

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.271.333

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ УСТУПОВ И УЧАСТКОВ БОРТОВ КАРЬЕРОВ

В. Л. Яковлев, А. В. Яковлев, Е. С. Шимкив

*Институт горного дела УрО РАН,
E-mail: direct@igduran.ru, lubk_igd@mail.ru,
ул. Мамина-Сибиряка, 58, 620075, г. Екатеринбург, Россия*

Для обоснования условий обеспечения устойчивости уступов и участков бортов карьеров приведены этапы развития соответствующей нормативной базы. Рассмотрены дополнительные факторы, влияющие на устойчивость уступов и участков бортов карьеров в гравитационно-тектоническом поле напряжений. Представлены основные направления изучения прибортовых массивов на действующих карьерах и показана необходимость определения тектонических напряжений в прибортовых массивах скальных горных пород и учета их воздействия на устойчивость карьерных откосов. Разработан алгоритм обоснования параметров уступов и участков бортов карьеров в тектонически напряженных массивах горных пород, сформулированы принципы ведения буровзрывных работ в приконтурных зонах и способы уменьшения воздействия взрывных работ на законтурный массив.

Карьер, борт, уступ, тектонические напряжения, напряженно-деформированное состояние массива, структурное строение, трещины, устойчивость, буровзрывные работы

DOI: 10.15372/FTPRPI20230601

Проблема обеспечения устойчивости уступов и бортов карьеров имеет особую актуальность, так как от их параметров зависит безопасность разработки месторождений, а также объемы вскрыши и запасы полезного ископаемого в контурах карьеров.

В [1] приведена историческая справка, отражающая этапы развития нормативной базы в области обеспечения устойчивости бортов карьеров и отвалов:

— руководство по определению оптимальных углов наклона бортов карьеров и откосов отвалов [2];

— методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов, строящихся и эксплуатируемых карьеров [3];

— инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости [4];

— правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах [5].

В [6–10] многолетними исследованиями, проведенными на ряде глубоких карьеров, прибортовые массивы которых сложены скальными породами, обоснована необходимость изучения и учета тектонических напряжений при формировании уступов и бортов на предельном контуре карьеров. Необходимость разработки нормативно-методической базы для определения параметров бортов и уступов карьеров в массивах скальных горных пород неоднократно отмечалась на многих конференциях и в публикациях [11–23]. Основой для разработки новых Правил обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и отвалов [24] послужило Руководство по проектированию бортов карьеров под редакцией Джона Рида и Питера Стейси [25]. Перевод подготовлен и издан в 2015 г. под редакцией проф. А. Б. Макарова [26]. В [27] выполнены обзор и анализ данной книги на предмет сходимости с российскими подходами. При разработке Правил [24] использован зарубежный опыт обоснования устойчивости бортов и уступов карьеров [28–32].

В дополнение к Правилам [24] в ИПКОН РАН разработаны Методические указания, рекомендованные Ростехнадзором РФ:

- методические указания по изучению массива горных пород для обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов [33];
- методические указания по определению параметров бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов [34];
- методические указания по оценке рисков развития деформаций, мониторингу и управлению устойчивостью бортов и уступов, карьеров, разрезов и откосов отвалов [35].

В [33] даны пояснения к [24], а также рекомендации по их применению. В [34] приведены методы и способы оценки устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов (далее карьеров) и откосов отвалов на всех этапах освоения месторождений. Отмечается, что методики и способы расчета носят рекомендательный характер.

Важнейшими факторами, влияющими на устойчивость уступов и бортов в предельном положении, являются структурно-тектоническое строение массива, прочностные свойства пород в массиве, особенно по поверхностям ослабления, наличие и уровень тектонических напряжений, а также степень нарушения естественного строения массива взрывными работами. Производство горных работ в карьере сопровождается геомеханическими процессами, происходящими в прибортовых массивах по мере углубки и формирования выработанного пространства. Прибортовой массив из-за воздействия тектонических напряжений и взрывных работ теряет свое первоначальное структурно-тектоническое строение, происходит раскрытие сомкнутых и образование новых трещин, в результате чего изменяются условия устойчивости уступов и участков бортов. В [24] определены факторы, влияющие на устойчивость уступов и бортов карьеров.

По результатам многолетних исследований авторов статьи при оценке устойчивости уступов и бортов в скальных массивах предлагается учитывать дополнительные факторы:

— вторичное поле напряжений (гравитационное и тектоническое), изменяющееся по мере развития карьерного пространства и во времени;

— тектонические деформации приоткосной части массива, которые могут проявляться на локальных участках в зависимости от структурного строения массива и прочностных свойств контактов пород и других поверхностей ослаблений;

— подвижность прибортовых массивов, приводящая к изменению структурного строения и прочностных свойств поверхностей ослабления массива;

— технологию производства взрывных работ в приконтурных зонах карьера.

Для повышения надежности обоснования устойчивости прибортовых массивов рекомендуются следующие основные направления изучения прибортовых массивов на действующих карьерах:

— мониторинг подвижности прибортовых массивов (инструментальные маркшейдерские наблюдения, спутниковая геодезия);

— выявление индикаторов тектонических сдвижений (картирование штрихов и борозд скольжения, дискование керна);

— оценка уровня и направления действия тектонических напряжений (тектонофизические методы);

— исследование влияния тектонических напряжений на устойчивость уступов и участков бортов (геомеханические расчеты);

— районирование бортов карьеров по условию устойчивости уступов и обоснование углов откоса уступов на различных участках предельного контура (картирование структурного строения прибортовых массивов);

— оптимизация конструкции участков бортов в зонах расположения транспортных берм (картирование структуры уступов по мере их оформления с интерполяцией протяженных трещин на нижележащие уступы);

— минимизация взрывного разрушения законтурного массива.

В [24] приведена обобщающая формула для расчета коэффициента запаса устойчивости изотропного откоса методом алгебраического сложения сил:

$$n = \frac{\sum \left[\left(P_i \cos \mu_i + P_i^B \frac{\cos(\alpha - \mu_i)}{\cos \alpha} - D_i + \Delta P \cos(45 + 0.5\varphi_n) - Q_i \sin \xi_i \right) \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i + A \right]}{\sum \left[\left(P_i \sin \mu_i + P_i^B \frac{\sin(\alpha - \mu_i)}{\cos \alpha} + \Delta P \sin(45 + 0.5\varphi_n) + Q_i \sin \xi_i \operatorname{tg} \varphi_i + B \right) \right]}.$$

Не приводя расшифровку всех параметров, входящих в формулу, обратим внимание на два из них: A — дополнительные удерживающие силы, мН; B — дополнительные сдвигающие силы, мН. Очевидно, это должны быть составляющие тектонического поля напряжений, влияние которого в скальном массиве имеет определяющее значение для устойчивости бортов и уступов карьера.

При формировании выработанного пространства карьера по мере углубки и расширения напряженно-деформированное состояние прибортовых массивов изменяется во времени как для гравитационного, так и тектонического поля напряжений.

Один из главных факторов, воздействующих на массив горных пород, — вторичное поле напряжений, которое можно установить только в процессе изучения на конкретном карьере в динамике развития горных работ: возникновение подвижности участков прибортовых массивов; изменение структурно-тектонического строения массива с раскрытием существующих и формированием новых дизъюнктивов; формирование поверхностей скольжения и оползневых участков массива.

Для оценки напряженно-деформированного состояния массива в ИГД УрО РАН применяются следующие методы:

- анализ геологического и геотектонического состояния и особенностей массива;
- метод дискования керна;
- кинематический анализ сопряженных трещин со следами штрихов и борозд скольжения (тектонофизический метод);
- модифицированный геодезическо-геомеханический метод, основанный на измерении смещений различных участков массива на больших базах, в том числе с организацией геомеханического полигона в околокарьерном и внутрикарьерном пространстве, инструментальным мониторингом смещений реперов, последующим расчетом напряженно-деформированного состояния массива и изучением его трансформации во времени.

Алгоритм обоснования устойчивости бортов и уступов для действующих карьеров предлагается дополнить изучением тектонических напряжений в прибортовых массивах скальных горных пород и учетом их воздействия на устойчивость карьерных откосов (рис. 1):

- выявление признаков тектонического поля напряжений и участков тектонической подвижности прибортовых массивов;
- оценка уровня и направления действия горизонтальных тектонических напряжений;
- расчетная оценка возможности потери устойчивости уступов и участков бортов по протяженным трещинам в зависимости от действующих тектонических напряжений, ориентировки трещин относительно простирания уступа, прочностных свойств заполнителя и характеристик поверхностей трещин (ровная, волнистая, гладкая, шероховатая и т. д.).



Рис. 1. Алгоритм обоснования устойчивости бортов и уступов для действующих карьеров

Методика изучения влияния тектонических напряжений на устойчивость карьерных откосов должна включать:

- изучение результатов эксплуатационного разведочного бурения;
- анализ деформационных процессов, происходящих в прибортовых массивах, и результатов маркшейдерских наблюдений;
- проведение полевых инженерно-геологических исследований структурно-тектонического строения прибортовых массивов (системы трещин, индикаторы тектонической подвижности массива, корректировка модели возможного деформирования уступов и групп уступов);
- расчеты напряженно-деформированного состояния массива;
- оценка возможности деформаций уступов и участков бортов под воздействием горизонтальных тектонических напряжений;
- внесение изменений в необходимых случаях в проектную документацию с корректировкой параметров бортов и уступов карьера на потенциально опасных участках, особенно в зонах расположения постоянных транспортных коммуникаций.

Решение проблемы устойчивости уступов и участков бортов карьеров должно базироваться на расчетной оценке возможности потери устойчивости откосов по протяженным трещинам в зависимости от действующих тектонических напряжений, ориентировки трещин относительно простирания уступа, прочностных свойств заполнителя и характеристик поверхностей трещин.

Тектоническое поле напряжений способно дезинтегрировать массив не только по залеченным швам, но и некоторые области ненарушенных ранее пород. Для оценки устойчивости прибортового массива в первую очередь необходимо определить уровень действующих компонент поля напряжений тектонического происхождения, например структурных характеристик массива, образованных в результате перемещения смежных блоков. Ориентировка перемещения блоков и борозд скольжения на прочных заполнителях швов позволяет провести реконструкцию поля напряжений. Такая реконструкция выполнена для массива северо-западного борта Главного карьера АО «ЕВРАЗ КГОК» и получены следующие компоненты тектонического поля напряжений: $\sigma_1 \approx 14.5$ МПа и $\sigma_3 \approx 5.8$ МПа [3]. Для оценки устойчивости прибортового массива выбраны три нарушения: первое имеет шероховатую поверхность, угол трения $\varphi' = 20^\circ$, сцепление по контакту $c' = 0.5$ МПа, второе — слабошероховатую поверхность, $\varphi' = 15^\circ$, $c' = 0.3$ МПа, третье — гладкую увлажненную поверхность, $\varphi' = 12^\circ$, $c' = 0.1$ МПа.

Коэффициент запаса устойчивости определяется соотношением удерживающей и сдвигающей компонент поля напряжений:

$$n = \frac{\tau_{\text{сц}}}{\tau_{\text{сдв}}} = \frac{(\sigma_1 \sin^2 \alpha + \sigma_3 \cos^2 \alpha) \operatorname{tg} \varphi' + c'}{0.5(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha},$$

где α — угол между σ_1 и поверхностью трещины, град.

По результатам расчетов (таблица, рис. 2) потеря устойчивости прибортового массива прогнозируется по нарушениям, которые составляют с вектором действия максимальной компоненты тензора напряжений σ_1 углы $23-48^\circ$ ($\varphi' = 20^\circ$, $c' = 0.5$ МПа), $14-62^\circ$ ($\varphi' = 15^\circ$, $c' = 0.3$ МПа) и $8-68^\circ$ ($\varphi' = 12^\circ$, $c' = 0.1$ МПа). Установленные диапазоны углов позволяют реализоваться первичным подвижкам по трещинам и нарушениям, причем снижение прочностных свойств поверхностей ослабления массива приводит к расширению диапазона углов падения потенциально подвижных нарушений, т. е. от значений компонент тектонического поля напряжений и прочностных свойств поверхностей ослабления зависит способность массива противостоять сложившимся нагрузкам и определяются условия возникновения подвижек прибортового массива по междублочным контактам.

Коэффициент запаса устойчивости прибортового массива при разных прочностных свойствах поверхностей ослабления массива

α , град	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
Шероховатый контакт, $\varphi' = 20^\circ$, $c' = 0.5$ МПа																
$\tau_{сц}$	2.71	2.82	2.98	3.17	3.40	3.65	3.92	4.19	4.47	4.73	4.98	5.21	5.40	5.56	5.68	5.75
$\tau_{сдв}$	1.49	2.17	2.79	3.33	3.77	4.09	4.28	4.35	4.28	4.09	3.77	3.34	2.80	2.18	1.49	0.76
$\tau_{сц} / \tau_{сдв}$	1.82	1.30	1.07	0.95	0.90	0.89	0.91	0.96	1.04	1.16	1.32	1.56	1.93	2.55	3.80	7.55
Слабошероховатый контакт, $\varphi' = 15^\circ$, $c' = 0.3$ МПа																
$\tau_{сц}$	1.92	2.01	2.13	2.27	2.44	2.62	2.82	3.02	3.22	3.42	3.60	3.77	3.91	4.03	4.11	4.17
$\tau_{сдв}$	1.49	2.17	2.79	3.33	3.77	4.09	4.28	4.35	4.28	4.09	3.77	3.34	2.80	2.18	1.49	0.76
$\tau_{сц} / \tau_{сдв}$	1.29	0.92	0.76	0.68	0.65	0.64	0.66	0.69	0.75	0.84	0.95	1.13	1.40	1.85	2.75	5.47
Гладкий увлажненный контакт, $\varphi' = 12^\circ$, $c' = 0.1$ МПа																
$\tau_{сц}$	1.39	1.46	1.55	1.66	1.79	1.94	2.10	2.26	2.42	2.57	2.72	2.85	2.96	3.06	3.12	3.17
$\tau_{сдв}$	1.49	2.17	2.79	3.33	3.77	4.09	4.28	4.35	4.28	4.09	3.77	3.34	2.80	2.18	1.49	0.76
$\tau_{сц} / \tau_{сдв}$	0.93	0.67	0.55	0.50	0.48	0.47	0.49	0.52	0.56	0.63	0.72	0.85	1.06	1.40	2.09	4.16

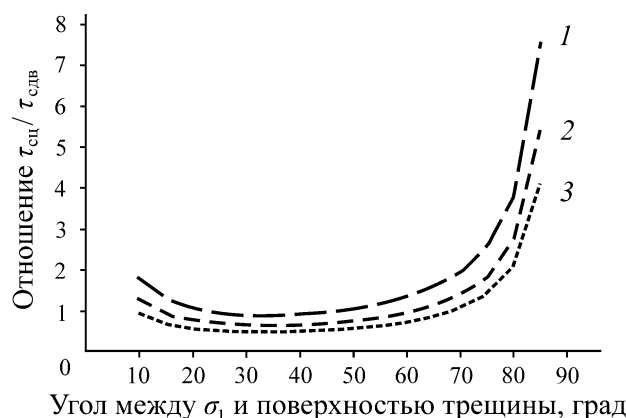


Рис. 2. Коэффициент запаса устойчивости прибортового массива при разных прочностных свойствах поверхностей ослабления массива: 1 — шероховатый контакт, $\varphi' = 20^\circ$, $c' = 0.5$ МПа; 2 — слабошероховатый контакт, $\varphi' = 15^\circ$, $c' = 0.3$ МПа; 3 — гладкий увлажненный контакт, $\varphi' = 12^\circ$, $c' = 0.1$ МПа

На основании данных многолетних исследований влияния взрывных работ на качество дробления взорванной горной массы и нарушение контурного массива предлагаются следующие основные принципы ведения буровзрывных работ в приконтурных зонах:

1) управление интенсивностью дробления горной массы и размером зоны нарушения контурного массива посредством изменения пространственно-временного порядка инициирования зарядов в схемах многорядного короткозамедленного взрывания;

2) геомеханическое сопровождение производства буровзрывных работ при постановке уступов в предельное положение:

— исследование структурного строения массива для обоснования категории взрываемости (трещиноватости) горных пород, ориентировки систем трещин и протяженных трещин относительно простирания уступа;

— расчетное обоснование угла откоса уступа (угла наклона контурных скважин) в зависимости от структурного строения массива;

3) применение специальной технологии производства взрывных работ, основанной на независимой работе каждого из зарядов для минимизации разрушающих воздействий на законтурный массив.

Основные способы уменьшения воздействия взрывных работ на законтурный массив заключаются в следующем:

- при подходе горных работ к контуру карьера следует оставлять приконтурный целик для предохранения законтурного массива от разрушающего действия взрывов технологических блоков;

- до производства буровзрывных работ на приконтурном блоке необходимо изучение структурного 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;

- изменение параметров буровзрывных работ при многорядном короткозамедленном взрывании скважинных зарядов на основании исследования структурного строения массива:

- обоснование угла наклона и диаметра заоткосных скважин, а также расстояния между ними в зависимости от интенсивности трещиноватости массива;

- разработка схем взрывания приконтурных блоков, оптимизация сетки скважин, интервалов времени замедления и порядка взрывания скважинных зарядов для обеспечения независимой работы каждого из зарядов;

- учет направления простирания основных систем трещин в массиве по длине взрывного блока путем оптимизации сетки скважин и обеспечения такого направления фронта отбойки, при котором трещины основной системы создают дополнительный экранирующий эффект, уменьшая разрушение тыльной части массива.

- для предупреждения локальных обрушений уступов, особенно в районе расположения капитальных вскрывающих выработок, постановку уступов в предельное положение следует проводить на основании исследований структурно-тектонического строения массива с целью выявления неблагоприятно ориентированных трещин и нарушений, прогнозной оценки вероятности разрушения вскрывающих выработок и при необходимости корректировки проектных параметров уступов.

ВЫВОДЫ

Обоснование параметров уступов и участков бортов карьеров должно базироваться на расчетной оценке возможности потери устойчивости откосов по протяженным трещинам в зависимости от действующих тектонических напряжений, ориентировки трещин относительно простирания уступа, прочностных свойств заполнителя и характеристик поверхностей трещин.

Для действующих карьеров важными являются дополнительные факторы, влияющие на устойчивость уступов и бортов: вторичное поле напряжений, изменяющееся по мере развития карьерного пространства и во времени; тектонические деформации приоткосной части массива, которые могут проявляться на локальных участках в зависимости от структурного строения массива и прочностных свойств контактов пород и других поверхностей ослаблений; подвижность прибортовых массивов, приводящая к изменению структурного строения и прочностных свойств поверхностей ослабления массива; технология производства взрывных работ в приконтурных зонах карьера.

Определены главные направления изучения прибортовых массивов на действующих карьерах и разработан алгоритм обоснования параметров уступов и участков бортов карьеров в тектонически напряженных массивах горных пород, построенный на расчетной оценке их устойчивости по результатам мониторинга подвижности прибортовых массивов, ориентировки трещин относительно простирания уступа, прочностных свойств заполнителя и характеристик поверхностей трещин, выявления индикаторов тектонических сдвижений, оценки уровня и направления действия тектонических напряжений и их влияния на устойчивость уступов и участков бортов карьеров.

Сформулированы принципы ведения буровзрывных работ в приконтурных зонах и обоснованы способы уменьшения воздействия взрывных работ на законтурный массив.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Makarov A., Livinsky I., Spirin V., and Pavlovich A.** Regulation of open pit slope stability in Russia, Slope Stability 2020, Proc. of the 2020 Int. Symp. on Slope Stability in Open Pitch Min. and Civil Eng., Australian Centre for Geomechanics, 2020. — P. 155–164.
2. **Руководство** по определению оптимальных углов наклона бортов карьеров и откосов отвалов / Государственный комитет Совета Министров СССР по топливной пром-сти. — Л.: ВНИМИ, 1962. — 138 с.
3. **Методические указания** по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов, строящихся и эксплуатируемых карьеров / Министерство угольной промышленности СССР. — Л.: ВНИМИ, 1972. — 165 с.
4. **Инструкция** по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. Утв. Госгортехнадзором СССР 21.07.1970 / Министерство угольной пром-сти СССР. — Л.: ВНИМИ, 1971. — 186 с.
5. **Правила** обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. Утв. Госгортехнадзором РФ 16.03.1998. — СПб.: ВНИМИ, 1998.
6. **Яковлев А. В.** Устойчивость уступов и бортов карьеров в скальных массивах // Проблемы геотехнологии и недроведения (Мельниковские чтения) // Докл. Междунар. конф. 06–10.07.1998. — Екатеринбург: УрО РАН, 1998. — Т. 2. — С. 199–205.
7. **Яковлев В. Л., Сашурин А. Д., Зубков А. В., Яковлев А. В.** Геомеханические аспекты проблемы открытой разработки месторождений // ФТПРПИ. — 2001. — № 4. — С. 32–35.
8. **Яковлев А. В., Ермаков Н. И.** Устойчивость бортов рудных карьеров при действии тектонических напряжений в массиве. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2006. — 231 с.
9. **Яковлев В. Л., Яковлев А. В.** Оценка напряженного состояния прибортовых массивов карьеров // ФТПРПИ. — 2007. — № 3. — С. 36–44.
10. **Яковлев А. В., Ермаков Н. И.** Методика изучения прибортовых массивов для прогнозирования устойчивости бортов карьеров. — Екатеринбург: УрО РАН, 2008. — 76 с.
11. **Зотеев В. Г., Зотеев О. В.** О необходимости совершенствования нормативно-методической базы по геомеханическому обеспечению открытых горных работ // Горн. журн. — 2010. — № 1. — С. 66–68.
12. **Рыбин В. В., Жиров Д. В., Мелихова Г. С., Климов С. А.** Комплексная методика инженерно-структурных исследований и мониторинга геомеханического состояния массива пород в целях проектирования и эксплуатации глубоких карьеров // Современная тектонофизика. Методы и результаты. — 2011. — С. 100–109.

13. **Кожуховский А. В., Завьялов А. А., Козырев А. А., Серый С. С., Дунаев В. А.** Инновационные технологии мониторинга и прогнозирования устойчивости бортов глубокого карьера // Горн. журн. — 2012. — № 10. — С. 29–35.
14. **Сопоставление** российских и международных практик анализа устойчивости откосов бортов карьера / А. М. Мочалов, К. В. Морозов, Ю. А. Норватов, М. Д. Ильин и др. // Глубокие карьеры: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, 18–22.06.2012 / Российская акад. наук, Отд-ние наук о Земле РАН, Горный ин-т Кольского науч. центра РАН; гл. ред. Н. Н. Мельников. — Апатиты, СПб.: ГИИ КНЦ РАН, 2012. — С. 340–352.
15. **Мочалов А. М., Ишутин С. А., Павлович А. А., Сапачев Р. Ю.** Оценка устойчивости бортов карьеров с использованием отечественного и зарубежного программного обеспечения // Зап. Горн. ин-та. — 2012. — Т. 199. — С. 219–226.
16. **Tsirel S. V., Zuev B. Yu., and Pavlovich A. A.** The influence of earthquakes on open-pit slope stability, *Int. J. Geosciences*, 2012, Vol. 3. — P. 799–808.
17. **Козырев А. А., Рыбин В. В.** Геомеханическое обоснование рациональных конструкций бортов карьеров в тектонически напряженных массивах // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2015. — С. 245–250.
18. **Ливинский И. С., Митрофанов А. Ф., Макаров А. Б.** Комплексное геомеханическое моделирование: структура, геология, разумная достаточность // Горн. журн. — 2017. — № 8. — С. 51–55.
19. **Ляшенко В. И.** Развитие научно-технических основ мониторинга состояния горного массива сложноструктурных месторождений. Сообщение 2 // ГИАБ. — 2017. — № 3. — С. 123–141.
20. **Цирель С. В., Павлович А. А.** Проблемы и пути развития методов геомеханического обоснования параметров бортов карьеров // Горн. журн. — 2017. — № 7. — С. 39–45.
21. **Захаров В. Н., Рыльникова М. В., Никифорова И. Л.** Развитие научно-методических основ проектирования горнотехнических систем при открытой разработке месторождений // ГИАБ. — 2017. — № S37: Открытые горные работы в XXI в.: результаты, проблемы и перспективы развития, Т. 1. — С. 13–26.
22. **Зотеев В. Г., Макаров А. Б., Эпштейн И. В.** Оценка возможности использования “Руководства по проектированию бортов карьеров” при проектировании открытой разработки рудных месторождений в условиях современной России // Золото и технологии. — 2018. — № 1. — С. 52–57.
23. **Рыльникова М. В., Зотеев О. В., Никифорова И. Л.** Развитие нормативной базы в области обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и отвалов // Горн. пром-сть. — 2018. — № 3. — С. 95–98.
24. **Правила** обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов. Утв. Приказом Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору 13.11.2020 № 439. — 77 с.
25. **Read J. and Stacey P.** Guidelines for open pit slope design, Australia, CSIRO, 2009. — 496 p.
26. **Руководство** по проектированию бортов карьеров / под ред. А. Б. Макарова. — Екатеринбург: Правовед, 2015. — 544 с.
27. **Зотеев В. Г.** Проектирование бортов карьера: отечественная и зарубежная // Горн. журн. — 2017. — № 1. — С. 85–89.
28. **Bieniawski Z. T.** Engineering rock mass classifications, New York, Wiley, 1989. — 272 p.
29. **Hoek E., Caranza-Torres C., and Corcum B.** Hoek — Brown failure criterion, *Min. Innovation Technol., Proc. North Amer. Rock Mech. Soc.*, 2002. — P. 267–273.

30. **Hormazabal E., Rovira F., Walker M., and Carranza-Torres C.** Analysis and design of slopes for Rajo Sur, an open pit mine next to the subsidence crater of El Teniente mine in Chile, Proc. of Slope Stability 2009, Santiago, Universidad de Los Andes, 2009.
31. **Tonderai Chiwaye H.** A comparison of the limit equilibrium and numerical modeling approaches to risk analysis for open pit mine slopes: Dissertation for to degree of Master of Sci. in Eng., Johannesburg, University of the Witwatersrand, 2010. — 145 p.
32. **Taseko** mines limited new prosperity gold-copper project, Preliminary pit slope design, Knight Piesold Consulting, 2012. — 78 p.
33. **Методические указания** по изучению массива горных пород для обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов; разработ. М. В. Рыльникова и др. — М.: ИПКОН РАН, 2022. — 102 с.
34. **Методические указания** по определению параметров бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов; разработ. М. В. Рыльникова и др. — М.: ИПКОН РАН, 2022. — 80 с.
35. **Методические указания** по оценке рисков развития деформаций, мониторингу и управлению устойчивостью бортов и уступов, карьеров, разрезов и откосов отвалов; разработ. М. В. Рыльникова и др. — М.: ИПКОН РАН, 2022. — 90 с.

Поступила в редакцию 24/X 2023

После доработки 12/XI 2023

Принята к публикации 16/XI 2023