

www.rudmet.ru

ISSN 0017-2278

ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

195
ЛЕТ

Издается с 1825 года
(№ 2270)

1.2020



**ГОРНАЯ ГЕОМЕХАНИКА –
ФУНДАМЕНТ БЕЗОПАСНОГО И РЕНТАБЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**



Основан в 1825 году
при Горном кадетском корпусе

ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

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: ФГБН ИПКОН 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. Аренс, 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»), В. А. Ерёмченко, Б. Н. Заровняев, В. Н. Захаров, В. П. Zubov,
И. В. Зырянов, П. А. Игнатов, С. А. Ильин, О. И. Казанин, Н. О. Каледина
(руководитель секции «Охрана труда и окружающей среды»), Д. Р. Каглунов
(руководитель секции «Разработка месторождений и горно-строительные работы»),
Е. А. Козловский (руководитель секции «Сырьевая база»), А. В. Корчак,
Г. Л. Краснянский, 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, М. В. Рыльникова, 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. Одеков (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

Ежемесячный научно-технический
и производственный журнал

№ 1 (2270)
ЯНВАРЬ 2020

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
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 23.01.2020

Дата выхода в свет: 29.01.20
Формат 60×90/8. Печ. л. 15,5

Печать офсетная. Бумага мелованная
Тираж 3000 экз. Цена свободная

- За достоверность рекламной информации
ответственность несет рекламодатель
- За достоверность научно-технической информации
ответственность несет автор
- Все материалы, поступающие в редакцию,
строго 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

Лушников В. Н. Горная геомеханика в прошлом, настоящем и будущем 4

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ГЕОМЕХАНИКИ

Воробьев С. А., Воробьев А. А.
К проблеме построения ценностных контуров будущего геомеханики (Взгляд издателей) 7

Тарасов Б. Г. Парадоксы прочности и хрупкости горных пород в условиях сейсмических глубин 11

Тарасов Б. Г. Веерный механизм динамических трещин сдвига как источник парадоксов прочности и хрупкости горных пород 18

Батугин А. С. Техногенные землетрясения как часть тектонического процесса в зонах предельно напряженного состояния земной коры 24

Котиков Д. А., Шабаров А. Н., Цирель С. В.
Установление связи между распределением сейсмособытий в массиве горных пород и его тектоническим строением 28

Баринов А. Ю., Ерёмченко В. А., Бушков В. К. Системный подход к выбору металлоконструкций для инженерной защиты от скально-обвальных явлений в карьерах 33

Сергунин М. П., Дарбинян Т. П. Выделение параметров трещиноватости массива горных пород из геологических моделей, построенных в современных геоинформационных системах (на примере Micromine) 39

Бирючев И. В., Макаров А. Б., Усов А. А.
Геомеханическая модель рудника. Часть 1. Создание 42

Сидоров Д. В., Пономаренко Т. В. Методология оценки геодинамического состояния природно-техногенных систем при реализации проектов освоения месторождений 49

Рыбин В. В., Константинов К. Н., Каган М. М., Панасенко И. Г. Принципы организации комплексной системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия 53

Марысюк В. П., Сабянин Г. В., Трофимов А. В., Киркин А. П. Определение параметров скважинных зарядов ВВ при очистной отбойке на основе расчета зон разрушения и районирования руд по физико-механическим свойствам 58

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 62

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ерёмченко В. А. Разработка и обоснование параметров системы анкерного крепления междукамерного целика большого сечения и протяженности 67

Гречишкин П. В., Феофанов Г. Л., Козлов А. Г., Зайцев Я. И. Анализ параметров деформации вмещающего углепородного массива и выбор крепи выработок по пластам В-12 и В-26 в условиях шахты «Северная» АО «Ургалуголь» 73

Ерёмченко А. А., Конурич А. И., Штирц В. А., Приб В. В.
Выявление зон повышенного горного давления на удароопасном железорудном месторождении 78

Ерёмченко А. А., Дарбинян Т. П., Айнбиндер И. И., Конурич А. И. Оценка геомеханического состояния массива горных пород на Талнахском и Октябрьском месторождениях 82

Беспалов Н. А., Гладырь А. В. Комплексный геодинамический мониторинг при разработке месторождения Антей, опасного по горным ударам 87

Бокий И. Б., Зотеев О. В., Пуль В. В., Федянин А. С.
Методология определения параметров зоны сдвижения при отработке алмазоносных месторождений Якутии по системам с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями 91

Аксенов А. А., Золотин В. Г., Пуль Э. К.
Исследования склонности кимберлитовых месторождений Мало-Ботубинского района к горным ударам 96

Бокий И. Б., Зотеев О. В., Пуль В. В. Погашение верхних частей камер на руднике «Айхал» АК «АЛРОСА» (ПАО) с использованием породной закладки 101

Пуль Э. К., Захаров Н. Е., Лосовская Ю. В., Иванов П. С.
Разработка и опытно-промышленная апробация мероприятий по предотвращению негативных последствий газодинамических явлений на месторождении трубки «Интернациональная» 104

Рыльникова М. В., Есина Е. Н., Овчаренко О. В.
Геотехнологические и геомеханические особенности отработки междукамерных целиков на Коробковском месторождении железных руд 109

Куранов А. Д., Багаутдинов И. И., Котиков Д. А., Зуев Б. Ю. Комплексный подход к прогнозу устойчивости предохранительного целика при слоевой системе разработки запасов Яковлевского месторождения 115

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Итоги Всероссийской научно-практической конференции «Золото. Полиметаллы. XI век» 120

Творец каменной летописи (Интервью с народным художником Беларуси, скульптором И. Я. Миско) 122

РЕКЛАМА

На обложке:

АО Боровичский завод «Полимермаш»
ООО «ГЕОБРУГГ»

IX Международная конференция по геомеханике 108

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**

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

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

Printed in Buki Vedi, LLC

CONTENTS

THEORETICAL ISSUES OF GEOMECHANICS

Vorobei S. A., Vorobyev A. A. On the problem of contouring core values for the future of rock mechanics (Publisher’s view) . 7

Tarasov B. G. Paradoxes of strength and brittleness of rocks at seismic depths 11

Tarasov B. G. Fan mechanism of dynamic shear fractures as a source of strength and brittleness paradoxes in rocks 18

Batugin A. S. Induced earthquakes as a part of tectonic process in critical stress state zones in the Earth’s crust 24

Kotikov D. A., Shabarov A. N., Tsirel S. V. Connecting seismic event distribution and tectonic structure of rock mass 28

Barinov A. Yu., Eremenko V. A., Bushkov V. K. System approach to selection of rockfall engineering protection steelworks in open pit mines 33

Sergunin M. P., Darbinyan T. P. Identification of rock mass jointing parameters in geological models in modern geoinformation systems (in terms of Micromine) 39

Biryuchev I. V., Makarov A. B., Usov A. A. Geomechanical model of underground mine. Part I. Creation 42

Sidorov D. V., Ponomarenko T. V. Estimation methodology for geodynamic behavior of nature-and-technology systems in implementation of mineral mining projects 49

Rybin V. V., Konstantinov K. N., Kagan M. M., Panasenko I. G. Methodology of integrated stability monitoring in mines 53

Marysyuk V. P., Sabyanin G. V., Trofimov A. V., Kirkin A. P. Designing blast patterns by calculation of fracture zones and ore zoning by physical and mechanical properties 58

Marysyuk V. P., Shilenko S. Yu., Trofimov A. V., Kuzmin S. V. Risk assessment in main ore chute construction in difficult geological conditions based on integrated geotechnical research 62

APPLIED RESEARCHES

Eremenko V. A. Rock bolting design and justification for rib pillars of large cross-section and extension 67

Grechishkin P. V., Feofanov G. L., Kozlov A. G., Zaytsev Ya. I. Coal-rock mass deformation analysis and support design for roadways on seams V-12 and V-26 in the Severnaya Mine of Uralugol 73

Eremenko A. A., Konurin A. I., Shtirts V. A., Prib V. V. Identification of higher rock pressure zones in rockburst-hazardous iron ore deposits 78

Eremenko A. A., Darbinyan T. P., Aynbinder I. I., Konurin A. I. Geomechanical assessment of rock mass in the Talnakh and Oktyabrsky deposits 82

Bespalov N. A., Gladyr A. V. Integrated geodynamic monitoring during development of the rockburst-hazardous Antey deposit . . . 87

Bokiy I. B., Zoteev O. V., Pul V. V., Fedyanin A. S. Methodology for determining displacement zone parameters in mining diamond deposits in Yakutia using systems with cemented backfill 91

Aksenov A. A., Zolotin V. G., Pul E. K. Rockburst proneness studies in the Malaya Botuobuia kimberlite deposits 96

Bokiy I. B., Zoteev O. V., Pul V. V. Mining with rock backfill at the top of stoping zone in the Aikhal Mine of ALROSA 101

Pul E. K., Zakharov N. E., Losovskaya Yu. V., Ivanov P. S. Development and pilot testing of activities aimed to prevent adverse consequences of gasdynamic phenomena at the Internatsionalnaya pipe 104

Rylnikova M. V., Esina E. N., Ovcharenko O. V. Geomechanical and geotechnical features of rib pillar extraction in the Korobkovo iron ore deposit 109

Kuranov A. D., Bagautdinov I. I., Kotikov D. A., Zuev B. Yu. Integrated approach to safety pillar stability in slice mining in the Yakovlevo deposit 115

«GORNYI ZHURNAL», 2020, № 1, pp. 39–42
DOI: 10.17580/gzh.2020.01.07

Identification of rock mass jointing parameters in geological models in modern geoinformation systems (in terms of Micromine)

Information about authors

M. P. Sergunin¹, Head of Department for Geotechnical Supervision of Mining at the Center for Geodynamic Safety, SerguninMP@nornik.ru

T. P. Darbinyan¹, Director of Mining Practice Department

¹Norilsk Nickel's Polar Division, Norilsk, Russia

Abstract

The article describes the method of collecting large bulk of data on rock mass jointing in the Talnakh and Oktyabrsky deposits developed by the Polar Division of Norilsk Nickel. The method is based on processing of 3D triangulation faulting frames constructed in the geoinformation environment Micromine. This trend is selected because of the current storage of the majority of geological and surveying data collected by Norilsk Nickel's Polar Division in geoinformation packages in the form of 3D models; for this reason, the correct retrieval of the data for the interpretation and analysis is of the current concern. Furthermore, the model data amount and quality is sufficient for the more exact solution of the main geotechnical problems since the final geological models use data obtained from the exploration beginning and down to recent times; moreover the geological models are promptly updated as new data are acquired.

The export of the data on jointing from the geological models is implemented automatically in view of the large quantity of computational operations. To this effect, the dedicated program is written in the Python language to extract the required information from the triangulation frames and to mark it with auxiliary data. All in all, processing of the tectonic faulting frames produced the array composed of more than 206 thousand records. Later on, the information was used to illustrate the variation in rock mass jointing in the Talnakh and Oktyabrsky deposits with depth. The analysis was carried out after depth-wise filtration of the initial data in the special Rocscience Dips software representing the data on jointing in the form of standard stereographic projections. Finally, the article offers some case-studies on application of the available data on rock mass jointing to solving specific geotechnical problems.

Keywords: jointing, joint sets, kinematic analysis, movement, Dips software, Unwedge, Micromine.

References

- Basargin A. A. Modeling of ore mineral deposits using Micromine GIS. *Interexpo GEO-Sibir*. 2016. Vol. 1, No. 2. pp. 151–155.

- Kurlenya M. V., Seryakov V. M., Eremenko A. A. Anthropogenic geomechanics stress fields. Novosibirsk: Nauka, 2005. 264 p.
- Petukhov I. M., Egorov P. V., Vinokur B. Sh. Prevention of rock bumps in mines. Moscow: Nedra, 1984. 230 p.
- Uskov V. A., Eremenko A. A., Darbinyan T. P., Marysyuk V. P. Geodynamic Hazard Assessment for Tectonic Structures in Underground Mining of North Ore Bodies in the Oktyabrsky Deposit. *Journal of Mining Science*. 2019. Vol. 55, Iss. 1. pp. 77–87.
- Rats M. V., Chernyshev S. N. Jointing and the properties of jointed rocks. Moscow: Nedra, 1970. 159 p.
- Sergunin M. P., Eremenko V. A. Determining parameters of original stress field in rock mass in Zapolyarny mine. *GIAB*. 2019. No. 4. pp. 63–74.
- Dong Hyun Kim, Gratchev I., Balasubramaniam A. Back analysis of a natural jointed rock slope based on the photogrammetry method. *Landslides*. 2015. Vol. 12, Iss. 1. pp. 147–154.
- Mehdi Amini, Abbas Majidi, Mohammad Amin Veshadi. Stability Analysis of Rock Slopes Against Block-Flexure Toppling Failure. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2012. Vol. 45, Iss. 4. pp. 519–532.
- Wanna Phyo, Yew Mun Cheong, Kyi Khin, Aung Khaing, Kyaw Thu Myint. Geological rock face mapping and kinematics analysis for drill and blast excavation. 2014. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/275016547> (accessed: 14.06.2019).
- Contreras L.-F., Brown E. T. Slope reliability and back analysis of failure with geotechnical parameters estimated using Bayesian inference. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019. Vol. 11, Iss. 3. pp. 628–643.
- Sergunin M.P., Eremenko V. A. Learning of neural network to predict overlying rock mass displacement parameters by the data on jointing in terms of the Zapolyarny Mine. *GIAB*. 2019. No. 10. pp. 106–116.
- Goodman R. E. Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks. St. Paul: West Publishing Co., 1976. 472 p.
- Goodman R. E. Block theory and its application to rock engineering. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985. 338 p.
- Kosyreva M. A., Eremenko V. A., Gorbunova N. N., Tereshin A. A. Support design using Unwedge software for mines of Norilsk's Polar Division. *GIAB*. 2019. No. 8. pp. 57–64.
- Fithriyani Fauziyyah, Ryan Pratama, Zufaldi Zakaria. Viability Index Method for Wedge Analysis in Gudang Handak Underground Mine PT. Antam Tbk. 2015. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/282971836> (accessed: 14.06.2019).
- Riadh Boukarm, Abdelkader Houam, Mohamed Fredj, Rima Boucif. Modelling and Analysis of the Excavation Phase by the Theory of Blocks Method of Tunnel 4 Kherrata Gorge, Algeria. *World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium*. Prague, 2017.

УДК 622.831:004.925.83

ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РУДНИКА. Часть 1. СОЗДАНИЕ



И. В. БИРЮЧЕВ¹,
старший консультант
по геомеханике,
ibiryuchiov@srk.ru.com



А. Б. МАКАРОВ¹,
главный консультант
по геомеханике,
проф., д-р техн. наук



А. А. УСОВ²,
ведущий
горный инженер

¹SRK Consulting, Москва, Россия

²ООО «Русдрагмет», Москва, Россия

Введение

Современные цифровые технологии создания горно-геологических информационных систем первоначально использовали геологи для трехмерного геологического моделирования

Описаны этапы создания геолого-структурной компоненты геомеханической модели рудника, показаны инструменты и технологии сбора необходимых для этого исходных данных. С помощью созданной модели выполнено районирование шахтного поля Ново-Широкинского рудника по категориям устойчивости на основе индекса качества горного массива.

Ключевые слова: месторождение, геолого-структурная модель, геомеханические данные, структурные данные, качество массива, оценка, блочная геомеханическая модель, категории устойчивости, шахтное поле, районирование.

DOI: 10.17580/gzh.2020.01.08

месторождений и подсчета запасов руды. Позднее их стали применять горняки для проектирования, планирования и оперативного (маркшейдерского и пр.) сопровождения горных работ. Логическим продолжением данной тенденции цифровизации горного производства являлась практика создания геомеханической модели рудника. Она включает в себя информационные оболочки:

геолого-структурную (распределение в массиве разных типов пород, их изменений – выветривание, метасоматическая проработка, каркасы тектонических разломов, сетка трещин), рейтинговых оценок качества массивов и их механических свойств. В необходимых случаях добавляется гидрогеологическая компонента модели (распределение уровней подземных вод, порового давления в пространстве).

Геомеханическая модель может и должна стать основным инструментом геомеханика рудника для выявления потенциально опасных (ослабленных, нарушенных или сильнонапряженных) зон и 3D-расчетов напряженно-деформированного состояния и устойчивости массива. При проектировании бортов карьеров такая практика стала международным стандартом [1]. Норма создавать и использовать геомеханическую модель месторождения включена в проект новых Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности по обеспечению устойчивости бортов карьеров. Все более активно вовлекают в данную тенденцию и подземные рудники [2–5]. В данной статье описаны шаги по созданию геомеханической модели Ново-Широкинского рудника (НШР), входящего в состав Hingland Gold Mining Ltd.

Создание геолого-структурной модели месторождения

Ново-Широкинское золотополиметаллическое месторождение в Забайкальском крае представлено серией сближенных рудных тел линзовидной формы средней и выше мощности, образующих выпуклую дугу субширотного (СЗ-ЮВ) простирания, крутопадающих на ЮЗ (под углами 65–80°). Основными вмещающими породами являются андезиты.

Месторождение вскрыто центральными вертикальными стволами и транспортным автоуклоном с поверхности. Подземную разработку месторождения ведут с 2010 г. системой подэтажных штреков с применением самоходного горного оборудования. За 10 лет эксплуатации рудника горные работы опустились на глубину 270 м. При отработке первого горизонта потолочина у земной поверхности мощностью в несколько метров местами обрушалась.

Каркасная геолого-структурная модель (рис. 1) создана путем сведения воедино всей имеющейся информации (база данных геологического описания керна разведочных скважин, геологические планы и разрезы, топоповерхность), полученной на различных этапах изучения и разработки месторождения с помощью программы Leapfrog GEO.

Программа позволяет моделировать взаимоотношения геологических элементов модели, исходя из их генезиса, характера, возраста и других геологических индикаторов. С ее помощью также были созданы каркасы тектонических разломов и зон дробления, выявленные по сумме геологических признаков. Созданная геолого-структурная модель послужила основой для создания блочной геомеханической модели.

Программа сбора геомеханических данных

Первичный анализ имеющихся данных показал, что информация о структурной нарушенности массива трещинами отсутствовала полностью, а механические свойства руд и пород изучены

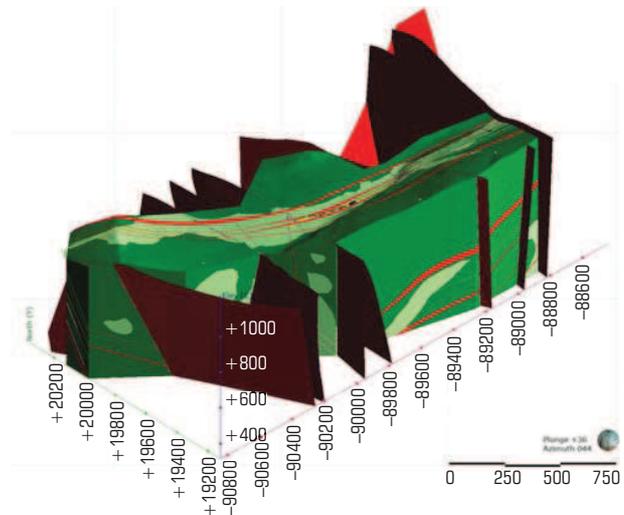


Рис. 1. Общий вид геолого-структурной модели месторождения с каркасами выявленных тектонических разломов

недостаточно. Чтобы наполнить блочную модель геомеханическими параметрами, была реализована программа сбора данных, включавшая:

- бурение с поверхности четырех наклонных геомеханических скважин суммарной длиной 1,6 км, равномерно распределенных по простиранию рудной зоны, с геомеханическим документированием керна и с привязкой его по трем координатам для создания базы данных, необходимых для геомеханической модели;
- акустическое сканирование стенок геомеханических скважин для определения элементов залегания трещин в массивах всячего бока и рудной зоны с помощью сканера QL40ABI компании ALT (Люксембург); обработку данных проводили в программе WellCAD компании Advanced Logic Technology с определением типа (сцементированная или открытая трещина, зона разлома/дробления), азимута и угла падения нарушения;
- геомеханическое документирование керна 24 скважин эксплоразведки (порядка 5 % их общего числа) суммарной длиной 3,4 км по фотографиям с помощью программы CoreProfiler с координированием интервалов для расширения базы данных об интенсивности трещиноватости массива по площади месторождения и глубине;
- съемку трещиноватости в подземных выработках методом массовых замеров с помощью горного компаса для заверки и расширения базы данных в массивах рудной зоны, всячего и лежащего боков;
- отбор образцов керна с разных глубин геомеханических скважин и их лабораторные испытания для изучения свойств пород по широкому ряду показателей и оценка их изменений по простиранию рудной зоны и глубине;
- полевые испытания прочности руды и пород в подземных выработках для заверки и пополнения базы данных о свойствах массивов руды, всячего и лежащего боков;
- визуальные обследования геомеханического состояния подготовительных выработок для обнаружения признаков повышенного горного давления и удароопасности массива;

- визуальную оценку нагруженности анкерной крепи для выявления механизма возможной неустойчивости подготовительных выработок.

Сбор структурных данных

В ходе бурения скважин и геомеханического описания керна вели удаленную проверку полученных данных (процедура QA/QC). О высоком качестве проведенного документирования свидетельствует хорошая корреляция между показателем нарушенности массива RQD (в процентах) и частотой трещин FF (ед/м) во всех четырех скважинах (рис. 2). Данная корреляция основана на обратном экспоненциальном законе распределения расстояний между трещинами в массиве [6, 7]:

$$RQD = 100 \exp(-0,1FF)(0,1FF + 1). \quad (1)$$

Итоговые гистограммы RQD и FF показаны на рис. 3.

Показатель нарушенности массива трещинами RQD используют во всех рейтингах качества массива и многих современных методиках расчетов. По 2,5 тыс. интервалам геомеханических скважин он имеет экспоненциальный закон распределения. Это характерно для массивов слабонарушенных пород. Частота трещин FF распределена по логнормальному (близкому к обратному экспоненциальному) закону. Анализ базы собранных данных по RQD позволил сделать следующие выводы:

- нарушенность массива трещинами не изменяется по простиранию рудной зоны: по критерию Стьюдента средние значения RQD в четырех скважинах одинаковые; также не наблюдается закономерных изменений по глубине; поэтому все данные можно объединить в одну генеральную совокупность; среднее значение для всего месторождения $RQD = 95 \%$ со стандартным отклонением 10% (коэффициент вариации 11%); в интервале $RQD = 90-100 \%$ находится 86% всех значений; это достаточно высокое качество массива;

- исключение составляет приповерхностная толща, затронутая выветриванием на глубину $4-28 \text{ м}$; около земной поверхности значения RQD резко снижаются вплоть до 0% ; интервалы выветрелых пород не включены в общую статистику;

- интервалы с аномально низкими значениями $RQD = 20-50 \%$ – это пересечения скважинами зон тектонических нарушений; они использованы для построения 3D-каркасов разломов.

Результаты описания керна геомеханических и разведочных скважин сведены в электронные таблицы с вкладками: сводная информация по скважине с кодами; инклинометрия; поинтервальное геомеханическое документирование керна с координатами, с определением типа пород, их изменений, показателей нарушенности массива трещинами RQD и FF , состояние трещин (степень шероховатости и заполнитель); выделенные крупные структурные элементы (разломы, зоны дробления), интервалы отбора образцов для определения свойств пород.

Показатель RQD характеризует только интенсивность нарушенности массива без определения ориентировок трещин. Выявление систем трещин и определение элементов их залегания выполнены инструментами структурного картирования. По результатам акустического сканирования стенок геомеханических скважин определены элементы залегания более $2,9 \text{ тыс.}$ трещин. Из

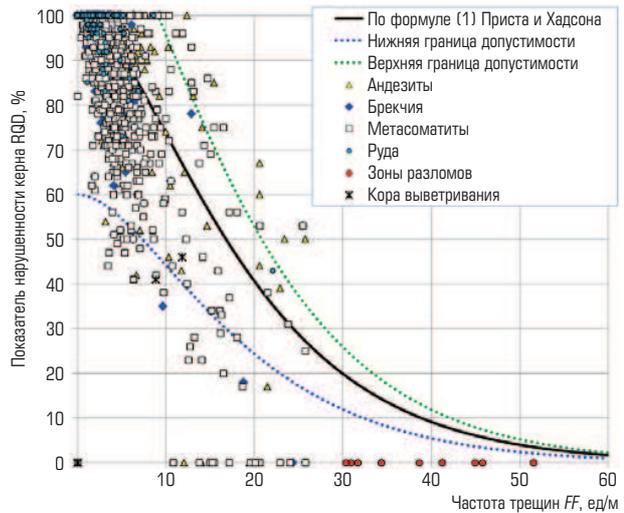


Рис. 2. Соотношение между показателем нарушенности массива RQD и частотой трещин FF , отображающее хорошее качество документирования керна

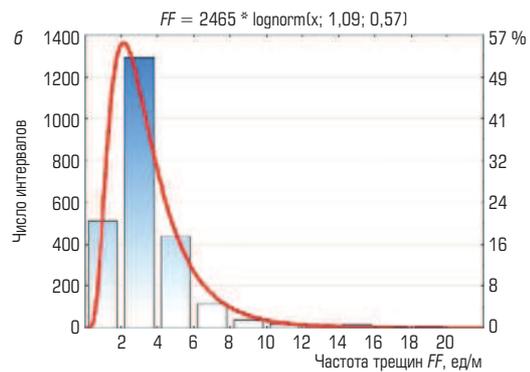
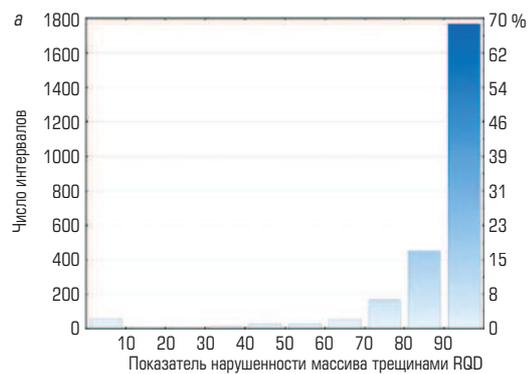


Рис. 3. Распределения показателей нарушенности массива трещинами RQD (a) и FF (б) по керну геомеханических скважин

них 75% составляют цементированные трещины, залеченные кварцем. Как правило, такие трещины (в отличие от открытых тектонических трещин) не являются причиной кинематической неустойчивости пород в подготовительных и очистных выработках. Поэтому в дальнейшем анализе использованы только открытые тектонические трещины (21%). Оставшиеся 4% трещин образуют зоны разломов/дробления.

Для заверки и пополнения базы структурных данных выполнена съемка трещиноватости массива в подземных горных выработках методом массовых линейных замеров. Горным компасом и рулеткой измеряли угол и азимут падения трещин, их заполнитель, шероховатость, длины, расстояние по нормали до ближайшей трещины данной системы. Съемка трещиноватости массива выполнена в горизонтальных выработках, расположенных в рудном массиве, породах висячего и лежачего боков и представленных андезитами с разной степенью метасоматической проработки. Анализ полученных данных показал: различия в характере трещиноватости руды и пород висячего и лежачего боков не наблюдается. Поэтому рабочей гипотезой стало положение о постоянстве ориентировок систем трещин по всему разрезу в целом. Это позволило объединить все результаты, полученные на разных участках, в одну генеральную совокупность с общим объемом 270 замеров.

В результате сопоставления результатов шахтного картирования с данными сканирования стенок скважин установлено:

- наличие многочисленных пологопадающих трещин (по данным сканирования стенок скважин), которые не были зарегистрированы в подземных выработках, так как пологие трещины попадают в «слепую» зону съемки в горизонтальных выработках;
- присутствие малочисленных крутопадающих трещин, которые были выявлены в процессе съемки в подземных выработках, так как крутопадающие трещины попадают в «слепую» зону крутонаклонных скважин;
- наличие систем наклонных трещин, выявленных обоими методами; данные хорошо согласуются между собой.

Два инструмента изучения трещиноватости – крутонаклонный и горизонтальный – в соответствии с принципом К. Терцаги [8] хорошо дополняют друг друга, позволяя получить достаточно представительные и объемные данные о структуре массива. Поэтому результаты, полученные разными методами, объединены в одну достаточно представительную (888 замеров) статистическую базу трещиноватости массива НШР (рис. 4).

Наиболее представительная система 1 пологопадающих трещин генетически обусловлена напластованием вулканогенно-осадочных и магматических пород, слагающих вмещающую толщу, и прорванных интрузиями среднего состава с зонами гидротермального метасоматоза (в том числе Ново-Широкинской рудной зоной). Крутые тектонические трещины, связанные с формированием рудной зоны и согласные с ее падением, образуют вторую по значимости систему 2. Наклонные трещины систем 3 и 5 нормально секут рудную зону в разных направлениях. Крутые трещины, косо секущие рудную зону, образуют систему 4. Трещины, согласные с простиранием рудной зоны, но с обратным падением, объединены в систему 6. Число систем трещин определяет показатель J_n Н. Бартона, который участвует в расчетах рейтинговых характеристик качества массива. Правила определения величины J_n , которыми для единообразия пользуются во всем мире, приведены в справочнике [9]. В условиях НШР показатель, характеризующий число систем трещин в массиве, принят $J_n = 15$.

При съемке трещиноватости в подземных выработках делали прямые замеры длин трещин и расстояний между ними в системах. По результатам 257 замеров, длины трещин L обладают

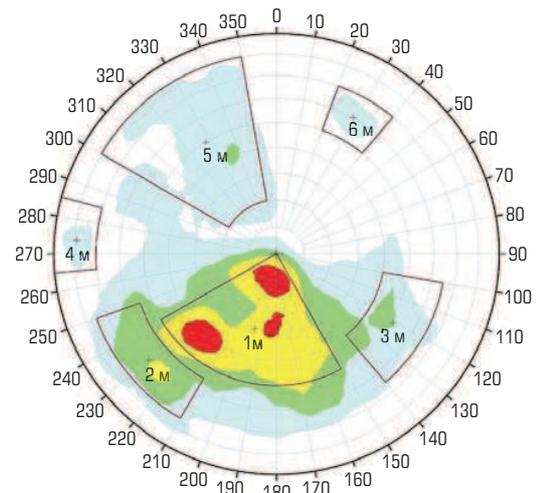


Рис. 4. Полярная диаграмма трещиноватости массива НШР, построенная с помощью программы Dips компании Rocscience по данным сканирования скважин и съемки в подземных выработках (1–6 – номера систем)

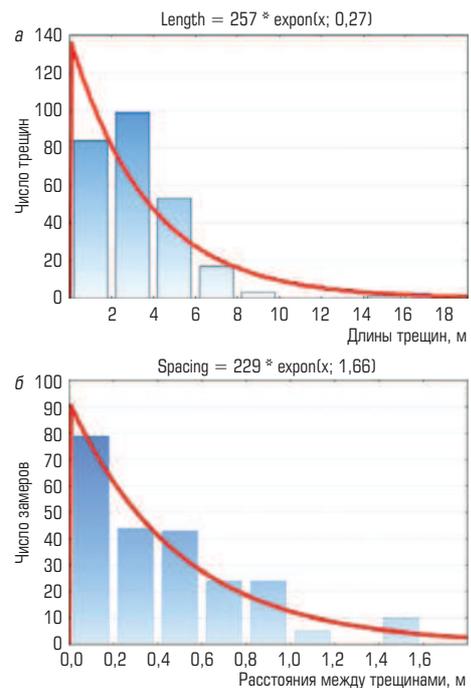


Рис. 5. Распределение длин (а) и расстояний между трещинами (б) в массиве НШР

значительной изменчивостью и колеблются в широких пределах: от 0,5 м до десятков метров. Гистограмма длин трещин (рис. 5) указывает на обратный экспоненциальный закон распределения их плотности:

$$f(L) = \lambda \exp(-\lambda L), \quad (2)$$

где λ – параметр экспоненциального распределения, равный 0,27 для массива НШР. Данный закон распределения – однопараметрический, в котором обратная величина $1/\lambda$ является и средним

значением, и стандартным отклонением случайной величины. Следовательно, по статистическим данным, средняя длина трещин в массиве НШР составляет 3,7 м.

Расстояния между трещинами в системах по данным 229 прямых замеров колеблются от первых сантиметров до нескольких метров. Средние расстояния между трещинами в отдельных системах изменяются в пределах 0,5–0,7 м. Поэтому была принята гипотеза, что средние расстояния между трещинами во всех системах одинаковые. Сводная гистограмма расстояний между трещинами также показана на рис. 5. Она свидетельствует об обратном экспоненциальном законе распределения (2) с параметром $\lambda = 1,66$ и средним расстоянием между трещинами всех систем 0,6 м с таким же среднеквадратичным отклонением.

Физической основой обратного экспоненциального закона распределения случайных величин (2) являются процессы, которые протекают в природе по концепции наислабейшего звена (по принципу: где слабо, там и рвется). Условия для образования коротких трещин возникают в массиве довольно часто. Поэтому их много, и расстояния между ними небольшие. Чем крупнее трещина, тем реже формируются условия для ее образования, тем реже они встречаются, тем больше расстояния между ними. Фактически это аналог закона повторяемости землетрясений Гуттенберга – Рихтера [10] на более низком масштабном уровне, что вполне соответствует концепции акад. М. А. Садовского о самоподобии процессов разрушения земной коры на разных масштабных уровнях [11].

Статистические оценки законов распределения параметров трещиноватости необходимы для моделирования стохастической сетки трещин средствами DFN (Discrete Fracture Networks). Она позволяет выявить механизмы обрушений вмещающих пород в очистных камерах по поверхностям структурного ослабления массива (трещинам, контактам, разломам). Типичные механизмы кинематической неустойчивости пород на контуре очистных выработок показаны на рис. 6 [11].

По полученным структурным данным (см. рис. 3, 4) построена сетка трещин в разрезе в крест среднего простирания рудной зоны (рис. 7). По ней видно, что из кровли очистных камер происходят вывалы блоков руды под действием собственного веса (Gravity Fall), а с висячего бока блоки пород сползают по крутопадающим трещинам (Sliding), так как углы падения трещин (50–80°) больше угла трения по ним (32°).

Различные механизмы кинематической неустойчивости обрушений по-разному учитывают в расчетах допустимых размеров очистных камер [12]. Обрушения кровли и висячего бока могут объединиться в единую зону обрушения камеры и междуэтажного целика. Подтвердить это предположение можно результатами лазерного сканирования фактических контуров очистных камер, увязывая геометрию вывалов с системами трещин.

Шероховатость трещин в ходе картирования подземных выработок оценивали визуально. Установлено, что большинство трещин (70 %) являются шероховатыми и неровными. Гладкие трещины составляют 30 % (рис. 8).

Шероховатость трещин учитывают в геомеханических расчетах показателем J_r Н. Бартон. Правила его определения приведены в [9]: для гладких прерывистых трещин необходимо

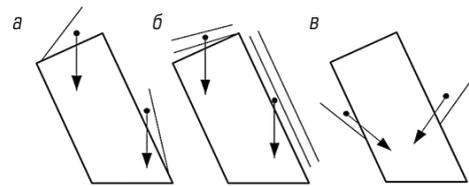


Рис. 6. Типичные механизмы обрушений вмещающих пород в очистные камеры по поверхностям структурного ослабления массива [8]: вывалы под действием собственного веса (а), отслоения по трещинам и контактам (б), сползание по трещинам и контактам (в)

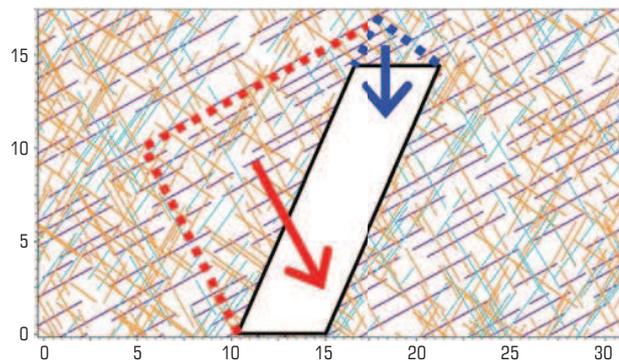


Рис. 7. Прогноз механизмов обрушения по трещинам очистных камер: кровли – вывалы блоков руды под действием собственного веса Gravity Fall (синяя стрелка); висячего бока – сползание блоков пород Sliding (красная стрелка)



Рис. 8. Распределение трещин по системам и доля шероховатых и гладких трещин в них

принимать $J_r = 3$; для шероховатых прерывистых трещин $J_r = 4$. Средневзвешенное значение показателя, учитывающего шероховатость трещин, в условиях НШР $J_r = 3,7$.

Оценка качества массивов

Собранные структурные данные использованы для расчета индекса качества массива Q по Н. Бартону [9], так как его используют во многих геомеханических приложениях. Расчет Q выполнен по 2,6 тыс. интервалам базы данных геомеханического документирования и внесен в нее как интегрирующий показатель качества массива. Плотность распределения индекса Q подчиняется

обратному экспоненциальному закону (рис. 9) с параметром распределения $\lambda = 0,15$ (см. формулу 2). Обратная величина $1/\lambda = 6,7$ – среднее значение индекса качества массивов $Q = 6,7$ и его среднеквадратичное отклонение в поле НШР.

Создание блочной геомеханической модели месторождения

Целью создания модели является визуализация рейтинговых показателей качества массива в трехмерном пространстве. Исходными материалами для создания модели являлись каркасная геолого-структурная модель месторождения и база данных геомеханического описания керна скважин. Блочную геомеханическую модель создавали с помощью модуля EDGE ПО Leapfrog GEO 4.4.2 с интерполяцией параметров в пределах выделенных геомеханических доменов. Пустая блочная модель создана в границах геолого-структурной модели с размером материнского блока $25 \times 25 \times 25$ м и размером субблокирования $5 \times 5 \times 5$ м. Размеры субблока выбраны таким образом, чтобы максимально исключить искажение геометрии геологических тел. С помощью каркасов структурной модели блокам модели присвоены коды геомеханического домена (неизменные андезит-порфиры, метасоматически измененные андезиты, зоны тектонических разломов и дробления, выветрелые породы).

В пустую блочную модель в пределах каждого домена интерполировали все имеющиеся геомеханические параметры (RQD, FF, Q и др.). Интерполяцию осуществляли методом радиальных базисных функций с использованием структурного тренда, направление которого определяется морфологией геологических тел, слагающих массив месторождения [13–15]. Для интерполяции индекса качества дополнительно использовали индикаторы, соответствующие классам $Q = (0,01 \div 0,1)$; $(0,1 \div 1)$; $(1 \div 4)$; $(4 \div 10)$; $(10 \div 40)$. Результирующее значение Q рассчитывали по стандартной методике индикаторной оценки с учетом доли вклада и среднего значения выборки по каждому классу. Заверка блочной модели с целью оценки корректности результатов интерполяции проведена путем сравнения фактических геомеханических параметров по интервалам скважин с соответствующими интерполированными значениями, а также средних исходных и интерполированных значений по различным направлениям. Вид созданной геомеханической модели НШР с распределением индекса качества массивов Q по Н. Бартону показан на рис. 10.

Районирование шахтного поля по категориям устойчивости

Индекс качества массивов Q использован для определения геомеханически обоснованных категорий устойчивости массивов, используемых в российской практике [16–18]. Распределение массивов НШР по категориям устойчивости приведено в таблице.

Большая часть массивов НШР (53 %) обладает средней устойчивостью с $Q = 4-10$ (зеленый цвет). Есть также устойчивые массивы с $Q = 10-40$ (голубой цвет) и неустойчивые массивы с $Q = 1-4$ (оранжевый цвет). Весьма неустойчивые массивы в зонах обводненных тектонических разломов с индексом качества $Q < 1$ занимают всего 3 % объема геомеханической модели.

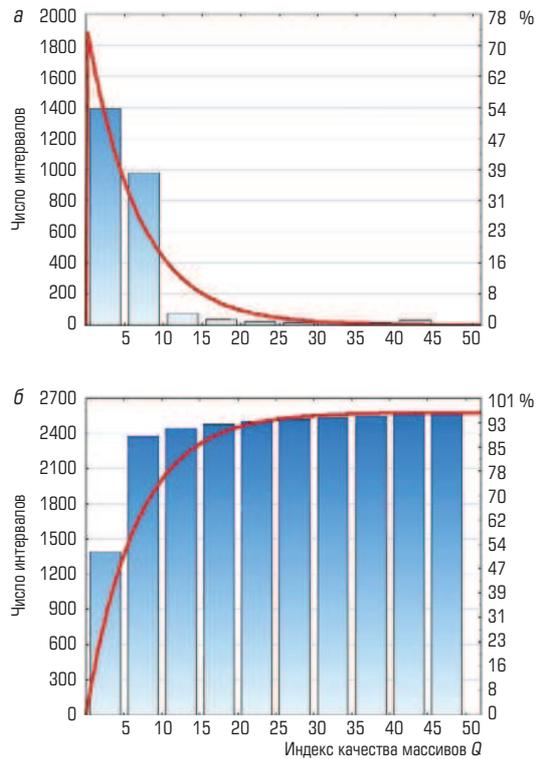


Рис. 9. Плотность (а) и кумулятивное распределение (б) индекса качества массива Q в поле НШР

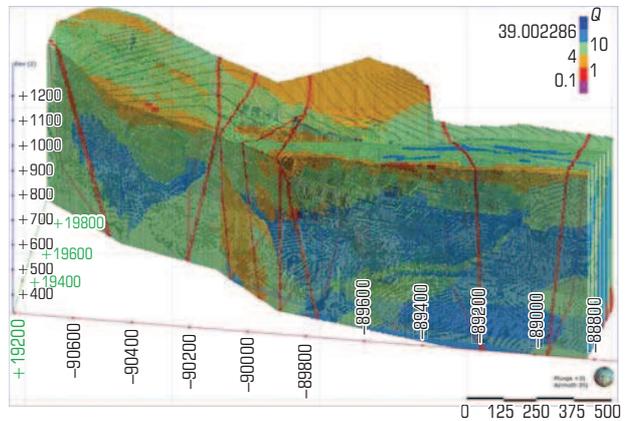


Рис. 10. Общий вид блочной геомеханической модели НШР с отображением индекса качества массива Q

Определение категорий устойчивости массивов по индексу качества Q

Интервал значений Q	Категория устойчивости массивов	Доля массивов на НШР, %	
Менее 1	5	Весьма неустойчивые	3
1–4	4	Неустойчивые	37
4–10	3	Средней устойчивости	53
10–40	2	Устойчивые	7
Более 40	1	Весьма устойчивые	0

Выбор типа крепи подготовительных выработок по категории ее устойчивости – в соответствии с действующей на руднике инструкцией. Для всех рабочих и проектируемых горизонтов построены планы распределения индекса Q (рис. 11). На них отображены категории устойчивости пройденных и проектируемых выработок.

Районирование массивов по устойчивости основано на объеме исходных данных, соответствующих стадии PFS. Для доведения детальности модели до стадии FS необходимо пополнить блочную геомеханическую модель данными картирования подземных выработок и керна разведочных скважин.

Заключение

Таким образом, в данной статье описаны шаги по созданию геолого-структурной компоненты геомеханической модели рудника, показаны инструменты и технологии сбора необходимых для этого исходных данных. С помощью созданной модели выполнено районирование шахтного поля НШР по категориям устойчивости на основе индекса качества массивов по Н. Бартону. В следующей публикации будут показаны пути использования геомеханической модели рудника для его районирования по удароопасности, определения критерия устойчивости очистных камер и их допустимых параметров, обоснования целесообразной технологии добычи руды.

(Окончание статьи в следующем номере «Горного журнала»)



Рис. 11. Районирование выработок на гор. 637 м по категориям устойчивости на основе индекса качества массива Q

Библиографический список

См. англ. блок. **Ж**

«GORNYI ZHURNAL», 2020, № 1, pp. 42–48
DOI: 10.17580/gzh.2020.01.08

Geomechanical model of underground mine. Part I. Creation

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

The article describes stages of geomechanical modeling of a mine. The geomechanical model is based on the frame model of the structural geology of a deposit. The latter model is created by integration of information acquired at different stages of the deposit exploration and operation: data bases on exploration coring, geological plans and profiles. Aiming to fill the blocky structural geology model with geomechanical information, the program of data acquisition on jointing and properties of ore and enclosing rocks was implemented. The program involved determination of jointing density from the core material and orientation of the joint systems from scanning of the rock mechanics survey borehole walls. Additional data were obtained from jointing surveys in mine workings. It is shown that different tools and technologies of the initial structural data acquisition for the geomechanical model complement one the other. The statistical laws of distribution of the joint length and spacing are obtained. The collected structural data are used to calculate the rock mass quality index by N. Barton. It is found that the calculated Q -indexes agree with the standard rock mass stability categories in the Russian mining practice. The blocky geomechanical model is created by interpolation of Q -index within the limits of identified geomechanical domains. The interpolation was accomplished by the method of radial basic functions using a structural trend with direction governed by the morphology of geological bodies composing the rock mass. The resultant rock mass quality index was calculated from the standard indicator estimation procedure. In order to check the interpolation validity in the blocky model, the actual geomechanical data obtained per intervals in boreholes were compared with the relevant interpolated values, and the average initial data were matched with the interpolated values in different directions. Using the created blocky geomechanical model, zoning of the Novo-Shirokino mine field was carried out by the stability categories based on the rock mass quality index.

Keywords: deposit, structural geology model, geomechanical data, structural data, rock mass quality, estimation, geomechanical block model, stability categories, mine field, zoning.

References

1. Read J., Stacey P. Guidelines for open pit slope design. Australia : CSIRO, 2009. 496 p.
2. Livinskiy I. S., Mitrofanov A. F., Makarov A. B. Complex geomechanical modeling: structure, geology, reasonable sufficiency. *Gornyi Zhurnal*. 2017. No. 8. pp. 51–55. DOI: 10.17580/gzh.2017.08.09

3. Laubscher D., Guest A., Jakubec J. Guidelines on Caving Mining Methods : The Underlying Concepts. Queensland : The University of Queensland, 2017. 282 p.
4. Zhironov A. A., Shaposhnik Yu. N., Nikolsky A. M., Neverov S. A. Geomechanical assessment and substantiation of mining conditions and mining method for Irtysh deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2018. No. 1. pp. 48–53. DOI: 10.17580/gzh.2018.01.08
5. Zhironov A. A., Abdrakhmanov S. U., Shaposhnik Yu. N., Konurin A. I. Rock mass stability estimation and selection of mine support design at Orlov complex ore deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2018. No. 3. pp. 51–57. DOI: 10.17580/gzh.2018.03.08
6. 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.
7. Hudson J. A., Harrison J. P. Engineering rock mechanics. An introduction to the principles. Amsterdam : Elsevier Science, 2000. 456 p.
8. Terzaghi R. Sources of Error in Joint Surveys. *Géotechnique*. 1965. Vol. 15, Iss. 3. pp. 287–304.
9. Using the Q-System. Rock mass classification and support design : Handbook. Oslo, 2015. 54 p.
10. Gutenberg B., Richter C. F. Frequency of Earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1944. Vol. 34. pp. 185–188.
11. Sadovskiy M. A., Pisarenko V. F. Similarity in geophysics. *Priroda*. 1991. No. 1. pp. 13–23.
12. Hutchinson D. J., Diederichs M. S. Cablebolting in Underground Mines. Richmond : BiTech Publishers Ltd., 1996. 406 p.
13. McInerney P., Goldberg A., Calcagno P., Courrioux G., Guillen R., Seikel R. Improved 3D Geology Modelling Using an Implicit Function Interpolator and Forward Modelling of Potential Field Data. *Proceedings of Exploration 07: The Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. Toronto, 2007. pp. 919–922.
14. Stewart M., de Lacey J., Hodkiewicz P. F., Lane R. Grade Estimation from Radial Basis Functions – How Does it Compare with Conventional Geostatistical Estimation? *Ninth International Mining Geology Conference*. Adelaide, 2014.
15. Knight R. H., Lane R. G., Ross H. J., Abraham A. P. G., Cowan J. Implicit Ore Delineation. *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. Toronto, 2007. pp. 1165–1169.
16. Operational regulations for nonferrous, rare and precious metal mines and placers. Moscow : Nedra, 1981. 109 p.
17. Eremenko V. A., Ainbinder I. I., Marysyuk V. P., Nagovitsyn Yu. N. Guidelines for selecting ground support system for the Talnakh operations based on the rock mass quality assessment. *Gornyi Zhurnal*. 2018. No. 10. pp. 101–106. DOI: 10.17580/gzh.2018.10.18
18. Andrews P. G. Ground support selection rationale: a Gold Fields perspective. *Proceedings of the Ninth International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction*. Perth : Australian Centre for Geomechanics, 2019. pp. 15–28.