

www.rudmet.ru

ISSN 0017-2278

КОРПУС ЖУРНАЛ

195 лет

Издается с 1825 года
(№ 2271)

2.2020





Основан в 1825 году
при Горном кадетском корпусе

ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

Ежемесячный научно-технический
и производственный журнал

№ 2 (2271)
ФЕВРАЛЬ 2020

Базовый печатный орган Межправительственного совета стран СНГ
по разведке, использованию и охране недр

Официальный информационный орган Федерального УМО
«Прикладная геология, горное дело, нефтегазовое дело и геодезия»

Журнал выпускается при участии: АК «АЛРОСА» (ПАО), АО «Апатит»,
ПАО «ГМК «Норильский никель», НПК «Механобр-техника» (АО)

При содействии: ФГБУН ИГКОН РАН, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный
университет», Государственного предприятия «Навоийский ГМК», НП «Горнопромышленники
России», Государственного Эрмитажа

УЧРЕДИТЕЛИ ЖУРНАЛА:

Акционерное общество «Издательский дом «Руда и Металлы», федеральное
государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Автономная некоммерческая организация «Информационный телеканал «Хибины ТВ»
Председатель правления «Горного журнала» Л. А. Вайсберг

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Л. А. Пучков (главный редактор), В. В. Адушкин, В. Ж. Арэнс, А. А. Барях,
О. С. Брюховецкий, Л. А. Вайсберг, Н. Г. Валиев, В. А. Винников (руководитель
секции «Физика горных пород и процессов»), А. Г. Воробьев (зам. главного
редактора), Л. Д. Гагут (руководитель секции «Экономика, управление,
недропользование»), Ж. К. Галиев, В. А. Ерёмченко, Б. Н. Заровняев,
В. Н. Захаров, В. П. Зубов, И. В. Зырянов, П. А. Игнатов, С. А. Ильин,
О. И. Казанин, Н. О. Каледина (руководитель секции «Охрана труда и окружающей
среды»), Д. Р. Каплунов (руководитель секции «Разработка месторождений
и горно-строительные работы»), Е. А. Козловский (руководитель секции «Сырьевая
база»), А. В. Корчак, Г. Л. Краснянский, С. В. Кривовичев, В. С. Литвиненко,
А. Б. Макаров, Ю. Н. Малышев, О. Н. Мальгин, О. С. Мисников, Д. В. Пастихин,
В. Л. Петров (руководитель секции «Образование и кадровое обеспечение горной
промышленности»), Г. Г. Пивняк, В. С. Святецкий, И. О. Темкин, Е. М. Титиевский,
С. М. Ткач, К. Н. Трубецкой, В. А. Чантурия (руководитель секции «Переработка
и комплексное использование полезных ископаемых»), А. Н. Шабаров,
Е. Е. Шешко (руководитель секции «Горное оборудование, электроснабжение
и автоматизация»), Т. И. Юшина, А. Б. Яновский

РУКОВОДИТЕЛИ ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВ В СТРАНАХ И РЕГИОНАХ:

Азим Иброхим (Таджикистан), С. С. Арзуманян (Армения),
Ю. И. Волков (КМА, Россия), С. Вуйич (Сербия), И. И. Головатый (Беларусь),
О. А. Одоков (Туркменистан), И. Ю. Рассказов (Дальневосточный регион, Россия),
У. Д. Рыскулов (Кыргызстан) И. Б. Табакман (Канада), А. Г. Твалчрелидзе (Грузия),
Л. И. Тотев (Болгария), Ф. Уолл (Великобритания), А. Ф. Цеховой (Казахстан),
К. С. Санакулов (Кызылкумский регион, Узбекистан), М. Эрикссон (Швеция),
З. Дж. Эфендиева (Азербайджан), В. Л. Яковлев (Средний и Полярный Урал, Россия)

**Журнал по решению ВАК Министерства образования и науки РФ включен
в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых
должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций
на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук» по разработке
месторождений твердых полезных ископаемых, экономике, энергетике**

Журнал входит в Международные реферативные базы данных
SCOPUS и CHEMICAL ABSTRACTS SERVICE

Подписные индексы:

в каталоге агентства «Роспечать» – 73075
в объединенном каталоге «Пресса России» – 45343

РЕДАКЦИЯ:

зам. главного редактора А. Г. Воробьев,
ведущий редактор Л. Е. Костина,
редактор В. А. Елистратова
младший редактор М. А. Крутикова
консультант по горному делу С. А. Ильин,
менеджер по рекламе Н. И. Кольхалова,
специалист по допечатной
подготовке Д. И. Воробьева

Издатель – АО «Издательский дом «Руда и Металлы»

Адрес издателя: 119049, Москва, Ленинский просп., д. 6,
строение 2, НИТУ «МИСиС», оф. 622

Адрес редакции: 119049, Москва, Ленинский просп., д. 6, стр. 2
НИТУ «МИСиС», оф. 619

Тел.: +7 (499) 236-10-62

Эл. почта: gornjournal@rudmet.ru

Почтовый адрес: 119049, Москва, а/я № 71

Отдел рекламы:

Тел/факс: +7 (499) 236-11-86

Эл. почта: reklama@rudmet.ru

www.rudmet.ru

Ежемесячный научно-технический
и производственный журнал «Горный журнал»

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
(Свидетельство ПИ № ФС77-76119 от 24.06.2019 г.)

Товарный знак и название «Горный журнал» являются исключительной
собственностью Издательского дома «Руда и Металлы»

Отпечатано в типографии ООО «Буки Веди»

Адрес типографии: 115093, г. Москва, Партийный переулок, д. 1, корп. 58,
стр. 3, пом. 11

Подписано в печать с оригинал-макета 25.02.2020

Дата выхода в свет: 5.03.20

Формат 60×90/8. Печ. л. 13,5

Печать офсетная. Бумага мелованная

Тираж 3000 экз. Цена свободная

- За достоверность рекламной информации
ответственность несет рекламоатель
- За достоверность научно-технической информации
ответственность несет автор
- Все материалы, поступающие в редакцию,
строга рецензируются и рассматриваются на заседаниях
соответствующих секций и редакционной коллегии
- Мнение редакции может не совпадать с позицией
авторов статей, опубликованных в журнале
- Перепечатка материалов возможна только
с письменного разрешения редакции
- При перепечатке ссылка на «Горный журнал» обязательна
- За сроки размещения опубликованных статей в базе
данных Scopus редакция ответственности не несет

ISSN 0017-2278



9 770017 227004 >

СОДЕРЖАНИЕ

ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ

НИУ «БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Чендев Ю. Г., Григорьев Г. Н., Лисецкий Ф. Н., Михайлов Н. Н. История становления и развития Института наук о Земле НИУ «БелГУ» 5

Козырев А. В., Игнатенко И. М. Памяти Александра Николаевича Петина (к 70-летию со дня рождения) 10

Игнатенко И. М., Липницкая Т. А., Овчинников А. В. Геолого-минералогический музей имени А. Н. Петина НИУ «БелГУ»: история создания, образовательный потенциал и социокультурное значение для Белгородской области 14

НАУКА И ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Урсул А. Д., Урсул Т. А. Устойчивое развитие горного дела: от земного к космическому 18

ГЕОЛОГИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Сначёв А. В., Сначёв В. И., Рассомахин М. А., Коломеец А. В. Углеродистые сланцы Каменского участка: геология и рудоносность (Южный Урал) 24

ФИЗИКА ГОРНЫХ ПОРОД И ПРОЦЕССОВ

Середин В. В., Хрулев А. С., Растегаев А. В., Галкин В. И. Методика оценки напряженного состояния горных пород 30

Бирючев И. В., Макаров А. Б., Усов А. А. Геомеханическая модель рудника. Часть 2. Использование 35

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ГОРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Шорников И. И. Оценка нажимных усилий продавливания трубных обделок при строительстве микротоннелей 45

ЭКОНОМИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

Носков В. А., Бадтиев Б. П., Павлович А. А. Риск-менеджмент при ведении открытых горных работ 51

Швайба Д. Н. Концептуальные основы обеспечения социально-экономической безопасности горно-химического комплекса Республики Беларусь 56

Аполо Эррера А. Э., Чавез Феррейра Й. К., Потравный И. М. Оценка влияния добычи золота на экономику и окружающую среду на примере Эквадора 62

РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Брюховецкий О. С., Секисов А. Г., Лавров А. Ю., Рассказова А. В. Повышение эффективности освоения месторождений поликомпонентных руд со сложноизвлекаемыми формами золота на основе использования их блочно-скважинного выщелачивания 66

Лысенко М. В., Николенко О. А., Позолотин А. С., Айкин А. В. Применение анкеров глубокого заложения при поддержании широкопролетных сопряжений горных выработок в условиях рудника «Айхал» 71

ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ОХРАНА ТРУДА

Ефремов Е. Ю., Мельник Д. Е. Определение безопасных условий отвалообразования на земной поверхности в зоне обрушения действующего подземного рудника 75

Кормицков Д. С., Зайцев А. В., Киряков А. С. Повышение энергоэффективности систем рудничной вентиляции на основе внедрения подземных главных вентиляторных установок 80

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Озарян Ю. А., Бубнова М. Б., Усиков В. И. Методика дистанционного мониторинга природно-технических систем (на примере горнопромышленных районов юга Дальневосточного региона) 84

ЗА РУБЕЖОМ

Соколов А. Д., Такайшвили Л. Н., Батхуяг С., Очирбат П. Угольная промышленность Монголии: ресурсы развития 90

ИСТОРИЯ ГОРНОГО ДЕЛА. КУЛЬТУРА

Мисников О. С., Копенкина Л. В. Возникновение торфяного дела в России 95

ЮБИЛЕИ

Литвинцеву Эдуарду Георгиевичу — 80 лет 34
Гендлеру Семену Григорьевичу — 70 лет 100

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Презентация именного самосвала БЕЛАЗ . . . (2-я стр. обложки)
Итоги выборов в Российскую академию наук по Отделению наук о Земле 4

Памяти Пейхеля Георгия Валентиновича 83
Памяти Барона Всеволода Лазаревича 89

РЕКЛАМА

На обложке:

Карьерный самосвал БЕЛАЗ «Академику В. В. Ржевскому 100 лет» «Mining World Russia-2020» — 24-я Международная выставка машин и оборудования для добычи, обогащения и транспортировки полезных ископаемых «Уголь России и Майнинг-2020» — XI Международная специализированная выставка

На цветной вкладке:

VIII Балканский горный конгресс
Проходческие буровые установки производства АО «Машиностроительный холдинг»
«Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов» — X Международная научно-практическая конференция
АО «Боровичский завод «Полимермаш»
«Индустрия камня-2020» — 21-я Международная выставка
«Добыча, обработка, использование природного камня»

На черно-белых полосах:

IX Международная конференция по геомеханике 70

MONTHLY SCIENTIFIC-TECHNICAL AND INDUSTRIAL JOURNAL

The basic edition of the Intergovernmental council of CIS countries in exploration, usage and protection of the earth bowels

With participation of “ALROSA” PJSC, “Apatit” JSC,
PJSC “MMC “NORILSK NICKEL”, “Mekhanobr-Technica” JSC
With assistance of IPKON RAN, Ural State Mining University, State enterprise Navoi mining
and metallurgical works, “Gornopromyshlenniki Rossii” non-commercial partnership,
State Hermitage Museum
Founders: “Ore & Metals” Publishing house, National University of Science
and Technology “MISIS”, Autonomous Noncommercial Organization
“TV News Channel “Khibiny TV”

The journal has been published since 1825
at Mining military school

Publisher: “Ore & Metals” publishing house
Phone/fax: +7 (495) 638-45-18
E-mail: rim@rudmet.com

Chairman of the managing board: **Leonid Vaisberg**
Editor-in-Chief: **Lev Puchkov**
Deputy Editor-in-Chief: **Alexander Vorobiev**
Mining consultant: **Sergey Il'yin**

Actual address: Moscow, Leninsky prospekt 6 bld. 2, office 619
Mailing address: Russia, 119049, Moscow, P.O. Box # 71
Phone/fax: +7 (499) 236-10-62, +7 (499) 236-11-86
E-mail: gornjournal@rudmet.com
Internet: www.rudmet.com

Leading editor: **Lyudmila Kostina**
Editor: **Vera Elistratova**
Junior editor: **Margarita Krutikova**
Advertising manager: **Natalia Kolykhalova**
Responsible for pre-printing work: **Daria Vorobyeva**

Printed in Buki Vedi, LLC

CONTENTS**SCIENCE AND INDUSTRY**

- Ursul A. D., Ursul T. A.** Sustainable development of mining:
from earth to space **18**

GEOLOGY OF MINERALS

- Snachev A. V., Snachev V. I., Rassomakhin M. A.,
Kolomoets A. V.** Carbonaceous shales of the Kamensk
block: geology and ore content (South Urals) **24**

PHYSICS OF ROCKS AND PROCESSES

- Seredin V. V., Khrulev A. S., Rastegaev A. V., Galkin V. I.**
Procedure of stress state assessment in rocks **30**
Biryuchev I. V., Makarov A. B., Usov A. A. Geomechanical
model of underground mine. Part II. Application **35**

DESIGNING AND MINING-CONSTRUCTIONS WORK

- Shornikov I. I.** Estimation of jacking forces on casings in
microtunneling. **45**

ECONOMY, ORGANIZATION AND MANAGEMENT

- Noskov V. A., Badtiev B. P., Pavlovich A. A.**
Risk management in open pit mining **51**
Shvayba D. N. Conceptual framework of social and
economic security in the mining and chemistry sector
of the Republic of Belarus **56**
Apolo Herrera A. E., Chàvez Ferreyra Y. K., Potravny I. M.
Gold mining impact assessment on the economy and the
environment in Ecuador **62**

DEVELOPMENT OF DEPOSITS

- Bryukhovetskiy O. S., Sekisov A. G., Lavrov A. Yu.,
Rasskazova A. V.** Improvement of development efficiency
in multi-component refractory gold ore fields using in-situ
leaching **66**
Lysenko M. V., Nikolenko O. A., Pozolotin A. S., Aikin A. V.
Deep-buried rock bolt reinforcement for wide-span junctions
in the Aikhal Mine **71**

INDUSTRY SAFETY AND LABOUR PROTECTION

- Efremov E. Yu., Melnik D. E.** Safe earth surface conditions
for dumping in the zone of ground collapse over operating
underground mine **75**
Kormshchikov D. S., Zaitsev A. V., Kiryakov A. S.
Enhancement of energy efficiency in mine ventilation by
introduction of main fan installations in underground mines **80**

ENVIRONMENTAL PROTECTION

- Ozaryan Yu. A., Buhnova M. B., Usikov V. I.** Technique of
remote monitoring of natural-technical systems (in terms
of the mining areas of in south of Russia's Far East) **84**

ABROAD

- Sokolov A. D., Takayshvili L. N., Batkhuyag S., Ochirbat P.**
Coal industry of Mongolia : resources for advancement **90**

MINING HISTORY. CULTURE

- Misnikov O. S., Kopenkina L. V.** Peat mining uprising
in Russia **95**

УДК 622.831:004.925.83

ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РУДНИКА. ЧАСТЬ 2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

И. В. БИРЮЧЕВ¹, старший консультант по геомеханике, ibiryuchiov@srk.ru
А. Б. МАКАРОВ¹, главный консультант по геомеханике, проф., д-р техн. наук
А. А. УСОВ², ведущий горный инженер

¹SRK Consulting, Москва, Россия

²ООО «Руссдрагмет», Москва, Россия

(Окончание. Начало см. «Горный журнал». 2020. № 1. С. 42–48)

Введение

В первой части данной статьи [1] были описаны шаги по созданию каркасной геолого-структурной оболочки блочной геомеханической модели рудника. Показаны инструменты и технологии сбора и обработки необходимых исходных данных о структуре массива. С помощью созданной модели выполнено районирование шахтного поля Ново-Широкинского рудника (НШР), входящего в состав Highland Gold Mining Ltd., по категориям устойчивости на основе индекса качества массивов по Н. Бартону. Далее, в данной второй части статьи, показаны шаги, которые необходимо было сделать для наполнения геомеханической модели рудника механическими свойствами трещиноватых массивов. Они необходимы для районирования рудника по удароопасности, определения критерия устойчивости очистных камер и их допустимых параметров, численного моделирования геомеханических процессов с целью обоснования целесообразной технологии добычи руды.

Определение свойств пород

Механические свойства пород Ново-Широкинского месторождения изучали в лаборатории СПбГУ на образцах керна геомеханических скважин диаметром HQ . Все образцы представлены андезитом с различной степенью гидротермально-метасоматических изменений. Перед анализом результатов выполнена отбраковка недостоверных (непредставительных) данных по критерию Смирнова – Граббса [2, 3].

Прочность при одноосном сжатии (UCS). Определение прочности UCS (153 испытания) проводили в двух состояниях породы: воздушно-сухом и водонасыщенном. Так как все образцы привязаны к глубине, на которой они отобраны, первоначально изучено изменение прочности пород с глубиной. Оказалось, что коэффициент корреляции данной связи статистически ничтожен. Следовательно, с глубиной прочность андезитов не изменяется. Разброс в расположении геомеханических скважин по простиранию рудной зоны составляет около 1,5 км. Поэтому на втором этапе сопоставлены свойства пород на разных флангах месторождения. Было выявлено, что изменение прочности пород по простиранию рудной зоны не просматривается. Различия UCS на разных флангах по критерию Стьюдента находятся в пределах

С использованием геомеханической модели выполнено районирование шахтного поля Ново-Широкинского рудника, входящего в состав Highland Gold Mining Ltd., по склонности к горным ударам. Анализом натурных данных установлен критерий устойчивости, с помощью которого определены допустимые размеры очистных камер. Показана целесообразность отказа от системы разработки подэтажными штреками и перехода на отработку системой подэтажного обрушения.

Ключевые слова: Ново-Широкинский рудник, геомеханическая модель, склонность к горным ударам, районирование, очистные камеры, устойчивость, геомеханические процессы, моделирование, обрушение, разубоживание, системы разработки.

DOI: 10.17580/gzh.2020.02.04

статистической изменчивости. Два данных факта позволили объединить результаты испытаний всех свойств пород в одну генеральную совокупность, т. е. свойства андезитов являются однородными и по глубине, и по простиранию рудной зоны.

Анализ освобожденных от недостоверных данных статистик UCS показал, что прочность андезитов распределена по нормальному закону. Полученные результаты сведены в **таблицу**. Повышенные значения коэффициента вариации UCS (41–46 %) характеризуют высокую изменчивость прочности андезитов из-за различной степени гидротермальных изменений.

Сравнение результатов в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии по критерию Стьюдента показало, что с вероятностью 95 % прочность «сухих» и «мокрых» андезитов различается статистически значимо из-за роста порового давления воды при сжатии «мокрых» образцов [4, 5]. Это означает, что в зонах обводненных разломов прочность пород будет снижена почти на 30 %. Следовательно, в геомеханическую модель

Прочность андезитов НШР при одноосном сжатии UCS

Показатель	Прочность		Средняя (лабор.)	Полевая оценка
	«сухая»	«мокрая»		
Число испытаний n	76	73	149	510
Среднее значение прочности UCS, МПа	123	88	106	112
Стандартное отклонение UCS, МПа	52	38	49	46
Коэффициент вариации, %	4	43	46	41
Ширина доверительного интервала UCS, МПа	12	9	8	4
Верхняя граница доверительного интервала UCS, МПа	135	97	114	116
Нижняя граница доверительного интервала UCS, МПа	111	79	98	108

месторождения целесообразно ввести структурные элементы – зоны обводненных разломов с пониженной прочностью.

Прочность пород в условиях естественной влажности в массиве можно оценить как среднюю между «сухой» и «мокрой». Это позволило сопоставить результаты лабораторных испытаний UCS с данными полевой оценки прочности пород в условиях естественной влажности электронным молотком Шмидта RockSchmidt типа L. Полевые тесты и обработку их результатов проводили по методике ISRM [6]. Она предусматривает отбраковку 50 % наименьших значений отскока и определение прочности по 50 % наибольших значений. Расчет прочности пород на одноосное сжатие UCS по показателю упругого отскока R_L выполнен по формуле [7–9]

$$UCS = 1,45 \exp(0,07 R_L). \quad (1)$$

Полевые тесты проведены в массивах рудной зоны (160 тестов), лежачего (146 тестов) и висячего (175 тестов) боков. Статистическая обработка результатов полевых испытаний показала, что различия полевой оценки прочности пород статистически незначимы, так как они находятся в пределах природной изменчивости с коэффициентами вариации 9–11 %. На этом основании массивы рудной зоны, висячего и лежачего боков объединены в один литологический домен, а все полевые данные о прочности руды и вмещающих пород сведены в одну генеральную совокупность. Распределение прочности UCS по данным полевых тестов подчиняется логнормальному закону со средним значением $UCS = 112$ МПа (см. таблицу). Данный результат в условиях естественной влажности руды/пород в массиве хорошо согласуется со средним значением лабораторной прочности «сухих» и «мокрых» пород $UCS = 106$ МПа. Это говорит о возможности достаточно достоверной оценки прочности пород по данным шахтных тестов с помощью молотка Шмидта и формулы (1).

Прочность при трехосном сжатии (ТХТ). При трехосном сжатии образцов определяют разрушающее вертикальное давление σ_1 при боковом обжатии давлением σ_3 . По результатам испытаний ТХТ определяют параметры m_i , s , которые входят в критерий прочности Хука – Брауна [10], а также сцепление и угол внутреннего трения критерия прочности Кулона – Мора [11]. Оба критерия определяют предельные значения максимальных главных напряжений σ_1 при заданном боковом давлении σ_3 (т. е. прочность пород в объемном напряженном состоянии). Параметр m_i является аналогом угла внутреннего трения φ в критерии Кулона – Мора, т. е. данный параметр характеризует прирост прочности породы σ_1 при увеличении бокового давления σ_3 . Параметр s аналогичен сцеплению C пород в критерии Кулона – Мора.

Результаты трехосного сжатия ТХТ андезитов НШР (70 испытаний) в виде кругов Мора показаны на **рис. 1**. В процессе их обработки в программе RocData получено значение параметра $m_i = 8,45$. Справочное значение m_i для андезитов, которое предоставляет компания Rocscience в программах RocLab, RocData, $m_i = 25 \pm 5$. Достаточно сильное несовпадение реальных (полученных в лаборатории для андезитов НШР) и справочных данных по параметру m_i говорит о том, что проведение трехосных испытаний прочности пород является необходимым условием для корректного использования в расчетах критерия прочности

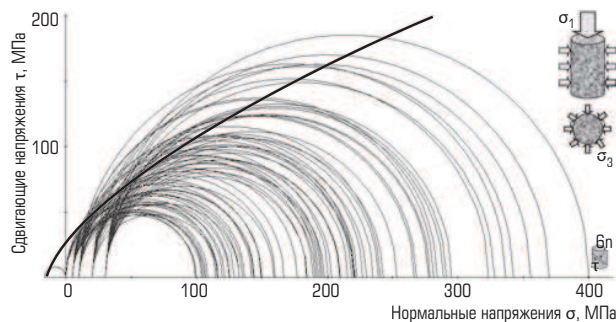


Рис. 1. Результаты испытаний андезитов НШР на трехосное сжатие и критерий разрушения Хука – Брауна

σ_1 – разрушающее вертикальное давление, σ_3 – боковое давление

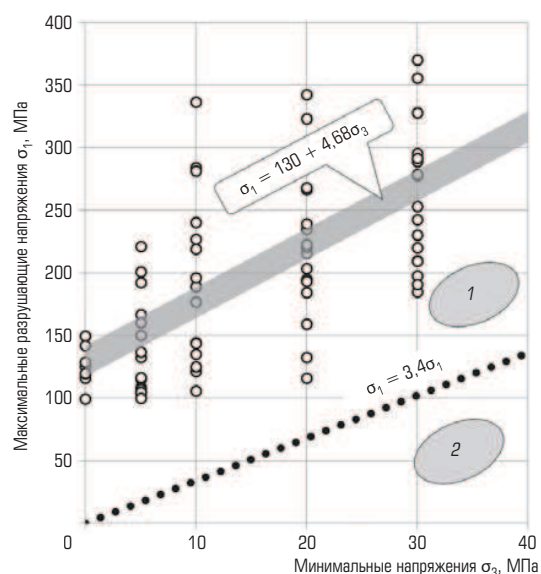


Рис. 2. Критерий прочности Кулона – Мора андезитов НШР в главных напряжениях σ_1 (максимальные разрушающие напряжения по оси образца) и σ_3 (минимальные боковые напряжения, обжимающие образец по горизонтали):

1, 2 – области хрупкого и пластичного разрушения пород

Хука – Брауна. По кругам Мора с помощью программы RocData построена предельная огибающая по критерию Хука – Брауна (см. рис. 1).

В главных напряжениях критерий прочности Кулона – Мора по результатам ТХТ определен в виде регрессии: $\sigma_1 = 130 + 4,68 \sigma_3$ МПа (**рис. 2**). Коэффициентами данной регрессии являются [8]: прочность при одноосном сжатии $UCS = 130$ МПа и параметр $\tan^2(45^\circ + \varphi/2) = 4,68$. Отсюда найден угол внутреннего трения андезитов НШР $\varphi = 40,4^\circ$. Прочность андезитов, полученная в ходе ТХТ-испытаний, находится в пределах 95 % доверительного интервала $UCS = 111 \div 135$ МПа, полученного в процессе испытаний на одноосное сжатие «сухих» пород (см. таблицу).

В координатах главных напряжений на рис. 2 построена линия К. Мори [12]: $\sigma_1 = 3,4\sigma_3$, которая разделяет области хрупкого

и пластичного разрушения пород в условиях объемного напряженного состояния. В области выше линии К. Моги разрушение пород происходит хрупко, т. е. они являются склонными к горным ударам. В области ниже линии К. Моги разрушение пород происходит пластически. Такие породы не склонны к горным ударам. Андезиты НШР по критерию К. Моги сохраняют хрупкий характер разрушения в объемном напряженном состоянии, т. е. являются склонными к горным ударам, поскольку лежат выше критической линии.

Испытания на косой срез (CCS). По результатам испытаний на косой срез определяют сцепление C и угол внутреннего трения пород φ . Результаты косого среза 87 образцов андезитов НШР приведены на **рис. 3**.

В процессе обработки данных получен критерий прочности Кулона – Мора в виде линейной регрессии с достаточно высоким коэффициентом корреляции 0,93: $\tau = 31,3 + 0,83\sigma$, где τ – предельные касательные (сдвигающие) напряжения, σ – действующие нормальные (прижимающие) напряжения. Коэффициенты данной регрессии представляют собой сцепление $C = 31$ МПа и коэффициент трения $\operatorname{tg}\varphi = 0,83$. Отсюда получен угол внутреннего трения в андезитах $\varphi = 39,8^\circ$. Его значения при трехосном сжатии ($40,4^\circ$) и при косом срезе ($39,8^\circ$) различаются между собой всего на $0,6^\circ$. В дальнейших расчетах следует использовать угол внутреннего трения $\varphi = 40^\circ$.

Сопротивление сдвигу по трещинам. Показатели сопротивления сдвигу по трещинам (сцепление C' и угол трения φ') необходимы для кинематического анализа вывалов горной массы в подготовительных выработках и очистных камерах по трещинам под действием собственного веса. По результатам 50 испытаний на прямой сдвиг по трещинам в андезитах НШР (**рис. 4**) получены сцепление по трещинам $C' = 0,18$ МПа, угол трения $\varphi' = 32^\circ$.

Сцепление по трещинам в 170 раз, а коэффициент трения на 25 % меньше, чем в ненарушенной породе. Низкое сопротивление сдвигу по трещинам – это физическая основа кинематической формы неустойчивости пород, для которой достаточно собственного веса пород для вывалов, отслоений, обрушений по имеющимся в массиве трещинам.

Прочность при растяжении (UTS). Испытания пород на разрыв бразильским методом проводили в воздушно-сухом (79 тестов) и водонасыщенном (73 теста) состоянии. Отбракованных результатов не оказалось. Сопоставление прочности андезитов UTS в разных состояниях по критерию Стьюдента показало, что с вероятностью 95 % прочность на разрыв «сухих» и «мокрых» пород различается статистически незначимо, т. е. при водонасыщении прочность андезитов НШР на разрыв не уменьшается. Поэтому их свели в одну выборку с нормальным законом распределения, средним значением $UTS = 16$ МПа и среднеквадратичным отклонением 5 МПа (коэффициент вариации 31 %).

Деформационные свойства пород. В лаборатории СПбГУ определяли модуль упругости E в «сухом» и «мокроем» состояниях. Их сопоставление по критерию Стьюдента показало, что с вероятностью 95 % упругость различается статистически незначимо, т. е. при обводнении жесткость андезитов, в отличие от прочности, не снижается. Поэтому все результаты (153 теста) сведены в одну выборку с нормальным законом распределения со средним

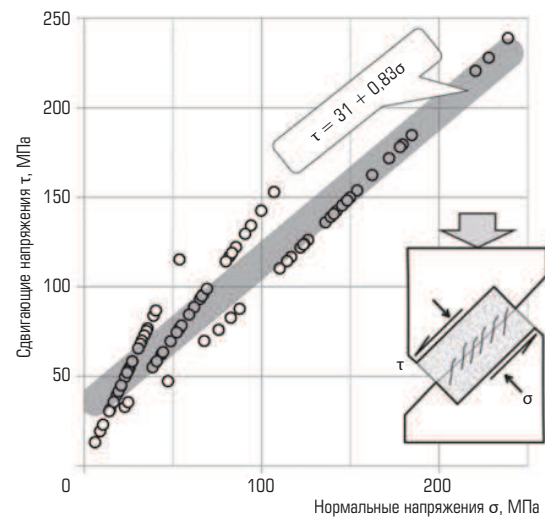


Рис. 3. Критерий прочности Кулона – Мора по результатам испытаний андезитов НШР на косой срез

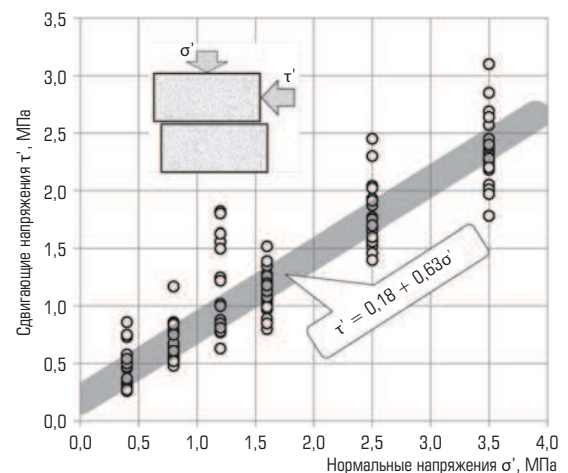


Рис. 4. Сопротивление сдвигу по трещинам в андезитах НШР

значением $E = 44,5$ ГПа, стандартным отклонением 12,7 ГПа и коэффициентом вариации 29 %.

Связь модуля упругости E с прочностью андезитов UCS по результатам испытаний достаточно слабая (коэффициент корреляции около 0,3). Тем не менее соотношение $E/UCS = 350$ хорошо совпадает со справочными данными для андезитов, которые предоставляет компания Rocscience в программах RocLab, RocData $E/UCS = 400 \pm 100$. Коэффициент Пуассона андезитов изменяется с коэффициентом вариации 27 % и составляет в среднем 0,2.

Отметим любопытный факт, относящийся к свойствам «сухих» и «мокрых пород»: прочность при сжатии водонасыщенных пород по сравнению с «сухими» снижается, а прочность при растяжении и модуль упругости породами не изменяются. Кажущееся противоречие можно объяснить поровым давлением воды. В воздушно-сухом состоянии пород вода в порах отсутствует. Поэтому при сжатии «сухих» образцов поровое давление воды

в процессе разрушения не участвует. При сжатии водонасыщенных пород поровое давление воды возрастает за счет сжатия пор, что по принципу К. Терцаги [4] снижает прочность. При растяжении образцов объем пор возрастает, и рост порового давления не происходит. Модуль упругости пород определяется плотностью и жесткостью минерального скелета. Поэтому наличие или отсутствие давления воды в порах образца не изменяет его деформационных свойств.

Запредельные свойства пород характеризуют процесс их разрушения и оцениваются модулем спада M (аналог модуля упругости в стадии разрушения) и остаточной прочностью [13]. В лаборатории СПбГУ запредельные свойства андезитов определяли только при одноосном сжатии «сухих» образцов. Они характеризуются очень широкой изменчивостью, во много раз превышающей изменчивость прочности. Это связано с тем, что процесс разрушения может развиваться по самым разнообразным траекториям: по одной трещине, нескольким трещинам, в пределах множества трещин самых разных направлений. Поэтому из 51 испытания пришлось отбраковать 11 результатов с аномально низкими и высокими значениями модуля спада. Среднее значение модуля спада $M = 1120$ ГПа со среднеквадратичным отклонением 890 ГПа (коэффициент вариации 74 %). Это в 12 раз (на порядок) больше, чем модуль упругости. Соотношение модулей спада и упругости $M/E > 1$ является одним из критериев для определения склонности пород к горным ударам [14]. По данному критерию андезиты НШР являются склонными к горным ударам. Остаточная прочность андезитов в стадии руинного разрушения в среднем составляет 14 МПа со стандартным отклонением 11 МПа (коэффициент вариации 78 %), что равняется всего 14 % прочности при одноосном сжатии.

Высокие значения модуля спада и низкие остаточной прочности говорят об упругом деформировании пород и хрупком характере разрушения с резкой потерей прочности. Такие типы разрушения образцов, как правило, происходят в динамической форме и ассоциируются с удароопасностью пород. Плотность распределения модуля спада и остаточной прочности близка к обратному экспоненциальному закону с большим числом низких значений и малым числом больших значений. Поэтому склонностью к горным ударам будет обладать не весь массив андезитов, а только отдельные участки, охарактеризованные высокой степенью хрупкости.

Районирование месторождения по склонности к горным ударам

Специалистами Уральского филиала ВНИМИ по результатам испытания образцов пород месторождение отнесено к склонным по горным ударам с глубины 280 м (ниже гор. 650 м). Однако по результатам визуального обследования выработок в процессе их геомеханического картирования не было обнаружено признаков раздавливания руд/пород высокими напряжениями, действующими на контуре выработок и в междуканальных целиках даже на гор. 635 м. Также не обнаружено характерных признаков подготовки горных ударов: шелушения, интенсивного заколообразования. Самым надежным (базовым) индикатором подготовки горных ударов является дискование керна [15]. Данный эффект

появляется в рудах/породах, способных накапливать потенциальную энергию упругих деформаций и хрупко разрушаться, когда действующие напряжения в массиве достигают уровня прочности пород. При геомеханическом описании геологоразведочных и геотехнических скважин дискование керна — основного индикатора удароопасности — также не обнаружено. Отмеченные в ходе визуальных обследований разрушения междуканальных и междуканальных целиков, обрушения пород всякого бока в очистных камерах, обрушения породных междупластий при отработке сближенных рудных тел не носят динамического характера. Они являются статическими проявлениями горного давления по тектоническим разломам, природным трещинам, а также в результате сильного повреждения массива взрывными работами.

Отсутствие признаков удароопасности позволило сделать корректировку прогноза удароопасности. Советские (российские) традиции прогноза горных ударов [14–17] заключаются в последовательном ответе на два вопроса: является ли руда/порода склонной к горным ударам? Если да, то является ли руда/порода, склонная к горным ударам, настолько напряженной, чтобы стать удароопасной?

Руды/породы признаются склонными к горным ударам, если они упруго деформируются (т. е. накапливают потенциальную энергию упругих деформаций), вплоть до разрушения, и обладают хрупким характером разрушения (т. е. в процессе разрушения выделяют накопленную упругую энергию быстро при небольших деформациях). Все скальные породы являются упругими. Хрупкими из них являются те, у которых модуль спада M больше модуля упругости E . На рис. 5 показаны диаграммы упругого деформирования и разрушения двух образцов андезитов НШР при одноосном сжатии. Оба образца деформируются упруго, вплоть до разрушения. Но первый из них с прочностью $UCS = 48$ МПа разрушался медленно с модулем спада M , меньшим, чем модуль упругости E . Данный тест не показал склонности породы к горным ударам. Зато второй образец с прочностью $UCS = 154$ МПа разрушился быстро, бурно, как при горных ударах. Это означает, что склонным к горным ударам является не весь массив андезитов, а только его наиболее прочная часть, которая накапливает до разрушения большое количество потенциальной энергии упругих деформаций, достаточное для разрушения в динамической форме, т. е. с переходом потенциальной энергии упругих деформаций в кинетическую энергию выброса и разлета раздавленной горной массы.

Лабораторные испытания свойств андезитов НШР в СПбГУ показали: по соотношению модулей упругости и спада руды/породы НШР при одноосном нагружении являются хрупкими, т. е. склонны к горным ударам. По критерию К. Моги руды/породы НШР сохраняют хрупкий характер разрушения в объемном напряженном состоянии, т. е. продолжают оставаться склонными к горным ударам.

Модуль упругости определяют до разрушения пород на обычных «мягких» прессах во всех обычных лабораториях. Чтобы определить модуль спада, необходимо регистрировать деформации в запредельном состоянии в процессе разрушения образца. Это возможно только на «жестких» прессах, которые гораздо сложнее, массивнее и дороже «мягких» прессов. В России их всего

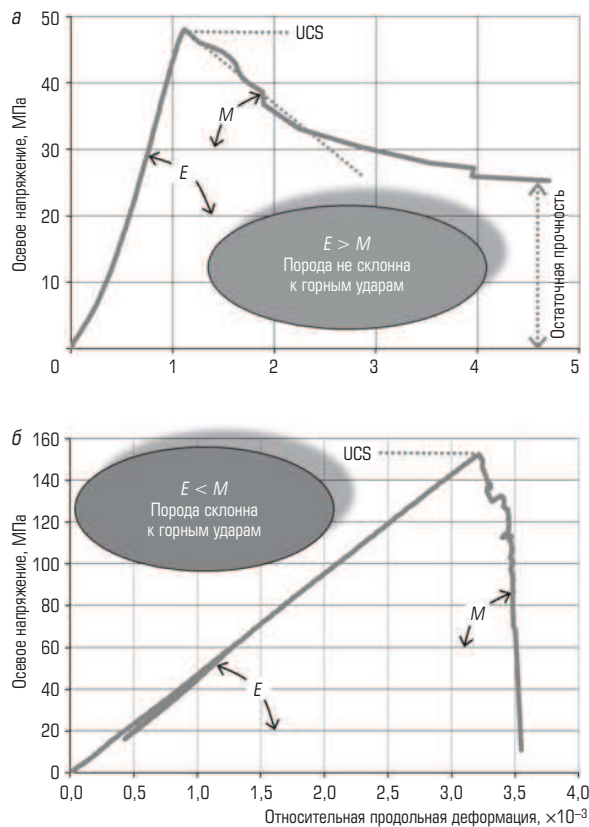


Рис. 5. Деформирование и разрушение образцов андезита из геомеханической скважины SRK-002 при одноосном сжатии:
 а – образец № 2-022 с глубины 156 м; б – образец № 2-035 с глубины 211 м; E – модуль упругости; M – модуль спада; UCS – прочность при одноосном сжатии

несколько единиц. Получение данных о модуле спада пород для большинства месторождений оказалось весьма проблематичным из-за ограниченной доступности «жестких» испытаний. Поэтому для косвенной оценки склонности пород к горным ударам без определения модуля спада используют коэффициент хрупкости UCS/UTS . Критерием склонности пород к горным ударам является $UCS/UTS > 10$. Данный критерий – следствие критерия хрупкого разрушения Гриффитса [18]. В соответствии с ним, в условиях действия растягивающих напряжений соотношение прочностей при сжатии и разрыве $UCS/UTS = 8$; в условиях объемного сжатия $UCS/UTS = 12$. Среднее значение формулирует условие хрупкого разрушения пород при коэффициенте хрупкости $UCS/UTS > 10$.

Результаты многолетних обширных исследований в Канаде по программе горных ударов (Canadian Rockburst Program) показали [19], что опасность горных ударов (Rockburst Severity) целесообразно оценивать потенциалом удароопасности (Rockburst Potential), который одновременно учитывает и прочность пород при одноосном сжатии UCS, и коэффициент хрупкости UCS/UTS . Прочность UCS определяет энергию, которая накапливается в породах к моменту их разрушения. Чем выше прочность, тем больше накопленная потенциальная энергия упругих деформаций, тем выше выделение кинетической энергии при разрушении, тем

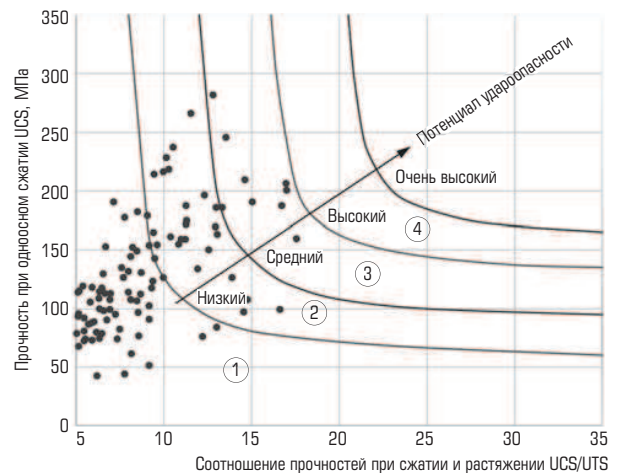


Рис. 6. Диаграмма уровней потенциала удароопасности (низкий, средний, высокий, очень высокий) в зависимости от хрупкости пород UCS/UTS и их прочности при одноосном сжатии UCS [19]

сильнее динамический эффект разрушения в виде выброса, разлета горной массы. Коэффициент хрупкости UCS/UTS характеризует потенциал (склонность) пород к скалыванию их тонких пластин в результате отрыва (spalling potential). Для определения потенциала удароопасности пород в работе [19] предложена диаграмма, показанная на рис. 6. На нее вынесены результаты испытаний андезитов НШР в лаборатории СПбГУ.

Большая часть результатов тестов (81 %) на диаграмме попадает в область 1, в которой отсутствует потенциал удароопасности. В этой области или прочность пород недостаточно высока, чтобы к моменту разрушения накопить большую потенциальную энергию упругих деформаций, или коэффициент хрупкости недостаточно велик, чтобы разрушаться динамически. В области 2 с уровнем потенциала от низкого до среднего находятся 17 % всех результатов. И только 2 % тестов показали средний потенциал удароопасности (область 3). Образцов с высоким потенциалом удароопасности (область 4) не оказалось вовсе.

Результаты оценки потенциала удароопасности пород по совокупности двух параметров существенно меняют оценку их склонности к горным ударам. По результатам лабораторных испытаний сделаны следующие выводы:

- 80 % андезитов невысокой крепости и хрупкости не обладают энергетическим потенциалом удароопасности;
- только 20 % андезитов с большой прочностью и хрупкостью имеют потенциал удароопасности, причем в 17 % случаев – это низкий потенциал, при котором динамические явления могут быть только низкоэнергетического уровня (шелушение и интенсивное заколообразование как предвестники удароопасности, стрельания);
- при районировании шахтного поля НШР по склонности к горным ударам необходимо выделить 20 % массивов, обладающих наибольшей жесткостью, прочностью и хрупкостью. Это необходимо для концентрации сил и средств с целью прогноза и предотвращения горных ударов на наиболее опасных участках. Сделать

это необходимо с учетом трещиноватости массива, поскольку она существенно влияет на жесткость, прочность и хрупкость пород.

В зарубежной практике характер запредельного деформирования разрушающихся трещиноватых массивов, а следовательно, и их склонность к горным ударам связывают не с хрупкостью пород в образцах, а с качеством трещиноватых породных массивов [20, 21]. Различают три основных типа их разрушений (рис. 7):

- хрупкое разрушение весьма устойчивых и устойчивых массивов слаботрещинчатых крепких пород, которое сопровождается резкой потерей несущей способности (от предельной до остаточной в стадии руинного разрушения); такой характер разрушения, как правило, происходит в динамической форме со скоростью, близкой к скорости распространения упругих волн (скорость развития трещин отрыва составляет 38 % скорости поперечных волн [18]) и ассоциируется с удароопасностью пород;
- разрушение массивов средней крепости и устойчивости с постепенной потерей прочности (разупрочнением) пород, вплоть до остаточной прочности, на достаточно высоком уровне; данный характер разрушения скальных трещиноватых массивов встречается на практике наиболее часто;
- пластическое течение весьма неустойчивых и неустойчивых массивов слабых пород без потери несущей способности в запредельном состоянии, характерное для солей, плотных глин и т. п.; пластическое деформирование таких массивов сопровождается весьма интенсивной акустической эмиссией (шумом), но без динамических проявлений горного давления; на угольных шахтах и калийных рудниках при низкой прочности и хрупкости угля и солей динамические проявления горного давления во многом связаны с высоким давлением метана, инкапсулированного (растворенного) в угле и солях и происходят не в виде горных ударов в чистом виде, а посредством внезапных выбросов горной массы и газа, высвобождающегося при их разрушении.

На основании анализа вновь полученных лабораторных данных о свойствах пород НШР, современных критериев оценки потенциала удароопасности пород, прогноза характера разрушения массивов по оценке их геомеханического качества выполнено районирование шахтного поля НШР по склонности к горным ударам по индексу качества массивов Q . Для этого из блочной геомеханической модели месторождения по индексу качества Q выделено 20 % наиболее жестких, крепких, устойчивых (с высоким качеством) массивов пород, в которых имеется потенциал удароопасности, пусть даже и невысокий. Чтобы найти эти 20 % наиболее качественных массивов по базе данных геомеханической модели, использована гистограмма накопленной частоты распределения Q [1]. На ней видно, что 20 % наиболее крепких массивов – это массивы с индексом качества $Q > 10$ (категория устойчивости 1 – устойчивые). Таким образом, для районирования шахтного поля НШР по склонности к горным ударам в блочной геомеханической модели выделены участки массивов с индексом качества $Q > 10$, на которых имеется потенциал удароопасности. Они вынесены на планы рабочих горизонтов.

Чтобы массивы руд/пород, имеющие потенциал удароопасности, стали удароопасными, необходим высокий уровень действующих напряжений, который может возникнуть в междуканальных,

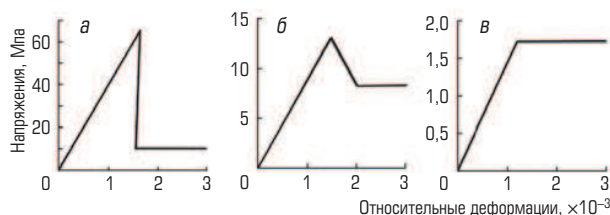


Рис. 7. Характер запредельного деформирования породных массивов по Хуку [20]:

а – хрупкое разрушение весьма устойчивых массивов крепких пород; *б* – деформирование с постепенным разупрочнением массивов средней крепости и устойчивости; *в* – пластическое течение весьма неустойчивых массивов слабых пород

междуканальных целиках по мере углубления горных работ. Прогноз удароопасности целиков на стадии проектирования осуществляется численным моделированием их напряженного состояния [22], а при добыче руды – инструментальными методами оценки уровня действующих напряжений: бурением контрольных скважин на дискование керна, контролем сейсмоакустической активности массива [23].

Оценка устойчивости очистных камер

Для оценки устойчивости камер по методике Мэтьюза – Потвина [24–26] собрана информация о фактических параметрах и состоянии выемочных единиц НШР. Для расчета эквивалентных полупролетов (HR = площадь/периметр) кровли и висячего бока отработанных камер использованы их реальные размеры. Показатели устойчивости N рассчитаны по данным геомеханической модели месторождения. В созданную базу практических данных вошли 92 отработанные камеры, в которых кровля устойчива в 43 камерах, в 50 камерах – неустойчива; висячий бок устойчив в 17 камерах, в 75 – неустойчив.

Устойчивыми являются только 43 % пород кровли и 18 % висячего бока. Неустойчивость кровли камер выражается в обрушениях руды из междуканальных целиков, вплоть до их полного провала в выработанное пространство нижележащей камеры. Неустойчивость висячего бока камер приводит к повышенному разубоживанию руды породой. Для определения условий их обрушения по результатам расчетов построена диаграмма устойчивости кровли и висячего бока очистных камер НШР, основанная на реальной информации о фактическом состоянии выработанных пространств (рис. 8). Критерий устойчивости обнажений в очистных камерах НШР (линия, разделяющая параметры устойчивых и неустойчивых обнажений) на основе натурных данных в интервале $N = 0,1 \div 4,5$ определен в виде

$$HR \leq 3 + 1,07N. \quad (2)$$

Чтобы им пользоваться при проектировании, необходимо по формуле (2) рассчитать допустимый эквивалентный полупролет проектируемой камеры HR . Исходные данные для расчета показателя устойчивости N извлекают из блочной геомеханической модели месторождения.

Полученный критерий устойчивости очистных камер (2) на НШР позволяет рассчитать допустимые размеры очистных

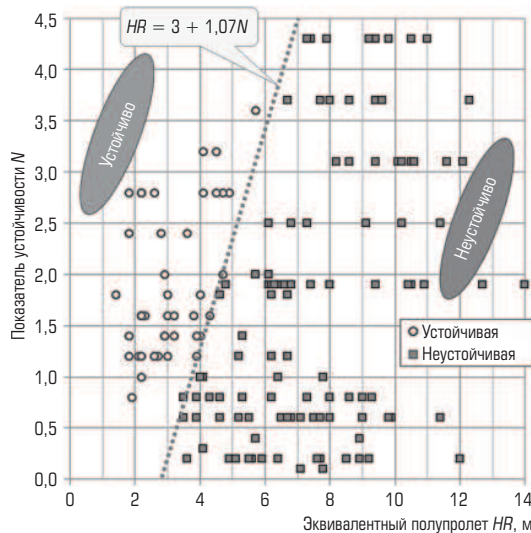


Рис. 8. Диаграмма устойчивости обнажений в очистных камерах НШР

камер, если задать ожидаемый показатель устойчивости N . Его среднее значение в типовых условиях НШР $N = 3,5$. Показатель необходимо уточнять на заданном конкретном участке шахтного поля, используя базу данных блочной геомеханической модели месторождения.

Допустимые размеры очистных камер определяют по условию сохранения устойчивости висячего бока, чтобы не было вторичного разубоживания руды обрушенной породой. Если в критерий устойчивости (2) подставить среднее значение показателя устойчивости $N = 3,5$, то в типовых условиях НШР допустимый эквивалентный полупролет обнажений $HR_{\text{доп}} = 6,7$ м.

Основные размеры камер — это длина по простиранию рудного тела w и высота по падению h . Один из размеров очистной камеры необходимо задать в качестве проектного. Как правило, это высота камер h , которая определяется схемой вскрытия месторождения и высотой подэтажей для скважинной отбойки руды. Тогда допустимую длину камер по простиранию $w_{\text{доп}}$ рассчитывают по формуле [27, 28]

$$w_{\text{доп}} \leq 2hNR_{\text{доп}}/(h - 2NR_{\text{доп}}). \quad (3)$$

Для определения допустимых размеров очистных камер в типовых условиях НШР по формуле (3) построен график (рис. 9).

На основании анализа натурных данных об устойчивости очистных камер и проведенных расчетов сделаны следующие выводы:

- проектные размеры очистных камер на НШР длиной 40 м и высотой 45 м далеки от оптимальных, чтобы обеспечить проектный уровень разубоживания руды; поэтому добычу руды камерами ведут со вторичным разубоживанием из-за обрушений висячего бока; при этом теряется суть применения системы подэтажных штреков: ограничивать выработанное пространство целиками, чтобы извлекать камерные запасы руды чисто, без разубоживания; если камеры обрушаются, и из них мы получаем разубоженную руду, тогда теряется смысл оставления рудных целиков;

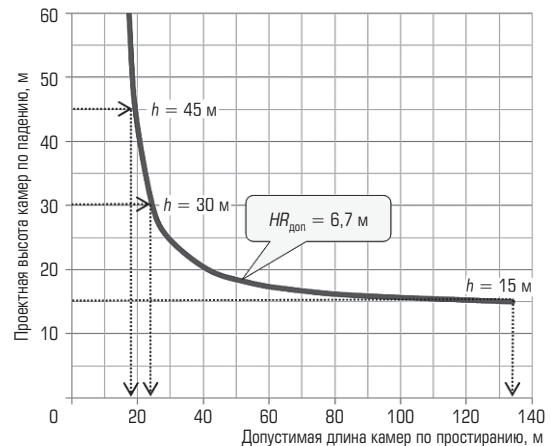


Рис. 9. Допустимые размеры очистных камер в типовых условиях НШР при среднем показателе устойчивости $N = 3,5$

- при достаточной крепости пород и относительно невысокой трещиноватости массива малая устойчивость висячего бока камер обусловлена неблагоприятными направлениями падения систем трещин в выработанное пространство камер под углами, превышающими углы трения по трещинам 32° ; по ним происходят отслоения и сползание блоков пород в отработанные камеры [1].

- при высоте камеры 45 м (три подэтажа по 15 м) допустимый пролет камер по простиранию составляет всего 19 м; при большей длине камеры ее висячий бок теряет устойчивость и обрушается, приводя к разубоживанию руды;

- небольшие допустимые размеры очистных камер делают сомнительной целесообразность применения на НШР камерной выемки руды системой подэтажных штреков; сама природа подсказывает, что в данных геомеханических условиях необходимо переходить на систему разработки с подэтажным обрушением.

Данные выводы подтверждены результатами численного моделирования.

Численное моделирование геомеханических процессов

Для численного моделирования в качестве основы использованы блочная геомеханическая модель массива [1] и упрощенные каркасы выемочных единиц. Природное напряженное состояние массива НШР задано по результатам натурных измерений ИрГТУ [29, 30] методом щелевой разгрузки на глубине $H = 220$ м (гор. 750 м): вертикальные напряжения являются максимальными по величине и близки к давлению налегающей толщи пород $\sigma_1 = \gamma H$, где γ — плотность пород. Горизонтальные напряжения в крест простирания рудной зоны являются промежуточными по величине $\sigma_2 = 0,8\gamma H$. Горизонтальные напряжения по простиранию рудной зоны минимальны по величине $\sigma_3 = 0,7\gamma H$. Результаты исследований ИрГТУ подтверждаются геологическим строением месторождения, приуроченного к сбросо-сдвигу. Данный тип тектонических нарушений может формироваться только в условиях, когда вертикальные напряжения превышают горизонтальные [5].

Моделирование напряженно-деформированного состояния массива выполнено с помощью программы MIDAS методом

конечных элементов в объемной упругопластичной постановке в следующей последовательности: загрузка топографической поверхности, геомеханической модели массива и его природного напряженного состояния; активация выявленных зон тектонических разломов с обнулением смещений по ним, чтобы анализировать только те смещения, которые происходят при добыче руды; отработка камер; разрушение или отработка междуэтажных и междукамерных целиков.

Прочностные и деформационные свойства трещиноватых массивов, использованные при численном моделировании, определены по обобщенному критерию прочности Хука — Брауна [10] с помощью программы RocData с использованием геологического индекса прочности GSI. Его расчет выполняли по формуле [31]

$$GSI = 52J_r/J_a/(1 + J_r/J_a) + RQD/2, \quad (4)$$

в которой, наряду с показателем интенсивности трещиноватости RQD, используются показатели Н. Бартон [32], учитывающие: J_r — шероховатость трещин, J_a — степень выветрелости и прочность заполнителя трещин.

По результатам расчетов висячем боку отработанных камер и в междуэтажных целиках формируются зоны растягивающих напряжений (рис. 10). В соответствии с принятым критерием, разрушения трещиноватого массива зоны растягивающих напряжений — это зоны разрушения в результате раскрытия природных трещин. По ним происходят вывалы и обрушения пород в выработанное пространство, приводящие к разубоживанию руды. При небольшой глубине разработки зоны неупругих деформаций в междукамерных целиках и потолочине, оставленных у земной поверхности (рис. 11, а), совпадают с зонами растягивающих напряжений. Провал потолочины и фактическое состояние целиков (рис. 11, б) полностью подтверждают результаты, полученные численным моделированием. Это означает, что зоны неупругих деформаций в численной модели следует считать зонами разрушения массива.

Соответствие результатов моделирования фактическому состоянию потолочины у земной поверхности, камер и целиков подтверждает достоверность численной модели в части использования геомеханической модели месторождения; природного напряженного состояния массива; прочностных и деформационных свойств трещиноватых массивов, полученных расчетным путем по обобщенному критерию Хука — Брауна с геологическим индексом прочности GSI на базе геомеханического описания качества массивов по результатам изучения трещиноватости массива и лабораторных испытаний свойств пород. Результаты численного моделирования совпадают с эмпирической оценкой устойчивости отработанных камер по методике Мэтьюза — Потвина, основанной на обобщении мирового опыта. Это также подтверждает достоверность численной модели.

На основании результатов численного моделирования сделаны следующие выводы:

- междукамерные целики, ориентированные по падению рудных тел, сохранились в устойчивом состоянии, за исключением зоны выветривания у земной поверхности. Действующие в них максимальные напряжения из-за малой глубины разработки и невысокого исходного горизонтального давления в крест простирания рудной зоны невелики и не создают условий удароопасности;

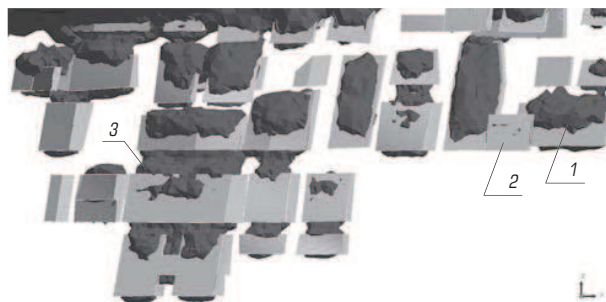


Рис. 10. Зоны растягивающих напряжений (обрушений) в висячем боку (1) отработанных камер (2) и в междуэтажных целиках (3)

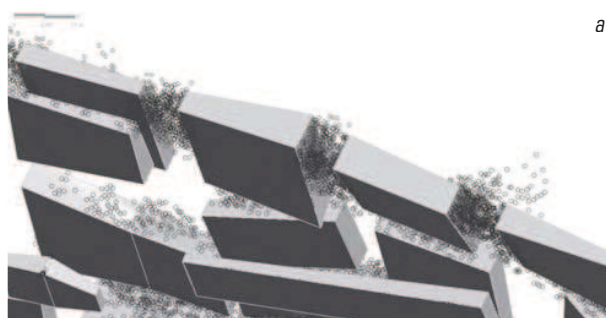


Рис. 11. Зоны неупругих деформаций в потолочине у земной поверхности, в междукамерных и междуэтажных целиках по результатам расчетов (а) и провал потолочины и разрушение верхних частей междукамерных целиков у земной поверхности в зонах неупругих деформаций (б) (фото с лежачего бока рудной зоны, сентябрь 2018 г.)

- большая часть междуэтажных целиков уже не существует; они обрушились в выработанное пространство камер, расположенных ниже.

На следующей стадии смоделировано разрушение междуэтажных целиков. В результате в массиве висячего бока сформировалась зона обрушения горных пород, контур которой показан на рис. 12. Летом 2019 г. произошло обрушение подработанной толщи висячего бока рудной зоны в центральной части шахтного поля. Вид зоны обрушения земной поверхности приведен на рис. 13.

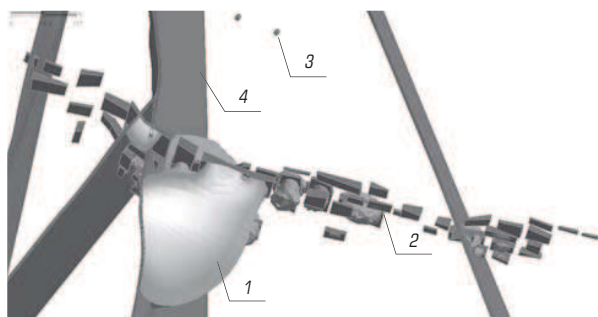


Рис. 12. Расчетная зона обрушения висячем боку рудной зоны в результате разрушения междуэтажных целиков (вид с висячего бока):

1 – висячий блок; 2 – рудная зона; 3 – шахтные столбы; 4 – каркасы тектонических разломов

Чтобы увидеть масштаб развития обрушения, достаточно сравнить данную фотографию с аналогичной 2018 г. (см. рис. 11). Еще один примечательный момент: с СЗ фланга зона обрушения ограничена тектоническим разломом, секущим рудную зону. Это хорошо видно и на расчетной модели обрушения (см. рис. 12), и на земной поверхности (см. рис. 13). Данное совпадение подтверждает адекватность моделей: и геологоструктурной (см. рис. 1 в [1]), и геомеханической (см. рис. 10 в [1]), и расчетной (см. рис. 12), которые с достаточной для практических целей достоверностью характеризуют реальную геомеханическую ситуацию на НШР. Таким образом, численное моделирование, подтвержденное развитием сдвижения горных



Рис. 13. Зона обрушения земной поверхности летом 2019 г. (фото с лежащего бока рудной зоны)

пород на практике, свидетельствует о целесообразности изменения технологии добычи руды на НШР путем перехода от системы подэтажных штреков к системе подэтажного обрушения.

Заключение

По результатам лабораторных испытаний пород и данным геомеханической модели выполнено районирование шахтного поля НШР по склонности к горным ударам. В процессе анализа фактических данных установлен критерий устойчивости, с помощью которого определены допустимые размеры очистных камер. Показана целесообразность отказа от системы разработки подэтажными штреками и перехода к системе подэтажного обрушения. Данный вывод подтвержден результатами численного моделирования, а также процессом развития сдвижения горных пород на практике.

Библиографический список

- Бирючев И. В., Макаров А. Б., Усов А. А. Геомеханическая модель рудника. Часть 1. Создание // Горный журнал. 2020. № 1. С. 42–48. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.08
- Лемешко Б. Ю., Лемешко С. Б., Постовалов С. Н., Чимитова Е. В. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход. Сер.: Монографии НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 888 с.
- Grubbs F. E., Beck G. Extension of Sample Sizes and Percentage Points for Significance Tests of Outlying Observations // Technometrics. 1972. Vol. 14. No. 4. P. 847–854.
- Terzaghi K. Theoretical soil mechanics. – New York: John Wiley and Sons, 1943. – 509 p.
- Ребецкий Ю. Л., Сим Л. А., Маринин А. В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. – М.: ГЕОС, 2017. – 233 с.
- Aydin A. ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2009. Vol. 46. Iss. 3. P. 627–634.
- Ramli Nazir, Ehsan Momeni, Danial Jahed Armaghani, Mohd For Mohd Amin. Prediction of Unconfined Compressive Strength of Limestone Rock Samples Using L-Type Schmidt Hammer // The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2013. Vol. 18. Bund. I. P. 1767–1775.
- Buyuksagis I. S., Goktan R. M. The effect of Schmidt hammer type on uniaxial compressive strength prediction of rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2007. Vol. 44. Iss. 2. P. 299–307.
- Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: сб. науч. тр. / под ред. А. Н. Шабарова, К. В. Морозова. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского горного ун-та, 2017. – 336 с.
- Hoek E., Brown E. T. The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. Iss. 3. P. 445–463.
- Фисенко Г. Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. – М.: Недра, 1976. – 272 с.
- Kiyoo Mogi. Experimental Rock Mechanics. Geomechanics Research Series 3. – London: Taylor & Francis Group, 2007. – 361 p.
- Баклашов И. В. Деформирование и разрушение породных массивов. – М.: Недра, 1988. – 270 с.
- Петухов И. М., Линьков А. М. Механика горных ударов и выбросов. – М.: Недра, 1983. – 279 с.
- Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам: приказ об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности от 02.12.2013 № 576. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499086982> (дата обращения: 17.12.2019).
- Петухов И. М., Линьков А. М., Сидоров В. С., Фельдман И. А. Теория защитных пластов. – М.: Недра, 1976. – 223 с.
- Петухов И. М., Батугина И. М., Сидоров В. С., Шабаров А. Н., Лодус Е. В. и др. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках. – М.: Изд-во Академии горных наук, 1997. – 377 с.
- Прочность и деформируемость горных пород / под ред. А. Б. Фадеева. – М.: Недра, 1979. – 269 с.
- Cai M., Kaiser P. K. Rockburst Support: Reference Book. – Sudbury: Laurentian University, 2018. Vol. 1. Rockburst Phenomenon and Support Characteristics. – 284 p.
- Hoek E. Practical Rock Engineering. URL: <https://www.rocsience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf> (дата обращения: 26.11.2019).
- Lianyang Zhang. Engineering Properties of Rocks. 2nd ed. – Amsterdam: Elsevier, 2017. – 394 p.

22. Stacey T. R. Rock engineering design – the importance of process, prediction of behaviour, choice of design criteria, review and consideration of risk // *Proceedings of the International Seminar on Design Methods in Underground Mining* – Perth : Australian Centre for Geomechanics, 2015. P. 57–76.
23. Рассказов И. Ю. Исследования удароопасности на подземных рудниках Дальнего Востока и Забайкалья // *Проблемы недропользования*. 2018. № 3. С. 128–139.
24. Potvin Y., Hudyma M., Miller H. D. S. Design guidelines for open stope support // *CIM Bulletin*. 1989. Vol. 82. No. 926. P. 53–62.
25. Stewart S. B. V., Forsyth W. W. The Mathew's method for open stope design // *CIM Bulletin*. 1995. Vol. 88. No. 992. P. 45–53.
26. Trueman R., Mikula P., Mawdesley C., Harries N. Experience in Australia with the application of the Mathews' method for open stope design // *CIM Bulletin*. 2000. Vol. 93. No. 1036. P. 162–167.
27. Макаров А. Б. Обоснование допустимых параметров очистных камер и целиков // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2015. Т. 2. № 2. С. 261–267.

«GORNYI ZHURNAL», 2020, № 2, pp. 35–44
DOI: 10.17580/gzh.2020.02.04

Geomechanical model of underground mine. Part II. Application

Information about authors

I. V. Biryuchev¹, Senior Consultant for Geomechanics, ibiryuchiov@srk.ru.com
A. B. Makarov¹, Chief Consultant for Geomechanics, Professor, Doctor of Engineering Sciences
A. A. Usov², Leading Mining Engineering

¹SRK Consulting, Moscow, Russia
²Russdragmet, Moscow, Russia

Abstract


Earlier on, the authors described the geology and structure framing stages of a block geomechanical model of a mine. The instruments and technologies required for the collection and processing of source data on rock mass structure were presented. The model was applied to zoning of the Novo-Shirokino Mine field with respect to the rock mass stability categories for support design purposes. In order to fill the geomechanical model with the data on the mechanical properties of the jointed rock mass, the full-scale study of the rock properties were accomplished. The studies are required for the mine zoning with respect to rockburst hazard, determination of the stability criterion and allowable parameters of stopes, and for the numerical modeling of geomechanical processes to validate an efficient mining technology. Based on the analysis of the new lab test data on the properties of rocks in NSHM, recent rockburst hazard criteria and rock fracture prediction by the rock mass quality, the rockburst hazard zoning of the NSHM field was performed by the rock mass quality index Q. The factual data analysis produced a stability criterion, and the permissible parameters of stopes were determined thereupon. The expedience of the transition from sublevel stoping to sublevel caving is shown. The conclusion is proved by the numerical modeling outcome and by the data on actual movements in rock mass.

This is the end of the article. The beginning is *Gornyi Zhurnal*, 2020, No. 1, pp. 42–48.

Keywords: Novo-Shirokino Mine, geomechanical model, proneness to rock bursts, zoning, stopes, stability, geomechanical processes, modeling, caving, dilution, mining system.

References

1. Biryuchev I. V., Makarov A. B., Usov A. A. Geomechanical model of underground mine. Part I. Creation. *Gornyi Zhurnal*. 2020. No. 1. pp. 42–48. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.08
2. Lemesko B. Yu., Lemesko S. B., Postovalov S. N., Chimitova E. V. Statistical data analysis, simulation and study of probability regularities. Computer approach. Series: NSTU monographs. Novosibirsk: Izdatelstvo NGTU, 2011. 888 p.
3. Grubbs F. E., Beck G. Extension of Sample Sizes and Percentage Points for Significance Tests of Outlying Observations. *Technometrics*. 1972. Vol. 14. No. 4. pp. 847–854.
4. Terzaghi K. Theoretical soil mechanics. New York: John Wiley and Sons, 1943. 509 p.
5. Rebetskiy Yu. L., Sim L. A., Marinin A. V. From slickensides to tectonic stresses. Methods and algorithms. Moscow: GEOS, 2017. 233 p.
6. Aydin A. ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2009. Vol. 46. Iss. 3. pp. 627–634.
7. Ramli Nazir, Ehsan Momeni, Danial Jahed Armaghani, Mohd For Mohd Amin. Prediction of Unconfined Compressive Strength of Limestone Rock Samples Using L-Type Schmidt Hammer. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2013. Vol. 18. Bund. I. pp. 1767–1775.

28. Макаров А. Б., Рассказов И. Ю., Саксин Б. Г., Ливинский И. С., Потапчук М. И. Геомеханическое обоснование параметров камерной системы разработки при переходе на подземный способ добычи руд // *ФТПРПИ*. 2016. № 3. С. 27–38.
29. Сосновская Е. Л., Авдеев А. Н. Управление геомеханическими процессами на золоторудных жильных месторождениях Восточной Сибири // *Известия вузов. Горный журнал*. 2019. № 5. С. 21–29.
30. Сосновский Л. И. Обоснование методов управления геомеханическими процессами при подземной разработке золоторудных месторождений на основе выявленных закономерностей формирования тектонических структур : автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Иркутск, 2007. – 40 с.
31. Hoek E., Carter T. G., Diederichs M. S. Quantification of the Geological Strength Index Chart // 47th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. – San Francisco, 2013.
32. Barton N., Loset F., Lien R., Lunde J. Application of the Q-system in design decisions // *Subsurface Space: Environmental Protection, Low Cost Storage, Energy Savings : proceedings of the International Symposium*. – New York: Pergamon, 1980. P. 553–561. 
8. Buyuksagis I. S., Goktan R. M. The effect of Schmidt hammer type on uniaxial compressive strength prediction of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2007. Vol. 44. Iss. 2. pp. 299–307.
9. Shabarov A. N., Morozov K. V. (Eds.). *Innovation trends in mine planning and design : collection of scientific papers*. Saint-Petersburg : Izdatelstvo Sankt-Peterburgskogo gornogo universiteta, 2017. 336 p.
10. Hoek E., Brown E. T. The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019. Vol. 11, Iss. 3. pp. 445–463.
11. Fisenko G. L. Limiting states of rocks around underground openings. Moscow : Nedra, 1976. 272 p.
12. Kiyoo Mogi. *Experimental Rock Mechanics*. Geomechanics Research Series 3. London : Taylor & Francis Group, 2007. 361 p.
13. Baklashov I. V. Deformation and Fracture of Rock Masses. Moscow : Nedra, 1988. 270 p.
14. Petukhov I. M., Linkov A. M. Mechanic of rock bumps and discharges. Moscow : Nedra, 1983. 279 p.
15. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/499086982> (accessed: 17.12.2019).
16. Petukhov I. M., Linkov A. M., Sidorov V. S., Feldman I. A. Theory of protection strata. Moscow : Nedra, 1976. 223 p.
17. Petukhov I. M., Batugina I. M., Sidorov V. S., Shabarov A. N., Lodus E. V. et al. Prediction and Prevention of Rock Bumps in Mines. Moscow : Izdatelstvo Akademii Gornykh Nauk, 1997. 377 p.
18. Fadeev A. B. (Ed.). Durability and deformability of rocks. Moscow : Nedra, 1979. 269 p.
19. Cai M., Kaiser P. K. Rockburst Support : Reference Book. Sudbury : Laurentian University, 2018. Vol. 1. Rockburst Phenomenon and Support Characteristics. 284 p.
20. Hoek E. Practical Rock Engineering. Available at: <https://www.rocksience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf> (accessed: 26.11.2019).
21. Lianyang Zhang. Engineering Properties of Rocks. 2nd ed. Amsterdam : Elsevier, 2017. 394 p.
22. Stacey T. R. Rock engineering design – the importance of process, prediction of behaviour, choice of design criteria, review and consideration of risk. *Proceedings of the International Seminar on Design Methods in Underground Mining*. Perth : Australian Centre for Geomechanics, 2015. pp. 57–76.
23. Rasskazov I. Yu. Research of rock bump hazard on underground mines of the Far East and Transbaikalia. *Problemy nedropolzovaniya*. 2018. No. 3. pp. 128–139.
24. Potvin Y., Hudyma M., Miller H. D. S. Design guidelines for open stope support. *CIM Bulletin*. 1989. Vol. 82. No. 926. pp. 53–62.
25. Stewart S. B. V., Forsyth W. W. The Mathew's method for open stope design. *CIM Bulletin*. 1995. Vol. 88. No. 992. pp. 45–53.
26. Trueman R., Mikula P., Mawdesley C., Harries N. Experience in Australia with the application of the Mathews' method for open stope design. *CIM Bulletin*. 2000. Vol. 93, No. 1036. pp. 162–167.
27. Makarov A. B. Validation of permissible parameters for rooms and pillars. *Fundamentalnye i prikladnye voprosy gornykh nauk*. 2015. Vol. 2. No. 2. pp. 261–267.
28. Makarov A. B., Rasskazov I. Yu., Saksin B. G., Livinsky I. S., Potapchuk M. I. Geomechanical evaluation of roof-and-pillar parameters in transition to underground mining. *Journal of Mining Science*. 2016. Vol. 52, Iss. 3. pp. 438–447.
29. Sosnovskaya E. L., Avdееv A. N. Control over the geotechnical processes at the goldfields of Eastern Siberia. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 2019. No. 5. pp. 21–29.
30. Sosnovskiy L. I. Justification of geomechanical behavior control methods in underground gold mining from the determined regular patterns in the formation of tectonic structures : thesis of inauguration of Dissertation ... of Doctor of Engineering Sciences. Irkutsk, 2007. 40 p.
31. Hoek E., Carter T. G., Diederichs M. S. Quantification of the Geological Strength Index Chart. 47th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. San Francisco, 2013.
32. Barton N., Loset F., Lien R., Lunde J. Application of the Q-system in design decisions. *Subsurface Space: Environmental Protection, Low Cost Storage, Energy Savings : proceedings of the International Symposium*. New York : Pergamon, 1980. pp. 553–561.