

ПРОБЛЕМЫ ПОСТАНОВКИ УСТУПОВ В ПРЕДЕЛЬНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

А. В. Яковлев¹, Е. С. Шимкив¹

¹ Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, Россия

Аннотация: Рассмотрена проблема обеспечения долговременной устойчивости уступов на предельном контуре карьеров. Рекомендации по производству буровзрывных работ на предельном контуре разработаны на основе изучения геологической информации, проведения полевых инженерно-геологических исследований структурно-тектонического строения массива, выявления неблагоприятно ориентированных поверхностей ослабления массива, расчетной оценки устойчивости уступов. Исследования особенностей деформирования законтурного массива горных пород вблизи взрывного блока при многорядном короткозамедленном взрывании позволили разработать способы повышения степени дробления взорванной горной массы за счет снижения энергии взрыва, передаваемой в законтурный массив, методику расчета интервалов времени замедления между зарядами и схемы взрывания приконтурных взрывных блоков, позволяющие обеспечить долговременную устойчивость уступов в результате уменьшения взрывного разрушения законтурного массива. При постановке уступов в предельное положение для уменьшения воздействия взрывных нагрузок на законтурный массив следует применять диагональные схемы взрывания и увеличивать интервалы времени замедления. Для уменьшения вероятности опасных обрушений уступов, в том числе в зоне капитальных вскрывающих выработок, постановку уступов в предельное положение рекомендуется производить по результатам исследований структурного строения массива с картированием неблагоприятно ориентированных трещин и нарушений, оценкой устойчивости уступов и корректировки проектных параметров уступов.

Ключевые слова: карьер, массив горных пород, устойчивость, приконтурная зона, буровзрывные работы, короткозамедленное взрывание скважинных зарядов, интервал времени замедления, схема и порядок взрывания, нарушение законтурного массива.

Благодарность: Статья подготовлена при выполнении Госзадания по теме «Методы учета переходных процессов технологического развития при освоении глубокозалегающих сложноструктурных месторождений полезных ископаемых» (№ 0405–2019–0005).

Для цитирования: Яковлев А. В., Шимкив Е. С. Проблемы постановки уступов в предельное положение // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5–1. – С. 105–116. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_105.

Problems of ultimate pit limit design

A. V. Yakovlev¹, E. S. Shimkiv¹

¹ Institute of Mining Ural branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Abstract: The paper considers the problems of long-term stability of pit wall at the ultimate limits. The recommendations on drilling and blasting at the ultimate pit limits are based on geological studies, field engineering and geological exploration of structure and tectonics of rock mass, detection of unfavorably oriented weakening surfaces and on the pit wall stability estimates. The studies into adjacent rock mass deformation under multi-row short-delay blasting made it possible to develop the methods for improving the fragmentation quality of blasted rock mass by reducing the blast energy transmitted to pit wall rock mass, the calculation procedure of delay intervals between blasts and the blasting patterns for pit wall rock mass which ensured long-term stability of benches as a result of decreased explosive rupture of pit wall rock mass. At ultimate pit limits, the blast load applied to the pit wall rock mass can be reduced by using the diagonal blasting patterns and by increasing the delay intervals. To reduce the probability of pit wall failure, including the zone of permanent access roadways, it is recommended to operate at the ultimate pit limits based on the studies on rock mass structure with mapping the unfavorably oriented cracks and faults, pit wall stability estimates and adjustment of pit wall design parameters.

Key words: open-pit mine, rock mass, stability, adjacent rock mass, drilling-and-blasting, short-delayed blasting, delay interval, blasting pattern and sequence, pit wall rock mass fracture.

Acknowledgements: The article is prepared under the State Contract on Methods to Take into Account Transient Technological Processes in Mining Deep-Sated Mineral Deposits of Complex Structure, Topic No. 0405-2019-0005.

For citation: Yakovlev A. V., Shimkiv E. S. Problems of ultimate pit limit design. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5–1):105–116. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_105.

Введение

Важнейшими факторами, влияющими на устойчивость уступов в предельном положении, являются структурно-тектоническое строение массива, прочностные свойства пород, слагающих борта карьера, степень нарушения естественного строения массива взрывными работами. Прибортовой массив из-за воздействия взрывных работ теряет свое первоначальное структурно-тектоническое строение, происходит раскрытие сомкнутых и образование новых трещин. Поэтому при постановке уступов в конечное положение должно быть предусмотрено изменение параметров буровзрывных работ, в том числе применение многорядного короткозамедленного взрывания (МКЗВ) скважинных зарядов, обоснование диаметра приконтурного ряда скважин и расстояния между ними, угла наклона контурных скважин в зависи-

мости от структурного строения массива и определенного расчетами угла откоса уступа, схемы и порядка взрывания приконтурной ленты.

Теоретические исследования особенностей деформирования массива взрывными нагрузками позволили установить механизм разрушения массивов горных пород и разработать способы повышения степени дробления отбиваемой части массива за счет снижения энергии взрыва, передаваемой в законтурный массив [1].

При взрыве заряда по мере возрастания давления газообразных продуктов детонации отбиваемая часть массива начинает разрушаться и постепенно теряет сцепление с законтурным массивом. Затем давление газообразных продуктов детонации уменьшается, и «в массиве начинается разгрузка, время которой определяется величиной и скоростью отхода горной массы

от массива. После снятия нагрузки в законтурной части массива остаются зоны остаточных деформаций, направление максимального вектора которых обратно направлению отбойки, а их величина определяется условиями работы взрыва зарядов двух рядов скважин, примыкающих к массиву» [2].

«Если эти заряды инициируются через интервал времени, не обеспечивающий формирования боковой свободной поверхности, время действия взрывных газов на массив увеличивается, поэтому возрастают интенсивность и ширина зоны нарушения» [2]. Для уменьшения воздействия взрыва на законтурный массив необходимо отбойку производить в направлении простираения взрываемого блока с применением увеличенных интервалов времени замедления. Необходимость увеличения интервалов времени замедления также показана в [3–7].

Практика ведения буровзрывных работ в условиях дробления вязких пород карьеров АО «ЕВРАЗ КГОК» с увеличенными расходами ВВ 1,7–2,0 кг/м³ и более показывает, что повышенный выход негабарита наблюдается из зоны первого-второго рядов скважин, где массив пород уже нарушен



Рис. 1. Раздробленный массив в верхней части уступа

Fig. 1. Fragmented array at the top of bench

ранее проведенными взрывами. Кроме того, разрушению подвергается откос в верхней части уступов (рис. 1) в зоне перебура при взрывании вышележащего уступа.

Следовательно, проблема снижения интенсивности и ширины зоны нарушения массива актуальна не только при постановке уступов на предельной контур, но и при взрывании технологических блоков.

Устойчивость уступов в скальных породах зависит от пространственного положения поверхностей ослабления массива и их прочностных свойств. Формирование уступов на предельном контуре карьеров сопровождается локальными обрушениями верхней приоткосной части уступов с уменьшением ширины предохранительных берм, что особенно важно учитывать в зонах расположения транспортных берм.

Эти обрушения могут быть вызваны двумя основными причинами:

- невыявленные на стадии разведки или неучтенные в ранее проведенных расчетах поверхности ослабления массива, имеющие падение в направлении выработанного пространства карьера;
- разрушение структуры приоткосной части уступов взрывными работами.

Некоторые участки бортов проектируются с увеличенными конструктивными углами погашения из-за необходимости размещения вскрывающих выработок или перегрузочных складов при сохранении результирующего угла наклона борта. Наличие в массиве неблагоприятных поверхностей ослабления и возникновение сдвижений по ним может привести к разрушению вскрывающих выработок и нарушению грузотранспортной связи рабочих горизонтов с поверхностью.

Подобного рода нарушение устойчивости сдвоенного уступа с транспортной бермой произошло 01 января

2014 г. на Западном карьере АО «ЕВРАЗ КГОК» (рис. 2, 3). Деформация бермы и железнодорожного пути на горизонте 220 м восточного борта привела к полной остановке работы карьера, так как это единственный выезд из карьера.

Параметры участка деформации: длина зоны обрушения — 50 м; высота уступа — 30 м; угол откоса уступа после обрушения — 50°. Массив горных пород на данном участке представлен пироксенитами.

Структурное строение массива горных пород на аварийном участке определяется тектоническим нарушением, имеющих северо-западное простирание и юго-западное падение. Плоскость, по которой произошло обрушение уступа, имеет угол падения 50°.



Рис. 2. Начальная стадия развития деформаций

Fig. 2. Initial stage of deformation development



Рис. 3. Поверхность обрушения

Fig. 3. Collapse surface

Кроме этого тектонического нарушения, в массиве картирована система протяженных трещин с углом падения в выработанное пространство карьера 67°. Выявленные протяженные трещины при пересечении создают клинообразную структуру, снижающую устойчивость отдельных уступов и участков борта карьера.

Наряду со структурой массива горных пород, существенным фактором, влияющим на устойчивость уступов и участков бортов в целом, является напряженно-деформированное состояние и современные геодинамические движения массива. На основе ранее проведенных исследований установлено, что на участке деформации восточного борта смещения окружающего массива характеризуются изменчивостью во времени по амплитуде и направлению, поэтому подвижность структурных блоков по тектоническим нарушениям оказывает существенное негативное влияние на сохранение устойчивости локальных участков борта и отдельных уступов.

Массив северо-восточного и восточного бортов Западного карьера характеризуется наиболее сложным структурно-тектоническим строением среди остальных прибортовых массивов карьера. Деформации откосов и берм происходят по сопряженным кососекущим протяженным трещинам, которые обнаруживаются при постановке уступов в предельное положение.

Проведенные после произошедшей деформации исследования структурно-тектонического строения массива позволили обосновать невозможность повторных обрушений и разрушения транспортной бермы после переноса железнодорожных путей за пределы опасной зоны.

Приведенный пример локального обрушения уступа демонстрирует важ-

ность обоснования параметров уступов на предельном контуре карьеров.

Кроме того, при обследовании уступов, поставленных в предельное положение, выявлена проблема, связанная с искривлением наклонных контурных скважин глубиной более 30 м, что вызывает отклонение угла откоса уступа от проектного положения.

Основными причинами искривления скважин являются наклонное залегание и анизотропия свойств горных пород, малый диаметр и большая глубина скважин при формировании высоких уступов на предельном контуре карьера.

Чем меньше диаметр скважины и больше ее глубина, тем большее отклонение скважины от проектного оказывается в нижней части уступа при неблагоприятных условиях залегания горных пород.

Если искривление (уходка) контурных скважин на конкретном карьере — закономерное явление, наблюдается практически всегда и на любых участках массива, то следует принимать техническое решение, как с этим бороться. Уменьшение уходки может быть достигнуто путем снижения осевой нагрузки на буровой инструмент и увеличения скорости вращения долота, а также изменения параметров уступов на предельном контуре с уменьшением их высоты, тогда уменьшится длина контурных скважин и, как следствие, будет исключена уходка скважин отрезной щели.

Методы

Инженерно-геологические исследования структурно-тектонического строения прибортовых массивов карьеров проводятся с целью выявления неблагоприятно ориентированных поверхностей ослабления массива, оказывающих влияние на долговременную устой-

чивость приоткосной части уступов, поставленных в предельное положение.

Важное значение имеет определение основных систем блокообразующих трещин и протяженных поверхностей нарушения сплошности массива, залегающих с углом падения 30—60° в выработанное пространство карьера, по которым возможно обрушение верхней части уступа с выполаживанием откоса.

Расчеты устойчивости откосов уступов осуществляются, исходя из физико-механических свойств горных пород и их контактов, а также анализа углов падения и простираения трещин относительно положения уступа.

В случае наличия потенциальных поверхностей ослабления расчет устойчивости уступов выполняется по схемам, позволяющим учесть соответствующие возможные механизмы разрушения откоса.

Нарушение законтурного массива при проведении экспериментальных взрывов оценивалось по результатам замеров смещения реперов маркшейдерских реперных линий, заложенных за последним рядом скважин на поверхности уступов перпендикулярно взрываемому блоку. Координирование реперов до и после взрыва выполнялось электронным тахеометром, устанавливаемым за границей взрываемого блока на расстоянии не ближе 200 м. Привязка места установки тахеометра проводилась от пунктов опорной маркшейдерской сети карьера. По смещениям в осях координат вычислялись результирующие смещения реперов в плане и по высоте.

Результаты

Сложность выбора основных параметров БВР при заоткоске (линейной массы заряда на метр скважины и расстояния между скважинами при различ-

ных диаметрах) заключается в том, что несмотря на значительные объемы экспериментальных и теоретических работ, выполненных как в нашей стране, так и зарубежных странах, до настоящего времени нет общепризнанной, дающей достоверные результаты методики их расчета, что приводит к необходимости проводить большой объем экспериментальных работ в условиях конкретного горнорудного предприятия.

Создавшееся положение объясняется тем, что не удается описать все происходящие при формировании контурной щели физические процессы в рамках единой теории. Если в прошлом столетии всеобщее признание заслуживал механизм образования щели за счет взаимодействия волн напряжения между контурными скважинами [8], то к настоящему времени преобладающей точкой зрения является деформационный механизм, при котором основную роль в формировании трещин разрыва оказывает поршневое квазистатическое действие газов продуктов детонации ВВ [9, 10].

Результаты расчетов расстояний между скважинами контурной щели для карьеров АО «ЕВРАЗ КГОК» и результаты экспериментов при заоткоске уступов приведены в табл. 4.1.

Анализ данных таблицы показывает, что основные параметры БВР при заоткоске (линейный вес контурного заряда и расстояние между контурными скважинами) как при теоретическом подходе к их расчету [9, 10], так и полученные в результате обобщения экспериментальных взрывов на карьерах, отличаются друг от друга незначительно.

Расстояние между контурными скважинами существенно зависит от категории трещиноватости горных пород массива, уменьшаясь с увеличением трещиноватости в связи с повыше-

нием диссипативных потерь на стыках блоков. Для компенсации диссипации энергии взрыва зарядов на трещинах необходимо снижать расстояние между контурными скважинами до 1,3–1,5 м при линейной массе заряда 1,6–1,8 кг на метр скважины.

В статье [11] приводится методика, разработанная с учетом отечественного и зарубежных [12] исследований, которую можно использовать для расчета величины перебура.

По результатам экспериментальных взрывов на моделях из оргстекла на рис. 4 показано изменение зон трещинообразования без трещины и при наличии протяженной трещины вблизи заряда. Видно, что смоделированная до взрыва трещина препятствует развитию разрушающих деформаций в окружающий массив.

Повышение качества дробления горной массы при субвертикальной направленной трещиноватости массива [13] возможно путем изменения размеров сетки скважин и направления фронта отбойки.

Следовательно, до производства заоткосочных работ на планируемом участке уступа необходимо изучение структурно-тектонического строения и степени трещиноватости вышележащего уступа, уже поставленного в конечное положение, с последующей экстраполяцией результатов на нижележащий уступ. Это позволит корректировать расстояние между контурными скважинами в зависимости от категории трещиноватости пород.

В течение ряда лет на карьерах АО «ЕВРАЗ КГОК» была проведена серия опытно-промышленных взрывов для экспериментальной проверки влияния интервалов времени замедления между зарядами в ряду скважин и смежными рядами и порядка инициирования зарядов в схемах МКЗВ

Таблица 4.1

Основные параметры БВР по заоткоске уступов
Cutback-aimed drilling and blasting parameters

D _{скв} , м	Результаты исследований и экспериментов ИГД УрО РАН (2009 год)				По данным работ [9, 10]				Результаты исследований и экспериментов ИГД УрО РАН (1979 год)						
	P _{к'} , кг/м	α _т , град.	a, м	P _{к'} , кг/м	K _{тр}	κ'	a, м	P _{к'} , кг/м	K _{тр}	κ'	a, м	P _{к'} , кг/м	K _{тр}	κ'	a, м
0,250	3,5–4,0	0–15	2,3–2,5	3,6–3,9	V	1	2,45–2,6	4,0–4,9	V	1	2,3–3,0	4,0–4,9	V	1	2,3–3,0
		15–45	1,9–2,1		IV	0,8	2,0–2,1		IV	0,85			2,0–2,6		
		>45	1,7–1,8		III	0,6	1,5–1,6		III ^a	0,7			1,6–2,1		
0,165	1,9–2,1	0–15	1,5–1,6	1,6–1,8	V	1	1,65–	1,0–1,1	V	1	1,3–1,7	1,0–1,1	V	1	1,3–1,7
		15–45	1,3–1,4		IV	0,8	1,74		IV	0,8			1,32–1,4		
		>45	1,1–1,2		III	0,6	1,0–1,1		III	0,6			1,0–1,1		

Примечание: D_{скв} – диаметр скважины; P_к – линейная масса заряда на метр скважины; α_т – угол между простиранием уступа и основной системой трещин; a – расстояние между скважинами контурной щели; K_{тр} – коэффициент трещиноватости по классификации Междомственной комиссии по взрывному делу; κ' – коэффициент, зависящий от категории пород по трещиноватости.

Таблица 2

Сравнительные данные результирующих горизонтальных смещений законтурного массива и качества дробления горной массы
Comparison of resultant residual horizontal displacements in pit wall rock mass and rock fragmentation quality

Интервалы времени замедления, мс в первом ряду скважин	Между смежными скважинами в последующих рядах	Величина смещений реперов (мм) на расстоянии от последнего ряда скважин (м)		Качество дробления горной массы (по выходу негабарита), %
		13–16	18–22	
42	42	293	154	29
100	42	104	92	72
100	67	82	36	14
				23–27
				2,5
				1,8
				1,6

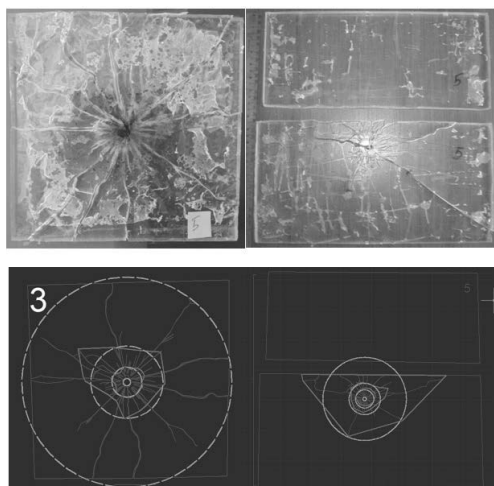


Рис. 4. Результаты опытных взрывов на моделях из оргстекла

Fig. 4. Results of experimental explosions on organic glass models

на качество взрывной подготовки горной массы. В каждом случае взрывные блоки были разделены на экспериментальный и контрольный участки, по которым производились отдельные замеры деформаций законтурного массива, параметров развала и выхода негабарита.

Проведенными ИГД УрО РАН исследованиями [14–16] установлено, что интенсивностью дробления горной массы и величиной зоны нарушения законтурного массива можно управлять посредством изменения пространственно-временного порядка инициирования зарядов в схемах МКЗВ и применением оконтуривания взрывных блоков скважинными зарядами уменьшенного диаметра. Разработана методика расчета интервалов времени замедления, оптимизация которых позволяет увеличить долю энергии взрыва скважинных зарядов на дробление горной массы и снизить взрывное воздействие на законтурный массив [17, 18].

На карьерах АО «ЕВРАЗ КГОК» нами проведена опытно-промышленная

проверка влияния расчетных интервалов времени замедления на нарушение законтурного массива и повышение интенсивности дробления горной массы.

Всего проанализировано 15 взрывных блоков (6 — на Западном карьере, 7 — на Северном карьере и 2 — на Главном карьере). Результаты опытно-промышленной проверки приведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что величина горизонтальных остаточных смещений на расстоянии около 15 м от последнего ряда скважин при увеличении интервалов времени замедления между зарядами в ряду скважин с 42 мс до 100 мс и между зарядами смежных рядов скважин с 42 мс до 67 мс снижается с 293 мм до 82 мм, то есть более чем в 3 раза, а ширина зоны нарушения — с 22 до 15 м, то есть в 1,4 раза. При этом в соответствии с расчетными интервалами времени замедления 100 мс между скважинами в ряду и 67 мс между смежными скважинами в рядах происходит полное формирование зон дробления от каждого из взрывааемых зарядов, а благодаря зарядам в ряду, взрываемым в следующей серии времени замедления, формируется боковая свободная поверхность, что обеспечивает отбойку в направлении, близком к фланговому. Результатом полного формирования зон дробления от каждого из взрывааемых зарядов является снижение выхода негабарита во взорванной горной массе в 1,5 раза и уменьшение ширины развала на 5–10 м.

Обсуждение

Рекомендованные для АО «ЕВРАЗ КГОК» параметры БВР при заоткопке уступов направлены на получение эффективной контурной щели и обеспечение минимального нарушения

законтурного массива при отбойке приконтурного целика методом МКЗВ с применением оптимальных интервалов времени замедления, то есть на обеспечение долговременной устойчивости уступов, поставленных в конечное положение.

На основании проведенных исследований при ведении буровзрывных работ на предельном контуре карьеров могут быть реализованы следующие рекомендации, направленные на максимальное сохранение структурного строения законтурного массива:

- при подходе горных работ к контуру карьера на расстояние, не ближе 4 расстояний между рядами технологических отбойных скважин, следует оставлять приконтурный целик для предохранения законтурного массива от разрушающего действия взрывов технологических блоков. Этот целик впоследствии должен быть взорван, но по щадящей технологии с отрезной щелью и затем отгружен;

- до производства заоткосочных работ на планируемом участке уступа необходимо проводить изучение структурно-тектонического строения массива и определение границ участков по степени их трещиноватости на вышележащем уступе, поставленном в конечное положение, с последующей экстраполяцией результатов картирования на нижележащий уступ;

- применять схемы МКЗВ с числом рядов не менее 4;

- применять диагональные схемы взрывания (желательно с подпорной стенкой из ранее взорванной горной массы) при шахматной сетке скважин с увеличенными интервалами замедления и с обеспечением независимой работы каждого из зарядов;

- схемы коммутации зарядов производить без врубов, начало детонации — с крайней скважины в первом

ряду. Монтаж наружной сети производить в диагональ с наклоном в направлении хода детонации;

- учитывать направление простира-ния основных систем трещин в массиве по длине взрывного блока путем оптимизации сетки скважин (угол наклона большой оси зоны дробления каждого из зарядов к линии откоса уступа должен соответствовать простираению основной системы трещин) и обеспечения такого направления фронта отбойки, при котором трещины основной системы создают дополнительный экранирующий эффект, уменьшая разрушение тыльной части массива;

- для сохранения структурного строения верхней части уступа бурение технологических скважин вышележащего горизонта, попадающих в зону сопряжения оставляемой бермы и откоса нижележащего уступа производить с недобуром 0,5 — 1,5 м;

- на проблемных участках в промежутках между скважинами отрезной щели бурить (но не заряжать) направляющие (холостые) скважины глубиной 3 — 5 м.

Заключение

1. По результатам проведенных исследований установлено, что интенсивностью дробления горной массы и величиной зоны нарушения законтурного массива можно управлять посредством изменения пространственно-временного порядка инициирования зарядов в схемах многорядного короткозамедленного взрывания.

2. При постановке уступов в предельное положение для уменьшения воздействия взрывных нагрузок на законтурный массив следует применять диагональные схемы взрывания и увеличивать интервалы времени замедления.

3. Для предупреждения локальных обрушений уступов, особенно

в районе расположения капитальных вскрывающих выработок, постановку уступов в предельное положение следует производить на основании исследований структурно-тектонического строения массива с целью выявления неблагоприятно ориентированных трещин и нарушений, прогнозной оценки вероятности разрушения вскрываю-

щих выработок и (при необходимости) корректировки проектных параметров уступов.

4. Для минимизации негативных последствий локальных обрушений в зоне транспортных берм предусматривать постановку в предельное положение одиночных (не сдвоенных) вышележащего и нижележащего уступов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемов Э. П.* Деформационные процессы в ближней зоне законтурного массива при массовых взрывах на карьерах // Геомеханика в горном деле (Доклады Всероссийской конф., 10–11 октября 2007 г., Екатеринбург) / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 2008. – С. 102 – 107.
2. *Яковлев В. Л., Артемов Э. П., Батуев М. А., Дубских А. В.* Влияние порядка инициирования скважинных зарядов на величину остаточных деформаций породного массива // Горный журнал. – 1996. – № 9/10. – С. 57 – 60.
3. *Шевкун Е. Б., Лецинский А. В., Лысак Ю. А., Плотников А. Ю.* Особенности взрывного рыхления при увеличенных интервалах замедления // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 4. – С. 272 – 282.
4. *Шевкун Е. Б., Лецинский А. В., Лысак Ю. А., Плотников А. Ю.* Взрывное рыхление пород на карьерах с большими замедлениями // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10. – С. 29 – 41.
5. *Xiaodong Fu, Qian Sheng, Yonghui Zhang, Jian Chen.* Application of the discontinuous deformation analysis method to stress wave propagation through a one-dimensional rock mass // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2015. – Vol. 80. – Pp. 155 – 170.
6. *Bangbiao Wu, Rong Cheng, Kaiwen Xia.* Dynamic tensile failure of rocks under static pretension // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – Vol. 80. – December 2015. – Pp. 12 – 18.
7. *Yang L.-Y., Ding C.-X.* Fracture mechanism due to blast-imposed loading under high static stress conditions // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2018. – Vol. 107. – P. 150 – 158.
8. *Бротанек И., Вода Й.* Контурное взрывание в горном деле и строительстве. – Москва : Недра, 1983. – 144 с.
9. *Фокин В. А.* О приоритетном механизме формирования щели при контурном взрывании // Известия вузов. Горный журнал. – 2005. – № 6. – С. 78 – 86.
10. *Фокин В. А.* О предельных нагрузках при хрупком разрушении сдвигом // Известия вузов. Горный журнал. – 2004. – № 4. – С. 113 – 122.
11. *Борычев В. М., Иляхин С. В., Брюховецкий О. С.* Влияние горнотехнических факторов на выбор величины перебура скважинных зарядов // Горный журнал. – 2018. – № 11. – С. 87 – 91.
12. *Duan Y., Xiong D., Yao L., Wang F., Xu G.* Advanced Technology for Setting Out of Blastholes and Measurement while Drilling // Rock Fragmentation by Blasting (Fragblast 11) : Proceedings of the 11th International Symposium. – Sydney, 2015. – P. 593–598.
13. *Яковлев А. В., Шимкив Е. С.* Исследование влияния основных систем трещин в массиве Северного карьера ОАО «ЕВРАЗ КГОК» на качество дробления взорванной горной массы // Проблемы недропользования. – №3 (6) [Электронный ресурс]: рецензируемый сборник научных статей. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН. – 2015. – № 3. – С. 19 – 25.

14. *Артемьев Э. П.* Управление воздействием взрывных нагрузок на законтурный массив // Уральский горнопромышленный форум : сборник докладов. — Екатеринбург : УрО РАН, 2006. — С. 115–119.

15. *Артемьев Э. П.* Деформационные процессы в ближней зоне законтурного массива при массовых взрывах на карьерах // Геомеханика в горном деле : сборник докладов Всероссийской конференции, (10–11 октября 2007 г., Екатеринбург) / ИГД УрО РАН. — Екатеринбург, 2008. — С. 102 – 107.

16. *Артемьев Э. П., Яковлев А. В., Бусаргина Е. С., Бушель В. Г., Дубских А. В.* Обеспечение долговременной устойчивости высоких уступов на предельном контуре карьеров (на примере Западного карьера ОАО «ЕВРАЗ КГОК») // Горный журнал. — 2012. — № 1. — С. 52 – 55.

17. *Артемьев Э. П., Яковлев А. В., Бусаргина Е. С.* Обоснование пространственно-временного порядка инициирования скважинных зарядов при массовых взрывах на карьерах // Проблемы недропользования: Сборник статей. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня. — 2011. — № ОВ11. — С. 41 – 50.

18. *Яковлев А. В., Артемьев Э. П., Трясцин А. В.* Математическая модель пространственно-временного режима дробления массивов горных пород технологическими взрывами методом МКЗВ // Маркшейдерия и недропользование. — 2015. — № 2. — С. 33 – 37. **MIAB**

REFERENCES

1. Artemiev E. P. *Deformatsionnye protsessy v blizhney zone zakonturnogo massiva pri massovykh vzryvakh na karierakh* [Deformation processes in the near zone of the perimeter rock mass at large-scale blasts in open-pit mines], *Geomekhanika v gornom dele, (Doklady Vserossiyskoy konf., October 10–11, 2007, Ekaterinburg)*, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, 2008, pp. 102 107 [in Russ].

2. Yakovlev V. L., Artemiev E. P., Batuev M. A., Dubskikh A. V. Influence of the order of initiation of borehole charges on the residual deformations of the rock mass, *Gornyy Zhurnal*. 1996, no. 9/10, pp. 57 60 [in Russ].

3. Shevkun E. B., Leshchinsky A. V., Lysak Yu. A., Plotnikov A. Yu. Special aspects of blasting loosening at the increased delay intervals, *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 4, pp. 272 282 [in Russ].

3. Shevkun E. B., Leshchinsky A. V., Lysak Yu. A., Plotnikov A. Yu. Blasting loosening of rocks in open-pit mines with long delays, *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 10, pp. 29 41 [in Russ].

5. Xiaodong Fu, Qian Sheng, Yonghui Zhang, Jian Chen. Application of the discontinuous deformation analysis method to stress wave propagation through a one-dimensional rock mass, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015, Vol. 80, pp. 155 170.

6. Bangbiao Wua, Rong Chenc, Kaiwen Xia. Dynamic tensile failure of rocks under static pretension. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. 80, December 2015. pp. 12 18.

7. Yang L.-Y., Ding C.-X. Fracture mechanism due to blast-imposed loading under high static stress conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018, Vol. 107. pp. 150 158.

8. Brotanek I., Water J. *Konturnoye vzryvaniye v gornom dele i stroitelstve* [Presplit blasting in mining and construction], Moscow, Nedra, 1983, 144 p. [in Russ]

9. Fokin V. A. On the priority mechanism of split formation at presplit blasting. *Izvestiya vuzov. Gornyy Zhurnal*, 2005, no. 6. pp. 78 86 [in Russ].

10. Fokin V. A. On breaking loads at brittle fracture by shear. *Izvestiya vuzov. Gornyy Zhurnal*, 2004, no. 4. pp. 113 122 [in Russ].

11. Borychev V. M., Ilyakhin S. V., Bryukhovetskiy O. S. Influence of mining and technical factors on the choice of the value of overdrilling of borehole charges. *Gornyy Zhurnal*, 2018, no. 11, pp. 87 91 [in Russ].

12. Duan Y., Xiong D., Yao L., Wang F., Xu G. Advanced Technology for Setting Out of Blastholes and Measurement while Drilling. Rock Fragmentation by Blasting (Fragblast 11): Proceedings of the 11th International Symposium, Sydney, 2015. pp. 593 598.

13. Yakovlev A. V., Shimkiv E. C. *Issledovaniye vliyaniya osnovnykh sistem treshchin v massive Severnogo kariera OAO "EVRAZ KGOK" na kachestvo drobleniya vzorvannoy gornoy massy* [Investigation of the influence of the main systems of cracks in the rock mass of the Severny open-pit mine of JSC "EVRAZ KGOK" on the quality of crushing of the blasted rock mass], *Problemy nedropolzovaniya*. no. 3 (6) available at reviewed collection of scientific articles, Ekaterinburg, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, 2015, no. 3, pp. 19 25 [in Russ].

14. Artemyev E. P. *Upravleniye vozdeystviem vzryvnykh nagruzok na zakonturniy massiv* [Control of the impact of blasting loads on the perimeter rock mass], *Uralskiy gornopromyshlenny forum: sbornik dokladov*, Ekaterinburg, Ural Branch of RAS, 2006, pp. 115 119 [in Russ].

15. Artemyev E. P. *Deformatsionnye protsessy v blizhney zone zakonturnogo massiva pri massovykh vzryvakh na karierakh* [Deformation processes in the near zone of the perimeter rock mass at large-scale blasts in open-pit mines], *Geomekhanika v gornom dele: sbornik dokladov Vserossiyskoy konferentsii (October 10–11, 2007, Ekaterinburg)*, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, 2008, pp. 102 107 [in Russ].

16. Artemyev E. P., Yakovlev A. V., Busargina E. S., Bushel V. G., Dubskikh A. V. *Obespecheniye dolgovremennoy ustoychivosti vysokikh ustupov na predelnom konture karierov (na primere Zapadnogo kariera OAO "EVRAZ KGOK")* [Provision of long-term stability of high benches on the limiting outline of open-pit mines (on the example of the Zapadny open-pit mine of JSC "EVRAZ KGOK")], *Gornyy Zhurnal*, 2012, no. 1, pp. 52 55 [in Russ].

17. Artemyev E. P., Yakovlev A. V., Busargina E. C. *Obosnovaniye prostranstvenno-vremennogo poryadka initsirovaniya skvazhinnykh zaryadov pri massovykh vzryvakh na karierakh* [Justification of the spatial and temporal order of initiation of borehole charges at large-scale blasts in open-pit mines], *Problemy nedropolzovaniya: MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2011, no. OB11, pp. 41 50 [in Russ].

18. Yakovlev A. V., Artemiev E. P., Tryaztsin A. V. Mathematical model of the spatial and temporal mode for crushing the rock masses by technological blasts using the multirow short-delay blasting method, *Markshederiya i nedropolzovaniye*, 2015, no. 2, pp. 33 37 [in Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Яковлев Алексей Викторович¹ — канд. техн. наук, зав. лабораторией открытой геотехнологии, Шимкив Екатерина Сергеевна¹ — научный сотрудник

¹ Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия, lubk_igd@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yakovlev A. V., Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory of Open Geotechnology, Shimkiv E. S., Researcher; Institute of Mining, Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Ruusia, lubk_igd@mail.ru.

Получена редакцией 18.12.2020; получена после рецензии 02.04.3021; принята к печати 10.04.2021.

Received by the editors 18.12.2020; received after the review 02.04.3021; accepted for printing 10.04.2021.