

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НА ТРЕХОСНОЕ СЖАТИЕ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ «КАРКАСНЫХ» И «СОТОВЫХ» ГОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Н.Г. Высотин¹, Ч.В. Хажылай¹, М.А. Косырева¹, С.С. Шерматова¹

¹ ГИ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: kalgani@yandex.ru

Аннотация: Изменение напряженно-деформированного состояния и формирования вторичного поля напряжений в окружающем подземные горные выработки массиве связано с генезисом, прочностными и упругими характеристиками горных пород, последовательностью технологических операций по выемке руд и пород и изменением величины действующих напряжений. В статье представлены результаты экспериментальных исследований деформационных процессов моделируемых «каркасных» и «сотовых» горнотехнических конструкций с использованием адаптированной новой разработанной экспериментальной методики по моделированию изменения их напряженно-деформированного состояния при трехосном сжатии. На созданном экспериментальном стенде были испытаны кубические модели из силикатного материала линейным размером 200 мм, подвергающиеся механическому воздействию трехосного сжатия с различными величинами главных напряжений, значения которых приближены к реальным натурным условиям. Использовались встроенные датчики акустической эмиссии, которые были установлены на поверхности образца породы и внутри моделируемых выработок в целях регистрации акустических сигналов, производимых при деформировании моделей. Результаты эксперимента позволили на основании физического моделирования при постепенном монотонном нагружении конструкций и быстром снятии нагрузки обеспечить изменение напряженно-деформированного состояния и определить области повреждений и деформаций в режиме реального времени.

Ключевые слова: трехосное сжатие, горное давление, модельные материалы, физическое моделирование, «каркасные» и «сотовые» горные конструкции.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-17-00034).

Для цитирования: Высотин Н. Г., Хажылай Ч. В., Косырева М. А., Шерматова С. С. Методика и результаты испытаний на трехосное сжатие физических моделей «каркасных» и «сотовых» горных конструкций // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11. – С. 19–27. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_19.

Triaxial compression test procedure and data obtained on physical models of frame and honeycomb mine structures

N.G. Vyotin¹, Ch.V. Khazhyylai¹, M.A. Kosyreva¹, S.S. Shermatova¹

¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: kalgani@yandex.ru

Abstract: The stress–strain behavior and the secondary stress field formation in surrounding rock mass around underground excavations is connected with the genesis, strength and elastic characteristics of rocks, with the sequence of ore and barren rock extraction and with the change in values of the effective stresses. This article describes the experimental studies into deformation processes in models of frame and honeycomb mine structures using a new adapted procedure of the stress–strain analysis in triaxial compression. Silicate cubic models 200 mm in size were subjected to triaxial compression on the designed testing machine at varied values of principal stresses scale-wise adjusted to the real in-situ conditions. Acoustic emission sensors were set on the surfaces of the rock specimens and inside the model excavations to record acoustic signals in the course of deformation of the models. The testing data obtained in physical modeling of gradual loading and immediate relief of the model structures to simulate the changing stress–strain behavior made it possible to identify the domains of damage and deformation in real time.

Key words: triaxial compression, confining pressure, model materials, physical modeling, frame and honeycomb mine structures.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 19-17-00034.

For citation: Vysotin N. G., Ch.V. Khazhyylai, Kosyreva M. A., Shermatova S. S. Triaxial compression test procedure and data obtained on physical models of frame and honeycomb mine structures. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11):19-27. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_19.

Введение

Геомеханическое поведение горного массива в основном зависит от деформаций как отклика на изменение его напряженно-деформированного состояния [1 – 4]. Информация о деформационных характеристиках массива является важным фактором в анализе и проектировании подземных горных работ [5].

Методы определения деформационных характеристик массива горных пород включают натурные и лабораторные эксперименты, а также численное моделирование. Натурные эксперименты являются наиболее точными, но их сложно проводить в больших объемах из-за трудоемкости и условий. Одним из главных экспериментальных решений является производство испытаний на физических моделях, изготовленных из эквивалентных материалов [6 – 8].

Проведены испытания физических моделей проектируемых «каркасных» и «сотовых» горных конструкций с целью определения их оптимальных размеров и форм, а также количественной и качественной оценки напряженно-деформированного состояния [9 – 14].

Материал и оборудование

Физические модели для проведения экспериментов были изготовлены из элементов силикатного материала, свойства которого представлены в табл. 1.

Элементы модели нарезались из силикатных блоков на камнерезном станке Helmut. На следующем этапе конструировались модели из отдельных элементов с помощью монтажного клея с выдержкой вертикального и горизонтального уровня. Образец готовой модели представлен на рис. 1.

Таблица 1

Физические свойства силикатного материала
Physical properties of silicate materials

Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	15 – 19
GSI (геологический индекс прочности) модели	51 – 58
Структурный индекс mi	7 – 8
Модуль деформации (Юнга), ГПа	9,8 – 19,6
Сцепление, МПа	0,687 – 0,73
Угол внутреннего трения, град.	25,404 – 27,03
Коэффициент Пуассона	0,165 – 0,25
Водопоглощение, %	13 – 16
Постоянная Хука-Брауна mb	3,895 – 3,931
Постоянная Хука-Брауна s	0,002 – 0,0021
Постоянная Хука-Брауна a	0,504 – 0,506
Плотность, кг/м ³	1800 – 2000
Воздушная известь молотая негашеная, %	5 – 8
Кварцевый песок немолотый, %	82 – 87
Цемент, %	8 – 10
Вода, %	7

Перечень оборудования для подготовки и испытания физических моделей представлен в табл. 2.

В рамках реализации проекта РНФ № 19-17-00034 в НИЦ «Прикладная гео-

механика и конвергентные горные технологии» Горного института НИТУ «МИСиС» создан комплексный стенд (рис. 2) для подготовки и проведения физического и оптического моделиро-

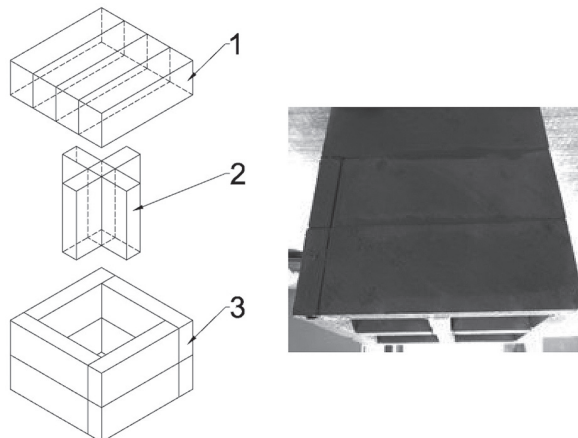


Рис. 1. Вариант модели «каркасной» горной конструкции: 1 – горизонтальные ограждающие каркасные конструкции; 2 – разделительные каркасные конструкции; 3 – вертикальные ограждающие каркасные конструкции

Fig. 1. Frame mine structure model: 1 – horizontal enclosing framing; 2 – separating framing; 3 – vertical enclosing framing

Таблица 2

Перечень оборудования для подготовки и испытания физических моделей
List of equipment for preparation and testing of physical models

Метод применения	Название оборудования
Методические рекомендации НИЦ «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии» Горного института НИТУ «МИСиС» «Расчет параметров систем разработки на основе физического моделирования геомеханических процессов с использованием эквивалентных материалов»	Станок отрезной Helmut ST350-800
	Установка алмазного бурения DD 250 (DD-HD 30)
	Комплексный стенд для физического моделирования с использованием полуавтоматического пресса П-125 (стенд разработан при участии доцента кафедры обогащения и переработки полезных ископаемых и техногенного сырья Горного института НИТУ «МИСиС» А.М. Думова)
	Линейка измерительная металлическая ГОСТ 34854-07
	Измерительный комплекс акустической эмиссии «A-Line DDM-1»

вания геомеханических процессов в полях напряжений, при разработке месторождений различных геологических типов новыми горными технологиями, представляющий из себя экспериментальную трехосную нагрузочную систему, которая включает:

- вертикальную раму — пресс П-125, позволяющий развивать усилие до 125 т силы;
- двухосную раму усилием 10 т (рис. 2), оснащенную двумя гидравлическими домкратами и опорными плитами;

- блок давления, состоящий из двух насосов с манометрами для подачи, контроля и поддержания горизонтальных напряжений (σ_2 и σ_3) на фронтальных поверхностях физической модели;

- систему сбора данных;
- тензорезисторы по ГОСТ 21616 — для измерения относительных продольных и поперечных деформаций;
- персональный компьютер для записи всех данных о нагрузках и деформациях.

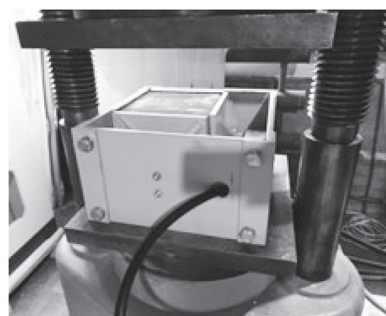
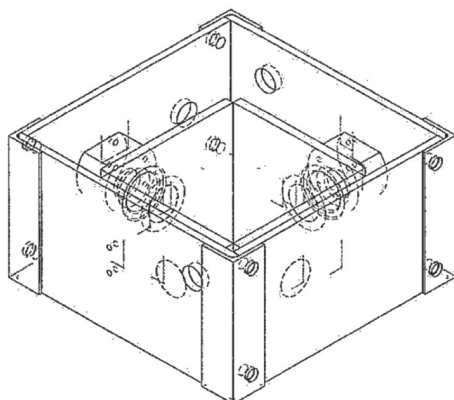


Рис. 2. Комплексный стенд для исследования прочностных, деформационных и акустических характеристик физических моделей и их конструктивных элементов при трехосном нагружении и имитации гравитационно-тектонического напряженного состояния массива

Fig. 2. Integrated strength, strain and acoustics testing machine for triaxial loading and gravitational–tectonic stress state simulation using physical models and structures

Методы испытаний и результаты

В работе применялась методика испытаний на трехосное сжатие физических моделей горных конструкций, разработанная в НИЦ «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии» Горного института НИТУ «МИСиС».

Исходя из поставленных конкретных задач, при испытании моделей более подробно изучалось распределение напряжений в массиве вокруг выработок; развитие деформаций и сдвижений толщи пород и земной поверхности; развитие деформаций, разрушений и смещений пород в призабойном пространстве и взаимодействие пород с крепью или системой крепления и т.п.

Физическая модель устанавливалась на испытательном стенде в соответствии с предлагаемой схемой (рис. 2) и оснащалась датчиками акустической эмиссии [15, 16]. Далее модель нагружалась до напряжения, эквивалентного $\sigma_1 =$

γH , т.е. до начального напряжения σ_0 . Деформации физической модели регистрировались в дискретной записи отсчетов. Интервал времени между отсчетами не превышал 10 с при нагрузке и разгрузке модели. При переходе от нагружения к разгрузке период времени не превышал 30 с.

Значения осевых вертикальных нагрузок при постоянных боковых нагрузках, осуществляемых и контролируемых с помощью гидравлических насосов, записывались в протокол испытания с помощью программного обеспечения (ПО) для прессы П-125. Соответствующие им показания регистрирующих приборов для деформаций (продольных и поперечных) также обрабатывались и фиксировались с помощью соответствующего ПО.

При значительной нелинейности изучаемой зависимости число интервалов диапазона для определения показателей

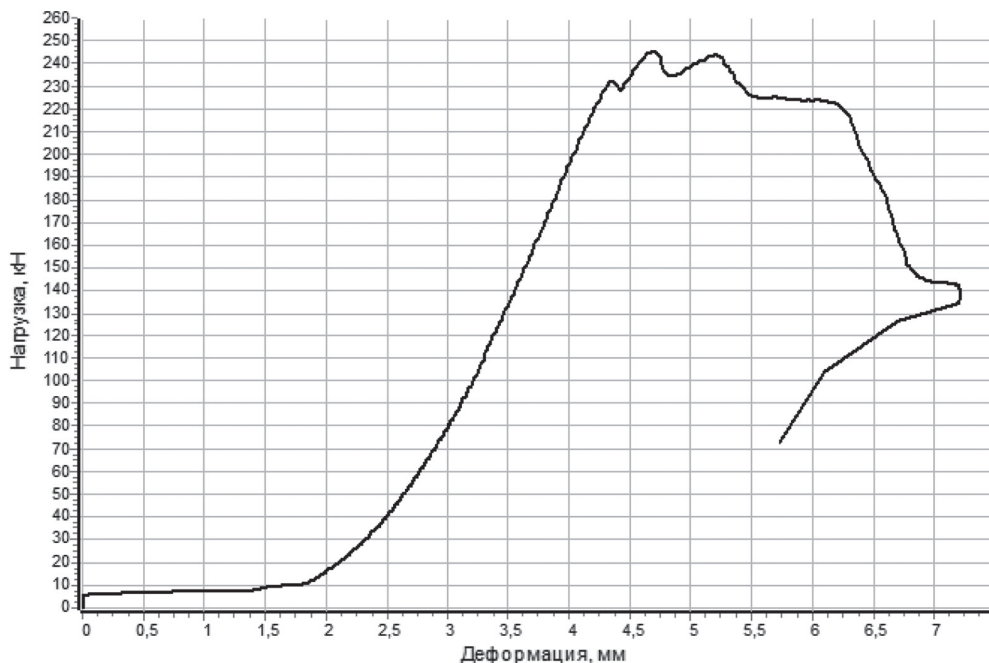


Рис. 3. Графическая зависимость нагрузка-деформация (продольная) для модели «сотовой» конструкции (в табл. 3 испытание № 4)

Fig. 3. Stress-strain (longitudinal) curve for honeycomb mine structure model (test no. 4 in Table 3)

Таблица 3

Результаты испытаний на трехосное сжатие моделей горных конструкций
Triaxial compression test data of model mine structures

№ испытания	Модель	Напряжение, МПа	Максимальная деформация, мм	Относительная деформация, %
1	модель «каркасная»	3,9	6,58	3,38
2	модель «каркасная»	3,9	4,2	2,42
3	модель «сотовая»	6,14	7,22	3,7
4	модель «сотовая»	6,32	5,32	3,82

увеличивалось, причем тщательнее исследовались те участки, где отмечалось наибольшее изменение интенсивности процесса.

Далее проводилось контрольное определение свойств эквивалентных материалов из части модели, не подвергнутой при испытаниях деформациям. Обработывались и анализировались результаты исследований путем построения зависимостей изучаемых параметров; полученные зависимости сопоставлялись с результатами натуральных наблюдений.

Результаты испытаний на трехосное сжатие физических моделей представлены в табл. 3 и на рис. 3.

Обсуждение результатов

Разработанная методика трехосного сжатия физических моделей из эквивалентных материалов показывает сопоставимость полученных результатов по измеренным напряжениям и деформациям от эксперимента к эксперименту. В научных целях данная методика применима для исследований деформационных свойств физических моделей различных горных конструкций.

Результаты испытаний на моделях также указывают на то, что при трехосном сжатии «сотовая» конструкция имеет деформации примерно одинаковые, в пределах погрешности, как и «каркасная», но при напряжении — на треть выше.

Такие результаты могут указывать на то, что «сотовая» конструкция прочнее «каркасной» при равных условиях.

Заключение

Моделирование на эквивалентных материалах позволяет с большей степенью детальности механизмов проследить геомеханические процессы в толще пород, особенно процессов деформирования с разрывом сплошности массива.

Разработанная методика физического моделирования на эквивалентных материалах дает возможность получить сопоставимые деформационные характеристики моделируемых горных конструкций.

Результаты моделирования указывают на перспективность развития проекта по созданию «сотовой» системы подземной разработки твердых полезных ископаемых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sidorov D., Ponomarenko T. Reduction of the ore losses emerging within the deep mining of bauxite deposits at the mines of OJSC «Sevuralboksitruuda» // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 302, article 012051. DOI: 10.1088/1755-1315/302/1/012051.

2. Еременко А. А., Конурун А. И., Штирц В. А., Приб В. В. Выявление зон повышенного горного давления на удароопасном железорудном месторождении // Горный журнал. — 2020. — № 1. — С. 78–81.

3. Рыбин В. В., Константинов К. Н., Каган М. М., Панасенко И. Г. Принципы организации комплексной системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия // Горный журнал. — 2020. — № 1. — С. 53–57.

4. Еременко В. А., Аксенов З. В., Пуль Э. К., Захаров Н. Е. Исследование структуры вторичного поля напряжений призабойной части подготовительных выработок при проходке выбросоопасных пластов с использованием программы Map3D // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 5. — С. 91–104. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-91-104.

5. Tiwari R. P., Rao K. S. Physical modeling of a rock mass under true triaxial stress state // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2004, vol. 41, pp. 396–401.

6. Глушихин Ф. П., Кузнецов Г. Н., Шклярский М. Ф. Моделирование в геомеханике. М.: Недра, 1991. — 240 с.

7. Arora K., Gutierrez M., Hedayat A. New physical model to study tunnels in squeezing clay-rich rock // Geotechnical Testing Journal. 2021, vol. 44, no. 6, article 20200081.

8. Arora K., Gutierrez M., Hedayat A. Physical modeling of lined tunnel in squeezing ground conditions / Geo-Congress 2020: Engineering, Monitoring and Management of Geotechnical Infrastructure. Minneapolis, 2020, pp. 335–344.

9. Трубецкой К. Н., Мясков А. В., Галченко Ю. П., Еременко В. А. Обоснование и создание конвергентных горных технологий подземной разработки мощных месторождений твердых полезных ископаемых // Горный журнал. — 2019. — № 5. — С. 6–13.

10. Galchenko Yu. P., Eremenko V. A., Kosyreva M. A., Vysotin N. G. Features of secondary stress field formation under anthropogenic change in subsoil during underground mineral mining // Eurasian Mining. 2020, no. 1, pp. 9–13. DOI: 10.17580/em.2020.01.02.

11. Еременко В. А., Галченко Ю. П., Косырева М. А. Оценка влияния геометрических параметров традиционно применяемых и природоподобных систем подземной разработки рудных месторождений на исходное поле напряжений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2020. — № 3. — С. 98–109.

12. Jiang Q., Feng X., Song L., Gong Y., Zheg H., Cui J. Modeling rockspecimens through 3D printing: Tentative experiments and prospects // Acta Mechanica Sinica. 2015, vol. 32, no. 1, pp. 524–535.

13. Kong L., Ostadhassan M., Li C., and Tamimi N. Rock physics and geomechanics of 3D printed rocks / ARMA 51st U.S. Rock Mechanics, Geomechanics Symposium. San Francisco, California, USA, 2017.

14. Gell E. M., Walley S. M., Braithwaite C. H. Review of the validity of the use of artificial specimens for characterizing the mechanical properties of rocks // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019, vol. 52, no. 9.

15. Еременко В. А., Галченко Ю. П., Высотин Н. Г., Лейзер В. И., Косырева М. А. Прочностные, деформационные и акустические характеристики физических моделей каркасных и сотовых горных конструкций // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2020. — № 6. — С. 93–104.

16. Галченко Ю. П., Лейзер В. И., Высотин Н. Г., Якушева Е. Д. Обоснование методики лабораторных исследований вторичного поля напряжений при создании и применении конвергентной горной технологии подземной разработки каменной соли // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 11. — С. 35–47. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-35-47. **ГИАН**

REFERENCES

1. Sidorov D., Ponomarenko T. Reduction of the ore losses emerging within the deep mining of bauxite deposits at the mines of OJSC «Sevuralboksitruda». *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 302, article 012051. DOI: 10.1088/1755-1315/302/1/012051.
2. Eremenko A. A., Konurin A. I., Shtirts V. A., Prib V. V. Identification of higher rock pressure zones in rockburst-hazardous iron ore deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 1, pp. 78–81. [In Russ].
3. Rybin V. V., Konstantinov K. N., Kagan M. M., Panasenko I. G. Methodology of integrated stability monitoring in mines. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 1, pp. 53–57. [In Russ].
4. Eremenko V. A., Aksenov Z. V., Pul E. K., Zakharov N. E. MAP 3D analysis of secondary stress field structure in face area of development headings in rockburst-hazardous seams. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 5, pp. 91–104. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-91-104.
5. Tiwari R. P., Rao K. S. Physical modeling of a rock mass under true triaxial stress state. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2004, vol. 41, pp. 396–401.
6. Glushikhin F. P., Kuznetsov G. N., Shklyarskiy M. F. *Modelirovanie v geomekhanike* [Modeling in geomechanics], Moscow, Nedra, 1991, 240 p.
7. Arora K., Gutierrez M., Hedayat A. New physical model to study tunnels in squeezing clay-rich rock. *Geotechnical Testing Journal*. 2021, vol. 44, no. 6, article 20200081
8. Arora K., Gutierrez M., Hedayat A. Physical modeling of lined tunnel in squeezing ground conditions. *Geo-Congress 2020: Engineering, Monitoring and Management of Geotechnical Infrastructure*. Minneapolis, 2020, pp. 335–344.
9. Trubetskoy K. N., Myaskov A. V., Galchenko Yu. P., Eremenko V. A. Creation and justification of convergent technologies for underground mining of thick solid mineral deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 5, pp. 6–13. [In Russ].
10. Galchenko Yu. P., Eremenko V. A., Kosyreva M. A., Vysotin N. G. Features of secondary stress field formation under anthropogenic change in subsoil during underground mineral mining. *Eurasian Mining*. 2020, no. 1, pp. 9–13. DOI: 10.17580/em.2020.01.02.
11. Eremenko V. A., Galchenko Yu. P., Kosyreva M. A. Effect of mining geometry on natural stress field in underground ore mining with conventional and nature-like technologies. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2020, no. 3, pp. 98–109. [In Russ].
12. Jiang Q., Feng X., Song L., Gong Y., Zheg H., Cui J. Modeling rockspecimens through 3D printing: Tentative experiments and prospects. *Acta Mechanica Sinica*. 2015, vol. 32, no. 1, pp. 524–535.
13. Kong L., Ostadhassan M., Li C., and Tamimi N. Rock physics and geomechanics of 3D printed rocks. *ARMA 51st U.S. Rock Mechanics, Geomechanics Symposium*. San Francisco, California, USA, 2017.
14. Gell E. M., Walley S. M., Braithwaite C. H. Review of the validity of the use of artificial specimens for characterizing the mechanical properties of rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019, vol. 52, no. 9.
15. Eremenko V. A., Galchenko Yu. P., Vysotin N. G., Leyzer V. I., Kosyreva M. A. Strength, deformation and acoustic characteristics of physical models of frame and honeycomb underground structures. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2020, no. 6, pp. 93–104. [In Russ].
16. Galchenko Yu. P., Leizer V. I., Vysotin N. G., Yakusheva E. D. Procedure justification for laboratory research of secondary stress field in creation and application of convergent technology for underground mining of rock salt. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 11, pp. 35–47. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-35-47.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Высотин Николай Геннадьевич¹ – старший преподаватель,

e-mail: kalgani@yandex.ru,

Хажыылай Чодураа Владимировна¹ – аспирант,

e-mail: chod.872198@mail.ru,

Косырева Марина Александровна¹ – аспирант,

e-mail: marinkosyreva@gmail.com,

Шерматова Сайера Сидиковна¹ – аспирант,

e-mail: s_shermatova@inbox.ru,

¹ ГИ НИТУ «МИСиС».

Для контактов: Высотин Н.Г., e-mail: kalgani@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

N.G. Vysotin¹, Senior Lecturer,

e-mail: kalgani@yandex.ru,

Ch.V. Khazhyulai¹, Graduate Student,

e-mail: chod.872198@mail.ru,

M.A. Kosyreva¹, Graduate Student,

e-mail: marinkosyreva@gmail.com,

S.S. Shermatova¹, Graduate Student,

e-mail: s_shermatova@inbox.ru,

¹ Mining Institute, National University

of Science and Technology «MISiS»,

119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: N.G. Vysotin, e-mail: kalgani@yandex.ru.

Получена редакцией 06.09.2021; получена после рецензии 10.09.2021; принята к печати 10.10.2021.

Received by the editors 06.09.2021; received after the review 10.09.2021; accepted for printing 10.10.2021.



ОТ РЕДАКЦИИ

В Горном информационно-аналитическом бюллетене № 9, 2021 в статье автора Скуфьина П. К. «Полувековой юбилей Кольской сверхглубокой буровой скважины СГ-3» на с. 159 допущена техническая ошибка:

№ стр.	Опубликовано	Должно быть
159	<p>Ключевые слова: сверхглубокое бурение, Кольская скважина СГ-3, Мурманская область, Балтийский щит, ранний докембрий.</p> <p>Для цитирования: Скуфьин П. К. Полувековой юбилей Кольской сверхглубокой буровой скважины СГ-3 // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 9. – С. 159–176. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_159.</p>	<p>Ключевые слова: сверхглубокое бурение, Кольская скважина СГ-3, Мурманская область, Балтийский щит, ранний докембрий.</p> <p>Благодарность: Результаты исследований получены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-18-00025).</p> <p>Для цитирования: Скуфьин П. К. Полувековой юбилей Кольской сверхглубокой буровой скважины СГ-3 // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 9. – С. 159–176. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_159.</p>