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 интегрированную 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

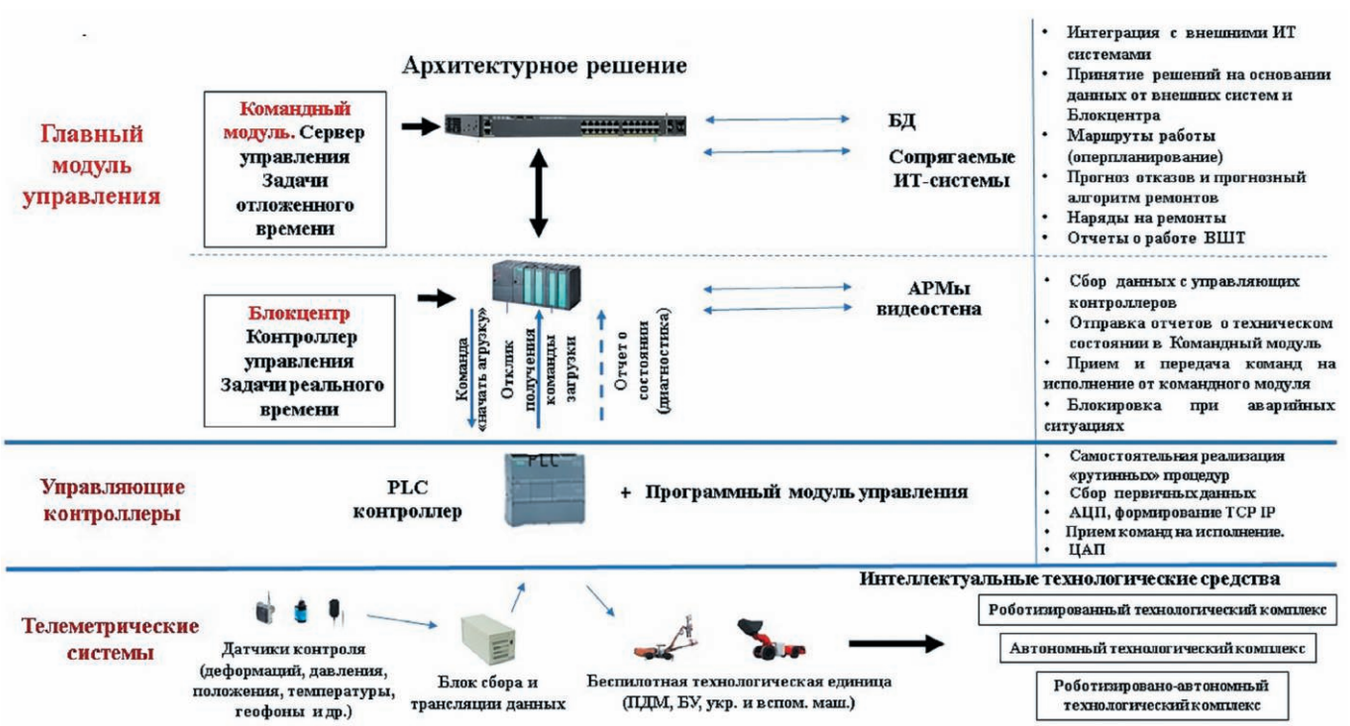


Рис. 1
Система интеллектуального соединения и интеграции горнодобывающих машин с информационными и коммуникационными технологиями при роботизации горнотехнических систем

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