

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.272.6

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-36-43



СНИЖЕНИЕ ОПАСНОГО ВЛИЯНИЯ ОЧИСТНЫХ РАБОТ НА УДАРООПАСНЫЙ МАССИВ ПРИ ОТРАБОТКЕ СЕВЕРОУРАЛЬСКИХ БОКСИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ БЕЗВЗРЫВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Холмский А.В., Фомин С.И.

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Актуальность работы. Североуральские бокситовые месторождения являются основным источником высококачественного алюминиевого сырья в России. Отработку месторождений ведут с 1970-х годов, и в настоящее время фронт горных работ достиг отметки более 1 км вглубь залежи. Для месторождений Североуральского бокситового бассейна характерны сложные горно-геологические условия, отдельно стоит отметить удароопасность, которая повышается с глубиной. В пределах 15 лет на рудниках АО «Североуральский бокситовый рудник» планируется увеличение производственной мощности, в том числе с применением высокопроизводительных технологических схем отработки. Нынешние технологические схемы отработки не способны обеспечить необходимое повышение производительности без ущерба безопасности ведения очистных работ, одним из факторов которой является воздействие очистных работ на удароопасный массив. В связи с этим поиск и обоснование технологических решений по снижению влияния очистных работ на удароопасный массив является актуальной задачей горной науки. **Используемые методы.** В ходе исследований использованы такие методы, как статистический анализ, сравнительный анализ, определение параметров отбойки, оказывающих влияние на удароопасный массив. **Новизна.** Новизна заключается в том, что для отработки Североуральских бокситовых месторождений предлагается принципиально новая технология отработки, обеспечивающая снижение влияния очистных работ на удароопасный массив и повышение производительности выемочного блока. **Результат.** Рассмотрена взаимосвязь между параметрами отбойки запасов камер и опорным давлением на краевой части массива, сделан вывод о том, что отбойка запасов камер гидромолотом в условиях отработки Североуральских бокситовых месторождений позволяет снизить влияние очистных работ на удароопасный массив. **Практическая значимость.** Предлагаемая безвзрывная технология отработки месторождений Североуральского бокситового рудника обеспечивает повышение производительности, снижение себестоимости добычи и отличается от применяемых технологических схем тем, что оказывает сравнительно меньшее влияние на удароопасный массив.

Ключевые слова: подземная разработка месторождений, сложные горно-геологические условия, безвзрывная технология, гидромолот, механическая отбойка.

© Холмский А.В., Фомин С.И., 2022

Для цитирования

Холмский А.В., Фомин С.И. Снижение влияния очистных работ на удароопасный массив при отработке Североуральских бокситовых месторождений за счет применения безвзрывной технологии // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 36–43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-36-43>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

REDUCING THE EFFECT OF STOPING ON THE BUMP HAZARDOUS MASSIF USING THE BLAST-FREE TECHNOLOGY, WHEN DEVELOPING THE NORTH URALS BAUXITE DEPOSITS

Kholmskiy A.V., Fomin S.I.

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. Relevance. The North Urals bauxite deposits are a main source of high quality aluminum raw materials in Russia. These deposits are mined since the 1970s and now mining operations have reached the level deeper than 1 km. The North Urals bauxite deposits are characterized by difficult mining and geological conditions. It is particularly important to mention the rock burst hazard, increasing with depth. Within 15 years JSC North Urals Bauxite Mine intends to increase production capacity of mines, including by applying high performance mining process flows. The existing mining processes do not provide for the required increase in production capacity without prejudicing safety of stoping operations. One of the factors is the effect of stoping on the bump hazardous massif. Therefore, searching and providing the rationale for process solutions on reducing the effect of stoping on the bump hazardous massif is currently relevant for mining science. **Methods Applied.** When conducting the studies, we used such methods as a statistical analysis, a comparative analysis, determination of the breakage parameters, influencing the bump hazardous massif. **Originality.** Originality is that the radically new technology is proposed for mining the North Urals bauxite deposits. The said technology contributes to decreasing the effect of stoping on the bump hazardous massif and increasing performance of a mining block. **Results.** The paper describes the relation between the breakage parameters and abutment pressure on the selvedge of the massif. It was concluded that breakage of chamber reserves with hydraulic breakers at the North Urals bauxite deposits reduced the effect of stoping on the bump hazardous massif. **Practical Relevance.** The proposed blast-free technology of mining of the North Urals bauxite deposits provides for increased production capacity, decreased mining cost and differs from the applicable process flows in having comparatively less effect on the bump hazardous massif.

Keywords: underground mining, difficult mining and geological conditions, blast-free technology, hydraulic breaker, mechanical breakage.

For citation

Kholmskiy A.V., Fomin S.I. Reducing the Effect of Stopping on the Bump Hazardous Massif Using the Blast-Free Technology, when Developing the North Urals Bauxite Deposits. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 36–43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-36-43>

Введение

На сегодняшний день горнодобывающая промышленность сталкивается с тем, что поверхностные запасы месторождений полезных ископаемых исчерпаны. В связи с этим более актуальными становятся запасы месторождений, залегающих на глубине более 800 м. К этой категории можно отнести месторождения Североуральского бокситового бассейна, запасы которых отрабатываются рудниками АО «СУБР». Большая часть высококачественного алюминиевого сырья России добывается именно рудниками АО «СУБР», суммарная годовая производственная мощность которых достигает 3 млн т руды в год.

Переход очистной выемки запасов месторождений на глубокие горизонты сопряжен ря-

дом проблем, которые обусловлены одним фактором – сложными горно-геологическими условиями. Месторождения Североуральского бокситового бассейна характеризуются следующими условиями залегания: пластообразные залежи мощностью от 4 до 8 м с углом падения 25–35°, разнокачественные бокситы, слагающие массив, изменчивая гипсометрия залежей, удароопасность месторождений [1]. Запасы выемочного блока отрабатывают камерно-столбовой системой с оставлением ленточных целиков по простиранию залежи [2], на отбойке руды применяют буровзрывной способ.

Курсом развития предприятия является увеличение объемов добычи бокситовой руды за счет применения новых технологических схем, обеспечивающих не только повышение производительности выемочных блоков, но и сохране-

ния показателей безопасности, связанных с отработкой удароопасных месторождений. В этой связи стоит отметить ряд ограничений, связанных с повышением производительности технологических схем отработки с отбойкой руды буровзрывным способом. В условиях разработки Североуральских бокситовых месторождений взрывные работы оказывают дополнительное сейсмическое воздействие на удароопасный массив, нередко являясь причиной возникновения горных ударов. Изменение проектов на отработку в пользу увеличения общего расхода взрывчатки на отбойку запасов выемочного блока, увеличение числа забоев в одновременной работе может привести к учащению возникновения горных ударов в результате техногенного воздействия на удароопасный массив. В сложных горно-геологических условиях Североуральских бокситовых месторождений следует применять безвзрывной способ отбойки руды, обеспечивающий намного меньшее влияние на удароопасный массив в процессе ведения очистных работ.

Целью исследований является обоснование снижения опасного воздействия на массив горных пород, склонных к горным ударам за счет применения в условиях отработки месторождений «СУБР» безвзрывного способа отбойки руды гидромолотами [3].

Материалы и методы исследования

Для постановки проблемы горных ударов при отработке месторождений на рудниках АО «СУБР» необходимо обратиться к горно-геологическим и горнотехническим условиям отработки [4]. Пластообразное рудное тело состоят бокситы нескольких марок, которые обладают различными физико-механическими характеристиками. Из их числа наибольшее влияние на показатель удароопасности оказывает предел прочности на сжатие. Прочные хрупкие бокситы более склонны к мгновенному выделению энергии, накопившейся в результате техногенного воздействия. Литология рудного тела представлена следующими разновидностями бокситов: красный маркий, красный немаркий, яшмовидный, серый, пестроцветный. Самыми прочными из них являются красный немаркий и яшмовидный бокситы, также считаются самыми удароопасными разновидностями бокситов. Согласно статистике, больше половины горных ударов при отработке Североуральских бокситовых месторождений произошло в результате ведения буровзрывных работ [5]. Стоит отметить, что по энергии произошедшие горные удары относятся к сильным, согласно классификации горных ударов по И.А. Турчанинову (табл. 1). Результаты статистического анализа приведены в табл. 2.

Таблица 1. Классификация горных ударов по И.А. Турчанинову

Table 1. Classification of rock bursts by I.A. Turchaninov

Класс горного удара	Сейсмическая энергия, Дж	Виды разрушений
Микро	<10	Поверхностные, локальные разрушения
Слабый	10-100	Локальные разрушения и незначительный выброс пород в выработку
Средний	100-10000	Быстрое разрушение, выброс значительного объема пород в выработки на участках длиной до нескольких метров
Сильный	10000-10000000	Быстрое разрушение, выброс в выработку больших объемов пород в выработки на участке длиной до нескольких десятков метров
Катастрофический	>10000000	Площадь разрушения - сотни, тысячи квадратных метров

Таблица 2. Статистика по горным ударам при отработке Североуральских бокситовых месторождений

Table 2. Statistics of rock bursts during the mining of the North Urals bauxite deposits

Период отслеживания горных ударов	Количество сильных ударов	Количество сильных ударов при наличии в массиве красных немарких/яшмовидных бокситов	Техногенный фактор	Средняя энергия горного удара, Дж
С 1979 по 2013 гг.	53 (17 с 2008 по 2013 гг.)	18/15	Взрывные работы	440 000
С 1970 по 2013 гг.	14 (3 с 2008 по 2013 гг.)	7/2	Бурение шпуров	1900000

Исходя из приведенного в табл. 2 анализа, можно сделать вывод о том, что при ведении буровзрывных работ в сложных условиях месторождений на рудниках АО «СУБР» повышается количество горных ударов, характеризующихся большим объемом разрушений и длительной ликвидацией последствий этих ударов (более 1 суток). В этой связи предлагается осуществлять отбойку бокситовой руды гидромолотами, так как безвзрывная технология обработки обеспечивает наименьшее влияние на напряженно-деформированное состояние удароопасного массива.

Обсуждение результатов

Решение проблемы горных ударов в результате влияния очистных работ достигается за счет применения безвзрывной технологии обработки Североуральских бокситовых месторождений с отбойкой руды гидромолотами (далее – механи-

ческая отбойка). Технологическая схема с механической отбойкой [6] реализуется на базе камерно-столбовой системы разработки и включает в себя отработку запасов камер с поперечным сечением $22,5 \text{ м}^2$ с применением проходческой машины, на которую установлен гидромолот (рис. 1).

Предлагаемая технологическая схема обеспечивает повышение производительности выемочного блока в 1,5–2 раза по сравнению с показателями актуальной технологии обработки Североуральских бокситовых месторождений за счет организации очистных работ по циклично-поточной технологии [7, 8] и высокой суточной скорости подвигания забоя [9]. Данное утверждение доказывается сравнением технико-экономических показателей, которые определены по классическим методикам и представлены в табл. 3.

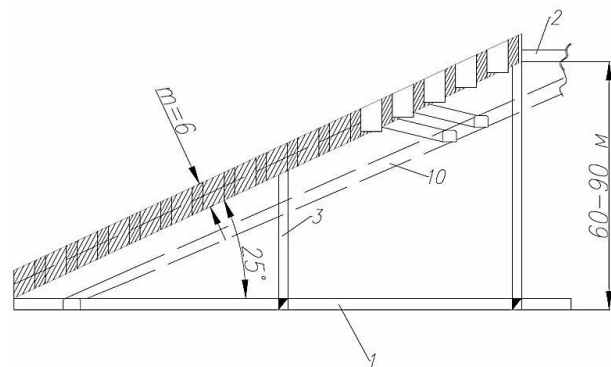
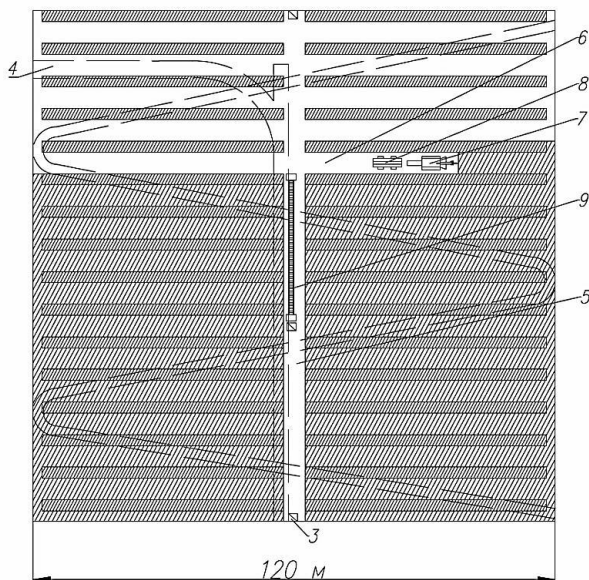


Рис. 1. Технологическая схема с механической отбойкой руды: 1 – откаточный орт; 2 – вентиляционный орт; 3 – рудоспуск; 4 – откаточный штрек; 5 – рудный восстающий; 6 – выемочная камера; 7 – проходческая машина; 8 – самоходный вагон; 9 – скребковый конвейер; 10 – наклонный автосъезд

Fig. 1. Process flow, including mechanical breakage of ore: 1 is a haulage cross-cut; 2 is a ventilation cross-cut; 3 is an ore chute; 4 is a haulage drift; 5 is an ore rise; 6 is an extraction chamber; 7 is a tunneling machine; 8 is a self-propelled car; 9 is a drag-type conveyor; 10 is an inclined ramp

Таблица 3. Сравнение технико-экономических показателей технологических схем
T a b l e 3. Comparison of technical and economic performance of process flows

Наименование показателя	Технологическая схема с буровзрывной отбойкой руды	Технологическая схема с механической отбойкой
Себестоимость добычи 1 т руды	510 руб./т	336 руб./т
Суточная скорость подвигания забоя	7,2 м/смену	11,4 м/смену
Производительность	216 т/смену	312 т/смену

Повышение скорости подвигания забоя обусловлено организацией очистных работ по циклично-поточной технологии. При этом коэффициент использования выемочного оборудования по технологической схеме составляет 0,78 по сравнению с коэффициентом использования выемочного оборудования при технологической схеме с буровзрывной отбойкой, равном 0,67. Коэффициент использования выемочного оборудования определен исходя из отношения времени, требуемого для процесса, к времени смены (7,2 ч). Снижение себестоимости добычи 1 т руды при технологической схеме с механической отбойкой достигается путем сокращения количества забойных рабочих, необходимого для ведения очистных работ. Затраты на материалы и оборудование также снижаются в связи с тем, что гидромолоты требуют меньшее количество расходных материалов при эксплуатации, при этом закупочная стоимость и амортизация базовых машин значительно меньше по сравнению с самоходными буровыми установками [10–12].

Показатели, изложенные выше, достигаются за счет применения на отбойке гидромолотов со следующими эксплуатационными характеристиками:

- эксплуатационная масса от 1500 до 2400 кг;
- частота ударов от 350 до 600 уд./мин;
- энергия удара от 4000 до 8000 Дж;
- рабочее давление от 15 до 16 МПа;
- диаметр исполнительного органа от 120 до 140 мм;

- рабочая длина исполнительного органа от 0,5 до 0,7 м.

При отбойке руды гидромолотами с такими характеристиками в условиях Североуральских бокситовых месторождений достигается наиболее рациональное соотношение производительности и себестоимости добычи 1 т руды. Вместе с тем наиболее важную роль в снижении воздействия на удароопасный массив играет рабочая длина исполнительного органа. Для обоснования данного положения необходимо сравнить [13] взаимосвязь параметров отбойки с опорным давлением в краевой части массива при буровзрывной отбойке и механической отбойке руды.

Взрывные работы оказывают сейсмическое влияние на удароопасный массив, достаточное для его перехода из напряженно-деформированного в запредельное состояние. При наличии включений прочных разновидностей бокситов, таких как красный немаркий и яшмовидный, воздействие взрывной волны или бурового инструмента способно спровоцировать вышеописанный переход и последующее высвобождение накопленных напряжений в виде горного удара.

На рис. 2 показана схема взаимосвязи опорного давления на краевую часть массива при буровзрывном способе отбойке руды в камере.

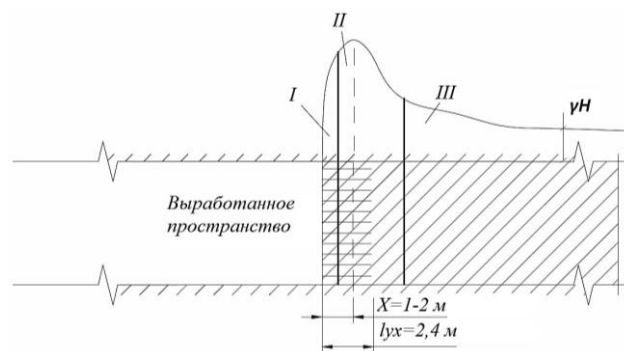


Рис. 2. Взаимосвязь опорного давления на краевую часть массива и параметров буровзрывной отбойки: I – зона пониженных напряжений; II – зона повышенных напряжений; III – зона напряжений, близких к первоначальным; X – расстояние до максимальных напряжений; $l_{ух}$ – длина уходки

Fig. 2. Relation between abutment pressure on the selvedge of the massif and parameters of drilling and blasting breakage: I is a zone of lower stresses; II is a zone of higher stresses; III is a zone of stresses close to original stresses; X is a distance to maximum stresses; l_{adv} is drift advance length

Исходя из анализа взаимосвязи, представленной на рис. 2, можно сделать вывод о том, что очистные работы буровзрывным способом ведутся в зоне II, которая считается наиболее опасной с точки зрения воздействия на напряженно-деформированный массив горных пород. Зона III является зоной первоначальных напряжений, где вертикальная составляющая напряжений равна напряжениям в нетронутом массиве. На практике расстояние до максимума опорного давления равно 1–2 м. При упругих породах оно сокращается, при пластичных породах распространяется на величину 5–6 м. При актуальных горнотехнических условиях отработки Североуральских бокситовых месторождений длина уходки составляет 2,4 м. Такие горнотехнические условия являются опасными, так как работа ведется в зоне II. При наличии в этой зоне прочных пород, таких как красный немаркий или яшмовидный бокситы, достаточно минимального воздействия взрывной волны или бурового инструмента для их быстрого перехода в запредельное состояние в виде горного удара.

Для сравнения с параметрами буровзрывного способа отбойки руды в камере проанализирована взаимосвязь опорного давления на краевую часть массива и механической отбойки (рис. 3).

Анализ взаимосвязи, представленный на рис. 3, показывает значительные изменения во взаимосвязи параметров механической отбойки с опорным давлением при отработке запасов камеры. Длина уходки при отбойке руды гидромолотами составляет 0,5–0,7 м и обоснована показателями производительности при таких характеристиках применяемого оборудования. При этом отбойку ведут в зоне I, где массив обладает естественным структурным ослаблением, повышенным трещинообразованием, отслаиванием отдельных кусков руды. Данные условия способствуют более эффективной отбойке руды гидромолотами [15, 16]. Вместе с тем рабочая длина исполнительного органа сравнимо меньше расстояния до максимума опорного давления, соответственно, очистные работы ведут в более безопасной зоне напряженно-деформированного массива. Наличие в зоне I красных немарких или яшмовидных бокситов не представляет опасности по их быстрому переходу в запределное состояние, так как подвигание забоя при отбойке руды гидромолотами не предполагает, по сравнению с буровзрывным способом отбойки, одномоментной выемки из массива большого объема руды.

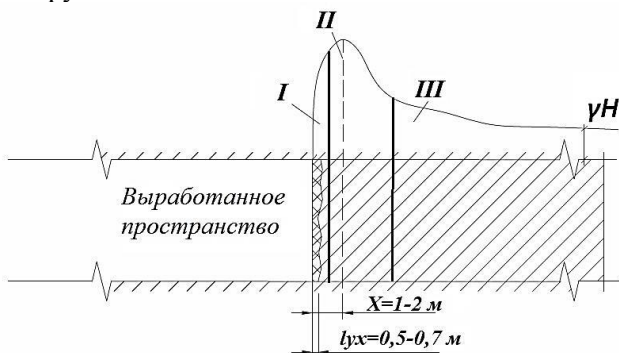


Рис. 3. Взаимосвязь опорного давления на краевую часть массива и параметров механической отбойки: I – зона пониженных напряжений; II – зона повышенных напряжений; III – зона напряжений, близких к первоначальным; X – расстояние до максимальных напряжений; l_{adv} – длина уходки

Fig. 3. Relation between abutment pressure on the selvedge of the massif and parameters of mechanical breakage: I is a zone of lower stresses; II is a zone of higher stresses; III is a zone of stresses close to original stresses; X is a distance to maximum stresses; l_{adv} is drift advance length

Заключение

Современное состояние отработки Североуральских бокситовых месторождений сопряжено с ведением очистных работ в сложных горно-геологических условиях. Одним из осложняющих факторов является удароопасность массива, которая обусловлена наличием прочных разновидностей бокситов. Бокситы такого типа быстро переходят из напряженно-деформированного состояния в запределное состояние при минимальном воздействии очистных работ. Согласно результатам статистического анализа, большая часть сильных горных ударов с большим объемом разрушений произошла в результате ведения буровзрывной отбойки. С целью повышения производительности, снижения себестоимости и снижения влияния очистных работ на удароопасный массив предлагается применение безвзрывной технологии отработки Североуральских бокситовых месторождений. Основным отличием является отбойка запасов камеры гидромолотами. В ходе исследований установлено, что отбойка руды гидромолотом оказывает сравнимо меньшее влияние на удароопасный массив за счет того, что отбойку ведут в зоне пониженных напряжений. Зона пониженных напряжений также характеризуется повышенной трещиноватостью массива, отслаиванием отдельных кусков руды, что способствует более эффективной отбойке. Таким образом, предложено технологическое решение проблемы влияния очистных работ на удароопасный массив, которое обеспечивает повышение производительности без ущерба безопасности ведения работ.

Список литературы

1. Анфимов А.Л. Литолого-фациальные особенности бемитсодержащих известняков нарудной толщи Североуральского бокситового рудника // Литология и полезные ископаемые. Екатеринбург. 2015. №3. С. 3–8.
2. Сидоров Д.В. Геомеханическое обоснование конструктивных параметров камерно-столбовой системы разработки для проектирования глубоких горизонтов СУБРа // Записки Горного института. 2012. Т. 199. С. 134–141.
3. Galchenko Yu.P. Solution of geoeological problems in underground mining of deep iron ore deposits // Eurasian Mining. 2018. №1. P. 35–40. DOI: 10.17580/em.2018.01.08
4. Кожухметова З.Ж., Кожухметов О.С. О современных методах разработки бокситовых месторождений // Молодой ученый – 2017. № 17 (151). С. 95–98.

5. 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
6. Ismael M. Performance prediction of hydraulic breakers in excavation of a rock mass // Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geological-Petroleum Bulletin). 2021. Т. 36. №4.
7. Литвинов А.Р. Обоснование параметров схем поточной технологии безвзрывной послойно-полосовой отработки массивов крепких пород: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2001. 24 с.
8. Ficarella A., Giuffrida A., Laforgia D. Numerical investigations on the working cycle of a hydraulic breaker: off-design performance and influence of design parameters // International journal of fluid power. 2006. Т. 7. №3. С. 41–50.
9. Анистратов Ю.И. Эффективность безвзрывных технологий разработки горных пород на карьерах // Горная промышленность. 1997. № 2. С. 20–23.
10. Панкевич Ю.Б. Применение мощных гидромолотов фирмы Крупп на безвзрывной разработке месторождений полезных ископаемых решает вопросы экологии и качества продукции // Горная промышленность. 1997. №2. С. 45.
11. Лабутин В.Н., Марков В.С. Перспективы применения комбинированного способа разрушения горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. №12.
12. Лысиков Б.А., Резник А.В., Дубинин А.В. Безвзрывная экологически чистая проходка тоннелей гидромолотами. Донецк: ДонТУ, 2004. С. 143–145.
13. Toraño J. et al. Environmental impact of rock excavation in urban areas: comparison between blasting and hydraulic breaker hammer // Civil Engineering and Environmental Systems. 2006. Т. 23. №2. С. 117–126.
14. Болобов В.И., Ле-Тхань Б., Плащинский В.А. О распространении трещины по горной породе при ударе // Обогащение руд. 2019. №6. С. 3–8.
15. Зависимость наработки пики гидромолота от износостойкости ее материала / Болобов В.И., Ле Тхань Бинь, Чупин С.А., Плащинский В.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. №5. С. 68–79. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-68-79
16. Холодняков Г.А., Половинко А.В., Лигоцкий Д.Н. Экологичная разработка крепких горных пород с помощью гидромолотов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. №3. С. 70–74.
17. *poleznye iskopaemye* [Litology and Minerals], 2015, no. 3, pp. 3–8. (In Russ.)
2. Sidorov D.V. Geomechanical rationale for structural parameters of the room-and-pillar system to design deep levels at the North Urals Bauxite Mine. *Zapiski Gornogo Instituta* [Journal of Mining Institute], 2012, vol. 199, pp. 134–141. (In Russ.)
3. Galchenko Yu.P. 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
4. Kozhakhmetova Z.Zh., Kozhakhmetov O.S. Modern methods of mining bauxite deposits. *Molodoy ucheny* [Young Scientist], 2017, no. 17 (151), pp. 95–98. Available at: <https://moluch.ru/archive/151/42900/> (In Russ.)
5. Sidorov D.V. Methodology of reducing rock-bump hazard, when using the room-and-pillar system of mining of the North Urals Bauxite Mine at great depth. *Zapiski Gornogo Instituta* [Journal of Mining Institute], 2017, vol. 223, pp. 58–69. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.58
6. Ismael M. Performance prediction of hydraulic breakers in excavation of a rock mass. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik* (The Mining-Geological-Petroleum Bulletin), 2021, vol. 36, no. 4.
7. Litvinov A.R. *Obosnovanie parametrov skhem potochnoy tekhnologii bezvzryvnoy posloyno-polosovoy otrabotki massivov krepkikh porod: avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Providing the rationale for parameters of flow technology of blast-free layer-band mining of hard rock massifs: Abstract of the PhD thesis]. Moscow, 2001, 24 p. (In Russ.)
8. Ficarella A., Giuffrida A., Laforgia D. Numerical investigations on the working cycle of a hydraulic breaker: off-design performance and influence of design parameters. *International Journal of Fluid Power*, 2006, vol. 7, no. 3, pp. 41–50.
9. Anistratov Yu.I. Efficiency of blast-free technologies for open pit mining of rocks. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 1997, no. 2, pp. 20–23. (In Russ.)
10. Pankevich Yu.B. The use of powerful hydraulic breakers by Krupp for blast-free mining of mineral deposits solves the issues of ecology and product quality. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 1997, no. 2, p. 45. (In Russ.)
11. Labutin V.N., Markov V.S. Prospects of using a combined method of rock breaking. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2015, no. 12. (In Russ.)
12. Lysikov B.A., Reznik A.V., Dubinin A.V. Blast-free environmentally friendly tunneling with hydraulic breakers. Donetsk: Donetsk Technical University, 2004, pp. 143–145. (In Russ.)
13. Toraño J. et al. Environmental impact of rock excavation in urban areas: comparison between blasting and hydraulic breaker hammer. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 2006, vol. 23, no. 2, pp. 117–126.
14. Bolobov V.I., Le Thanh B., Plashchinsky V.A. On the crack propagation along the rock on impact. *Obogashchenie rud* [Enrichment of Ores], 2019, no. 6, pp. 3–8. (In Russ.)

References

1. Anfimov A.L. The lithological and facies characteristics of the boehmite-containing limestones of the above-ore strata at the North Urals Bauxite Mine. *Litologiya i*

15. Bolobov V.I., Le Thanh Binh, Chupin S.A., Plashchinsky V.A. Dependence between the life of a hydraulic breaker pick and wear resistance of its material. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Science and Technical Journal)], 2020, no. 5, pp. 68-79. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-68-79
16. Kholodnyakov G.A., Polovinko A.V., Ligotskiy D.N. Ecological mining of hard rocks using hydraulic breakers. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Science and Technical Journal)], 2012, no. 3, pp. 70–74. (In Russ.)

Поступила 31.05.2022; принята к публикации 14.06.2022; опубликована 28.06.2022
Submitted 31/05/2022; revised 14/06/2022; published 28/06/2022

Холмский Алексей Валерьевич – аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия.
Email: chelmick@yandex.ru. ORCID 0000-0003-1311-0949

Фомин Сергей Игоревич – доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия.
Email: fomisi@mail.ru. ORCID 0000-0002-0939-1189

Alexey V. Kholmanskiy – postgraduate student,
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia
Email: chelmick@yandex.ru. ORCID 0000-0003-1311-0949

Sergey I. Fomin – DrSc (Eng.), Professor,
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.
Email: fomisi@mail.ru. ORCID 0000-0002-0939-1189