ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Определение потенциала удароопасности горных пород Норильского промышленного района

А.П.Господариков[1], **М.А.Зацепин**[1]✉, **А.П.Киркин**[2]
[1] *Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия*

Как цитировать эту статью: Господариков А.П., Зацепин М.А., Киркин А.П. Определение потенциала удароопасности горных пород Норильского промышленного района // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16498. С. 83-90. EDN UOHOQP

Аннотация
Увеличение глубины разработки месторождений полезных ископаемых приводит к ухудшению горно-геологических условий. Значительный рост уровня напряжений в массиве горных пород способствует возможному проявлению горного давления в динамической форме. Возникающая при этом задача оценки удароопасности горных пород тесно связана с задачей получения более точных результатов испытаний образцов на сжатие в жестких или сервогидравлических испытательных прессах с использованием графиков их полного деформирования. Такой подход требует специального дорогостоящего оборудования, значительных временных ресурсов и достаточного количества кернового материала. Поэтому важен подход, позволяющий оценить склонность горных пород к хрупкому разрушению достаточно простыми методами исследований, не приводящими к потере качества и достоверности полученных результатов. Представлены результаты лабораторных испытаний горных пород Норильского промышленного района по определению пределов прочности на растяжение и сжатие. В качестве методик испытаний применялись как отечественные, так и зарубежные стандарты определения значения коэффициента хрупкости. Потенциал удароопасности горных пород определялся по критерию Кайзера. Установлено, что испытанные литологические типы (богатые сульфидные руды, роговики, вкрапленные руды и породные габбро-долериты), кроме ангидритов, обладают низким потенциалом удароопасности.

Ключевые слова
потенциал удароопасности; горный удар; горные породы; критерий Кайзера; коэффициент хрупкости; одноосное сжатие и растяжение; сервогидравлический испытательный пресс

Поступила: 17.05.2024 ***Принята: 28.01.2025*** ***Онлайн: 27.03.2025*** ***Опубликована: 25.04.2025***

Введение

Разработка месторождений полезных ископаемых на больших глубинах, как правило, приводит к осложнению геомеханической обстановки [1-3] в виде повышенного горного давления, а также увеличения риска проявления его в динамической форме [4-6]. Например, в настоящее время глубина разработки рудников Талнаха на некоторых участках достигает более 1000 м при известной критической глубине удароопасности 700 м [7-9]. При таких больших глубинах, а следовательно, и высоких значениях напряжений, для массива горных пород характерно разрушение его краевой части, проявляющееся потенциально в хрупкой форме с высвобождением упругой энергии, т.е. в виде горного удара [10-12].

Согласно разработанным методическим рекомендациям, необходимо выявлять участки массива горных пород, где возможность возникновения горных ударов наиболее вероятна, т.е. производить оценку склонности горных пород к хрупкому разрушению [13-15]. Одним из наиболее точных способов оценки склонности горных пород к хрупкому разрушению является отношение модуля упругости E к модулю спада M материала. При соотношении $(E/M) > 1$ исследуемый образец принимается неудароопасным, а в случае $(E/M) \leq 1$ – удароопасным. Подобная оценка тесно связана с необходимостью испытания образцов на сжатие с получением графиков полного

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

деформирования. Такой подход можно реализовать либо на жестких, либо на сервогидравлических испытательных прессах с учетом роста скорости поперечных деформаций [16-18]. Для проведения подобных испытаний требуется специализированное оборудование, широкий временной диапазон как на сами испытания, так и на логистику и качественный керновый материал в достаточном количестве.

Достаточно упрощенным методом оценки склонности пород к хрупкому разрушению является метод Я.А.Бича [19, 20], заключающийся в сравнении значений упругих и полных деформаций. В этом случае коэффициент удароопасности определяется по формуле

$$k_{\text{у}} = \frac{\varepsilon_{\text{упр}}}{\varepsilon_{\text{полн}}},$$

где $\varepsilon_{\text{упр}}$ – деформации в зоне упругости; $\varepsilon_{\text{полн}}$ – полные деформации (до разрушения).

Горная порода считается удароопасной при значениях $k_{\text{у}} > 0{,}7$. Согласно методическим рекомендациям*, допускается при определении корреляции между величиной E/M и коэффициентом удароопасности $k_{\text{у}}$ проводить число испытаний для шестого и последующих образцов при допредельных нагрузках [21, 22].

В связи с большим объемом испытаний достаточно перспективной выглядит возможность применения известного критерия Кайзера [23], заключающегося в определении величины потенциала удароопасности горных пород [24]. При применении данного критерия необходимыми являются лишь результаты определения пределов прочности пород на сжатие и растяжение. Таким образом, в этом случае склонность горных пород к хрупкому разрушению определяется достаточно простым способом, что позволяет оперативно получить оценку удароопасности исследуемых горных пород [25-27].

Методика исследований

В рамках исследования горных ударов на рудниках Канады выявлено, что удароопасность горных пород достаточно точно можно оценить по показателю потенциала удароопасности горных пород [23]. Такой показатель учитывает такие параметры, как предел прочности на одноосное сжатие UCS и отношение предела прочности пород на сжатие к пределу прочности на растяжение UCS/UTS, определяемое как коэффициент хрупкости [28].

Известно, что предел прочности пород на сжатие характеризуется энергией, накопленной в породном массиве к моменту его разрушения, большему пределу прочности пород соответствуют большие величины потенциальной энергии упругих деформаций и кинетической энергии, приводящие к динамическим разрушениям массива в виде выброса горной массы и разлету отдельных кусков. Еще одним важным показателем склонности горных пород к скалыванию в результате отрыва тонких пластин является коэффициент хрупкости, определяемый как отношение предела прочности при сжатии к пределу прочности при растяжении исследуемых образцов горной породы (кернового материала) [29].

В рамках определения удароопасности месторождений, расположенных на территории РФ, данный подход был успешно применен для руд и пород месторождений Хибинского массива и Новоширокинского месторождения полиметаллических руд, расположенного в Забайкальском крае [30-32].

При ведении подземных горных работ на больших глубинах в породах, обладающих потенциалом удароопасности, возможны горные удары, а в случае его отсутствия вероятность проявления горного давления в динамической форме близка к нулю [27, 28].

Отметим, что после получения результатов испытаний определения пределов прочности горных пород на сжатие и растяжение возможно за счет увеличения масштаба выполненных работ получение более достоверных и статистически значимых результатов исследования. Для этой цели были использованы результаты лабораторных испытаний, выполненных с 2018 по 2023 гг., определения физико-механических свойств рудного и породного массивов двух месторождений Норильского промышленного района.

*Методические рекомендации по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам. Утверждены Приказом № 216 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23.05.2013.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 272. С. 83-90
© А.П.Господариков, М.А.Зацепин, А.П.Киркин, 2025

Для оценки потенциала удароопасности рассмотрены некоторые типы руд и горных пород Норильского промышленного района (табл.1). Выбор руд и пород обусловлен тем, что первые четыре литологических типа согласно федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности (ФНИП) для рудников Талнаха отнесены к породам, склонным к хрупкому разрушению. Отметим, что на месторождениях Талнаха ангидриты к удароопасным породам не относят [33, 34].

Для оценки потенциала удароопасности пород и руд использовались данные, полученные в результате испытаний на одноосное сжатие и растяжение. Проводилось сопоставление результатов по ГОСТ и ASTM (ISRM). Пробоподготовка и испытания выполнялись в соответствии с ГОСТ 21153.2-84 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии» и ГОСТ 21153.3-85 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении». Определение пределов прочности регламентировано стандартами ASTM D7012-14. Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures и ISRM Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials [35, 36].

В рамках проводимых испытаний по методикам, регламентированным ГОСТ, образцы на сжатие имели отношение высоты к диаметру 2:1, а для растяжения – 1:1. Для испытаний по зарубежным стандартам отношение высоты к диаметру образцов на сжатие составляло 2:1 и 2,5:1, а образцов на растяжение – 0,5:1. Для первой пробы производилась серия испытаний, включавшая по шесть образцов на сжатие, шесть образцов на растяжение по ГОСТ, четыре образца на растяжение по ASTM. Полученные результаты испытаний усреднялись.

Результаты лабораторных испытаний

В результате экспериментальных исследований были определены прочностные свойства пяти литологических типов руд и пород Норильского промышленного района. Полученные результаты, связанные с определением потенциала удароопасности пород и руд, приведены в табл.1.

Таблица 1

Распределение уровня потенциала удароопасности пород и руд Норильского промышленного района

Показатель	Богатые руды		Роговики		Вкрапленные руды		Породные габбро-долериты		Ангидриты	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
Всего проб	51		96		140		144		47	29
Неудароопасные, %	80,4	68,6	54,2	76,0	60,0	70,0	57,6	61,8	0,0	0,0
Низкий потенциал, %	15,7	27,5	40,6	23,0	33,6	27,1	36,1	34,0	0,0	0,0
Средний потенциал, %	3,9	3,9	5,2	1,0	6,4	2,9	5,6	4,2	0,0	0,0
Высокий потенциал, %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0
Очень высокий потенциал, %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0

Примечание. Методика I – ГОСТ, методика II – ASTM.

Графическое распределение проб приведено на рис.1.

Согласно полученным результатам, пробы всех литологических типов, за исключением ангидритов, обладают низким уровнем потенциала удароопасности [37, 38]. При этом соотношение неудароопасных проб составило от 54 до 80 % в зависимости от типа литологии и методики проведения испытаний. Эти процентные соотношения вполне достаточны для отнесения данных литологических типов к удароопасным, так как согласно методическим рекомендациям минимальное количество удароопасных пород должно составлять не менее 10 %. Наилучшее совпадение результатов для различных методик наблюдается при испытании породных габбро-долеритов. Так, в случае богатых руд количество проб, обладающих потенциалом удароопасности, было больше на 12 % при испытаниях по зарубежным методикам, чем по отечественным. Для вкрапленных руд и роговиков наибольший процент удароопасносных проб был получен при испытаниях по отечественным методикам. Однако, несмотря на некоторые расхождения в полученных пропорциях, значительных различий не наблюдалось [39, 40].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

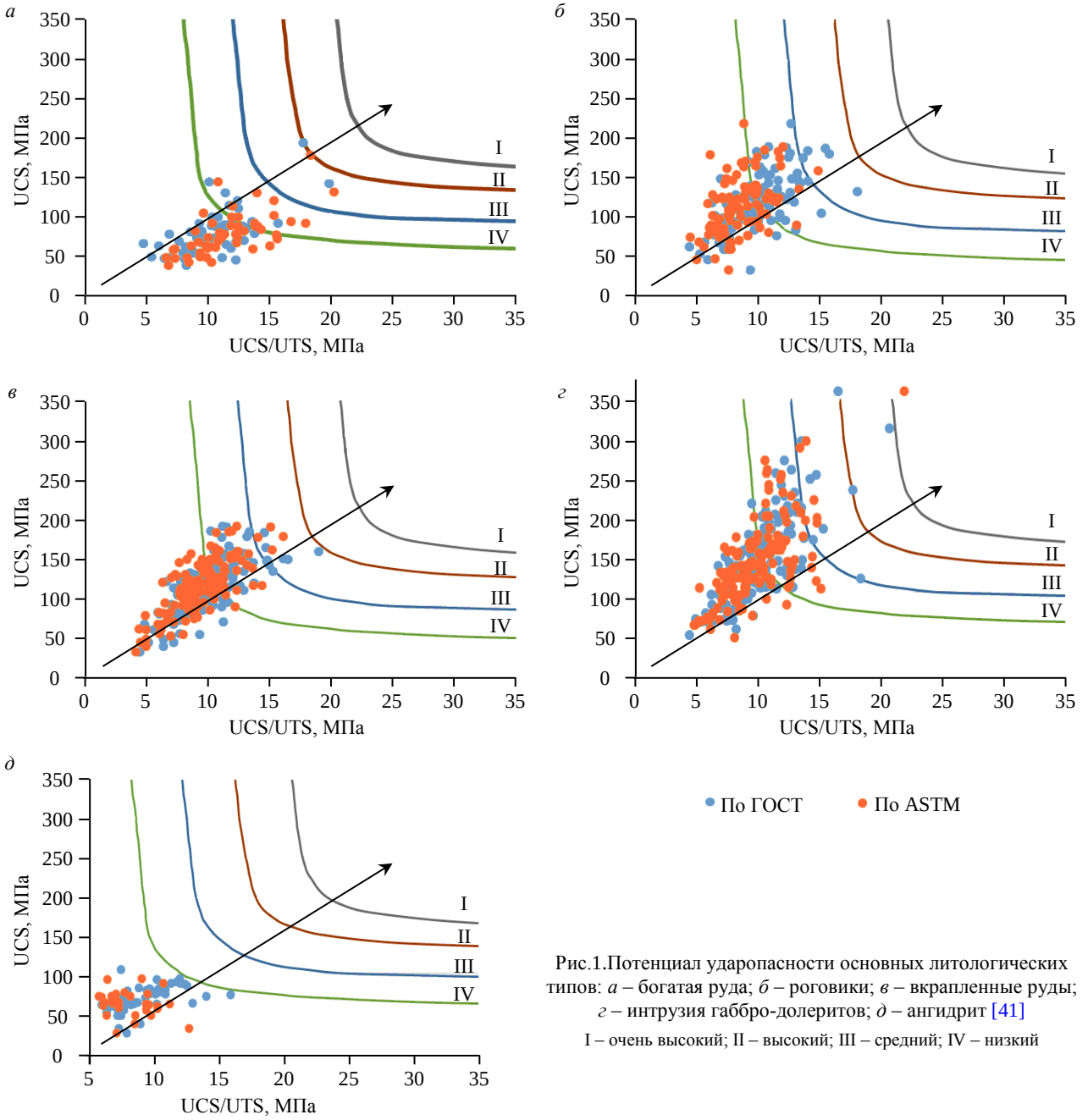


Рис.1.Потенциал ударопасности основных литологических типов: *а* – богатая руда; *б* – роговики; *в* – вкрапленные руды; *г* – интрузия габбро-долеритов; *д* – ангидрит [41]

I – очень высокий; II – высокий; III – средний; IV – низкий

Как и предполагалось, ангидриты неудароопасные и, согласно полученным результатам, не обладают потенциалом удароопасности.

Удароопасность роговиков и габбро-долеритов обуславливается преимущественно их высокой прочностью на сжатие, которая может достигать 300 МПа в образце, тогда как для богатых руд характерно более высокое значение коэффициента хрупкости (табл.2), чем для других пород, что говорит о склонности таких пород к скалыванию тонкими пластинами в результате их отрыва (отжима).

Таблица 2

Среднее значение коэффициента хрупкости исследуемых литологических типов

Методика	Богатая руда	Роговики	Вкрапленные руды	Породные габбро-долериты
ГОСТ	10,57/13,73*	9,85/11,98	9,63/11,93	9,29/11,59
ASTM	11,73/14,81	8,49/10,93	8,95/11,53	9,10/11,63

* Все пробы/удароопасные пробы.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 272. С. 83-90
© А.П.Господариков, М.А.Зацепин, А.П.Киркин, 2025



Рис.2. Примеры отслоения руды в приконтурном массиве под действием высокого уровня напряжений

Такая характерная особенность (высокое значение коэффициента хрупкости) проявляется в богатых рудах и в массиве горных пород. Так, при разработке месторождений полезных ископаемых на глубоких горизонтах приконтурная часть рудного массива отжимается, образуя характерные отслоения (рис.2), а для других геологических разностей обычно такого эффекта не возникает [42].

Средний коэффициент хрупкости ангидритов в табл.2 не представлен, он составил 8,75, предел прочности на сжатие не превысил 105 МПа.

Такой же вывод о меньшем коэффициенте хрупкости у наиболее прочных пород был сделан в работе [30] при исследовании потенциала удароопасности горных пород на апатит-нефелиновых месторождениях. Наглядно это представлено на рис.3, где отражено распределение литологических типов на диаграмме по средним значениям коэффициентов хрупкости и пределов прочности на сжатие (в данной выборке не учитывались пробы без потенциала удароопасности).

Таким образом, согласно полученным результатам исследований горных пород, можно определить, что, несмотря на разный характер возможного проявления удароопасности, всем рассмотренным породам, за исключением ангидритов, присвоен низкий уровень удароопасности.

Выполненные лабораторные исследования по оценке удароопасности богатых руд Норильского промышленного района с помощью испытаний образцов на сжатие в режиме контроля роста скорости поперечных деформаций [19] показали, что они являются удароопасными. Это подтверждает возможность применения критерия Кайзера для оценки потенциала удароопасности в рассмотренных условиях.

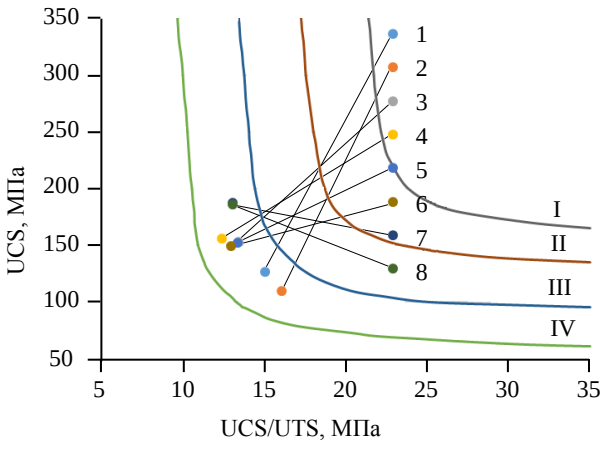


Рис.3. Усредненные показатели удароопасности исследуемых литологических типов: богатая руда (1 – ГОСТ, 2 – ASTM); роговики (3 – ГОСТ, 4 – ASTM); вкрапленные руды (5 – ГОСТ, 6 – ASTM); породные габбро-долериты (7 – ГОСТ, 8 – ASTM)

I-IV – см. рис.1

Заключение

• В результате испытаний по отечественным и зарубежным методикам определены прочностные свойства различных пород и руд Норильского промышленного района и рассчитаны значения их коэффициентов хрупкости.

• При помощи критерия Кайзера установлено, что количество неудароопасных проб варьировалось от 54 до 80 % в зависимости от типа литологии и методики испытаний, что подтверждает склонность к динамическому разрушению

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

пород Норильского промышленного района. Наибольший процент удароопасных проб, полученный при испытании роговиков, согласно отечественным методикам составил практически половину от испытанных проб. Наилучшее совпадение между используемыми методиками наблюдалось при испытании породных габбро-долеритов. Полученные результаты исследований отразили достаточно качественную сходимость между отечественными и зарубежными методиками.

• Отмечено, что богатые руды обладают наименьшей прочностью на сжатие, чем остальные удароопасные типы пород, но при этом имеют наибольший коэффициент хрупкости, что говорит о склонности их к скалыванию в виде тонких пластин. Последний факт подтверждается и результатами натурных исследований в горных выработках, где при наличии уровня высоких напряжений происходит отжим рудных пластин от приконтурной части массива горных пород.

• Определено, что исследованные литологические типы, за исключением ангидритов, обладают низким потенциалом удароопасности. Потенциал удароопасности ангидритов отсутствует, т.е. они не являются удароопасными.

• Для оценки удароопасности богатых руд Норильского промышленного района по критерию Кайзера было проведено широкое сравнение с результатами испытаний образцов на сжатие в режиме контроля роста скорости поперечных деформаций. Сравнение подтвердило, что богатая руда является удароопасной.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Кузиев Д.А. и др.* Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 61-70. DOI: 10.31897/PMI.2022.2

2. *Hongpu Kang, Pengfei Jiang, Yongzheng Wu, Fuqiang Gao.* A combined «ground support-rock modification-destressing» strategy for 1000-m deep roadways in extreme squeezing ground condition // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021. Vol. 142. № 104746. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104746

3. *Jian Zhou, Chao Chen, Kun Du et al.* A new hybrid model of information entropy and unascertained measurement with different membership functions for evaluating destressability in burst-prone underground mines // Engineering with Computers. 2022. Vol. 38. Iss. 1 Suppl. P. 381-399. DOI: 10.1007/s00366-020-01151-3

4. *Konicek P., Schreiber.* Rockburst prevention *via* distress blasting of competent roof rocks in hard coal longwall mining // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2018. Vol. 118. № 3. P. 235-242. DOI: 10.17159/2411-9717/2018/v118n3a6

5. *Тюпин В.Н.* Оценка критической глубины месторождений по условию удароопасности // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 167-171. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.167

6. *Сидоров Д.В., Потапчук М.И., Сидляр А.В., Курсакин Г.А.* Оценка удароопасности при освоении глубоких горизонтов Николаевского месторождения // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 392-398. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.392

7. *Плешко М.С., Давыдов А.А., Сильченко Ю.А., Каледин О.С.* Эффективные решения по креплению сверхглубокого ствола СКС-1 рудника «Скалистый» в сложных геомеханических условиях // Горный журнал. 2020. № 6. С. 57-62. DOI: 10.17580/gzh.2020.06.08

8. *Сергунин М.П., Алборов А.Э., Андреев А.А., Буслова М.А.* Оценка напряжений впереди фронта очистных работ при увеличении ширины зоны разгрузки в условиях Октябрьского и Талнахского месторождений // Горный журнал. 2020. № 6. С. 38-41. DOI: 10.17580/gzh.2020.06.06

9. *Баландин В.В., Леонов В.Л., Куранов А.Д., Багаутдинов И.И.* Опыт применения обобщенного критерия Хука – Брауна к определению типов и параметров крепей в условиях Октябрьского месторождения медно-никелевых руд // Горный журнал. 2019. № 11. С. 14-18. DOI: 10.17580/gzh.2019.11.01

10. *Закалинский В.М., Мингазов Р.Я., Шиповский И.Е.* Влияние горно-технологических факторов на буровзрывные работы при разработке месторождений на большой глубине // Проблемы недропользования. 2022. № 2 (33). С. 46-54. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.02.046

11. *Александрова Т.Н., Афанасова А.В., Кузнецов В.В., Бабенко Т.А.* Исследование процессов селективной дезинтеграции медно-никелевых руд Заполярного месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 12. С. 73-87. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_73

12. *Александрова Т.Н., Чантурия А.В., Кузнецов В.В.* Минералого-технологические особенности и закономерности селективного разрушения железистых кварцитов Михайловского месторождения // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 517-526. DOI: 10.31897/PMI.2022.58

13. *Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г., Мажитов А.М.* Энергетические критерии квазихрупкого разрушения горных пород в технологических процессах их добычи и первичной переработки // Горная промышленность. 2022. № 2. С. 84-89. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-2-84-89

14. *Корчак П.А., Карасев М.А.* Геомеханическое обоснование формирования зон хрупкого разрушения пород в окрестности сопряжений горных выработок рудников АО «Апатит» // Устойчивое развитие горных территорий. 2023. Т. 15. № 1 (55). С. 67-80. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-67-80

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

15. *Соннов М.А., Трофимов А.В., Румянцев А.Е., Шпилев С.В.* Применение численного и блочного геомеханического моделирования для определения параметров крепления камерных выработок большого сечения // Горная промышленность. 2021. № 2. С. 127-131. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-2-127-131

16. *Ulusay R., Hudson J.A.* The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. International Society for Rock Mechanics, Commission on Testing Methods, 2007. 628 p.

17. *Протосеня А.Г., Беляков Н.А., Буслова М.А.* Моделирование напряженно-деформированного состояния блочного горного массива рудных месторождений при отработке системами разработки с обрушением // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 619-627.

18. *Морозов К.В., Демёхин Д.Н., Бахтин Е.В.* Многокомпонентные датчики деформаций для оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-2. С. 80-97. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_80

19. *Господариков А.П., Трофимов А.В., Киркин А.П.* Оценка деформационных характеристик хрупких горных пород за пределом прочности в режиме одноосного сервогидравлического нагружения // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 539-548. DOI: 10.31897/PMI.2022.87

20. *Бич Я.А., Мельков А.Д., Дьяконов Ю.Я.* Предотвращение горных ударов при разработке антрацитовых пластов. М.: Недра, 1993. 159 с.

21. *Subrahmanyam D.S.* Evaluation of Hydraulic Fracturing and Overcoring Methods to Determine and Compare the In Situ Stress Parameters in Porous Rock Mass // Geotechnical and Geological Engineering. 2019. Vol. 37. Iss. 6. P. 4777-4787. DOI: 10.1007/s10706-019-00937-7

22. *Krietsch H., Gischig V., Evans K. et al.* Stress Measurements for an In Situ Stimulation Experiment in Crystalline Rock: Integration of Induced Seismicity, Stress Relief and Hydraulic Methods // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019. Vol. 52. Iss. 2. P. 517-542. DOI: 10.1007/s00603-018-1597-8

23. *Ming Cai, Kaiser P.K.* Rockburst Support. Reference Book. In 2 volumes. Vol. 1: Rockburst Phenomenon and Support Characteristics. Sudbury: Laurentian University, 2018. 284 p.

24. *Айнбиндер И.И., Овчаренко О.В.* Исследования потенциальной удароопасности массива горных пород на проектируемых глубинах отработки месторождения «Валунистое» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6. С. 35-45. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_35

25. *Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A. et al.* Selective Disintegration Justification Based on the Mineralogical and Technological Features of the Polymetallic Ores // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 8. № 851. DOI: 10.3390/min11080851

26. *Winn K.* Multi-approach Geological Strength Index (GSI) Determination for Stratified Sedimentary Rock Masses in Singapore // Geotechnical and Geological Engineering. 2020. Vol. 38. Iss. 2. P. 2351-2358. DOI: 10.1007/s10706-019-01149-9

27. *Самсонов А.А.* Оценка состояния массива горных пород удароопасного месторождения «Олений ручей» по результатам измерений напряжений // Вестник Кольского научного центра РАН. 2019. № 1 (11). С. 62-67. DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.1.62-67

28. *Závacký M., Štefaňák J.* Strains of rock during uniaxial compression test // The Civil Engineering Journal. 2019. Vol. 28. № 3. P. 398-403. DOI: 10.14311/CEJ.2019.03.0032

29. *Бирючев И.В., Макаров А.Б., Усов А.А.* Геомеханическая модель рудника. Часть 2. Использование // Горный журнал. 2020. № 2. С. 35-44. DOI: 10.17580/gzh.2020.02.04

30. *Кузнецов Н.Н., Кондрашов Л.Ю.* Оценка потенциала удароопасности горных пород месторождений Хибинского массива по критерию Кайзера // Вестник МГТУ. 2023. Т. 26. № 2. С. 170-179. DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-170-179

31. *Еременко А.А., Шапошник Ю.Н., Филиппов В.Н., Конурин А.И.* Развитие научных основ безопасной и эффективной геотехнологии при освоении удароопасных месторождений Западной Сибири и Крайнего Севера // Горный журнал. 2019. № 10. С. 33-39. DOI: 10.17580/gzh.2019.10.03

32. *Bertuzzi R.* Revisiting rock classification to estimate rock mass properties // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. Iss. 3. P. 494-510. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.08.011

33. *Марысюк В.П., Шиленко С.Ю., Трофимов А.В., Кузьмин С.В.* Оценка рисков строительства капитального рудоспуска в сложных горно-геологических условиях на основе комплексных геотехнических исследований // Горный журнал. 2020. № 1. С. 62-66. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.12

34. *Марысюк В.П., Шиленко С.Ю., Андреев А.А., Шабаров А.Н.* Методика расчета межскважинных целиков для формирования защищенных зон в условиях удароопасных месторождений Талнаха // Горный журнал. 2023. № 1. С. 106-112. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.18

35. *Saadatmand Hashemi A., Katsabanis P.* Tunnel face preconditioning using destress blasting in deep underground excavations // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 117. № 104126. DOI: 10.1016/j.tust.2021.104126

36. *Козырев А.А., Кузнецов Н.Н., Федотова Ю.В., Шоков А.Н.* Определение степени удароопасности скальных горных пород по результатам испытаний при одноосном сжатии // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 6. С. 41-50. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-41-50

37. *Ковалевский В.Н., Мысин А.В.* Особенности функционирования трубчатых эластичных зарядов, применяемых при добыче блочного камня // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 1. С. 20-34. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_20

38. *Зубов В.П., Тхан Ван Зуи, Федоров А.С.* Технология подземной разработки мощных пластов угля с низкими прочностными характеристиками // Уголь. 2023. № 5. С. 41-49. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-5-41-49

39. *Verbilo P., Karasev M., Belyakov N., Iovlev G.* Experimental and numerical research of jointed rock mass anisotropy in a three-dimensional stress field // Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 2022. Vol. 37. № 2. P. 109-122. DOI: 10.17794/rgn.2022.2.10

40. *Vennes I., Mitri H., Chinnasane D.R., Yao M.* Effect of Stress Anisotropy on the Efficiency of Large-Scale Destress Blasting // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2021. Vol. 54. Iss. 1. P. 31-46. DOI: 10.1007/s00603-020-02252-7

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

41. *Киркин А.П.* Управление удароопасностью массива сплошных сульфидных руд буровзрывным способом в условиях сложного напряженного состояния: Автореф. дис. … канд. техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2023. 22 с.

42. *Маринин М.А., Карасев М.А., Поспехов Г.Б. и др.* Инженерно-геологическое обоснование параметров кучного выщелачивания золота из бедных песчано-глинистых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9. С. 22-37 (in English). DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_22

***Авторы*: Александр Петрович Господариков,** *д-р техн. наук, заведующий кафедрой, https://orcid.org/0000-0003-1018-6841* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Михаил Александрович Зацепин,** *канд. физ.-мат. наук, доцент, zatsepin_ma@pers.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0002-6304-8349* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Александр Павлович Киркин,** *канд. техн. наук, старший научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-4830-8042* (*ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия*),

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0