируются разными службами: геологической, маркшейдерской, технологической, экономической, ремонтной и службой планирования производства. Отдельно учитываются требования обогатительной фабрики к качеству поступающего сырья. Из-за длительного сбора и согласования к моменту завершения подготовки часть исходных предпосылок уже может измениться. Это приводит к повторной актуализации данных, корректировке плана развития горных работ и потере времени на подготовку управленческого решения.

Поэтому практический интерес предприятия к цифровому планированию определяется не только возможностью автоматизировать отдельный расчёт. Более существенна способность системы связать исходные данные, рассчитать план развития горных работ, быстро уточнить его при изменении условий и сформировать сопоставимые альтернативные варианты.

Отечественные исследования показывают целесообразность интеграции планирования с горно-геологическими информационными системами, объектными моделями горной технологии, расчетами транспортирования и учетом технологических ограничений [4–6]. В мировой практике развиваются методы оптимизации последовательности работ, имитационного моделирования, интеграции производственного расписания и транспортных решений, а также оценки устойчивости планов в условиях неопределенности [7–14]. Однако перенос математических методов в повседневную практику предприятия по-прежнему осложняется неоднородностью данных, различием технологий и корпоративных методик, а также необходимостью получения объяснимого результата.

Цель исследования – разработать и апробировать комплексный методический подход к среднесрочному планированию открытых и подземных горных работ на общей объектной и алгоритмической основе, непосредственно связанной с цифровой моделью предприятия. Научная задача заключается в формализации единого контура данных, объектов, ограничений и расчётных процедур для двух существенно различающихся способов разработки. Практическая задача состоит в обеспечении воспроизводимого процесса формирования, проверки и корректировки сценариев, пригодного для адаптации к условиям конкретного предприятия.

Материалы и методы

Исходные требования и организация работ

Исследование выполнялось на основе научно-методических подходов Горного института Кольского научного центра РАН в рамках совместной разработки инструментов среднесрочного планирования на базе горно-геологической информационной системы (ГГИС) «Майнфрэйм» с Управлением планирования производства (УПП) АК «АЛРОСА» (ПАО).

Исходной организационной предпосылкой стала централизация планирования горных работ в компании и необходимость оперативного реагирования на меняющиеся рыночные и производственные условия. После ограничения доступа к ранее применявшимся зарубежным решениям задача получила также выраженный импортозамещающий характер. Требования формировались итерационно и исходили из практики работы УПП АЛРОСА. Заказчиком были описаны не только требуемые функции, но и логика использования прежних решений: планирова-

Таблица 1
Исходные данные комплексного расчетного контура планирования

Table 1
Input data for the integrated planning calculation scheme

Категория данных	Что учитывается	Роль в расчете	Практическое значение
Геологические (каркасные и блочные модели)	Количество и качество запасов, сортность полезного ископаемого, физико-механические характеристики массива горных пород	Расчёт объёмов и качества горных пород в отрабатываемых объектах, учёт характеристик горной массы	Повышение точности прогноза объёмно-качественных показателей добычи, расчёт производительности оборудования и продолжительности операций на основе характеристик горной массы в каждом забое
Маркшейдерские (каркасные модели, атрибутивная информация)	Фактическое положение горных работ, текущее состояние объектов	Определение доступного фронта горных работ и условий для их начала	Согласование плана с фактическим состоянием работ, упрощение подготовки плана развития горных работ
Проектные (каркасные модели, атрибутивная информация)	Направления развития, проектные объекты	Объёмы добычи, метраж проходки, разделение объёмов и метража по видам работ	Учёт направлений, увязка среднесрочного сценария с проектными решениями
Технологические	Графики работ, требования к последовательности подготовки и отработки объектов, вариативность операций и циклов работ	Формирование технологически допустимой последовательности работ, проверка возможности начала операций и учёт взаимосвязей между объектами	Снижение риска формирования формально достижимого, но технологически невыполнимого сценария; повышение прозрачности причин задержек и ограничений при перепланировании, повышение точности планирования
Оборудование и производительность	Состав оборудования, закрепление техники, производительность в конкретных условиях, простои, ремонты и фактическая занятость техники	Расчёт длительности операций, проверка загрузки оборудования, выявление дефицита производительности и конфликтов по ресурсам	Более обоснованная оценка достижимости производственных целей, выявление узких мест по технике и поддержка решений о перераспределении оборудования
Транспортные	Транспортная сеть, пункты погрузки и разгрузки, ограничения скорости и движения по участкам, характеристики дорог	Расчёт плеч доставки для каждого забоя, времени перемещения, производительности транспортирования и влияния маршрутов на выполнение плана	Согласование плана с фактической транспортной доступностью объектов, выявление ограничений по маршрутам и снижение риска недооценки времени транспортирования
Календарные и ресурсные	Периоды планирования, графики работ, календарь массовых взрывов, доступность персонала, оборудования, объектов и технологических ресурсов	Распределение работ по периодам, проверка доступности ресурсов и соблюдение календарных ограничений при формировании сценария	Повышение реализуемости плана во времени, снижение числа конфликтов между работами и возможность оперативной корректировки при изменении доступности ресурсов
Целевые показатели	Плановые объёмы добычи и проходки, требования к качеству, рудопотоку, срокам и приоритетам выполнения работ	Задание критериев формирования сценария, проверка выполнения плановых показателей и сравнение альтернативных вариантов	Переход от ручного подбора варианта к управляемой проверке достижимости целей; возможность быстро оценить последствия изменения объёмов, качества или приоритетов

ние от натурально-объёмных показателей «снизу вверх», опора на фактические показатели работы рудников, учёт производительности, готовности техники, ограничений по участкам и необходимость быстро оценивать варианты развития горных работ по принципу «что будет, если?». К основным требованиям были отнесены: работа с актуальным положением горных работ; учёт взаимосвязанных технологических и ресурсных ограничений; возможность задания жёстких и автоматически формируемых правил; расчёт транспортных маршрутов и производительности; создание, дублирование и сравнение сценариев.

Важной особенностью организации работ стало непосредственное участие в процессе специалистов УПП. Были сформированы рабочие группы по направлениям открытых и подземных горных работ, которые проверяли создаваемые версии методик, алгоритмов и программных решений на реальных данных.

Комплексный информационный контур

Чтобы связать контур планирования с цифровой моделью предприятия, архитектура решения предусматривает основной сценарий, при котором исходные горно-геологи-



Рис. 1
Итерационный цикл формирования и корректировки сценария среднесрочного плана

Fig. 1
Iterative cycle of generating and adjusting medium-term plan scenario

ческие и производственные данные формируются в ГГИС «Майнфрэйм» и сохраняются в единой базе данных, к которой обращаются модули планирования. Альтернативным вариантом является импорт данных из сторонних систем, их структурирование и дальнейшее использование в расчётном контуре.

В расчетном контуре используются каркасные и блочные модели, фактическое и проектное положение горных работ, целевые объемы и показатели качества, параметры оборудования, методики расчета производительности, транспортная сеть, ограничения скорости и движения по участкам, календарь массовых взрывов, пункты погрузки и разгрузки, связки экскаваторов и автосамосвалов, технологические связи и доступность ресурсов (табл. 1). Принципиальным является не механическое накопление максимально возможного объема сведений, а установление связей между данными, влияющими на достижимость и производственную реализуемость плана. Такой подход позволяет рассматривать исходные данные как общую производственную основу, а не как набор разрозненных входных файлов, что создает методическую основу для сокращения повторной подготовки данных.

Объектная модель открытых и подземных горных работ

Описанный комплексный подход сам по себе не превращает исходные данные в план. Для расчёта они должны быть связаны с конкретными объектами горных работ, их состоянием, доступностью, технологическими зависимостями и допустимыми операциями. Поэтому следующим методическим шагом стало преобразование исходных данных в объектную модель, пригодную для проверки последовательности работ, оценки ограничений и последующего перепланирования.

В основе методики лежит представление элементов горной технологии (блоков, выработок, выемочных единиц) как типовых объектов планирования. Каждый объект характеризуется геометрией, пространственным положением, набором атрибутов, состоянием, доступностью, технологическими связями и допустимыми операциями. Для открытых горных работ объектами могут быть участки, уступы, блоки, направления развития, склады и отвалы; для подземных – выработки, камеры, панели, блоки и другие выемочные единицы.

Общая объектная основа не означает нивелирования различий открытых и подземных горных работ. Технологическая специфика формализуется на уровне правил отработки, последовательности операций, пространственных, календарных и ресурсных ограничений. Благодаря этому общими остаются структура данных, сценарный цикл и принципы проверки результата, тогда как расчётные правила адаптируются к конкретной технологии.

Итерационный цикл и расчетная процедура

После формализации объектов необходимо определить порядок перехода от исходных данных к управленчески полезному результату. Для службы планирования таким результатом является не только первый рассчитанный вариант, но и возможность понять причины полученных результатов, изменить предпосылки и быстро получить сопоставимый сценарий.

Методика представлена как итерационный цикл (рис. 1), в котором получение первого варианта плана не является конечной целью. После выбора активного контура задаются целевые показатели и ограничения, рассчитывается сценарий, анализируются результаты и причины отклонений. При изменении исходных условий выполняется

повторный расчёт на общей объектной и информационной основе. Тем самым перепланирование рассматривается как штатная операция, а не как повторная подготовка плана с нуля.

Расчёт выполняется в два этапа. На первом этапе оптимизационные алгоритмы [15; 16] формируют последовательность вовлечения объектов в работу с учётом целевых показателей, усреднённых ограничений, производительности и загрузки оборудования. На втором этапе последовательность проверяется средствами имитационного моделирования с более детальным учётом технологических операций, плеч доставки и характеристик дорог, календарной доступности и связей между объектами. При выявлении недостижимости цели или конфликтов исходные параметры уточняются, после чего цикл повторяется.

Результаты

Сформированный функциональный контур

В результате совместной работы специалистов Горного института Кольского научного центра РАН, экспертов УПП АЛРОСА и разработчиков – ООО «Лаборатория Майнфрэйм», был сформирован единый методический контур и на его основе разработаны продукты среднесрочного планирования открытых и подземных горных работ в системе «Майнфрэйм». Результаты апробации АК «АЛРОСА» свидетельствуют о работоспособности решений для задач планирования открытых работ с углубочной системой разработки и подземных работ с камерной системой с закладкой, нисходящей слоевой отработкой с закладкой, системой с подэтажным обрушением и торцевым выпуском руды. Полученный результат имеет двойной эффект: с одной стороны, решена прикладная задача импортозамещения систем среднесрочного планирования; с другой – создана унифицированная методическая и программная основа, пригодная для дальнейшей адаптации под другие системы разработки и различные горно-геологические условия.

Реализованный инструментарий автоматизирует выбор объектов планирования, расчет вариантов транспортирования и расстояний, определение производительности оборудования в конкретных условиях, учет последовательности технологических операций, распределение ресурсов по периодам и проверку выполнения целевых показателей. Степень детализации модели может изменяться: укрупненный расчет применяется для быстрого анализа вариантов, детализированный – для проверки дополнительных условий и узких мест.

Интеграция с горно-геологической информационной системой позволяет использовать актуальные инженерные данные без их постоянного повторного сбора и подготовки специально для планирования. При необходимости данные могут быть внесены путём импорта проектного и фактического положения горных работ, справочников и геологических моделей. В этом случае импорт рассматривается как точка входа, а не как регулярная схема обмена: основная ценность достигается при дальнейшем сопровождении объектов и сценариев в связанной информационной среде.

Для подразделений, выполняющих планирование горных работ, это означает снижение объема повторных операций и повышение интерпретируемости результата; для производственного руководства – возможность быстрее оценивать достижимость целей и последствия изменения исходных условий и принимаемых решений; для корпоративной информационной среды – повторное использование актуальных инженерных данных без постоянной передачи файлов.

Результаты промышленной проверки

Промышленная проверка выполнялась совместно со специалистами АК «АЛРОСА». На полученных версиях продукта загружались реальные блочные и каркасные модели, производственные данные, после чего результаты расчетов сопоставлялись с фактической работой и плановыми сценариями. Один из контрольных расчетов был выполнен на данных фактической работы карьера за месяц. Сопоставление включало не только суммарные объемы, но и показатели производительности, простои экскаваторов и автосамосвалов, ремонтные простои, фактическую занятость техники, состав вовлекаемых объектов и общую логику развития горных работ.

Для указанного контрольного сценария отклонение автоматизированного расчета от фактических данных составило порядка 1,5%. При интерпретации этого результата принципиально важно учитывать качество исходных данных: актуальность блочной модели, корректность геологической разметки, полнота фактических данных и правильность внесения ограничений напрямую влияют на близость расчётного сценария к реальной производственной картине. Дополнительная апробация на данных других предприятий с открытыми и подземными горными работами показала, что перенос методики может потребовать предварительного анализа и адаптации структуры исходных данных, технологии планирования и состава ограничений. Поэтому применение целесообразно начинать с ограниченного контура, для которого заранее определены исходные данные, контрольные показатели и критерии успешности.

Обсуждение результатов

Полученные результаты согласуются с современным направлением развития систем планирования, в котором оптимизационные методы дополняются имитационной проверкой и сценарным анализом. Комплексный учёт исходных данных – технико-экономических показателей работы техники, ограничений транспортной сети и особенностей технологии ведения работ – позволяет избежать локальной оптимизации отдельных процессов в ущерб общим производственным показателям [12; 13].

Отличительной особенностью предложенного подхода является соединение формализованной расчетной постановки с повседневной работой службы планирования. Эффект возникает не за счет усложнения алгоритма как такового, а за счет совместной работы трех элементов: актуальных исходных данных, формализованных правил планирования и понятного пользователю механизма проверки результата. Если данные продолжают собираться вручную из несвязанных источников, правила остаются неформализованными, а результат невозможно объяснить, то автоматизация не дает устойчивого производственного эффекта. В единой объектной модели расчет связан с текущим состоянием работ, а причины формирования сценария становятся видимыми для специалиста и руководителя.

Комплексный учёт данных прежде всего влияет на точность и качество планирования горных работ. Геологиче-

ские сведения задают ресурсную и качественную основу, фактическое положение определяет доступный фронт, проектные решения фиксируют целевое состояние, параметры оборудования и транспорта задают темпы развития горных работ, а технологические и календарные связи определяют реализуемость последовательности. Исключение одной из этих категорий повышает риск формирования сценария, который выглядит оптимальным формально, но не может быть выполнен в производственных условиях.

На корпоративном уровне единая основа планирования открытых и подземных горных работ создаёт предпосылки для стандартизации принципов планирования между объектами и подразделениями без устранения технологической специфики. Это представляет интерес для компаний с несколькими производственными площадками: едиными могут быть структура данных, сценарный цикл, критерии проверки и требования к прозрачности, тогда как технологические правила настраиваются для каждого конкретного месторождения.

Перспективы дальнейшего развития связаны с расчетом стоимостной оценки сценариев, определением потребного парка оборудования, расширением набора поддерживаемых технологий, повышением скорости расчета и увязкой среднесрочного, краткосрочного и оперативного горизонтов планирования на основе единой объектной модели.

Заключение

В ходе проведенных исследований были получены следующие результаты:

1. Разработан комплексный методический подход к среднесрочному планированию открытых и подземных горных работ, основанный на общей объектной модели и объединении геологических, маркшейдерских, проектных, технологических, транспортных и производственных данных.
2. Показано, что практическая ценность цифрового планирования определяется не только алгоритмом расчета, но и повторным использованием актуальных данных, прозрачностью ограничений и возможностью штатного перепланирования.
3. Предложен итерационный цикл формирования, анализа и корректировки сценария и реализована двухэтапная расчетная схема, сочетающая построение рациональной последовательности работ и имитационную проверку ее реализуемости.
4. Сформированы два продукта среднесрочного планирования открытых и подземных горных работ на общей методической основе при сохранении технологической специфики в правилах, операциях и ограничениях.
5. Проведенная проверка показала расхождение автоматизированных и ручных результатов в пределах 1–2% по сопоставляемым показателям производительности, простоев оборудования, фактической занятости техники, состава вовлекаемых объектов и общей логики развития горных работ.

Список литературы / References

1. Рыльникова М.В., Струков К.И., Радченко Д.Н., Есина Е.Н. Цифровая трансформация – условие и основа устойчивого развития горнотехнических систем. *Горная промышленность*. 2021;(3):74–78. https://doi.org/10.30686/1609-91922021-3-74-78
   Rylnikova M.V., Strukov K.I., Radchenko D.N., Esina E.N. Digital transformation: a prerequisite and foundation for sustainable development of mining operations. *Russian Mining Industry*. 2021;(3):74–78. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-91922021-3-74-78
2. Дерябин С.А., Темкин И.О. Онтологическое моделирование и управление цифровой трансформацией архитектуры горно-добывающих предприятий. *Записки Горного института*. 2025;275:130–144. Режим доступа: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16728 (дата обращения: 11.02.2026).
   Deryabin S.A., Temkin I.O. Ontological modeling and management of digital transformation of mining enterprises architecture. *Journal of Mining Institute*. 2025;275:130–144. Available at: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16728 (accessed: 11.02.2026).
3. Лукичев С.В., Наговицын О.В. Научно-методические подходы при реализации проекта импортозамещения ГГИС в АК «АЛРОСА». *Записки Горного института*. 2025;275:155–166. Режим доступа: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16712 (дата обращения: 11.02.2026).
   Lukichev S.V., Nagovitsyn O.V. Scientific and methodological approaches in implementing the MGIS import substitution project at PJSC ALROSA. *Journal of Mining Institute*. 2025;275:155–166. Available at: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16712 (accessed: 11.02.2026).
4. Наговицын Г.О. Краткосрочное планирование открытых горных работ в горно-геологической информационной системе MINEFRAME. *Горная промышленность*. 2023;(5S):130–134. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-130-134
   Nagovitsyn G.O. Short-term planning of surface mining operations in the MINEFRAME mining and geological information system. *Russian Mining Industry*. 2023;(5S):130–134. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-130-134

5. Лаптев В.В., Звонарева С.В. Расчет параметров транспортирования горной массы при автоматизированном планировании подземных горных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2022;(2):70–80. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_70
Laptev V.V., Zvonareva S.V. Rock haulage loop design in automated underground mine planning. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2022;(2):70–80. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_70

6. Лаптев В.В., Гурин К.П. Учет технологических и горно-геологических ограничений при автоматизированном планировании подземных горных работ. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.* 2023;(3):159–166. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230316
Laptev V.V., Gurin K.P. Automated planning of underground mining operations with regard to geological and geotechnical constraints. *Journal of Mining Science.* 2023;59(3):490–496. https://doi.org/10.1134/S106273912303016X

7. Savolainen J., Rakhsha R., Durham R. Simulation-based decision-making system for optimal mine production plan selection. *Mineral Economics.* 2022;35(2):267–281. https://doi.org/10.1007/s13563-021-00297-w

8. Quelopana A., Órdenes J., Wilson R., Navarra A. Technology upgrade assessment for open-pit mines through mine plan optimization and discrete event simulation. *Minerals.* 2023;13(5):642. https://doi.org/10.3390/min13050642

9. Rahnema M., Amirmoeini B., Moradi Afrapoli A. Incorporating environmental impacts into short-term mine planning: a literature survey. *Mining.* 2023;3(1):163–175. https://doi.org/10.3390/mining3010010

10. Carelos Andrade L., Dimitrakopoulos R. Integrated stochastic underground mine planning with long-term stockpiling: method and impacts of using high-order sequential simulations. *Minerals.* 2024;14(2):123. https://doi.org/10.3390/min14020123

11. Eustace C., Hynard K. Application of simulation and optimization to support mine plan execution. *Mining, Metallurgy & Exploration.* 2024;41(6):3789–3800. https://doi.org/10.1007/s42461-024-01118-8

12. Xu C., Chen G., Lu H., Zhang Q., Liu Z., Bian J. Integrated optimization of production scheduling and haulage route planning in open-pit mines. *Mathematics.* 2024;12(13):2070. https://doi.org/10.3390/math12132070

13. Anvari K., Benndorf J. Real time mining – A review of developments within the last decade. *Mining.* 2025;5(3):38. https://doi.org/10.3390/mining5030038

14. Xie J., Ge F., Cui T., Wang X. A A virtual test and evaluation method for fully mechanized mining production system with different smart levels. *International Journal of Coal Science & Technology.* 2022;9(1):41. https://doi.org/10.1007/s40789-022-00510-3

15. Зуенко А.А., Олейник Ю.А. Составление расписаний как задача удовлетворения ограничений (на примере планирования открытых горных работ). *Информатика и автоматизация.* 2024;23(5):1290–1310. https://doi.org/10.15622/ia.23.5.1
Zuenko A.A., Oleynik Yu.A. Scheduling as a constraint satisfaction problem (using the example of open-pit mine production scheduling problem). *Informatics and Automation.* 2024;23(5):1290–1310. (In Russ.) https://doi.org/10.15622/ia.23.5.1

16. Oleynik Yu.A., Zuenko A.A. Open pit mine production scheduling using new global constraint. In: *2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Yekaterinburg, November 11–13, 2022.* IEEE; 2022, pp. 1700–1704. https://doi.org/10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016915

Информация об авторах
Лаптев Владимир Викторович – кандидат технических наук, руководитель лаборатории цифровых технологий горного производства, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-1525-1211; e-mail: v-laptev@ksc.ru
Зикрацкая Елизавета Данииловна – главный эксперт Управления планирования производства, АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, Российская Федерация; e-mail: MironovaED@alrosa.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 08.06.2026
Поступила после рецензирования: 21.07.2026
Принята к публикации: 24.07.2026

Information about the authors
Vladimir V. Laptev – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Digital Technologies in Mining, Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-1525-1211; e-mail: v-laptev@ksc.ru
Elizaveta D. Zikratskaya – Principal Expert, Production Planning Department, ALROSA PJSC, Mirny, Russian Federation; e-mail: mironovaed@alrosa.ru

Article info
Received: 08.06.2026
Revised: 21.07.2026
Accepted: 24.07.2026


ДОБЫЧА
ОБОГАЩЕНИЕ
МОДЕРНИЗАЦИЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА ФОРУМ
17-19
МАРТА
2027
НОВОСИБИРСК
ЭКСПО ЦЕНТР
МВК «НОВОСИБИРСК ЭКСПОЦЕНТР»
ДОБЫЧА
ОБОГАЩЕНИЕ
МОДЕРНИЗАЦИЯ
ОБОРУДОВАНИЕ • ТЕХНОЛОГИИ • РЕШЕНИЯ
ДЛЯ ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
УЗНАТЬ БОЛЬШЕ
MBMEXPO.RU
8 (800) 234-90-53
РЕКЛАМА 18+
ОРГАНИЗАТОР
ЦЕНТР ЭКСПО
СООРГАНИЗАТОР
ЗОЛОТО и технологии
ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПАРТНЁР
ДОБЫВАЮЩАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ
ОТРАСЛЕВОЙ ПАРТНЁР ПО ВОСТОКУ РОССИИ
БИЗНЕС-ПОРТАЛ NEDRADV
ПРОЕКТ ПРОВОДИТСЯ ПРИ ПОДДЕРЖКЕ
Минпромторг России
РОСНЕДРА
РОСТЕХНАДЗОР
РОСПРИРОДНАДЗОР

FLOTENT CHEMICALS

СТАБИЛЬНАЯ ХИМИЯ - СТАБИЛЬНАЯ ФАБРИКА

«Флотент Кемикалс Рус» — российский разработчик и производитель химических реагентов для добычи, обогащения, металлургии и очистки промышленных сточных вод.



«Флотент Кемикалс Рус»,
+7 (846) 277-17-55 / +7 (927) 207-17-55
info@flotent.ru

10 лет
ИЗВЛЕКАЕМ ПОЛЬЗУ



16+

РЕКЛАМА

NEW!

ГИДРОКСАМАТЫ

Новый химический флотационный реагент для повышения эффективности флотационного передела

- Разработаны специально для окисленных и смешанных руд
- Обеспечивают высокую селективность и извлечение там, где традиционные реагенты неэффективны

Гидроксаматы *– это инвестиция в повышение рентабельности и технологическое развитие предприятия.*

QS GROUP®
EXPERIENCE BASED

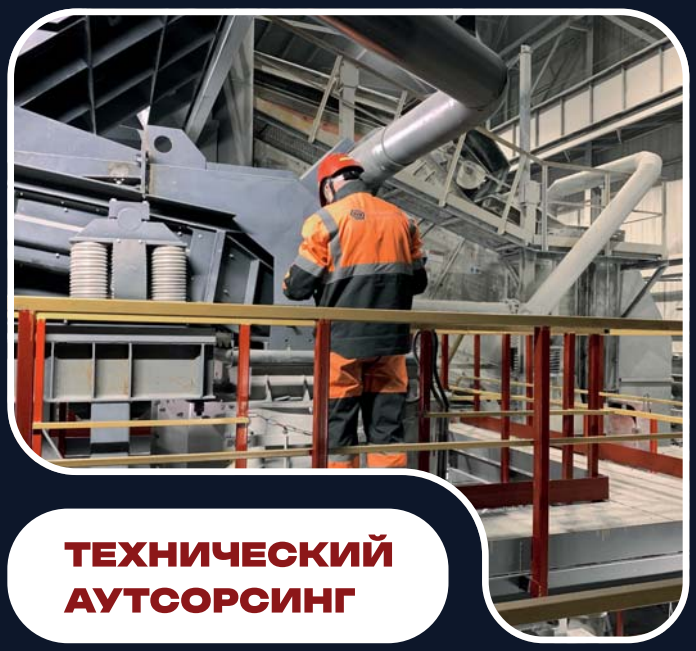
miner B

8 800 700 44 06
info@qsgrp.com

qsgrp.com

НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТЫ:

- ДРОБИЛЬНО-СОРТИРОВОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
- ИНЖИНИРИНГ
- ПОДЗЕМНАЯ САМОХОДНАЯ ТЕХНИКА
- БУРОВЫЕ СТАНКИ
- ЗАПАСНЫЕ И ИЗНАШИВАЕМЫЕ ЧАСТИ
- НАСОСНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ



ТЕХНИЧЕСКИЙ АУТСОРСИНГ





ПОДРЯДНОЕ ДРОБЛЕНИЕ





РЕКЛАМА



QS-PRO — ПРОИЗВОДСТВО МК И КОНВЕЙЕРНЫХ СИСТЕМ