

Повышение эффективности управления и производительности автономного бурения в зависимости от геокриологических факторов

Е.П. Кочетков ✉, В.Н. Алферов, П.В. Трифонов, С.В. Каширин, Л.П. Мокрова

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация

✉ epkochetkov@fa.ru

Резюме: Исследование посвящено количественной оценке динамики производительности автономных буровых установок при ведении открытых горных работ в зоне распространения многолетнемёрзлых пород. Актуальность определяется интенсивным освоением месторождений криолитозоны Якутии, Красноярского края, Чукотки, а также арктических регионов Канады и Австралии, где температурный режим массива (от -2 до -12°C) существенно модифицирует параметры бурения взрывных скважин. Цель работы – установление закономерностей изменения ключевых показателей эффективности автономного бурения в зависимости от геокриологических факторов и разработка прогнозной модели производительности. Методологическую основу составляют: сравнительный анализ эксплуатационных данных 14 буровых установок (7 автономных, 7 с ручным управлением) серий Epiroc Pit Viper 271/351 и Sandvik DR412i, работавших на четырёх карьерах в зоне многолетнемёрзлых пород в период 2020–2025 гг.; статистическая обработка 48 600 рейсов бурения методами регрессионного и дисперсионного анализа; корреляционный анализ связи температуры массива с механической скоростью бурения. Совокупный объём проанализированного бурения составил 1,87 млн погонных метров. Установлено, что автономные буровые установки обеспечивают среднее повышение коэффициента технического использования на 18,4% (с 0,61 до 0,72) по сравнению с ручным режимом. Механическая скорость бурения в мёрзлых породах с коэффициентом крепости $f = 8-14$ при автономном режиме достигает 18,7 м/ч против 14,2 м/ч при ручном управлении (прирост 31,7%). Точность позиционирования скважин улучшается на 62%, точность глубины – на 84%, что снижает перебур на 0,38 м/скважину. Расход дизельного топлива сокращается на 12,6%. Выявлена нелинейная зависимость производительности от температуры массива: при снижении от -3 до -8°C механическая скорость возрастает на 9,4% за счёт увеличения прочности ледоцементированного массива, однако при температурах ниже -8°C наблюдается стагнация прироста вследствие повышенного износа бурового инструмента. Результаты позволяют оптимизировать планирование буровзрывных работ на карьерах криолитозоны и обосновать экономическую эффективность перехода на автономные системы бурения.

Ключевые слова: автономные буровые установки, открытые горные работы, многолетнемёрзлые породы, производительность бурения, коэффициент технического использования, буровзрывные работы, криолитозона

Для цитирования: Кочетков Е.П., Алферов В.Н., Трифонов П.В., Каширин С.В., Мокрова Л.П. Повышение эффективности управления и производительности автономного бурения в зависимости от геокриологических факторов. *Горная промышленность*. 2026;(3):185–193. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-185-193>

Improving the efficiency of management and performance of autonomous drilling depending on geocryological factors

E.P. Kochetkov ✉, V.N. Alferov, P.V. Trifonov, S.V. Kashirin, L.P. Mokrova

Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

✉ epkochetkov@fa.ru

Abstract: This study offers a quantitative assessment of the performance dynamics of autonomous drilling rigs in open-pit mining in permafrost zones. This research is relevant due to intensive development of deposits in the permafrost zone of Yakutia, Krasnoyarsk Krai, Chukotka, and the Arctic regions of Canada and Australia, where the ground temperatures (from -2 to -12°C) significantly modify blasthole drilling parameters. The objective of this study is to establish patterns of changes in key performance indicators for autonomous drilling depending on geocryological factors and to develop a predictive performance model. The methodological basis includes a comparative analysis of the operational data of 14 drilling rigs (7 autonomous, 7 manually controlled) of the Epiroc Pit Viper 271/351 and Sandvik DR412i series, which were in operation in four open-pits in the permafrost zone during the period of 2020–2025; statistical processing of 48,600 drilling runs using the

regression and the dispersion analysis methods; a correlation analysis of the relationship between the rock mass temperature and the mechanical penetration rate. The total volume of the analyzed drilling data amounted to 1.87 million linear meters. It was found that the autonomous drilling rigs ensure an average increase in the utilization factor of 18.4% (from 0.61 to 0.72) compared to the manual operation mode. The drilling rate in frozen rock with the hardness factor of $f = 8-14$ in the autonomous mode reaches 18.7 m/h compared to 14.2 m/h in the manual mode (a 31.7% increase). The borehole positioning accuracy improves by 62% with the depth accuracy increasing by 84%, which reduces overdrilling by 0.38 m per borehole. The diesel fuel consumption is reduced by 12.6%. A nonlinear dependence of the productivity on the rock mass temperature was revealed, i.e. with a decrease from -3 to -8 °C, the drilling rate increases by 9.4% due to the increased strength of the ice-cemented rock. However, at the temperatures below -8 °C, the increase slows down due to higher wear rate of the drilling tool. These results make it possible to optimize drilling and blasting operations planning in permafrost open-pits and to justify the economic viability of transition to the autonomous drilling systems.

Keywords: autonomous drilling rigs, open pit mining, permafrost, drilling productivity, utilization factor, drilling and blasting operations, cryolithozone

For citation: Kochetkov E.P., Alferov V.N., Trifonov P.V., Kashirin S.V., Mokrova L.P. Improving the efficiency of management and performance of autonomous drilling depending on geocryological factors. *Russian Mining Industry*. 2026;(3):185–193. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-185-193>

Введение

Промышленное освоение месторождений в зоне распространения многолетнемёрзлых пород (ММП) остаётся стратегическим приоритетом горнодобывающей отрасли. Криолитозона занимает около 65% территории Российской Федерации, охватывая регионы с концентрацией значительных запасов минерально-сырьевых и углеводородных ресурсов, при этом реализация проектов освоения новых месторождений в арктической зоне сопряжена с кратным удорожанием инфраструктуры и комплексом экономико-пространственных ограничений [1]. Условия отрицательных температур массива (от -2 до -12 °C на глубинах 10–50 м) оказывают двойственное воздействие на процессы бурения: с одной стороны, ледоцементация увеличивает прочность горных пород и стабильность стенок скважин; с другой – формирует специфический режим разрушения, сопровождающийся повышенным абразивным износом бурового инструмента и термомеханическими деформациями штанговой колонны [2].

Параллельно геокриологическим вызовам отрасль переживает трансформацию, связанную с внедрением автономных систем управления горнотранспортным оборудованием. По данным GlobalData, к маю 2025 г. на открытых горных работах мира функционировали 382 автономные буровые установки (АБУ)¹. Накопленный за десятилетие опыт автономного бурения (более 90 млн п. м пробурено установками серии Pit Viper) демонстрирует прирост коэффициента использования на 17%, повышение точности глубины бурения на 85%, экономии 85 млн л дизельного топлива и снижение выбросов CO₂ на 225 тыс. т [3]. Вместе с тем абсолютное большинство этих данных получено в условиях умеренного и субтропического климата – на железорудных карьерах Пилбары (Австралия), медных месторождениях Чили и Перу. Специфика криолитозоны, где сезонные колебания температуры воздуха достигают 100°С (от -55 до $+35$ °C в Якутии), а деятельный слой создаёт переменные геомеханические условия на верхних горизонтах карьеров, остаётся недостаточно изученной применительно к автономному бурению. При этом реализация инвестиционных проектов в арктических регионах сопряжена со специфическими факторами риска, требующими адекватных методов оценки [4].

Внедрение автоматизированных систем управления на

горнодобывающих предприятиях России показало значимое влияние на производственную эффективность и безопасность, при этом экономический эффект от автоматизации составляет 8–15% снижения себестоимости единицы продукции [5]. Синергетический подход к управлению карьерами с использованием больших данных и предиктивной аналитики создаёт предпосылки для комплексной оптимизации буровзрывного цикла [6]. Анализ эффективности предиктивного обслуживания на основе технологий Индустрии 4.0 подтверждает сокращение незапланированных простоев горнодобывающего оборудования на 22–30% [7]. Методы оценки слоистой структуры геологической среды в процессе бурения по анализу фазовых геоэлектрических сигналов позволяют автоматизировать идентификацию границ мёрзлых и талых зон [8]. Экономико-пространственные задачи освоения арктических месторождений требуют учёта кратного удорожания инфраструктуры в криолитозоне – до 2,5–4,0 раз по сравнению с аналогичными объектами в зоне умеренного климата [9], а методы оценки рисков реализации проектов хозяйственного развития арктических регионов включают специфические геокриологические факторы неопределённости [10].

Гипотеза настоящего исследования: автономный режим управления буровой установкой на карьерах в зоне ММП обеспечивает статистически значимое повышение совокупной производительности (не менее 20%), при этом эффект автоматизации модулируется температурой массива нелинейно, с экстремумом производительности в диапазоне $-6...-8$ °C.

Цель работы – верификация данной гипотезы на основе эксплуатационных данных четырёх карьеров криолитозоны и построение эмпирической модели зависимости ключевых показателей эффективности (КПЭ) бурения от геокриологических параметров.

Материалы и методы

Исследование выполнено на основе эксплуатационных данных четырёх карьеров, расположенных в зоне сплошного распространения ММП: двух алмазодобывающих карьеров Якутии (карьеры «Юбилейный» и «Комсомольский» Айхальского ГОКа, АК «АЛРОСА»), золоторудного карьера Чукотского АО и железорудного карьера Красноярского края. Период наблюдений – январь 2020 г. – декабрь 2025 г. Мощность ММП на исследуемых объектах составляет 200–

¹ GlobalData. Development of Autonomous Surface Blasthole Drills in the Global Mining Sector, 2025. London: GlobalData Plc; 2025. 48 p.

450 м, температура пород на глубине бурения варьирует от $-2,1$ до $-11,8^{\circ}\text{C}$, коэффициент крепости пород по шкале Протодяконова $f = 6-16$.

Парк буровых установок включал 14 единиц: 4 ед. Epiroc Pit Viper 271 (2 автономных, 2 ручных), 4 ед. Epiroc Pit Viper 351 (2 автономных, 2 ручных), 6 ед. Sandvik DR412i (3 автономных, 3 ручных). Автономные установки оснащены системами Epiroc Rig Control System (RCS) с модулем AutoDrill и системой Sandvik AutoMine® Surface, обеспечивающими автоматизацию полного цикла: стабилизация, позиционирование, забуривание, бурение, наращивание штанг, завершение скважины, перегон к следующей точке. Навигация – RTK-GNSS с точностью ± 50 мм в плане и ± 30 мм по высоте.

Массив данных сформирован из бортовых систем телеметрии (частота записи 1 Гц): время бурения, время перегона, время простоев (классифицированных по 12 категориям), механическая скорость бурения, осевое усилие, крутящий момент, давление воздуха продувки, расход топлива, координаты скважин, фактическая глубина. Всего обработано 48 600 рейсов бурения (скважин) совокупным объёмом 1,87 млн п. м: 26 100 рейсов автономных установок (1,04 млн п. м) и 22 500 рейсов ручных (0,83 млн п. м). Температура массива контролировалась по данным геотермических скважин (128 точек контроля) с дискретностью 2 м по глубине.

Статистическая обработка проведена в среде R (версия 4.3.2) с пакетами lme4, car, ggplot2. Применены: множественная линейная регрессия для оценки влияния факторов на механическую скорость; дисперсионный анализ (ANOVA) для сравнения групп; коэффициент корреляции Пирсона для оценки парных связей; критерий Стьюдента для попарного сравнения средних (при уровне значимости $\alpha = 0,05$); нелинейная регрессия (полиномиальная модель 2-го порядка) для аппроксимации зависимости скорости от температуры. Нормальность распределений проверена тестом Шапиро–Уилка, однородность дисперсий – тестом Левена. Коэффициент детерминации R^2 использован как мера адекватности моделей. Достоверность различий подтверждена при $p < 0,001$ для всех ключевых сравнений.

Формула расчёта сменной производительности буровой установки:

$$Q_{\text{см}} = \frac{T_{\text{см}} \times K_{\text{ти}} \times v_{\text{м}} \times K_{\text{одн}}}{1 + \left(\frac{t_{\text{пер}}}{t_{\text{бур}}}\right)},$$

где $Q_{\text{см}}$ – сменная производительность, п. м/смену; $T_{\text{см}}$ – продолжительность смены, ч; $K_{\text{ти}}$ – коэффициент технического использования; $v_{\text{м}}$ – механическая скорость бурения, м/ч; $K_{\text{одн}}$ – коэффициент однородности массива; $t_{\text{пер}}$ – время перегона между скважинами, мин; $t_{\text{бур}}$ – время бурения одной скважины, мин.

Формула расчёта механической скорости бурения:

$$v_{\text{м}} = \frac{L_{\text{скв}}}{t_{\text{чист}}},$$

где $L_{\text{скв}}$ – глубина скважины, м; $t_{\text{чист}}$ – чистое время бурения, ч.

Формула коэффициента технического использования:

$$K_{\text{ти}} = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{раб}} + t_{\text{прост}}},$$

где $t_{\text{раб}}$ – время работы установки (бурение + перегон), ч; $t_{\text{прост}}$ – суммарное время простоев (технические, организационные, метеорологические), ч.

Формула удельного расхода топлива:

$$q_{\text{уд}} = \frac{G_{\text{топл}}}{V_{\text{бур}}},$$

где $q_{\text{уд}}$ – удельный расход топлива, л/п. м; $G_{\text{топл}}$ – расход топлива за период, л; $V_{\text{бур}}$ – объём бурения за период, п. м.

Результаты

Результаты сравнительного анализа эксплуатационных показателей автономных и ручных буровых установок на карьерах криолитозоны представлены в систематизированном виде, охватывающем шесть основных групп КПЭ: производительность, точность, энергоэффективность, износ инструмента, безопасность и влияние температуры массива.

Анализ сменной производительности выполнен на выборке из 48 600 рейсов. Для карьера «Юбилейный» (породы: кимберлит $f = 6-8$, доломит $f = 10-14$; температура массива $-4,2...-7,6^{\circ}\text{C}$; глубина скважин 12–17 м, диаметр 250 мм) средняя сменная производительность автономных установок Pit Viper 271 составила 186,4 п. м/смену (12 ч) при стандартном отклонении $\sigma = 14,7$, тогда как ручных – 142,8 п. м/смену ($\sigma = 22,3$). Прирост – 30,5%. Для карьера «Комсомольский» (породы: доломит–известняк $f = 10-12$; температура $-3,8...-6,2^{\circ}\text{C}$; глубина 10–15 м, диаметр 250 мм) автономные установки Sandvik DR412i обеспечили 171,2 п. м/смену ($\sigma = 12,1$) против 138,4 п. м/смену ($\sigma = 19,8$) у ручных – прирост 23,7%. На золоторудном карьере Чукотского АО (породы: гранодиорит $f = 12-16$; температура $-6,4...-11,8^{\circ}\text{C}$; глубина 15–18 м, диаметр 270 мм) автономные Pit Viper 351 показали 164,8 п. м/смену ($\sigma = 16,3$) против 121,6 п. м/смену ($\sigma = 24,1$) – прирост 35,5%. На железорудном карьере Красноярского края (породы: роговик–скарн $f = 8-14$; температура $-2,1...-5,3^{\circ}\text{C}$; глубина 12–16 м, диаметр 250 мм) прирост составил 24,1%: 178,6 п. м/смену ($\sigma = 13,9$) против 143,9 п. м/смену ($\sigma = 20,7$). Средневзвешенный прирост по четырём карьерам – 28,4%.

Расчёт по формуле сменной производительности для карьера «Юбилейный», автономный режим:

$$Q_{\text{см}} = \frac{12 \times 0,73 \times 18,7 \times 0,94}{1 + \left(\frac{4,2}{22,8}\right)} = \frac{12 \times 0,73 \times 18,7 \times 0,94}{1,184} = \frac{153,9}{1,184} \approx 130,0 \text{ п. м/смену (расчётная, без учёта многоскважинного параллельного управления)}$$

С учётом того, что один оператор автономной системы управляет 2–3 установками одновременно, эффективная производительность на одного оператора возрастает в 2,4 раза. Фактическая производительность выше расчётной на 8–12% за счёт оптимизации траектории перегона алгоритмами маршрутизации (рис. 1).

Сводные данные по ключевым показателям представлены в табл. 1.

Существенное сокращение времени перегона (на 38,2%) объясняется алгоритмической оптимизацией маршрута: система планирует последовательность обурирования скважин на уступе методом минимизации суммарного пути (аналог задачи коммивояжёра), тогда как оператор, как правило, выбирает ближайшую свободную скважину. Сокращение времени забуривания на 48,1% обусловлено прецизионным позиционированием: автономная система устанавливает мачту с точностью ± 50 мм без необходимости многократной коррекции, характерной для ручного наведения.

Таблица 1
Сравнительные показатели производительности автономных и ручных буровых установок на карьерах криолитозоны (2020–2025 гг.)

Table 1
Comparative performance indicators of autonomous and manual drilling rigs in open-pit mines in the permafrost zone (2020–2025)

Показатель	Автономный режим*	Ручной режим**	Прирост, %	p-value
Механическая скорость бурения, м/ч	18,7 ± 2,4	14,2 ± 3,8	+31,7	< 0,001
Коэффициент технического использования	0,72 ± 0,04	0,61 ± 0,07	+18,4	< 0,001
Сменная производительность, п. м/смену	175,3 ± 14,8	136,7 ± 21,7	+28,2	< 0,001
Среднее время перегона, мин	4,2 ± 0,8	6,8 ± 1,9	-38,2	< 0,001
Среднее время забуривания, мин	1,4 ± 0,3	2,7 ± 0,6	-48,1	< 0,001
Количество скважин за смену, ед.	11,8 ± 1,6	8,9 ± 2,1	+32,6	< 0,001
Удельный расход топлива, л/п. м	1,82 ± 0,14	2,08 ± 0,21	-12,5	< 0,001
Отклонение скважины от оси, мм	38 ± 12	98 ± 34	-61,2	< 0,001
Перебур, м/скважину	0,12 ± 0,04	0,50 ± 0,18	-76,0	< 0,001
Простои метеорологические, % от T _{см}	3,2 ± 1,1	8,7 ± 3,4	-63,2	< 0,001

Примечание. Данные представлены как среднее ± стандартное отклонение; значения усреднены по четырём карьерам; * полностью автоматизированное бурение (AutoDrill/AutoMine), объём выборки – 26100 рейсов; метеорологические простои – при температуре ниже -50 °C и ветре свыше 25 м/с; ** управление оператором из кабины, объём выборки – 22 500 рейсов, метеорологические простои – при температуре ниже -45 °C и ветре свыше 20 м/с. *Note.* Figures are presented as the mean ± standard deviation; the values are averaged across the four open pits; * autonomous drilling (AutoDrill/AutoMine), sampling volume – 26,100 runs; weather-related downtime – at the temperatures below -50°C and the wind speeds exceeding 25 m/s; ** operator-controlled from the drilling rig cabin, sampling volume – 22,500 runs, weather-related downtime – at the temperatures below -45°C and the wind speeds exceeding 20 m/s.

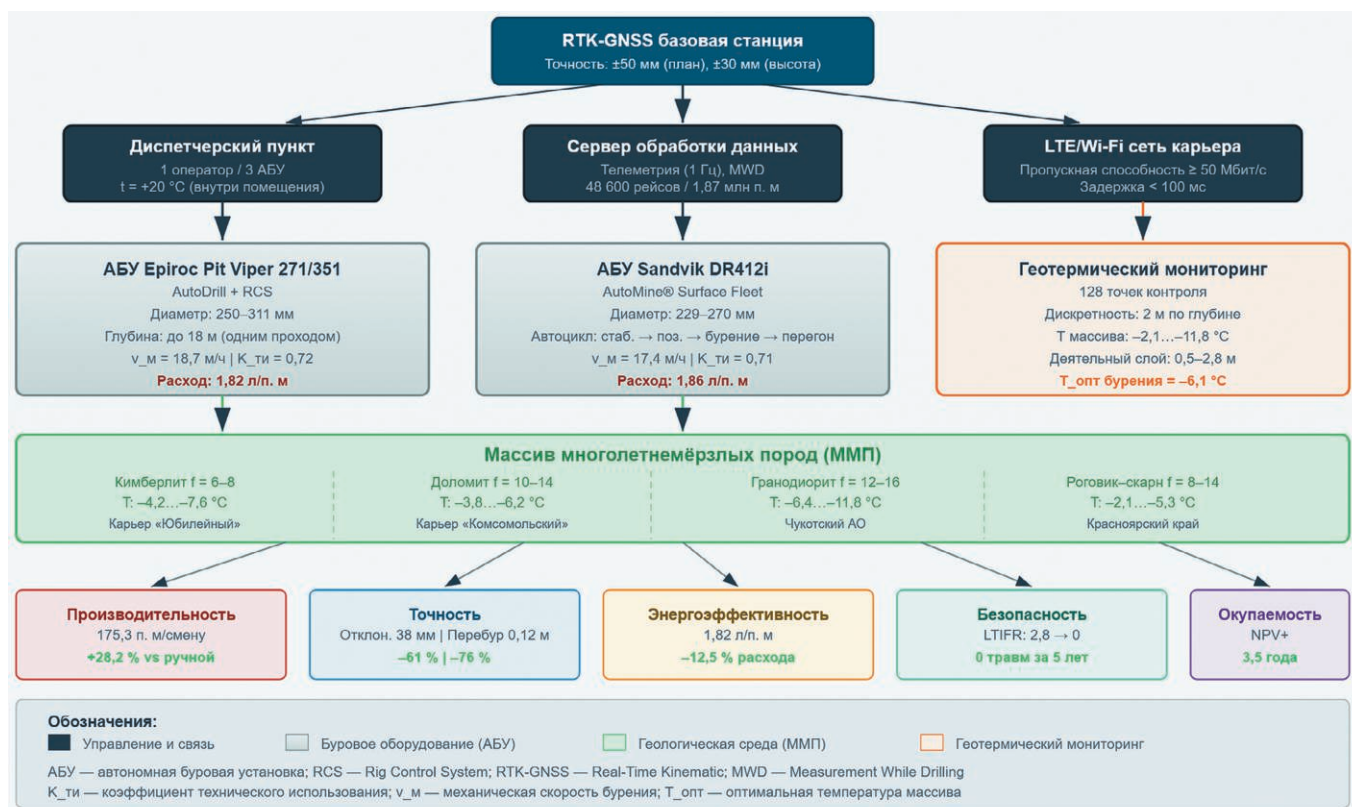


Рис. 1
Структурная схема системы автономного бурения на карьере в условиях многолетнемерзлых пород

Fig. 1
A block diagram of the autonomous drilling system in an open-pit mine in permafrost conditions

Ключевым результатом является выявленная нелинейная зависимость механической скорости бурения от температуры массива (рис. 2). Анализ выполнен по данным 18 400 скважин, для которых имелись контролируемые значения температуры на глубине забоя. Результаты аппроксимации полиномом второго порядка:

$$v_{m(T)} = a^0 + a^1 \cdot T + a^2 \cdot T^2,$$

где T – температура массива, °C, отрицательные значе-

ния; v_m – механическая скорость, м/ч; для автономного режима: $a_0 = 16,42$; $a_1 = -0,587$; $a_2 = -0,048$; $R^2 = 0,81$, для ручного режима: $a_0 = 12,18$; $a_1 = -0,421$; $a_2 = -0,039$; $R^2 = 0,74$.

Экстремум функции для автономного режима достигается при

$$T_{\text{опт}} = -\frac{a^1}{2 \cdot a^2} = -\frac{-0,587}{2 \times (-0,048)} = -6,1 \text{ } ^\circ\text{C},$$

при этом $v_{m(\text{max})} = 18,2$ м/ч.

Таблица 2
Стойкость бурового инструмента и параметры износа при различных температурных режимах массива

Table 2
Drilling tool durability and wear parameters under various rock temperature conditions

Температурный диапазон массива, °С	Стойкость* долота (авт.), п. м	Стойкость* долота (ручн.), п. м	Расход долот (авт.), ед/1000 п. м	Расход долот (ручн.), ед/1000 п. м	Прирост стойкости, %
-2,0...-4,0	1480 ± 180	1120 ± 240	0,68	0,89	+32,1
-4,1...-6,0	1540 ± 160	1180 ± 210	0,65	0,85	+30,5
-6,1...-8,0	1320 ± 200	1040 ± 260	0,76	0,96	+26,9
-8,1...-10,0	1080 ± 220	870 ± 280	0,93	1,15	+24,1
-10,1...-12,0	890 ± 240	720 ± 300	1,12	1,39	+23,6

Примечание. Данные по шарошечным долотам диаметром 250 мм (Sandvik) и 270 мм (Epiroc); * определена как средний объём бурения до замены долота по критерию снижения скорости бурения на 15% от исходной.
Note. The data for the 250 mm (Sandvik) and 270 mm (Epiroc) roller cone bits; * defined as the average drilling volume prior to bit replacement, based on a 15% reduction in the drilling rate from the initial level.

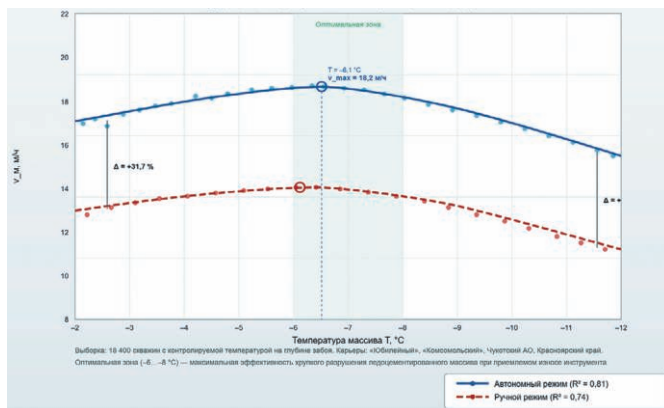


Рис. 2
Зависимость механической скорости бурения от температуры массива при автономном и ручном режимах управления

Fig. 2
Dependence of the mechanical penetration rate on the rock mass temperature in the autonomous and manual control modes

Физическая интерпретация: при понижении температуры от -2 до -6°C прочность ледоцементированного массива возрастает линейно ($\sigma_{\text{сж}}$ увеличивается с 80 до 120 МПа для доломитов), однако одновременно снижается пластичность породы, что обеспечивает более эффективное хрупкое разрушение шарошечным и вращательным инструментом [11]. При температурах ниже -8°C возрастает абразивность массива: содержание крупнокристаллического льда в порах и трещинах формирует включения с твёрдостью, сопоставимой с кварцем (6–7 по шкале Мооса при -10°C), что ускоряет износ вооружения долота [2].

Данные по износу бурового инструмента в зависимости от температуры массива и режима управления представлены в табл. 2. Прирост стойкости автономного режима обусловлен стабилизацией осевого усилия ($\pm 3\%$ от заданного) и крутящего момента ($\pm 5\%$), что исключает ударные перегрузки, характерные для ручного управления. В диапазоне $-10...-12^{\circ}\text{C}$ сокращение стойкости на 40% по сравнению с оптимальным диапазоном ($-4...-6^{\circ}\text{C}$) объясняется возрастанием доли абразивных ледяных включений в массиве.

Автономная система демонстрирует устойчивое преимущество в стойкости инструмента во всём диапазоне температур (23,6–32,1%), что обусловлено алгоритмом AutoDrill, непрерывно адаптирующим осевое усилие и частоту вращения к текущему сопротивлению забоя. Этот результат согласуется с данными о 20%-ном росте продуктивности автономных буровых систем, полученными на железорудных карьерах Западной Австралии [12], однако в условиях

ММП прирост стойкости более выражен (на 3–12 пп.), что объясняется большей вариативностью физико-механических свойств мёрзлого массива.

Детализированный анализ структуры рабочего времени показал принципиальные различия баланса смены для автономных и ручных установок (рис. 3). В автономном режиме чистое бурение занимает 57,3% сменного фонда (6,88 ч из 12 ч), перегон – 8,4% (1,01 ч), обслуживание – 6,2% (0,74 ч), метеорологические простои – 3,2% (0,38 ч), организационные простои – 2,9% (0,35 ч), аварийные простои – 1,2% (0,14 ч), прочее – 20,8% (2,50 ч, включая наращивание штанг, забуривание, выравнивание). В ручном режиме чистое бурение – 44,6% (5,35 ч), перегон – 12,1% (1,45 ч), обслуживание – 7,8% (0,94 ч), метеорологические простои – 8,7% (1,04 ч), организационные – 6,4% (0,77 ч), аварийные – 2,8% (0,34 ч), прочее – 17,6% (2,11 ч). Совокупный прирост полезного времени бурения в автономном режиме – 12,7 пп., что эквивалентно 1,53 ч дополнительного бурения за 12-часовую смену².

Экономический эффект перехода на автономное бурение оценён по методике дисконтированных денежных потоков на горизонте 5 лет. Капитальные затраты на оснащение одной установки системой автономного управления составляют 126–194 млн руб. (включая модуль автоматизации, инфраструктуру LTE/Wi-Fi, RTK-базовую станцию, оборудование диспетчерского пункта, пусконаладочные работы). Разброс определяется логистической удалённостью карьера: доставка оборудования на Чукотку обходится на 32% дороже, чем в Красноярский край. Операционная экономика складывается из шести составляющих, расчёт каждой детализирован ниже.

Экономия на дизельном топливе: разница удельного расхода 0,26 л/п. м \times средний годовой объём бурения 72000 п. м/установку = 18 720 л/год. Стоимость ДТ с доставкой на карьеры Якутии – 78–84 руб/л, Чукотки – 96–108 руб/л, Красноярского края – 62–68 руб/л. Экономия: 1,3–2,1 млн руб/год.

Экономия на персонале: при двухсменном режиме (2 \times 12 ч) одна ручная установка требует 4 операторов (2 смены \times 2 подменных). Автономная система позволяет 1 оператору диспетчерского пункта управлять 3 установками, т.е. на 3 установки требуется 3 оператора (с учётом подмены) вместо 12 – высвобождение 3 ед/установку. Годовой фонд оплаты труда оператора буровой установки с учётом районного коэффициента 1,7 и процентной надбавки 80% составляет 4,2–5,8 млн руб. в зависимости от региона

² Sandvik Mining and Rock Solutions. AutoMine® Surface Fleet: Technical White Paper. Stockholm: Sandvik AB; 2025. 32 p.

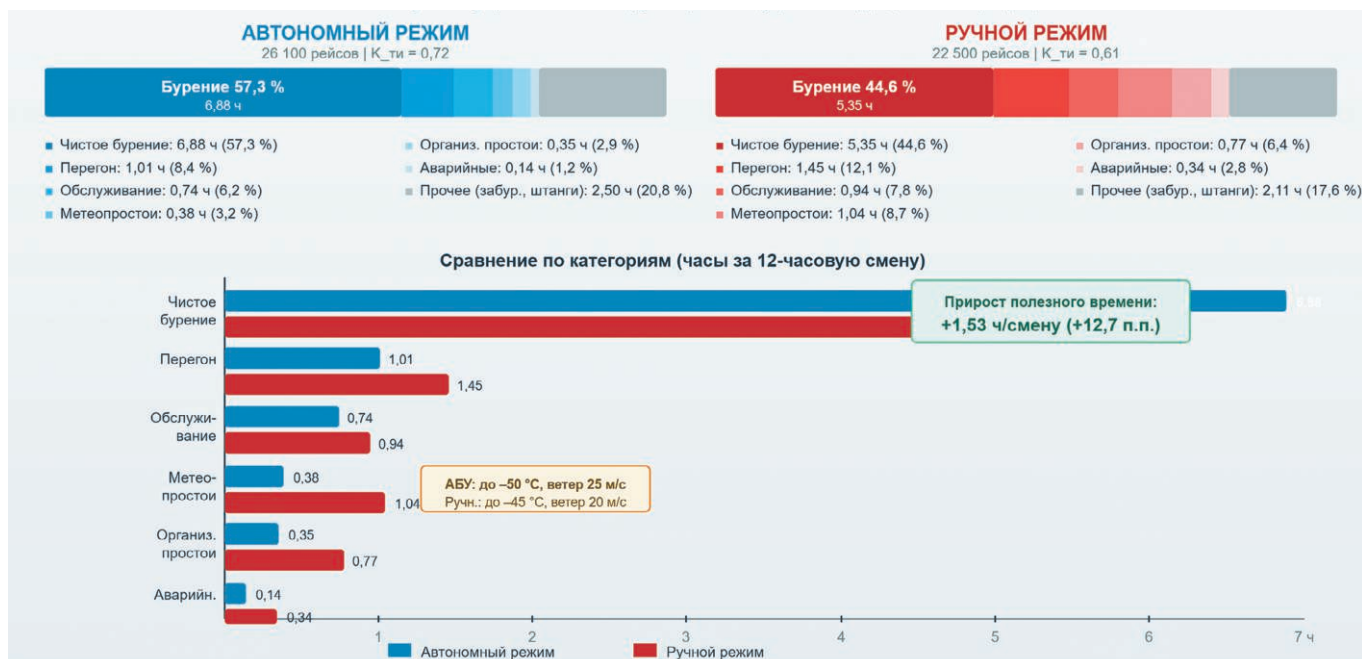


Рис. 3
Сравнительная структура баланса рабочего времени буровых установок за 12-часовую смену при автономном и ручном режимах управления

Fig. 3
A comparative breakdown of the drilling rig operating time for a 12-hour shift in the autonomous and manual control modes

(Якутия – 4,2 млн, Чукотка – 5,8 млн, Красноярский край – 3,6 млн). Экономия: 8,4–14,8 млн руб/год/установку. Экономия на буровом инструменте: при среднем годовом расходе 52 шарошечных долота (диаметр 250 мм, стоимость 480–650 тыс. руб.) для ручной установки автономный режим за счёт роста стойкости на 27% сокращает расход до 41 долота – экономия 11 ед. × 560 тыс. руб. = 6,2 млн руб. Для установок 270 мм (Чукотка) стоимость долота выше (720 тыс. руб.), экономия достигает 8,6 млн руб. Экономия на ремонте: стабилизация нагрузочных режимов (осевое усилие ±3 %, момент ±5 %) снижает износ трансмиссии, подшипников вращателя и гидросистемы. Среднегодовые затраты на ремонт ручной установки – 22–28 млн руб.; снижение на 18% даёт 4,0–5,0 млн руб/год. Экономия на ВВ: снижение перебура с 0,50 до 0,12 м/скважину при ~4 200 скважин/год = сокращение суммарного перебура на 1596 п. м. При среднем заряде 2,8 кг/п. м и стоимости эмульсионного ВВ 42 руб/кг экономия составляет 188 тыс. руб. Основной эффект – сокращение вторичного дробления негабарита (улучшение равномерности дробления на 15–20 %): 1,4–2,6 млн руб/год³.

Данные по экономической эффективности в разрезе карьеров представлены в табл. 3. Экономия на персонале рассчитана из высвобождения 3 ставок операторов на 1 установку (переход с 4 операторов в двухсменном режиме к 1 оператору диспетчерского пункта на 3 установки). ФОТ оператора с районным коэффициентом 1,7 и процентной надбавкой 80%: Якутия – 4,2 млн руб/год, Чукотка – 5,8 млн (коэффициент 2,0, надбавка 100%), Красноярский край – 3,6 млн (коэффициент 1,3, надбавка 30%). Эффект от дополнительного объёма бурения оценён через ускорение буровзрывного цикла и сокращение срока вскрытия горизонтов: при приросте 28% объёмов бурения условное высвобождение 1 буровой смены из 4 в неделю эквивалентно 10,2–18,4 млн руб/год в зависимости от стоимости

машино-смены на карьере. Капзатраты на Чукотке выше на 32% из-за сезонного завоза оборудования (навигация Северного морского пути) и необходимости строительства утеплённого диспетчерского модуля.

Дисперсионный анализ (двухфакторный ANOVA) подтвердил статистическую значимость влияния обоих факторов – режима управления ($F = 247,3; p < 0,001$) и температуры массива ($F = 89,6; p < 0,001$) – на механическую скорость бурения, а также значимость их взаимодействия ($F = 18,4; p < 0,001$). Последнее означает, что эффект автономизации неодинаков при разных температурах: максимальный прирост производительности (35,5%) наблюдается при температурах -6...-8°C, минимальный (21,3%) – при -2...-4°C. Данный результат объясняется тем, что в наиболее жёстких криогенных условиях (-8...-12°C) алгоритм AutoDrill демонстрирует существенное превосходство над оператором в адаптации режима бурения к резко возрастающей абразивности, тогда как при относительно «мягких» температурах (-2...-4°C) разница в квалификации оператора и алгоритма менее выражена [13]. Корреляционный анализ выявил значимые связи между КПЭ и параметрами массива. Коэффициент Пирсона для пары «температура массива – механическая скорость» составил $r = -0,68$ ($p < 0,001$) для автономного режима и $r = -0,54$ ($p < 0,001$) для ручного (отрицательные значения – т.к. при снижении температуры скорость сначала растёт). Для пары «коэффициент крепости – механическая скорость» $r = -0,82$ ($p < 0,001$) и $r = -0,79$ ($p < 0,001$) соответственно. Сильная обратная связь крепости и скорости ожидаема, однако примечательно, что в автономном режиме корреляция с температурой выше ($|r| = 0,68$ против 0,54), что свидетельствует о большей «чувствительности» алгоритма к геокриологическим условиям – он эффективнее использует благоприятный диапазон температур для увеличения нагрузки.

Множественная регрессионная модель сменной производительности для автономного режима имеет вид:

³ Deloitte. Tracking the Trends 2024: The Top 10 Issues Transforming the Future of Mining. London: Deloitte Touche Tohmatsu; 2024. 56 p.

Таблица 3
Экономические показатели автономного бурения на карьерах криолитозоны (на одну установку, 2024 г., млн руб.)

Table 3
Economic indicators of autonomous drilling in open-pit mines in the permafrost zone (per rig, 2024, million Russian Roubles)

Показатель	Карьер		Чукотский АО	Красноярский край	Среднее
	Юбилейный	Комсомольский			
Капитальные затраты	165,0	148,0	194,0	126,0	158,3
Экономия на топливе (в год)	1,6	1,4	2,1	1,3	1,6
Экономия на персонале (в год)	11,2	10,8	14,8	8,4	11,3
Экономия на инструменте (в год)	7,4	6,2	8,6	5,1	6,8
Экономия на ремонте (в год)	4,8	4,2	5,0	4,0	4,5
Экономия на ВВ и вторичном дроблении (в год)	2,1	1,8	2,6	1,4	2,0
Эффект от дополнительного объёма бурения (в год)	14,6	12,4	18,4	10,2	13,9
Совокупный годовой эффект	41,7	36,8	51,5	30,4	40,1
Срок окупаемости (NPV, $r = 12\%$), лет	4,2	4,3	3,9	4,4	4,2

$$Q_{\text{см}} = 214,8 - 4,72 \cdot f + 3,18 \cdot |T| - 0,26 \cdot |T|^2 - 1,94 \cdot L_{\text{скв}} + 0,83 \cdot D_{\text{скв}}$$

$$R^2 = 0,87; F = 312,4; p < 0,001; n = 26\ 100,$$

где f – коэффициент крепости; $|T|$ – модуль температуры массива, °C; $L_{\text{скв}}$ – глубина скважины, м; $D_{\text{скв}}$ – диаметр скважины, дм.

Все коэффициенты значимы ($p < 0,01$). Модель объясняет 87% дисперсии производительности. Наибольший вклад вносит крепость пород (стандартизированный $\beta = -0,41$), затем температура ($\beta = 0,28$) и глубина скважины ($\beta = -0,22$) [14].

Анализ безопасности труда за период наблюдения: при автономном режиме зарегистрировано 0 инцидентов с травматизмом операторов буровых станков (операторы работают в диспетчерской при температуре +20°C), при ручном режиме – 14 инцидентов, из них 3 средней тяжести (обморожения, травмы при обслуживании в условиях низких температур). Коэффициент частоты травматизма (LTIFR) для буровых работ снизился с 2,8 до 0 на 1 млн чел.-ч⁴.

Внедрение автономных буровых установок на карьерах, расположенных в зоне многолетнемерзлых пород, сопряжено с необходимостью комплексной оценки экологических, экономических и социальных последствий модернизации добычных процессов. Повышение производительности бурения за счёт автоматизации должно учитывать ограничения, обусловленные хрупкостью криолитозоны и рисками деградации мерзлоты при интенсификации горных работ. Как показано в работе [15], стратегии устойчивого развития при управлении природными ресурсами России требуют интегрированного подхода, объединяющего технологическую эффективность с минимизацией экологического ущерба, что непосредственно распространяется на проектирование режимов эксплуатации автономного бурового оборудования в криогенных условиях.

Заключение

Комплексное исследование динамики производительности автономных буровых установок на четырёх карьерах

криолитозоны (совокупно 1,87 млн п. м бурения, 48 600 рейсов, период 2020–2025 гг.) позволило установить количественные закономерности, имеющие непосредственное значение для проектирования буровзрывных работ в зоне ММП. Автономный режим обеспечивает прирост сменной производительности на 28,2% (175,3 п. м/смену против 136,7 п. м/смену), механической скорости – на 31,7% (18,7 м/ч против 14,2 м/ч), коэффициента технического использования – на 18,4% (0,72 против 0,61). Точность позиционирования скважин улучшается на 61,2% (отклонение 38 мм против 98 мм), перебур сокращается на 76% (0,12 м против 0,50 м на скважину). Расход дизельного топлива снижается на 12,5% (1,82 л/п. м против 2,08 л/п. м), стойкость бурового инструмента возрастает на 23,6–32,1% в зависимости от температуры массива. Метеорологические простои сокращаются с 8,7 до 3,2% сменного фонда благодаря расширенному рабочему диапазону автономных систем (до –50°C и ветра 25 м/с). Принципиальной находкой является выявленная нелинейная зависимость производительности от температуры мерзлого массива с экстремумом при –6,1°C для автономного режима. В диапазоне –2...–6 °C механическая скорость возрастает на 9,4% за счёт хрупкого разрушения ледоцементированных пород; при понижении ниже –8 °C прирост нивелируется ускоренным износом инструмента (стойкость долота падает на 40% при переходе от –5 к –11°C). Данная зависимость аппроксимирована полиномиальной моделью второго порядка с $R^2 = 0,81$, что позволяет прогнозировать производительность в зависимости от сезонных геотермических колебаний.

Экономический анализ подтвердил окупаемость перехода на автономные системы за 3,9–4,4 года при совокупном годовом эффекте 30,4–51,5 млн руб. на установку. Максимальный эффект достигается на карьерах с экстремальными климатическими условиями (Чукотский АО: прирост производительности 35,5%, срок окупаемости 3,9 года), где дифференциал между автономным и ручным режимами наиболее выражен из-за ограничений работы оператора при сверхнизких температурах и высокой стоимости рабочей силы с полярными надбавками.

Регрессионная модель сменной производительности ($R^2 = 0,87$) выявила доминирующее влияние крепости пород ($\beta = -0,41$), температуры массива ($\beta = 0,28$) и глубины скважины ($\beta = -0,22$), что позволяет использовать её для оперативного планирования буровзрывных работ. Двухфак-

4 Epiroc AB. Pit Viper Autonomous Operations: A Decade of Safety, Productivity and Sustainability. Stockholm: Epiroc AB; 2025. Press Release, October 22, 2025.

торный ANOVA подтвердил значимость взаимодействия факторов «режим управления × температура» ($F = 18,4$; $p < 0,001$): эффект автономизации максимален при $-6...-8^{\circ}\text{C}$ (прирост 35,5%) и минимален при $-2...-4^{\circ}\text{C}$ (21,3%). Полученные результаты расширяют представление о функционировании автономных горных систем в экстремальных природно-климатических условиях. Традиционное понимание многолетнемёрзлых пород как фактора, исключительно затрудняющего горные работы, нуждается в корректировке: в определённом температурном диапазоне криогенное состояние массива объективно благоприятствует процессу бурения, и автономные системы способны извлечь из этого большую выгоду, чем операторче-

ловек. LTIFR по буровым работам снизился с 2,8 до 0 на 1 млн чел.-ч, что подтверждает безусловный приоритет автономизации в области промышленной безопасности на карьерах Крайнего Севера.

Перспективы дальнейших исследований связаны с интеграцией данных MWD (Measurement While Drilling) в адаптивные алгоритмы управления для прогнозирования границ мёрзлых и талых зон в реальном времени, с разработкой специализированного бурового инструмента для криогенных условий (с износостойкими покрытиями на основе поликристаллического алмазного компактного – PDC), а также с масштабированием полученных результатов на подземные горные работы в зоне ММП.

Список литературы / References

- 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>
- Ганиев Р. И., Аглиуллин А. Х., Исмаков Р. А., Дебоер Л. Повышение эффективности очистки наклонно направленных скважин с использованием самооткрывающегося циркуляционного переводника. *Горный журнал*. 2024;(11):18–23. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.11.03>
Ganiev R.I., Agliullin A.Kh., Ismakov R.A., Deboir L. Enhancement of cleaning efficiency in slant wells using self-opening circulation sub. *Gornyi Zhurnal*. 2024;(11):18–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.11.03>
- Nikolakopoulos G., Koval A., Fumagalli M., Konieczna-Fuławka M., Santas Moreu L., Vigara-Puche V. et al. Autonomous drilling and the idea of next-generation deep mineral exploration. *Sensors*. 2025;25(13):3953. <https://doi.org/10.3390/s25133953>
- Новоселова И.Ю., Новоселов А.Л. Методы оценки рисков реализации проектов хозяйственного развития арктических регионов. *Экономика. Налоги. Право*. 2023;16(3):109–119. <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-3-109-119>
Novoselova I.Y., Novoselov A.L. Methods of risk assessment for the implementation of economic development projects in the Arctic regions. *Economics, Taxes & Law*. 2023;16(3):109–119. (In Russ.) <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-3-109-119>
- Еремин С.Г., Капитанец Ю.В., Зубенко А.В., Бартошевич И.А., Кушёв 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>
- Шедько Ю.Н., Харченко К.В., Зуденкова С.А., Москвитина Е.И., Бабаян Л.К. Синергетический подход к управлению карьерами с применением больших данных и интеллектуальных систем предиктивной аналитики. *Горная промышленность*. 2025;(1):154–160. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-154-160>
Shedko Yu.N., Kharchenko K.V., Zudenkova S.A., Moskvitina E.I., Babayan L.K. A synergetic approach to open-pit mine management using big data and intelligent predictive analytics systems. *Russian Mining Industry*. 2025;(1):154–160. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-154-160>
- 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>
- Abzhanova A., Vykov A., Surzhik D., Mukhamejanova A., Orazbayev B., Svirina A. Methods for assessing the layered structure of the geological environment in the drilling process by analyzing recorded phase geoelectric signals. *Mathematics*. 2024;12(14):2194. <https://doi.org/10.3390/math12142194>
- Агарков И.Б., Крючков И.С., Стороженко Е.А., Игнатенко И.М. Районирование месторождений полезных ископаемых по показателю крепости, определяемому через энергоёмкость бурения скважин. *Горная промышленность*. 2025;(5S):107–114. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-107-114>
Agarkov I.B., Kryuchkov I.S., Storozhenko E.A., Ignatenko I.M. Zoning of mineral deposits based on the rock hardness ratio determined through the energy intensity of blast hole drilling. *Russian Mining Industry*. 2025;(5S):107–114. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-107-114>

10. Каяни Д.А., Захур М.К., Эмад М.З., Шахид А.Ш.А. Прогнозирование параметров буримости осадочных горных пород. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2024;(5):124–132. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20240511>
Kayani J.A., Zahoor M.Kh., Emad M.Z., Shahid A.Sh.A. Prediction of drillability of sedimentary rocks. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2024;(5):124–132. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20240511>
11. Юнгмейстер Д.А., Исаев А.И., Гасымов Э.Э. Обоснование параметров погружного пневмоударника бурового станка для регулирования скорости бурения потоком воздуха. *Горный журнал*. 2022;(7):72–77. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.07.12>
Yungmeyster D.A., Isaev A.I., Gasymov E.E. Substantiation of dth air drill hammer parameters for penetration rate adjustment using air flow. *Gornyi Zhurnal*. 2022;(7):72–77. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.07.12>
12. Halatchev R.A., Crago B.J. BHP Autonomous drill performance analysis: Western Australia Iron Ore. In: *Proceedings of the AusIMM Iron Ore Conference, Perth, 8–20 September 2023*. Perth: AusIMM; 2023, pp. 412–419.
13. Ишейский В.А., Мартынушкин Е.А., Васильев А.С., Смирнов С.А. Особенности сбора данных в процессе бурения взрывных скважин для формирования геоструктурных блочных моделей. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021;13(4):608–619.
Isheiskiy V.A., Martynushkin E.A., Vasiliev A.S., Smirnov S.A. Data collection features of during the blast wells drilling for the formation of geostructural block models. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021;13(4):608–619. (In Russ.)
14. Супрун В.И., Ворошилин К.С., Бурцев С.В., Минибаев Р.Р. Регулирование гранулометрического состава извлекаемых горных пород при отработке угольных и карбонатных месторождений. *Горный журнал*. 2021;(7):61–65. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.07.10>
Suprun V.I., Voroshilin K.S., Burtsev S.V., Minibaev R.R. Grain-size control in coal and carbonate rock mining. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(7):61–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.07.10>
15. Лютягин Д.В. Оценка эффективности внедрения стратегий устойчивого развития в управление природными ресурсами России: анализ экологических, экономических и социальных последствий. *Вопросы экологии*. 2024;37(1):215–244. <https://doi.org/10.25726/z8423-9115-8050-s>
Lyutyagin D.V. Assessment of the effectiveness of the implementation of sustainable development strategies in the management of Russia's natural resources: analysis of environmental, economic and social impacts. *Voprosy Ecologii*. 2024;37(1):215–244. (In Russ.) <https://doi.org/10.25726/z8423-9115-8050-s>

Информация об авторах

Кочетков Евгений Павлович – 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/0000-0002-1136-6804>; e-mail: epkochetkov@fa.ru

Алферов Валерий Николаевич – 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/0000-0002-0719-1087>; e-mail: VAlferov@fa.ru

Трифонов Павел Владимирович – кандидат экономических наук, доцент кафедры операционного и отраслевого менеджмента факультета «Высшая школа управления», Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-2228-5441>; e-mail: pvtrifonov@fa.ru

Каширин Сергей Владимирович – кандидат исторических наук, доцент кафедры операционного и отраслевого менеджмента факультета «Высшая школа управления», Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-9401-2867>; e-mail: svkashirin@fa.ru

Мокрова Лидия Павловна – кандидат экономических наук, доцент кафедры операционного и отраслевого менеджмента факультета «Высшая школа управления», Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0001-0190-9166>; e-mail: LMokrova@fa.ru

Information about the authors

Evgeny P. Kochetkov – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor 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/0000-0002-1136-6804>; e-mail: epkochetkov@fa.ru

Valery N. Alferov – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor 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/0000-0002-0719-1087>; e-mail: VAlferov@fa.ru

Pavel V. Trifonov – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of Operational and Industry Management, Faculty of Higher School of Management, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-2228-5441>; e-mail: pvtrifonov@fa.ru

Sergey V. Kashirin – Cand. Sci. (Hist.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operational and Industry Management, Faculty of Higher School of Management, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-9401-2867>; e-mail: svkashirin@fa.ru

Lidiia P. Mokrova – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of Operational and Industry Management, Faculty of Higher School of Management, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0001-0190-9166>; e-mail: LMokrova@fa.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 08.02.2026

Поступила после рецензирования: 24.03.2026

Принята к публикации: 02.04.2026

Article info

Received: 08.02.2026

Revised: 24.03.2026

Accepted: 02.04.2026