

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ БЕЗВЗРЫВНОЙ ОТРАБОТКИ НА УДАРООПАСНЫХ БОКСИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ С ОТБОЙКОЙ ГИДРОМОЛОТАМИ

А.В. Холмский¹, С.И. Фомин¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: chelmick@yandex.ru

Аннотация: Рассмотрена проблема снижения производительности, безопасности и повышение себестоимости ведения очистных работ при отработке удароопасных бокситовых месторождений Северного Урала. Определены факторы, оказывающие наибольшее влияние на возможность повышения производительности, безопасности и снижения себестоимости ведения работ. Выполнен анализ горно-геологических и горнотехнических условий отработки бокситовых месторождений Северного Урала. Определены показатели производительности и себестоимости при используемой на данный момент технологической схеме отработки месторождения. Выполнен обзор и анализ наиболее конкурентоспособных способов отработки удароопасных месторождений, определен тип оборудования для высокопроизводительной отбойки руды в данных условиях отработки. Выполнен обзор классов гидромолотов, опыта их применения на открытых горных работах и при проходке тоннелей. Разработан метод определения производительности гидромолотов, учитывающий прочностные свойства горных пород и эксплуатационные параметры оборудования. Разработан алгоритм расчета паспорта отбойки руды гидромолотами. Паспорт отбойки руды гидромолотом позволяет повысить эффективность очистных работ при оптимальных эксплуатационных затратах. Разработана технологическая схема безвзрывной отработки удароопасных бокситовых месторождений, включающая отбойку руды гидромолотами и циклично-поточный характер ведения очистных работ. Предлагаемая технологическая схема обеспечивает наивысшую производительность и безопасность при снижении себестоимости добычи и эксплуатации.

Ключевые слова: подземная разработка, удароопасные месторождения, безвзрывная отработка, безвзрывная технология, гидромолот, отбойка руд гидромолотами, технологические схемы, численные исследования.

Для цитирования: Холмский А. В., Фомин С. И. Обоснование применения технологической схемы безвзрывной отработки на удароопасных бокситовых месторождениях с отбойкой гидромолотами // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 7. – С. 40–54. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_40.

Substantiation of blast-free technology for mining rockburst-hazardous bauxite deposits using hydraulic breakers

A.V. Kholmickiy¹, S.I. Fomin¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: chelmick@yandex.ru

Abstract: The article focuses on the problem connected with the low productivity, poor safety and increased cost of mining of rockburst-hazardous bauxite deposits in the Northern Ural. The factors that affect productivity, safety and cost of mining are identified. The geological and geotechnical conditions of bauxite mining in the Northern Ural are analyzed. The figures of performance and cost of the mining process flow currently in use are determined. The most competitive methods of mining rockburst-hazardous deposits are reviewed, and the equipment for the high production ore breaking in the given mining conditions is determined. The range and experience of hydraulic breakers in surface mining and in underground tunneling are discussed. The method is developed to determine capacity of hydraulic breakers with regard to strength characteristics of rocks and operating parameters of equipment. The hydraulic breaking flowchart algorithm is developed. The ore breaking flow chart using hydraulic hammers enhances stoping efficiency at optimal operating costs. The developed flowsheet of blast-free mining of rockburst-hazardous bauxite deposits includes hydraulic breaking of ore with the cyclic-and-continuous technology. The proposed flowsheet ensures the highest mining safety and production capacity at reduced operating cost.

Key words: underground mining, rockburst-hazardous deposits, blast-free mining, blast-free technology, hydraulic breaker, hydraulic ore breaking, process flowsheets, numerical studies.

For citation: Kholmkiy A. V., Fomin S. I. Substantiation of blast-free technology for mining rockburst-hazardous bauxite deposits using hydraulic breakers. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(7):40-54. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_40.

Введение

Месторождения бокситов в России имеют сложные горно-геологические и горнотехнические условия разработки при низком качестве добываемого сырья. Более 70% бокситов в РФ добываются АО «Североуралбокситруда» (АО «СУБР»). Однако основные потребности отечественной алюминиевой промышленности удовлетворяются за счет импорта. Последние 15 лет ситуация на российском рынке характеризуется дефицитом сырья для алюминиевой отрасли, который частично покрывается ежегодным объемом импорта в размере 3 млн т. Рудниками АО «Североуралбокситруда» (АО «СУБР») ведется отработка месторождений Красная Шапочка, Ново-Кальинское, Кальинское, Черемуховское. Около 65% высококачественных бокситов добываются на месторождениях АО «СУБР» при суммарной производительности 3,3 млн т руды в год.

АО «СУБР» планирует увеличить производственную мощность предприятия до 2030 г. за счет перехода к более производительным и безопасным технологическим схемам отработки запасов, которые разведаны до глубины 2000 м [1]. В подземную отработку будут вовлечены участки рудного тела, залегающие на больших глубинах. С увеличением глубины ведения горных работ повышается риск возникновения горных ударов [2]. Данный геодинамический фактор, а также ряд других технических и технологических факторов ограничивают развитие фронта горных работ и увеличение производительности предприятия.

Анализ опыта эксплуатации бокситовых месторождений показывает, что сохранение традиционных систем разработки в сложных горно-геологических условиях наряду с широким применением специальных профилактических

мероприятий приводит к значительному увеличению затрат за счет необходимости прогнозирования и профилактики горных ударов, больших объемов работ по профилактике удароопасности. Выполнение профилактических работ не обеспечивает видимого снижения опасности горных ударов, поскольку снятие концентрации напряжений в краевых зонах рудных залежей влечет за собой смещение зон повышенной напряженности вглубь массива, в результате чего сохраняется или возрастает неконтролируемая удароопасность со стороны нарушенного горными работами массива горных пород, выражающаяся в форме горно-тектонических ударов. Повышение безопасности и производительности при подземной разработке месторождений Североуральского бокситового бассейна является приоритетной задачей алюминиевой промышленности России ввиду роста рыночного спроса на алюминий.

Целью исследований является повышение производительности и безопасности при ведении очистных работ на рудниках АО «СУБР» за счет применения технологических схем безвзрывной отработки с отбойкой бокситовой руды гидромолотами.

Постановка проблемы

Бокситовые месторождения АО «СУБР» отрабатывают на глубине 1200 –

1400 м с применением камерно-столбовой системы разработки [3] буровзрывным способом (доля отрабатываемых с применением этой системы запасов составляет 85%). Условия залегания [4, 5] рудного тела характеризуются как сложные, угол падения залежи мощностью 6 м составляет 25 – 35°, с изменчивой гипсометрией лежащего бока. Крепость бокситов, слагающих рудное тело, изменяется от 4 до 8 по шкале М.М. Протодьяконова в зависимости от марки боксита. На первом этапе месторождения вскрыты вертикальными стволами. На втором этапе вскрытие осуществляли наклонными стволами ввиду увеличения глубины разработки до отметки ниже 1000 м.

Такие элементы системы разработки, как камеры и целики, варьируются в зависимости от применяемой технологической схемы. Применяются целики двух типов: барьерные, между которыми при отработке оставляют столбчатые целики; ленточные целики, исполняющие функции как барьерных, так и междукамерных целиков.

Применение буровзрывного способа отбойки руды при подземной разработке Североуральских бокситовых месторождений имеет ряд существенных недостатков, главным из которых является циклический характер ведения работ по очистной выемке (рис. 1).

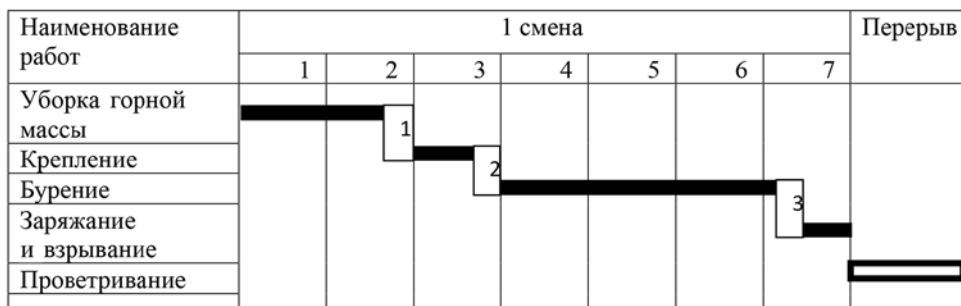


Рис. 1. Циклограмма очистных работ при технологических схемах с безвзрывной отбойкой руды (составлено А.В. Холмским)

Fig. 1. Cyclic chart of stoping with blast-free ore breaking flowsheets (by A. V. Kholmsky)

Анализ данных, представленных на рис. 1, позволяет сделать вывод, что технологические схемы с безвзрывной отбойкой руды обладают существенным недостатком — перекрывающимися перерывами между операциями забойного цикла (1, 2 и 3 на циклограмме). Перерывы обусловлены перестановкой оборудования в забое, подготовительно-заключительными операциями. В процессе применения циклических методов ведения очистных работ, в частности, с буровзрывной отбойкой руды, повышение производительности [6, 7] может быть достигнуто лишь изменением параметров системы разработки или увеличением количества забоев в одновременной работе.

На рис. 2 представлена диаграмма техногенных факторов возникновения горных ударов.

Данные, представленные на рис. 2, показывают, что взрывная отбойка провоцирует больше половины горных ударов, это является фактором, ограничивающим повышение производительности. Горнотехнические условия отработки Североуральских бокситовых месторождений не позволяют кардинально изменить параметры паспорта буровзрывных работ за счет увеличения объема одной заходки, так как это приведет к снижению уровня безопасности при ведении очистных работ.

Анализ техногенных факторов возникновения горных ударов [8, 9] с учетом горнотехнических условий ведения очистных работ на рудниках АО «СУБР» подтверждает актуальность обоснования и разработки параметров технологической схемы, обеспечивающей увеличение производительности, безопасности и экономической эффективности подземной отработки бокситовых месторождений [10, 11].

Методика проведения исследований

Анализ передового опыта в решении вопросов повышения производительности и безопасности горных работ позволяет выделить несколько путей повышения показателей очистной выемки:

- за счет изменения организации работ в выемочном блоке;
- за счет перехода к другим системам разработки;
- за счет применения безвзрывных способов отбойки руды.

Изменения в организации работ по очистной выемке затрагивают количество одновременно обрабатываемых забоев в одном блоке. Помимо количества забоев, можно распределить операции одного забойного цикла по двум и более забоям при переходе к циклично-поточному методу ведения очистных работ. Такое решение способно обеспечить по-

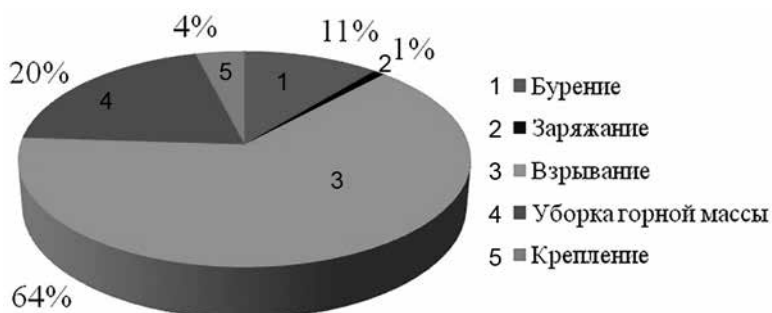


Рис. 2. Техногенные факторы возникновения горных ударов (составлено А.В. Холмским)

Fig. 2. Manmade factors of rock-bursting (by A.V. Kholmsky)

вышение производительности горных работ, однако на безопасность при отработке месторождений, склонных к горным ударам, увеличение числа забоев в одновременной работе повлияет отрицательно. При большом количестве обнаженных поверхностей и разгруженных участков рудного тела в пределах эксплуатационного блока горное давление неизбежно повышается в области концентраторов напряжений, к которым относят, в первую очередь, целики. Организация буровзрывных работ не позволяет достичь ожидаемого прироста производительности из-за невозможности исключения так называемых неперекрываемых перерывов.

Системы разработки с закладкой выработанного пространства обеспечивают высокую безопасность ведения очистных работ, особенно на месторождениях с неустойчивыми рудами и вмещающими породами. Применение закладки позволяет осуществлять очистную валовую выемку руды с минимальными потерями и разубоживанием, что в свою очередь позволяет повысить производительность по добыче. Однако себестоимость добычи руды возрастает при учете удельных затрат на закладочные работы, а высокая трудоемкость закладочных работ ограничивает темп ведения очистной выемки, и в результате преимущества системы разработки с закладкой выработанного пространства нивелируются.

Очистные и проходческие комбайны хорошо зарекомендовали себя на подземных горных работах в условиях отработки слабых руд и руд средней крепости. Применение комбайнов позволяет осуществить переход на циклично-поточные схемы ведения очистной выемки, при которых производительность по добыче зависит от физико-механических свойств руды. Комбайны избирательного действия [12] способны отделять

полезное ископаемое от массива селективно, что способствует повышению качества рудной массы. Однако у проходческих и очистных комбайнов имеется существенный недостаток — зависимость массы комбайна от мощности. Как показывает практика, легкие и средние комбайны применяют на отработке полезных ископаемых с коэффициентом крепости до 4 по шкале М.М. Протодьяконова. При отработке пород крепостью свыше 4–6 необходимо применять тяжелые комбайны, эксплуатационная масса которых может достигать 120 т. В условиях отработки Североуральских бокситовых месторождений применение такой добычной техники нецелесообразно из-за низкой мобильности комбайнов, большой эксплуатационной массы, ограничения по крепости обрабатываемых руд.

Исследованиями в области способов отбойки полезного ископаемого от массива, изучением машин ударного действия и высокопроизводительных технологических схем занимались такие ученые, как В.С. Марков, В.Н. Лабутин, Б.А. Лысиков, А.В. Резник, А.В. Дубинин, Е.Б. Бексалов, Э.Н. Абсаматов, А.В. Половинко, Г.А. Холодняков, Т. Caldwell, Y. Goupin, I. Fan, Ю.В. Михайлов, М.И. Агошков, А.А. Мансуров, Д.В. Сидоров, А.П. Корнаушенко, Э.А. Карапетян, В.Н. Пустобриков, В.А. Кравченко, Л.С. Ушаков, А.Б. Жабин и другие. Работы авторов посвящены анализу различных способов отбойки, типов оборудования для взрывной и безвзрывной технологии ведения очистных работ, как на подземных рудниках, так и при открытой разработке месторождений [13, 14]. В исследованиях затрагивают различные аспекты ведения очистных работ, в том числе организацию работ, оборудование для отбойки руды, перспективные безвзрывные способы отделения руды от массива, технологические схемы

ведения очистных работ на удароопасных месторождениях.

Наиболее перспективным способом отбойки крепких руд считают применение гидромолотов [15 – 17] при проходке тоннелей, подземных горных выработок и т.д. Гидромолоты делят на три класса (легкие, средние, тяжелые), при этом гидромолоты не имеют ограничений по физико-механическим свойствам обрабатываемой руды. Гидромолоты могут быть установлены на машины с различным типом шасси: с колесным ходом, гусеничным ходом, шагающие машины, с рельсовой базой. Сравнительно небольшая эксплуатационная масса машин-носителей позволяет обеспечить высокую техническую готовность оборудования, а также расширяет область применения гидромолотов [18, 19].

Применение гидромолотов на открытых горных работах показало повышение производительности горных работ, снижение себестоимости добычи по сравнению с буровзрывным способом отбойки, повышение качества дробления, улучшение качества добываемого полезного ископаемого. Производительность гидромолота по породам средней крепости на открытых горных работах достигает 700 м³ в смену. В зависимости от мощности применяемого гидромолота производительность варьируется от 150 до 500 м³ в смену. Проходку тоннелей гражданского назначения проводят в разных горно-геологических условиях, а назначение тоннелей предусматривает широкий спектр поперечных сечений строящегося сооружения. Скорость подвигания очистного забоя при использовании гидромолотов на проходке тоннелей может поддерживаться круглосуточно и составлять 3,5 м в смену, что в 1,5 раза превышает показатели буровзрывного способа отбойки, например, тоннель сечением 90 м² был пройден со скоростью 3 м в смену.

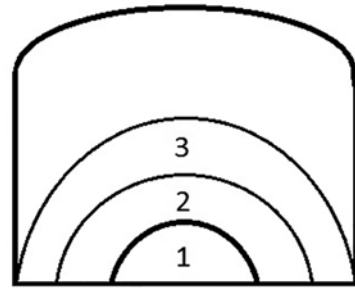


Рис. 3. Технологическая схема отбойки горных пород гидромолотами (составлено А.В. Холмским)
Fig. 3. Flowsheet of ore mining by hydraulic breakers (by A. V. Kholmisky)

Известны различные схемы отбойки, характеризующиеся одним принципом: отбойку производят на обнаженную поверхность в плоскости забоя. На рис. 3 представлена схема отбойки, заключающаяся в формировании ниши 1 в нижней части забоя размерами 1×1 м. После формирования ниши 1, осуществляется отбойка вышележащих слоев горной породы 2 и 3.

Технологическая схема (см. рис. 3) отбойки [20, 21] основана на влиянии горного давления и собственного веса горной породы, но не учитывает прочностные свойства массива пород, поэтому производительность отбойки по данной схеме будет зависеть от того, насколько мощный гидромолот применяют при проходке горных выработок.

Для определения оптимальной [22, 23] производительности гидромолота рассмотрен принцип воздействия ударной нагрузки на массив горных пород в процессе отбойки горной массы (рис. 4).

По мере распространения ударной нагрузки σ_x на расстояние x после первого удара она достигает своего максимума и впоследствии затухает. Ударная нагрузка σ_x зависит от давления в гидравлической системе P , коэффициента динамичности удара k_d и коэффициента Пуассона, который для большинства сталей равен 0,3

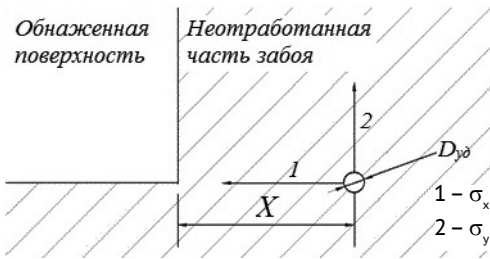


Рис. 4. Распространение ударной нагрузки в плоскости забоя (составлено А.В. Холмским)

Fig. 4. Impact load propagation in face plane (by A. V. Kholmisky)

$$\sigma^{(n)} = P \cdot k_d \cdot 0,3 \quad (1)$$

Коэффициент динамичности удара характеризует величину углубки рабочего инструмента гидромолота в результате нанесения удара и функционально зависит от массы гидромолота и энергии удара.

Точка максимума — это пик напряжений, образующихся в массиве пород [24, 25] после нанесения удара. Если расположить точку нанесения первого удара таким образом, что пик напряжений от второго удара наложится на пик напряжений от первого удара, то возникает возможность повысить эффективность отбойки горной массы гидромолотом (рис. 5). Величины x' и L зависят

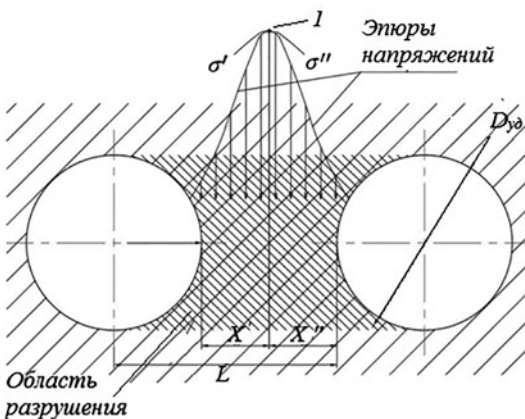
от предела прочности пород на сжатие $\sigma_{сж}$, радиуса ударника $R_{уд}$, диаметра ударника $d_{уд}$, предела прочности пород на сжатие $\sigma_{уд}'$ и величины ударной нагрузки σ_x , возникающей в результате нанесения удара. Зависимость искомых расстояний от перечисленных параметров описывают формулами (2) и (3).

$$x' = x'' = \frac{d_{уд}}{\left(\frac{\sigma_{сж}}{\sigma^{(n)}}\right)^{2/3}} \quad (2)$$

$$L = x' + x'' + R_{уд}. \quad (3)$$

Определение производительности [26] гидромолота с учетом формул (2) и (3) позволяет учитывать прочностные свойства горной породы и определять количество ударов, необходимое для отбойки i -го слоя породы.

Полученные в результате расчета расстояния x' и L следует использовать для построения паспорта отбойки пород гидромолотом, позволяющего определить производительность гидромолотов [27] в единицах измерения сменной или суточной производительности по объемам добываемой руды, а также определить себестоимость применения гидромолотов в конкретных горно-геологических условиях.



1 — пик напряжений

X' — расстояние от точки нанесения удара до пика напряжений, возникающих в результате удара

L — расстояние между центрами нанесения удара

Рис. 5. Схема влияния пиков напряжений от соседних ударов в плоскости забоя (составлено А.В. Холмским)

Fig. 5. Cross-effect of stress peaks generated by neighbor impacts in face plane (by A. V. Kholmisky)

При построении паспорта отбойки пород гидромолотом необходимо учитывать тот факт, что при работе на дополнительную обнаженную поверхность эффективность отбойки повышается. С учетом этого факта формулы (4) и (5) применяются для определения расстояний между точками нанесения удара за пределами вруба. В соответствии с этим вместо диаметра и радиуса ударника в формуле учитывают диаметр вруба $d_{вр}$ и радиус вруба $R_{вр}$ соответственно.

$$x' = x'' = \frac{d_{вр}}{\left(\frac{\sigma_{сж}}{\sigma^{(r)}}\right)^{2/3}} \quad (4)$$

$$L = x' + x'' + R_{вр} \quad (5)$$

Таким образом, при определении расстояний между точками нанесения удара внутри контуров вруба и за его пределами можно построить паспорт отбойки породы гидромолотом (рис. 6), с помощью которого определяется производительность гидромолотов в конкретных горно-геологических условиях.

Обсуждение результатов

Для обоснования применения технологических схем безвзрывной [28, 29] подземной отработки Североуральских бокситовых месторождений с применением гидромолотов необходимо рассмотреть ряд показателей, от определения которых зависит эффективность разработки. Наиболее значимыми показателями являются: производительность, безопасность и себестоимость руды при применении технологической схемы. К сравнению приняты две технологические схемы отработки:

- применяемая в настоящее время, с буровзрывной отбойкой руды и самоходным оборудованием на доставке (технологическая схема 1),

- технологическая схема безвзрывной [30] отработки с гидромолотами на отбойке руды и самоходным оборудова-

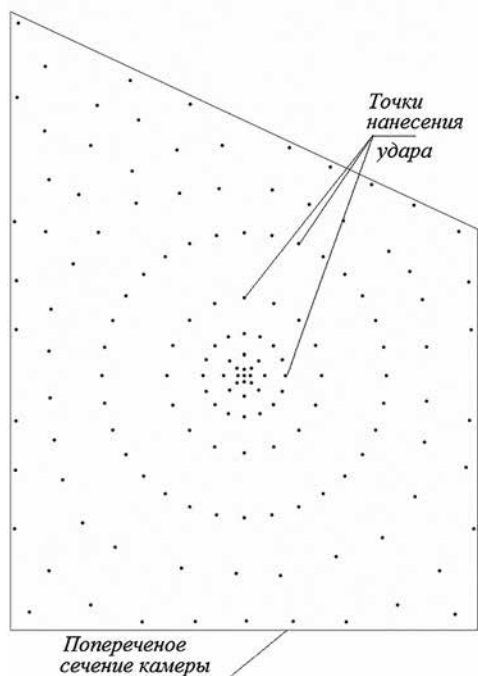


Рис. 6. Паспорт отбойки горных пород гидромолотом (составлено А.В. Холмским)

Fig. 6. Hydraulic rock breaking flowchart (by A.V. Kholmsky)

нием на доставке (технологическая схема 2).

Обе технологические схемы применяются в рамках камерно-столбовой системы разработки со следующими параметрами: длина и ширина выемочного блока — 170×120 м, длина и ширина ленточных целиков — 55×4 м, длина и ширина выемочных камер — 55×6 м, мощность рудного тела — 6 м, угол падения рудного тела — 25°.

При реализации технологической схемы 1 в одновременной работе находятся два забоя, а значит, работы децентрализованы. Деконцентрация влечет за собой снижение устойчивости удароопасного массива [31, 32] и увеличение горного давления в зоне формирования ленточных целиков. Дополнительным фактором, влияющим на устойчивость удароопасного массива, является ско-

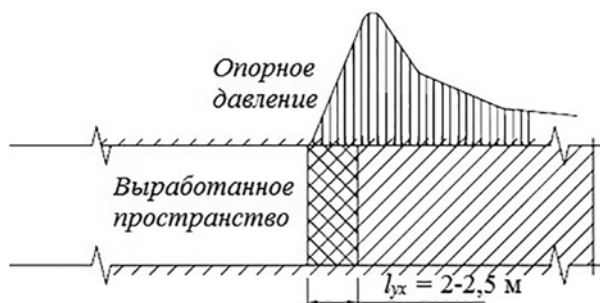


Рис. 7. Отбойка руды при технологической схеме 1 (составлено А.В. Холмским)
 Fig. 7. Ore breaking with flowsheet 1 (by A.V. Kholmisky)

рость подвигания забоя. При технологической схеме 1 руду отбивают буровзрывным способом, длина уходки l_{yx} составляет 2,4 м (рис. 7). Интенсивная выемка такого объема горной массы [33, 34] из удароопасного массива повышает риск возникновения горных ударов. Также сейсмическое воздействие взрывных работ может повлечь за собой разупрочнение окружающего массива пород.

По сравнению с технологической схемой 1, технологическая схема 2 [35] лишена вышеописанных недостатков по фактору безопасности ведения горных работ. Сейсмическое воздействие работы гидромолота по величине сравнимо с воздействием бурения на массив горных пород. Очистные работы ведут одним забоем, что характеризуется более высокой концентрацией горных работ и

повышением устойчивости удароопасного массива. Сменная скорость подвигания очистного забоя повышается в 1,5 раза при длине уходки l_{yx} , равной 0,3–0,5 м (рис. 8).

Гидромолот, применяемый на отбойке руды, установлен на проходческую машину с нагребующими лапами и скребковым перегружателем, что обеспечивает циклично-поточный характер ведения очистных работ. При этом эксплуатационная масса машины-носителя 17–35 т. Циклично-поточная технология позволяет исключить большинство непрерываемых перерывов на перестановку оборудования и проветривание.

С целью обоснования повышения производительности и экономической эффективности при технологической схеме безвзрывной отработки месторождений с отбойкой руды гидромолотами

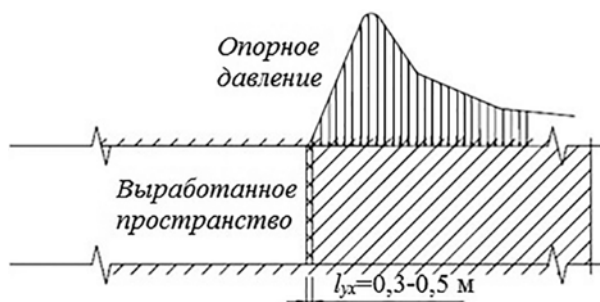


Рис. 8. Отбойка руды при технологической схеме 2 (составлено А.В. Холмским)
 Fig. 8. Stopping with technological scheme 2

Технико-экономические показатели технологических схем 1 и 2 (составлено автором)
Performance characteristics of flowsheets 1 and 2 (composed by the author)

Наименование показателя	Технологическая схема 1	Технологическая схема 2
Производительность, т/смен.	250	350
Себестоимость, руб./т	501	284
Объем работ, т	247 320	

произведено сравнение по технико-экономическим показателям, а именно:

- сравнение по сменной производительности;
- сравнение по себестоимости добычи 1 т руды.

Повышение сменной производительности выемочного блока при технологической схеме 2 обусловлено производством очистных работ по циклично-поточному методу и более высокой скоростью подвигания забоя. Более высокая экономическая эффективность технологической схемы 2 выражается в снижении затрат на материалы, энергию и заработную плату горнорабочих. При технологической схеме 2 показатели себестоимости по статьям затрат снижаются в 1,5–2 раза. Результаты технико-экономического сравнения технологических схем приведены в таблице.

Заключение

При обосновании технологических схем отработки удароопасных месторождений произведен анализ горно-геологических и горнотехнических условий отработки Североуральских удароопасных бокситовых месторождений, рассмотрены способы повышения показателей производительности и безопасности при отработке бокситовых месторождений в сложных горно-геологических условиях залегания.

По результатам комплексного анализа горнотехнических условий отработки можно сделать вывод об отсутствии возможности повышения эффективности горных работ в рамках традиционных

методов очистной выемки руды. Основные научные и практические результаты выполненных исследований:

1. На основе анализа литературы и экспериментальных данных обоснована целесообразность применения гидромолотов при отбойке руды для горнотехнических и горно-геологических условий отработки удароопасных глубокозалегающих месторождений СУБР.

2. Установлено, что для повышения производительности при подземной отработке удароопасных месторождений СУБР целесообразен переход на циклично-поточный метод ведения очистных работ с отбойкой бокситовой руды гидромолотами. Установка гидромолота на проходческие машины с нагребающими лапами и анкероустановщиками в комплекте позволит производить большинство технологических операций забойного цикла параллельно во времени.

3. Разработан алгоритм определения производительности гидромолота для условий отработки месторождений СУБР, обеспечивающий повышение эффективности, достоверности и точности определения производительности гидромолота до количества ударов, требуемого для отбойки одного слоя руды от груды забоя, для горнотехнических и горно-геологических условий отработки удароопасных глубокозалегающих месторождений СУБР.

4. Разработана технологическая схема безвзрывной отбойки руды гидромолотом при отработке удароопасных глубокозалегающих месторождений СУБР, позволяющая повысить суточную про-

изводительность выемочного блока в 1,5–2 раза по сравнению с традиционными способами ведения горных работ. Циклично-поточный метод ведения работ, используемый в разработанной техно-

логической схеме, позволяет исключить неперекрываемые перерывы, а отбойка руды гидромолотом повышает качество отбиваемой руды и безопасность ведения очистных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартынов В. С. Проектирование вскрытия глубоких горизонтов бокситовых месторождений // Горный журнал. — 2004. — № 3. — С. 12–15.

2. Казанин О. И., Ярошенко В. В. Снижение потерь угля при отработке сближенных пластов данной части Воркутского месторождения // Записки Горного института. — 2020. — № 244. — С. 395–401. DOI: 10.31897/PMI.2020A.1.

3. Кожахметова З. Ж., Кожахметов О. С. О современных методах разработки бокситовых месторождений // Молодой ученый. — 2017. — № 17(151). — С. 95–98. URL: <https://moluch.ru/archive/151/42900/> (дата обращения: 07.02.2022).

4. Анфимов А. Л., Сорока Е. И. Литолого-фациальные особенности бемитсодержащих известняков нарудной толщи Североуральского бокситового рудника // Литология и полезные ископаемые. — 2015. — № 3. — С. 228–235.

5. Именитов В. Р. Технология, механизация и организация производственных процессов при подземной разработке рудных месторождений. — М.: Недра, 1973. — 463 с.

6. Паланков И. М. Использование контурного взрывания для обеспечения безопасности приконтурного массива // Маркшейдерия и недропользование. — 2017. — № 3(89). — С. 25–27.

7. Кононов В. М. Научно-технические основы снижения затрат ресурсов при буровзрывной проходке транспортных тоннелей, автореферат диссертации докт. техн. наук. — М.: МГИ, 1992. — 29 с.

8. Sidorov D. V. The development of a software suite for predicting rock bursts within the framework of a system for ensuring geodynamic safety of mining operations / 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017. 2017, vol. 17, book 22, pp. 633–638. DOI: 10.5593/sgem2017/22/S09.079.

9. Сидоров Д. В., Потапчук М. И., Сидляр А. В. Прогнозирование удароопасности тектонически нарушенного рудного массива на глубоких горизонтах Николаевского полиметаллического месторождения // Записки Горного института. — 2018. — Т. 234. — С. 604–611. DOI: 10.31897/PMI.2018.6.604.

10. Сидоров Д. В. Методология снижения удароопасности при применении камерно-столбовой системы разработки Североуральских бокситовых месторождений на больших глубинах // Записки Горного института. — 2017. — Т. 223. — С. 58–69. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.58.

11. Холмский А. В. Мероприятия по повышению эффективности ведения горных работ на глубоких горизонтах рудников // Маркшейдерия и недропользование. — 2019. — № 4(102). — С. 29–31.

12. Карапетян Э. А. Оптимизация параметров процесса выемки бокситов при разработке месторождений открытым способом в сложных горно-геологических условиях, диссертация канд. техн. наук. — Екатеринбург, 2009. — 173 с.

13. Molodykh S. S., Ovsyannikov M. P., Petrunin A. M. Outlook on the implementation of steep inclined conveyors in deep open pits // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020, vol. 11, no. 5, pp. 374–377. DOI: 10.34218/IJARET.11.5.2020.039.

14. Бурмистров К. В., Овсянников М. П. Обоснование параметров этапа открытых горных работ в переходные периоды разработки крутопадающих месторождений // Гор-

ный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 6. — С. 20–28. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-20-28.

15. Половинко А. В. Экологичная разработка крепких горных пород с помощью гидромолотов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — № 3. — С. 70–74.

16. Лысигов Б. А., Резник А. В., Дубинин А. В. Безвзрывная экологически чистая проходка тоннелей гидромолотами. — Донецк, ДонТУ, 2004. — С. 143–145.

17. Ушаков Л. С., Котылев Ю. Е., Кравченко В. А., Юрьев Д. А. Динамические системы машин для разрушения горных пород // Записки Горного института. — 2004. — Т. 157. — С. 73.

18. Бексалов Е. Б., Абсаматов Э. Н. Отбойно-погрузочная машина ОПМ-1 «Аскатеш» для безвзрывной проходки туннелей Акбулунской ГЭС по крепким трещиноватым породам // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. — 2016. — № 2. — С. 11–13.

19. Galchenko Yu. P., Eremenko V. A., Myaskov A. V., Kosyreva M. A. Solution of geoeological problems in underground mining of deep iron ore deposits // Eurasian Mining. 2018, no. 1, pp. 35–40. DOI: 10.17580/em.2018.01.08.

20. Михайлов Ю. В. Подземная экотехнология разработки маломощных месторождений крепких руд. — Минск: Технология, 2005. — 157 с.

21. Anisimov K. A., Sokol D. G., Zubov V. P. Geomechanical issues in the development of the Udachnaya diamondiferous pipe / Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals. CRC Press, 2020, pp. 111–117. DOI: 10.1201/9781003164395-16.

22. Anisimov K. A., Zubov V. P. Substantiation of method ensuring the safe development of the pit reserves of the kimberlite ore deposits in the conditions of the Udachny mine // E3S Web of Conference. 2021, vol. 266, article 03013. DOI: 10.1051/e3sconf/202126603013.

23. Kosukhin N. I., Sidorov D., Beloglazov I., Timofeev V. Assessment of stress-strain and shock bump hazard of rock mass in the zones of high-amplitude tectonic dislocations // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 224, no. 1, article 012014. DOI: 10.1088/1755-1315/224/1/012014.

24. Каманин Ю. Н., Ределин Р. А., Кравченко В. А. Моделирование разрушения скальных пород гидравлическим устройством ударного действия // Горное оборудование и электромеханика. — 2017. — № 2(129). — С. 30–34.

25. Ределин Р. А., Кравченко В. А., Волков Н. Н. Некоторые вопросы динамики и моделирования гидравлических устройств ударного действия / Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины. Сборник научных статей по материалам XII международной научно-технической информации. — Курск, 2016. — С. 166–172.

26. Жабин А. Б., Лавит И. М., Поляков А. В., Керимов Э. Э. Математическая модель разрушения горных пород ударным инструментом // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 11. — С. 140–150. DOI: 10.25018/0236-14932020-11-0-140-150.

27. Титов К. С. Опыт использования безвзрывной тонкослойной технологии при добыче бокситов Среднего Тимана / Материалы Уральской горнопромышленной декады. — Екатеринбург, 2006. — 268 с.

28. Макаров А. Б. Безвзрывная проходка горных выработок гидромолотами KR и PP // Подземное пространство мира. — 1996. — № 112.

29. Ушаков Л. С. Новая энергетическая концепция проходческого комбайна с планетарным ударно-скалывающим исполнительным органом // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 12. — С. 161–168. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-0-161-168.

30. Ушаков Л. С., Климов В. Е. Рациональное природопользование на основе применения безвзрывных технологий для проведения подземных (горных) выработок / Проблемы и инновационные решения в области инженерного обеспечения экологической и промышленной безопасности урбанизированных территорий. — Самара, 2017. — С. 204–210.

31. Шараев Д. В. Разработка технологии выемки рудных залежей с учетом закономерности формирования параметров вторичного напряженно-деформированного состояния горного массива, автореферат диссертации, канд. техн. наук. — Екатеринбург, 2008. — 102 с.

32. Карпов Г. Н., Ковальский Е. Р., Смышчич А. Д. Определение параметров разгрузки массива горных пород на концевых участках демонтажной камеры // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 8. — С. 95–107. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-95-107.

33. Vinogradov E. A., Yaroshenko V. V., Kislicyn M. S. Method of gas emission control for safe working of flat gassy coal seams mining // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. 2017, vol. 87, no. 2, article 022023. DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022023.

34. Sidorenko A. A., Dmitriev P. N., Ivanov W. W. A study of gas drainage methods efficiency in Kotinskaya mine in Russia // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020, vol. 15, no. 4, pp. 530–535.

35. Анистратов Ю. И. Эффективность безвзрывных технологий разработки крепких горных пород на карьерах // Горная промышленность. — 1997. — № 2. — С. 20–23. **ИВАБ**

REFERENCES

1. Martynov V. S. Designing of the opening of deep horizons of bauxite deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2004, no. 3, pp. 12–15. [In Russ].

2. Kazanin O. I., Yaroshenko V. V. Decrease in coal losses during mining of contiguous seams in the near-bottom part at Vorkuta deposit. *Journal of Mining Institute*. 2020, no. 244, pp. 395–401. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020A.1.

3. Kozhahmetova Z. J., Kozhahmetov O. S. About the modern methods of developing bauxite fields. *Young scientist*. 2017, no. 17(151), pp. 95–98. [In Russ], available at: <https://moluch.ru/archive/151/42900/> (accessed 07.02.2022).

4. Anfimov A. L., Soroka E. I. Lithologically facial features of Blemit-containing limestone magnetic thickness of the North Ural Bauxite mine. *Lithology and mineral resources*. 2015, no. 3, pp. 228–235. [In Russ].

5. Imenitov V. P. *Tekhnologiya, mekhanizatsiya i organizatsiya proizvodstvennykh protsessov pri podzemnoy razrabotke rudnykh mestorozhdeniy* [Technology, mechanization and organization of production processes in underground development of ore deposits], Moscow, Nedra, 1973, 463 p.

6. Palankoev I. M. Use of contour explosion to ensure the safety of rock mass. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2017, no. 3(89), pp. 25–27. [In Russ].

7. Kononov V. M. *Nauchno-tekhnicheskie osnovy snizheniya zatrat resursov pri burovzryvnoy prokhodke transportnykh tonneley* [Scientific and technical foundations of reducing the cost of resources in drilling pipelines of transport tunnels], Doctor's thesis, Moscow, MGI, 1992, 29 p.

8. Sidorov D. V. The development of a software suite for predicting rock bursts within the framework of a system for ensuring geodynamic safety of mining operations. *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017*. 2017, vol. 17, book 22, pp. 633–638. DOI: 10.5593/sgem2017/22/S09.079.

9. Sidorov D. V., Potapchuk M. I., Sidlyar A. V. Forecasting rock burst hazard of tectonically disturbed ore massif at the deep horizons of Nikolaevskoe polymetallis deposit. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 234, pp. 604–611. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2018.6.604.

10. Sidorov D. V. Methodology for reducing rock burst hazard using room-and-pillar mining method on the deep North Ural bauxite deposits. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 223, pp. 58–69. [In Russ]. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.58.

11. Kholmskiy A. V. Arrangements for increase the efficiency of mining operations on the deep ore mines. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2019, no. 4(102), pp. 29–31. [In Russ].

12. Karapetyan E. A. *Optimizatsiya parametrov protsessa vyemki boksitov pri razrabotke mestorozhdeniy otkryтым sposobom v slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviyakh* [Optimiza-

tion of the parameters of the process of excavation of bauxite when developing deposits in an open method in complex mining and geological conditions], Candidate's thesis, Екатеринбург, 2009, 173 p.

13. Molodykh S. S., Ovsyannikov M. P., Petrunin A. M. Outlook on the implementation of steep inclined conveyors in deep open pits. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020, vol. 11, no. 5, pp. 374–377. DOI: 10.34218/IJARET.11.5.2020.039.

14. Burmistrov K. V., Ovsyannikov M. P. Validation of open pit staged design in the transition periods of mining at steeply dipping mineral deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 6, pp. 20–28. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-20-28.

15. Polovinko A. V. Ecological mining of hard rock mass with hydraulic breakers. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2012, no. 3, pp. 70–74. [In Russ].

16. Lysikov B. A., Reznik A. V., Dubinin A. V. *Bezvzryvnaya ekologicheski chistaya prokhodka tonneley gidromolotami* [Non-explosive environmentally friendly penetration of tunnels by DUTU hydraulic hammers], Donetsk, DonTU, 2004, pp. 143–145.

17. Ushakov L. S., Kotylev Yu. E., Kravchenko V. A., Yuriev D. A. Dynamic systems of machines to destroy rocks. *Journal of Mining Institute*. 2004.157, pp. 73.

18. Beksalov E. B., Absamatov E. N. OPM-1 Stopping-loading machine «Asskatesh» for the brown penetration of the Akbulun hydroelectric station in strong fractured rocks. *The herald of Kyrgyz state university of construction, transport and architecture named after N. Isanov*. 2016, no. 2, pp. 11–13. [In Russ].

19. Galchenko Yu. P., Eremenko V. A., Myaskov A. V., Kosyreva M. A. Solution of geoecological problems in underground mining of deep iron ore deposits. *Eurasian Mining*. 2018, no. 1, pp. 35–40. DOI: 10.17580/em.2018.01.08.

20. Mikhaylov Yu. V. *Podzemnaya ekotekhnologiya razrabotki malomoshchnykh mestorozhdeniy krepkikh rud* [Underground ecotechnology development of thin deposits of stiff ore], Minsk, Tekhnologiya, 2005, 157 p.

21. Anisimov K. A., Sokol D. G., Zubov V. P. Geomechanical issues in the development of the Udachnaya diamondiferous pipe. *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*. CRC Press, 2020, pp. 111–117. DOI: 10.1201/9781003164395-16.

22. Anisimov K. A., Zubov V. P. Substantiation of method ensuring the safe development of the pit reserves of the kimberlite ore deposits in the conditions of the Udachny mine. *E3S Web of Conference*. 2021, vol. 266, article 03013. DOI: 10.1051/e3sconf/202126603013.

23. Kosukhin N. I., Sidorov D., Beloglazov I., Timofeev V. Assessment of stress-strain and shock bump hazard of rock mass in the zones of high-amplitude tectonic dislocations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 224, no. 1, article 012014. DOI: 10.1088/1755-1315/224/1/012014.

24. Kamanin Yu. N., Redelin R. A., Kravchenko V. A. Simulation of fracture rock hydraulic equipment of percussion. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2017, no. 2(129), pp. 30–34. [In Russ].

25. Redelin R. A., Kravchenko V. A., Volkov N. N. Some questions of dynamics and modeling hydraulic devices of shock action. *Vibratsionnye tekhnologii, mekhatronika i upravlyayemye mashiny. Sbornik nauchnykh statey po materialam XII mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy informatsii* [Vibration technologies, mechatronics and controlled machines. Sbornik nauchnykh statey po materialam XII mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy informatsii], Kursk, 2016, pp. 166–172. [In Russ].

26. Zhabin A. B., Lavit I. M., Polyakov A. V., Kerimov Z. E. Mathematical model of piston/bit interaction in percussive destruction of rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 11, pp. 140–150. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-14932020-11-0-140-150.

27. Titov K. S. Experience in the use of blissful thin-scale technology in the mining of Boxitites of Middle Timan. *Materials of the Ural Mining dekady*. Ekaterinburg, 2006, 268 p. [In Russ].

28. Makarov A. B. Sleeping penetration of mountain buildings by hydraulic hammers KR and PR. *Podzemnoe prostranstvo mira*. 1996, no. 112. [In Russ].

29. Ushakov L. S. New energy concept for heading machine with planetary percussive-shearing drum head. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 12, pp. 161–168. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-0-161-168.

30. Ushakov L. S., Klimov V. E. Rational natural resources using on the basis of application of blastless technologies for provision of underground (mining) openings. *Problemy i innovatsionnye resheniya v oblasti inzhenernogo obespecheniya ekologicheskoy i promyshlennoy bezopasnosti urbanizirovannykh territoriy* [Problems and innovative solutions in the field of engineering support for environmental and industrial safety of urbanized territories], Samara, 2017, pp. 204–210.

31. Sharaev D. V. *Razrabotka tekhnologii vyemki rudnykh zalezhey s uchetom zakonomenosti formirovaniya parametrov vtorichnogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gornogo massiva* [Development of the technology of extrusion of ore deposits, taking into account the patterns of formation of parameters of the secondary stress-deformed state of the mountain massif], Candidate's thesis, Ekaterinburg, 2008, 102 p.

32. Karpov G. N., Kovalski E. R., Smychnik A. D. Determination of rock destressing parameters at the ends of disassembling room. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 8, pp. 95–107. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-95-107.

33. Vinogradov E. A., Yaroshenko V. V., Kislicyn M. S. Method of gas emission control for safe working of flat gassy coal seams mining. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 2017, vol. 87, no. 2, article 022023. DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022023.

34. Sidorenko A. A., Dmitriev P. N., Ivanov W. W. A study of gas drainage methods efficiency in Kotinskaya mine in Russia. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020, vol. 15, no. 4, pp. 530–535.

35. Anistratov Yu. I. Efficiency of blissful technologies for the development of strong rocks on open pits. *Russian Mining Industry*. 1997, no. 2, pp. 20–23. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Холмский Алексей Валерьевич¹ — аспирант,

e-mail: chelmick@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0003-1311-0949,

Фомин Сергей Игоревич¹ — д-р техн. наук,

профессор, e-mail: fomisi@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0939-1189,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Холмский А.В., e-mail: chelmick@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A. V. Kholmskiy¹, Graduate Student,

e-mail: chelmick@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0003-1311-0949,

S. I. Fomin¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: fomisi@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0939-1189,

¹ Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: A. V. Kholmskiy, e-mail: chelmick@yandex.ru.

Получена редакцией 22.12.2021; получена после рецензии 03.05.2022; принята к печати 10.06.2022.

Received by the editors 22.12.2021; received after the review 03.05.2022; accepted for printing 10.06.2022.