

- Глубина распространения II зоны изменяется от 11,52 до 20,11 м и в торце скважин от 9,30 до 17,94 м, в зависимости от типа ВВ.

Необходимо учитывать глубину распространения II зоны (особенно от торца взрывааемых вертикальных и наклонных скважинных зарядов ВВ) с точки зрения ее распространения в подкарьерном целике от границы максимальной глубины ведения ОГР в карьере. Данная область целика имеет ФМС, отличные от лабораторных экспериментальных данных и от свойств массива, нарушенного только природными трещинами (критерий прочности Хука–Брауна);

- Глубина распространения III зоны микротрещиноватости изменяется от 27,54 до 48,04 м и в торце скважин от 25,10 до 45,76 м, в зависимости от типа ВВ.

Необходимо учитывать глубину распространения III зоны (от торца взрывааемых вертикальных и наклонных скважинных зарядов ВВ) с точки зрения ее распространения в подкарьерном целике от границы максимальной глубины ведения ОГР в карьере. Данная область целика имеет микротрещины, которые способствуют улучшению коллекторских свойств массива, проницаемости и движению флюидов по трещинам и др., например, воды. Если чаша карьера будет обводнена, то вода может просачиваться через подкарьерный целик по зонам трещиноватости и природным трещинам в зону ведения ПГР. Например, III зона рассчитанной глубиной 45,76 м может распространяться практически на всю проектируемую мощность подкарьерного целика.

По результатам расчетов влияния взрыва на глубину формирования зон нарушенности пород ЗНП для условий взрывания шпуровых зарядов ВВ при проходке выработок:

- Глубина распространения I зоны дезинтеграции горной породы при про-

ведении выработок буровзрывным способом изменяется от 0,38 до 1,01 м и в торце шпуровых зарядов ВВ от 0,14 до 0,52 м, в зависимости от типа ВВ.

Необходимо учитывать глубину распространения I зоны для уточнения параметров и паспортов БВР, например, расстояний от контурных шпуров до проектного контура выработки или расстояний между основными и врубовыми шпуровыми зарядами ВВ;

- Глубина распространения II зоны изменяется от 1,26 до 2,65 м и в торце скважин от 0,66 до 1,89 м, в зависимости от типа ВВ.

Необходимо учитывать глубину II зоны с точки зрения ее распространения во вмещающем массиве выработок. Данная область массива имеет ФМС, отличные от лабораторных экспериментальных данных и от свойств массива, нарушенного только природными трещинами (критерий прочности Хука–Брауна), и снижает как минимум на одну категорию свою устойчивость. При этом данная область массива оказывает основное давление на крепь и испытывает ее несущую способность. В случае частичного или полного обрушения массива II зоны вывозится лишняя горная порода на гора при каждом цикле проходки и увеличивается пролет выработок, снижая их устойчивость;

- Глубина распространения III зоны микротрещиноватости изменяется от 3,27 до 6,43 м и в торце скважин от 2,37 до 5,54 м, в зависимости от типа ВВ.

Необходимо учитывать глубину распространения III зоны с точки зрения ее распространения во вмещающем массиве. Данная область имеет микротрещины, которые способствуют улучшению коллекторских свойств массива, проницаемости и движению флюидов по трещинам и др., например, воды. При наличии в массиве водоносных горизонтов вода будет распространяться в выработ-

ку, нарушать технологические процессы горного производства.

По результатам расчетов влияния взрыва на глубину формирования зон нарушенности пород ЗНП для условий взрывания скважинных зарядов ВВ при ведении очистных работ на ПГР:

- Глубина распространения I зоны дезинтегрированной горной породы при ведении очистных работ в камерах изменяется от 2,28 до 5,91 м и в торце скважинных зарядов ВВ от 1,35 до 2,57 м, в зависимости от типа ВВ.

Необходимо учитывать глубину распространения I зоны для уточнения параметров и паспортов БВР при ведении очистных работ, например, расстояний от торцов скважинных зарядов ВВ до проектного контура камеры, который в обязательном порядке следует сохранять для обеспечения безопасности работ (исключить увеличение проектной ширины пролета камер) и эффективности работ в будущих соседних камерах;

- Глубина распространения II зоны изменяется от 5,70 до 16,89 м и в торце скважин от 4,45 до 10,58 м, в зависимости от типа ВВ.

Необходимо учитывать глубину распространения II зоны с точки зрения ее распространения вглубь отрабатываемого, вмещающего и закладочного массива (нарушается целостность МКЦ, которые будут извлекаться). Данная об-

ласть целиков, вмещающего и закладочного массива имеет ФМС, отличные от лабораторных экспериментальных данных и от свойств массива, нарушенного только природными трещинами (критерий прочности массива Хука–Брауна), — глубину влияния взрыва необходимо учитывать при определении допустимого пролета обнажений камер, так как массив, нарушенный наведенными от взрыва трещинами, будет иметь меньшую устойчивость, чем до взрыва скважинных зарядов ВВ;

- Глубина распространения III зоны микротрещиноватости изменяется от 13,65 до 41,83 м и в торце скважин от 12,26 до 15,00 м, в зависимости от типа ВВ.

Необходимо учитывать глубину III зоны с точки зрения ее распространения во вмещающем массиве. Данная область имеет микротрещины, которые способствуют улучшению коллекторских свойств массива, проницаемости и движению флюидов по трещинам и др., например, воды. При наличии в массиве водоносных горизонтов вода будет распространяться в зону ведения очистных работ.

В работе принимал участие ведущий специалист по моделированию и гидрогеологии геотехнической службы ОсОО «Альянс Алтын» Плаксин Дмитрий Александрович.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Злобина Т. М., Петров В. А., Прокофьев В. Ю., Абрамов С. С., Котов А. А., Вольфсон А. А., Лексин А. Б. Сейсмогенная природа флюидодинамических структурных парагенезов Урянского золоторудного поля (Северо-Восточное Забайкалье) // Геология рудных месторождений. — 2020. — Т. 62. — № 4. — С. 291–320.
2. Сивков Д. В., Читалин А. Ф., Дергачев А. Л. Применение линеamentного анализа для выявления закономерностей локализации золотого оруденения на территории Тарынского рудного поля в Республике Саха (Якутия) // Исследование Земли из космоса. — 2020. — № 1. — С. 3–19.
3. Попов С. С., Читалин А. Ф., Сивков Д. В., Гришин Е. М. Геолого-структурные исследования и прогноз медно-золоторудной минерализации на месторождениях Сакдриси и Маднеули в Грузии / Труды VI Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия–2023.

Геологоразведочные технологии: наука и бизнес». Т. I (III). — Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2023. — С. 69–73.

4. Чикатуева В. Ю., Степанов Н. В., Читалин А. Ф., Корост Д. В. Методика изучения керна объектов золото-кварцевой формации с применением рентгеновской компьютерной томографии на примере месторождения Дразное (Республика Саха (Якутия)) // Руды и металлы. — 2021. — № 4. — С. 43–59. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10027.

5. Ермошкин Д. Н., Курманалиев К. З., Мансуров В. А., Межеловский В. И., Бабкин Е. А. Обоснование использования мозаичной системы целиков в безрудных блоках при отработке жильных месторождений золота // Горная промышленность. — 2023. — № 3. — С. 108–114.

6. Бронников Д. М., Замесов Н. Ф., Богданов Г. И. Разработка руд на больших глубинах. — М.: Недра, 1982. — 292 с.

7. Именитов В. Р. Системы подземной разработки рудных месторождений. — М.: МГГУ, 2000. — 297 с.

8. Рассказов И. Ю., Секисов А. Г., Чебан А. Ю. Повышение эффективности разработки сложноструктурных месторождений при опережающей выемке особо богатых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 4. — С. 6–19. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_5.

9. Акбаров Т. Г., Уразов Ж. Д., Нишанов А. Ш., Нишанов Д. К. Опыт и перспективы разработки сложноструктурных жил Кочбулакского золоторудного месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 2. — С. 97–110. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_97.

10. Еременко В. А., Косырева М. А., Высотин Н. Г., Хажыылай Ч. В. Геомеханическое обоснование параметров отработки месторождений каменных и полиминеральных солей, полигалитов по камерным системам // Горный журнал. — 2021. — № 1. — С. 37–43.

11. Кайсин В., Бин У., Ишань П., Хмелинин А. П., Чанышев А. И. Экспериментальное исследование влияния разрушения структурных блоков на параметры распространения продольных волн в породном массиве // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2024. — № 25. — С. 40–49.

12. Викторов С. Д., Закалинский В. М., Шиповский И. Е., Мингазов Р. Я. Влияние направленного взрывания на технологию разработки и геомеханическое состояние массива на больших глубинах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2024. — № 25. — С. 147–153.

13. Урбаев Д. А., Ахпашев Б. А., Галайко А. В., Новиков А. А. Разработка рекомендаций по выбору оптимальных вариантов снабжения взрывных работ при разработке золоторудных месторождений жильного типа // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 1. — С. 59–69. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_59.

14. Ржевский В. В. Физико-технические параметры горных пород. — М.: Недра, 1975. — 212 с.

15. Кутузов Б. Н., Марьясов А. Л., Совмен В. К., Токаренко А. В., Эквист Б. В. Сейсмическая безопасность при взрывных работах. — М.: Изд-во «Горная книга», 2012. — 228 с.

16. Гриб Г. В., Позынич А. Ю., Гриб Н. Н., Петров Е. Е. Зависимость сейсмического действия взрыва в массиве горных пород от технологических условий ведения буровзрывных работ // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2012. — № 14(1-8). — С. 2112–2117.

17. Holmberg R., Persson P. A. The Swedish approach to contour blasting / Proceedings of the 4th Conference on Explosives and Blasting Technique, SEE, 1978, pp. 113–127.

18. Holmberg R. Drilling and blasting of rock masses / Engineering in Rock Masses, Chapter 20. 1992, pp. 385–399.

19. Holmberg R. Explosives and blasting technique. 1st edition. CRC Press, 2000, 468 p.

20. Шапошник С. Н., Шапошник Ю. Н., Цой П. А., Неверов А. А. Удароопасности массива горных пород при отработке подкарьерных запасов месторождения САЯК-1 // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2025. — № 1. — С. 48–56. **ПИАБ**

REFERENCES

1. Zlobina T. M., Petrov V. A., Prokof'ev V. Yu., Abramov S. S., Kotov A. A., Volfson A. A., Leksina A. B. Seismogenic nature of fluid-dynamic structural parageneses of the Uryakh gold ore

- field (Northeastern Transbaikalia). *Geology of Ore Deposits*. 2020, vol. 62, no. 4, pp. 291–320. [In Russ].
2. Sivkov D. V., Chitalin A. F., Sivkov D. V., Grishin E. M. Geological structure analysis and copper gold ore mineralization prediction at the Sakdrisi and Madneuli deposits in Georgia. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2020, no. 1, pp. 3–19. [In Russ].
 3. Popov S. S., Chitalin A. F., Sivkov D. V., Grishin E. M. Geological structure analysis and copper gold ore mineralization prediction at the Sakdrisi and Madneuli deposits in Georgia. *Trudy VI Mezhdunarodnoy geologo-geofizicheskoy konferentsii «GeoEvraziya-2023. Geologorazvedochnye tekhnologii: nauka i biznes»* [GeoEurasia-2023. Exploration technologies: science and business. VI International Conference Proceedings], Tver, 2023, pp. 69–73. [In Russ].
 4. Chikatueva V. Yu., Stepanov N. V., Chitalin A. F., Korost D. V. X-ray computed tomography study for drill core of the Drazhnoe orogenic-type gold deposit (Sakha (Yakutia), Russian Federation). *Ores and Metals*. 2021, no. 4, pp. 43–59. [In Russ]. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10027.
 5. Ermoshkin D. N., Kurmanaliev K. Z., Mansurov V. A., Mezhelevsky V. I., Babkin E. A. Justification of applicability of the mosaic pillar system in the ore-free blocks in mining of lode gold deposits. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. 3, pp. 108–114. [In Russ].
 6. Bronnikov D. M., Zamesov N. F., Bogdanov G. I. *Razrabotka rud na bol'shikh glubinakh* [Deep-level ore mining], Moscow, Nedra, 1982, 292 p.
 7. Imenitov V. R. *Sistemy podzemnoy razrabotki rudnykh mestorozhdeniy* [Underground ore mining system], Moscow, MGGU, 2000, 297 p.
 8. Rasskazov I. Yu., Sekisov A. G., Cheban A. Yu. Enhancement of mining efficiency at structurally complex deposits with advanced extraction of very high-grade ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 4, pp. 6–19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_5.
 9. Akbarov T. G., Urazov J. D., Nishanov A. Sh., Nishanov D. K. Mining of structurally complex lodes at Kochbulak fold deposit: Experience and prospects. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 2, pp. 97–110. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_97.
 10. Eremenko V. A., Kosyreva M. A., Vysotin N. G., Khazhyylai Ch. V. Geomechanical justification of room-and-pillar dimensions for rock salt and polymineral salt mining. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 1, pp. 37–43. [In Russ].
 11. Wang Kaixing, Wu Bin, Pan Yishan, Khmelinin A. P., Chanyshv A. I. Experimental investigation of block fracture influence on p-wave propagation in block rock mass. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2024, no. 2S, pp. 40–49.
 12. Viktorov S. D., Zakalinskii V. M., Shipovskii I. E., Mingazov R. Ya. Effect of directed blasting on geotechnology and geomechanical behavior of rock mass in deep-level mining experimental investigation of block fracture influence on p-wave propagation in block rock mass. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2024, no. 2S, pp. 147–153. [In Russ].
 13. Urbaev D. A., Akhpahev B. A., Galaiko A. V., Novikov A. A. Recommendations on selecting optimized blasting supply scenarios in lode gold ore mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 1, pp. 59–69. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_59.
 14. Rzhavskiy V. V. *Fiziko-tekhnicheskie parametry gornyx porod* [Physicotechnical parameters of rocks], Moscow, Nedra, 1975, 212 p.
 15. Kutuzov B. N., Mar'yasov A. L., Sovmen V. K., Tokarenko A. V., Ekvist B. V. *Seysmicheskaya bezopasnost' pri vzryvnykh rabotakh* [Seismic safety in mining], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2012, 228 p.
 16. Grib G. V., Pozynich A. Yu., Grib N. N., Petrov E. E. Dependence of blasting-induced seismic effect on geotechnical conditions of blasting. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012, no. 14(1-8), pp. 2112–2117. [In Russ].
 17. Holmberg R., Persson P. A. The Swedish approach to contour blasting. *Proceedings of the 4th Conference on Explosives and Blasting Technique*, SEE, 1978, pp. 113–127.
 18. Holmberg R. Drilling and blasting of rock masses. *Engineering in Rock Masses*, Chapter 20. 1992, pp. 385–399.
 19. Holmberg R. *Explosives and blasting technique*. 1st edition. CRC Press, 2000, 468 p.
 20. Shaposhnik S. N., Shaposhnik Yu. N., Tsoi P. A., Neverov A. A. Rockburst hazard of rock mass during mining under open pit bottom at Sayak-1 deposit. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2025, no. 1, pp. 48–56. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Чуприн Константин Эдуардович*¹ — зам. генерального директора по производству, e-mail: chuprin.ke@alliance-altyn.kg,
*Мансуров Владимир Аглеевич*¹ — д-р физ.-мат. наук, профессор, советник генерального директора, e-mail: geomans43@gmail.com,
*Бабкин Евгений Анатольевич*¹ — начальник геотехнической службы, e-mail: babkin.ea@alliance-altyn.kg,
*Еременко Виталий Андреевич*² — д-р техн. наук, профессор РАН, профессор, директор, e-mail: prof.eremenko@gmail.com,
*Косырева Марина Александровна*² — канд. техн. наук, инженер, e-mail: marinkosyreva@gmail.com,
¹ ОсОО «Альянс Алтын», Бишкек, Киргизия,
² НИТУ МИСИС, Научно-исследовательский центр «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии».
Для контактов: Еременко В.А., e-mail: prof.eremenko@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*K.E. Chuprin*¹, Deputy CEO on Production, e-mail: chuprin.ke@alliance-altyn.kg,
*V.A. Mansurov*¹, Dr. Sci. (Phys. Mathem.), Professor, Counsellor to CEO, e-mail: geomans43@gmail.com,
*E.A. Babkin*¹, Head of Geotechnical Engineering Service, e-mail: babkin.ea@alliance-altyn.kg,
*V.A. Eremenko*², Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Russian Academy of Sciences, Director, Professor,
*M.A. Kosyreva*², Cand. Sci. (Eng.), Engineer, e-mail: marinkosyreva@gmail.com,
¹ Alliance Altyn LLC, Bishkek, Kirgizia,
² NUST MISIS, Research Center for Applied Geomechanics and Convergent Technologies in Mining, 119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: V.A. Eremenko, e-mail: prof.eremenko@gmail.com.

Получена редакцией 01.03.2025; получена после рецензии 18.04.2025; принята к печати 10.06.2025.
Received by the editors 01.03.2025; received after the review 18.04.2025; accepted for printing 10.06.2025.



ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ПОГЛОЩЕНИЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ ПРОТИВОКАМНЕПАДНЫХ ВАЛОВ С УЧЕТОМ ИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ И ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

О.Д. Белов

НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: below2idknet@inbox.ru

Аннотация: Проведено определение влияния основных физико-механических характеристик грунтов, входящих в конечно-элементную модель Мора–Кулона, на предельную энергию поглощения противокаменпадного предохранительного вала. Оценка выполнялась путем создания базовой модели по результатам ранее проведенных исследований, что позволило определить первичные геометрические параметры конструкции. Далее было проведено моделирование с последовательным изменением физико-механических характеристик грунтов и фиксации энергии обломка, при которой абсолютная деформация грунта предохранительного вала достигает значения его глубины, что равносильно разрушению конструкции. Моделирование выполнено в программном комплексе Plaxis 3D путем приложения динамической нагрузки с затуханием на 10% каждые 0,025 с, что позволяет симитировать поглощение энергии обломка предохранительным валом с постепенным затуханием. По результатам численного моделирования при помощи программного кода в среде Python было подобрано оптимальное уравнение регрессии с коэффициентом детерминации R^2 , равным 0,963, которое связывает глубину предохранительного вала и физико-механические характеристики грунта отсыпки с его энергией поглощения. Сходимость результатов численного моделирования и расчетных значений составила 97,5%, что позволяет использовать данную формулу для оценки предельной энергии поглощения противокаменпадных предохранительных валов.

Ключевые слова: камнепад, обломок, открытые горные работы, численное моделирование, предохранительный вал, Plaxis 3D, Python, проектирование, модель Мора–Кулона.

Для цитирования: Белов О. Д. Оценка энергии поглощения предохранительных противокаменпадных валов с учетом их конструкционных и геотехнических параметров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 7. – С. 24–37. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_24.

Evaluation of energy absorption capacity of anti rockfall barriers with regard to their design parameters and geotechnical properties

O.D. Belov

NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: below2idknet@inbox.ru

Abstract: The study determined the influence exerted by the main physical and mechanical properties of ground, included in the finite element Mohr–Coulomb model, on the energy absorption capacity of an anti rockfall barrier. First, a reference model was constructed using the earlier research results, which produced the primary dimensions of the structure. Then, the modeling involved gradual changes in the physical and mechanical characteristics of ground with recording of an impact energy such that absolute deformation of the safety barrier reached its depth, which is equal to failure of the structure. The modeling was performed in Plaxis 3D, with dynamic loading with an attenuation by 10% every 0.025 s, which simulated impact energy absorption by the safety barrier with a gradual attenuation. Using the numerical modeling results and a Python code, an optimum regression equation was captured with a coefficient of determination R^2 0.963. The equation connects the depth and the physical and mechanical properties of a safety barrier with its impact absorption energy. Agreement of the modeling and calculation results is 97.5%, which allows using the formula for estimating limit energy absorption capacities of anti rockfall barriers.

Key words: rockfall, stone, open pit mining, numerical modeling, safety barrier, Plaxis 3D, Python, design, Mohr–Coulomb model.

For citation: Belov O. D. Evaluation of energy absorption capacity of anti rockfall barriers with regard to their design parameters and geotechnical properties. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(7):24–37. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_24.

Введение

Противокаменпадные барьеры представляют собой конструкции, обеспечивающие торможение горных масс, сошедших с естественных и искусственных склонов [1]. Современные противокаменпадные барьеры можно классифицировать по следующим критериям [2–6]:

- конструкция барьера — ограждения сетчатого типа или грунтовые предохранительные валы;
- максимальная кинетическая энергия обломка, которую барьер может поглотить без разрушения — до 100 кДж, до 8500 кДж и до 20 000 кДж.

С точки зрения конструкции на сегодняшний день существует 3 типа противокаменпадных барьеров (см. рис. 1):

- негнущиеся — жесткие ограждения сетчатого типа, закрепленные на неподвижных опорах, максимальная энергия поглощения до 100 кДж;
- динамические — гибкие барьеры из плетеной кольцужной сети, закреп-

ленные на подвижных опорах с дополнительными тросовыми креплениями, максимальная энергия поглощения до 8500 кДж;

- предохранительные валы — армогрунтовая конструкция, представляющая собой насыпь, армированную геосинтетическими или композитными материалами, максимальная энергия поглощения до 20 000 кДж.

В работе проведено исследование возможностей использования предохранительных валов, что обусловлено их малой изученностью, а также тем, что они характеризуются наибольшими значениями поглощаемой энергии. Исследование проведено с учетом ранее полученных результатов по моделированию движения обломков горных пород в программном комплексе RAMMS: Rockfall [7]. Для расчета был принят обломок эквивалентной формы, массой 2700 кг и объемом 1 м³. Его характеристики, полученные в результате численного мо-

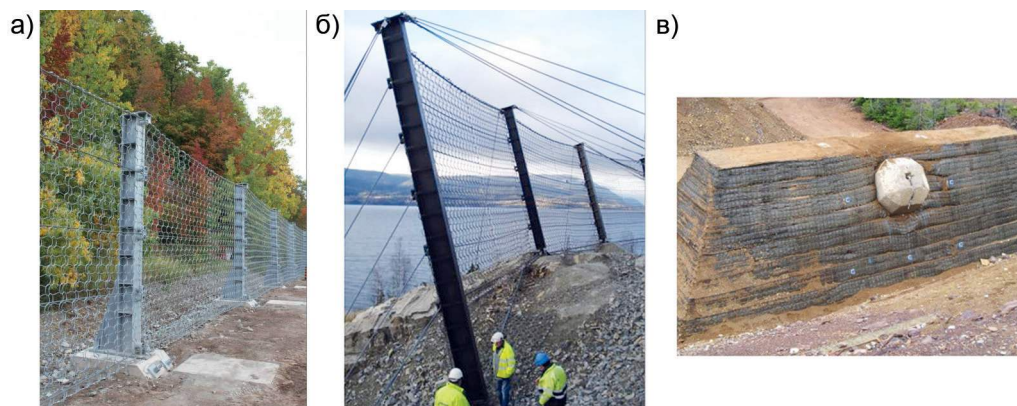


Рис. 1. Типовые конструкции улавливающих барьеров: негнущийся барьер (а); динамический барьер (б); предохранительный вал (в)

Fig. 1. Typical designs of catching barriers: rigid barrier (a); dynamic barrier (b); safety embankment (v)

делирования, приведены в табл. 1 [7]. Максимальная высота отскока обломка равняется 5,4 м, максимальная кинетическая энергия 813 кДж.

Создание конечно-элементной модели предохранительного вала

Для создания конечно-элементной модели вала требуется определить геометрические характеристики самого вала: высоту h , ширину b , глубину d , а также угол заложения откосной части α [8–12]. Схема предохранительного вала представлена на рис. 2.

Высоту барьера определим исходя из максимальной высоты отскока обломка, которая равняется 5,4 м [7]. Следовательно, высота барьера должна быть не

меньше данного значения. Для создания первичной модели примем высоту равной 6,0 м. Ширину барьера возьмем равной удвоенной высоте (12 м), глубину — половине высоты (3 м).

Также для создания конечно-элементной модели требуется определить характеристику грунта отсыпки предохранительного вала. В качестве грунтовой модели принята модель Мора–Кулона.

Физико-механические характеристики грунтов определены в соответствии с приложением А СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83». Удельный вес грунта γ 16 кН/м³, модуль Юнга E 44 МПа, коэффициент

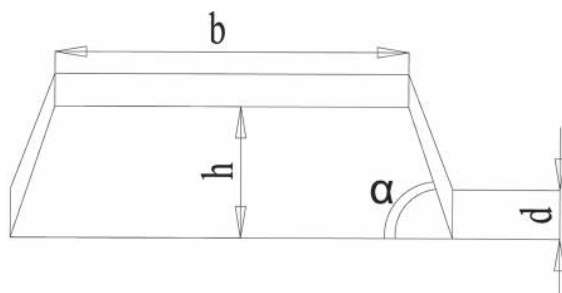


Рис. 2. Геометрические характеристики предохранительного вала

Fig. 2. Geometric characteristics of the safety embankment

Пуассона ν 0,33, удельное сцепление c 45 кПа, угол внутреннего трения φ 34°.

При расчете принято допущение, что вся кинетическая энергия обломка E_{tot} (см. табл. 1) переходит в работу деформации A_{def} грунта.

$$E_{\text{tot}} = A_{\text{def}} = 813 \text{ кДж.} \quad (1)$$

В этом случае средняя сила, приложенная к поверхности предохранительного вала, определяется следующим соотношением:

$$F = \frac{A_{\text{def}}}{d} = \frac{813 \cdot 10^3}{3} = 271 \text{ кДж,} \quad (2)$$

где d — глубина предохранительного вала, м.

Тогда значение средней силы F = 271 кН, а давление на грунт

$$P = \frac{F}{S} = 244 \text{ кН/м}^2, \quad (3)$$

где $S = 1,11 \text{ м}^2$ — площадь контакта обломка с поверхностью предохранительного вала.

Нагрузка будет задаваться как динамическая с затуханием на 10% каждые 0,025 с — таким образом будет имитироваться поглощение энергии предохранительным валом.

Распределение деформации грунта по направлению приложения нагрузки представлено на рис. 3.

Максимальное значение деформации составило 17,7 см, следовательно, разрушение не наступило; данное значение деформации принято за базисный уровень при проведении численного моделирования.

Изучение влияния изменений физико-механических характеристик грунта отсыпки на деформацию предохранительного вала

На следующем этапе расчетов проведено исследование влияния изменения физико-механических свойств грунта отсыпки предохранительного вала на его абсолютную деформацию по направлению приложения нагрузки [13–16].

В табл. 1 приведены значения физико-механических характеристик грунтов, использованные при численном моделировании.

На рис. 4 показано распределение деформации грунта предохранительного вала по направлению приложения нагрузки при удельном сцеплении, равном 15 кН/м².

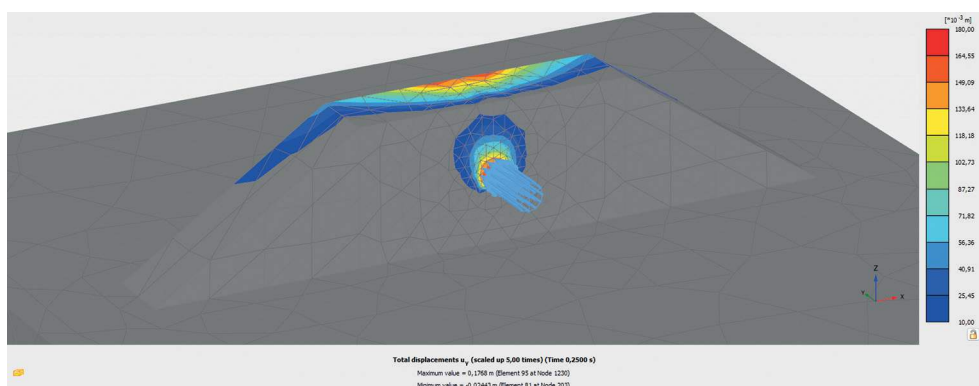


Рис. 3. Распределение деформации грунта предохранительного вала по направлению приложения нагрузки при $d = 3$ м, $c = 45$ кПа, $E = 44$ МПа, $\varphi = 34^\circ$, $\nu = 0,33$

Fig. 3. Isolines of soil deformation of the safety embankment in the direction of load application at $d = 3$ m, $c = 45$ kPa, $E = 44$ MPa, $\varphi = 34$ deg., $\nu = 0,33$

График зависимости абсолютной деформации грунта предохранительного вала от его удельного сцепления представлен на рис. 5.

По результатам численного моделирования можно сделать вывод, что изменение удельного сцепления оказывает большое влияние на способность предохранительного вала поглощать кинетическую энергию обломков. Обусловлено это тем, что малые значения удельного сцепления характеризуют несвязные грунты и, как следствие, большая часть

объема предохранительного вала не участвует в поглощении энергии обломка, что хорошо видно из рис. 4, где большая часть грунта не подвержена деформациям.

На рис. 6 представлены изолинии деформации грунта предохранительного вала по направлению приложения нагрузки при минимальном модуле Юнга, равном 14 МПа. График зависимости абсолютной деформации грунта предохранительного вала от модуля Юнга представлен на рис. 7.

Таблица 1

Характеристики грунта для численного моделирования
Soil characteristics for numerical modeling

Глубина вала, м	Характеристики грунта				
	грунт	удельное сцепление, кПа	модуль Юнга, МПа	коэффициент Пуассона	угол внутреннего трения, град.
3	супеси и пески элювиальные	15	44	0,33	34
3		20	44	0,33	34
3		25	44	0,33	34
3		30	44	0,33	34
3		35	44	0,33	34
3		40	44	0,33	34
3		45	44	0,33	34
3		45	14	0,33	34
3		45	19	0,33	34
3		45	24	0,33	34
3		45	29	0,33	34
3		45	34	0,33	34
3		45	39	0,33	34
3	щебень	45	44	0,22	34
3	брекчия	45	44	0,27	34
3	суглинок	45	44	0,4	34
3	супеси и пески элювиальные	45	44	0,33	20
3		45	44	0,33	25
3		45	44	0,33	30
3		45	44	0,33	40
2		45	44	0,33	34
1		45	44	0,33	34
4		45	44	0,33	34
5		45	44	0,33	34

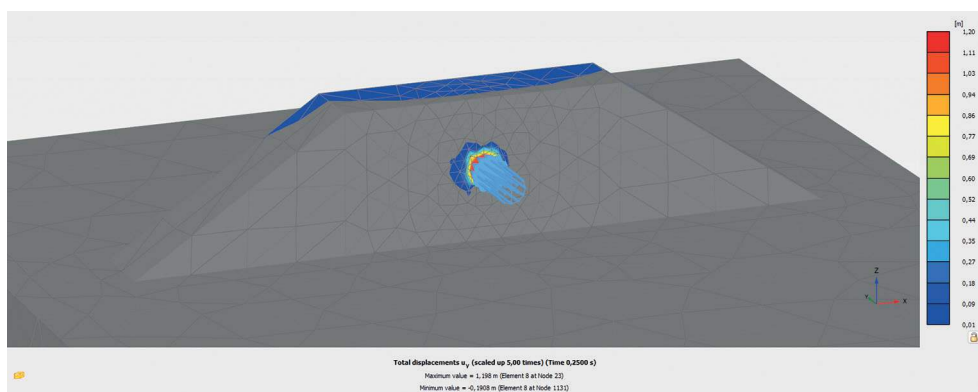


Рис. 4. Распределение деформации грунта предохранительного вала по направлению приложения нагрузки при $d = 3$ м, $c = 15$ кПа, $E = 44$ МПа, $\varphi = 34^\circ$, $\nu = 0,33$

Fig. 4. Isolines of soil deformation of the safety embankment in the direction of load application at $d = 3$ м, $c = 15$ kPa, $E = 44$ MPa, $\varphi = 34$ deg., $\nu = 0,33$

Как видно из рис. 7, изменение модуля Юнга без изменения коэффициента Пуассона, что равносильно изменению прочностных характеристик грунта, не оказывает сильного влияния на деформации.

На рис. 8 представлены изолинии деформации грунта предохранительного вала по направлению приложения нагрузки при минимальном коэффициенте Пуассона, равном 0,22.

График зависимости абсолютной деформации грунта предохранительного

вала от коэффициента Пуассона представлен на рис. 9.

Как видно из рис. 9, изменение коэффициента Пуассона не оказывает значительного влияния на значения деформации.

На рис. 10 показаны изолинии деформации грунта предохранительного вала по направлению приложения нагрузки при минимальном значении угла внутреннего трения, равном 20°

График зависимости деформации от угла внутреннего трения изображен на

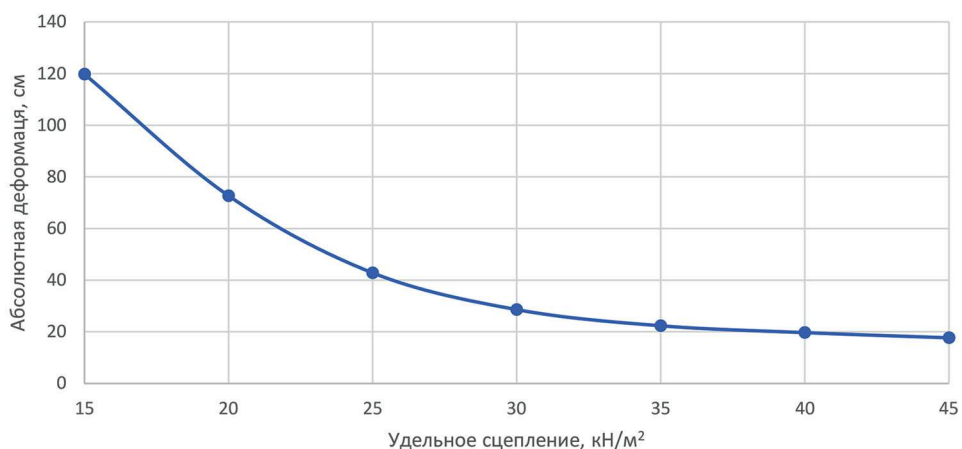


Рис. 5. График зависимости абсолютной деформации грунта от удельного сцепления

Fig. 5. Graph of the dependence of absolute soil deformation on specific adhesion

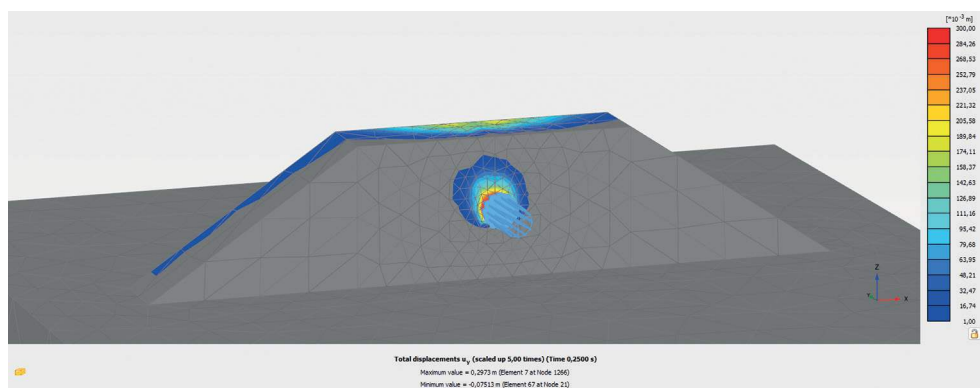


Рис. 6. Распределение деформации грунта предохранительного вала по направлению приложения нагрузки при $d = 3$ м, $c = 45$ кПа, $E = 14$ МПа, $\varphi = 34^\circ$, $\nu = 0,33$

Fig. 6. Isolines of soil deformation of the safety embankment in the direction of load application at $d = 3$ m, $c = 45$ kPa, $E = 14$ MPa, $\varphi = 34$ deg., $\nu = 0,33$

рис. 11. Как видно из рис. 11, уменьшение угла внутреннего трения соответствует значительному росту деформации. Это обусловлено тем, что угол внутреннего трения характеризует способность грунтов сопротивляться сдвиговым деформациям [17 – 20].

Дополнительно для каждого набора входных параметров, представленных в табл. 1, было проведено моделирование с повышением энергии обломка, пока абсолютная деформация предохранительного вала не сравняется с его глубиной,

что позволяет оценить предельное значение кинетической энергии обломка, которую может поглотить предохранительный вал без разрушения. Сводная таблица результатов численного моделирования энергии поглощения предохранительных валов приведена в табл. 2.

На основании значений, полученных при помощи численного моделирования, и программного кода в среде Python был произведен подбор оптимального уравнения регрессии, которое связывает глубину предохранительного вала d

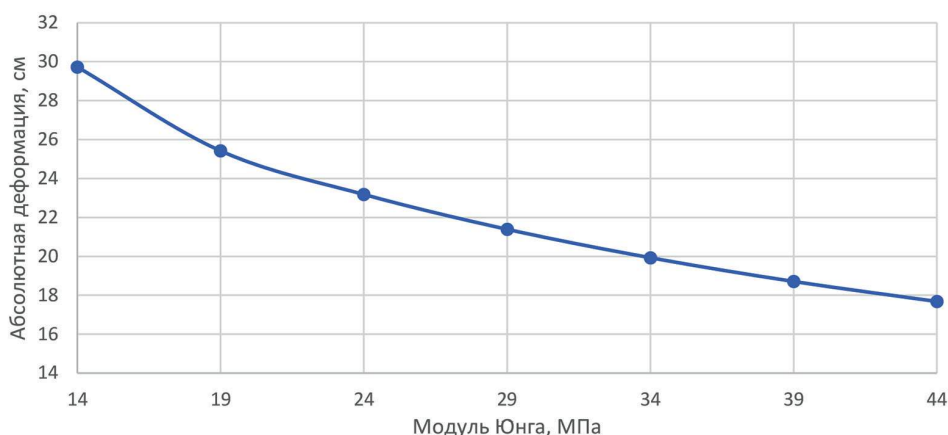


Рис. 7. График зависимости абсолютной деформации грунта от модуля Юнга

Fig. 7. Graph of the dependence of absolute soil deformation on Young's modulus

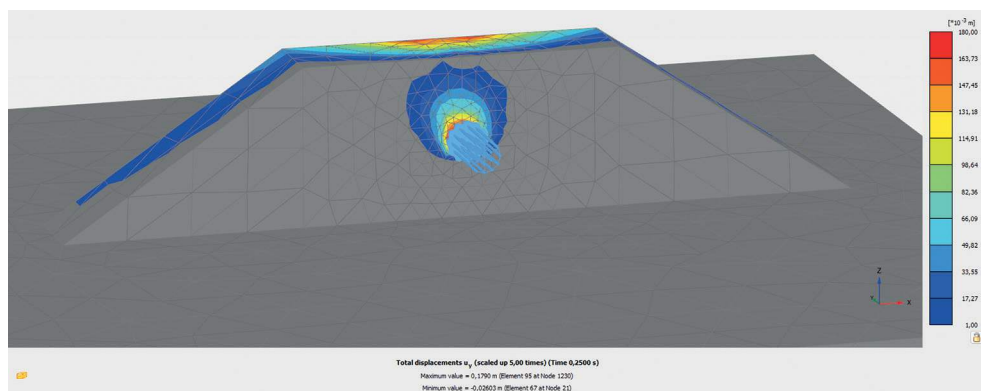


Рис. 8. Распределение деформации грунта предохранительного вала по направлению приложения нагрузки при $d = 3$ м, $c = 45$ кПа, $E = 44$ МПа $\varphi = 34^\circ$, $\nu = 0,22$

Fig. 8. Isolines of soil deformation of the safety embankment in the direction of load application at $d = 3$ м, $c = 45$ kPa, $E = 44$ MPa, $\varphi = 34$ deg., $\nu = 0,22$

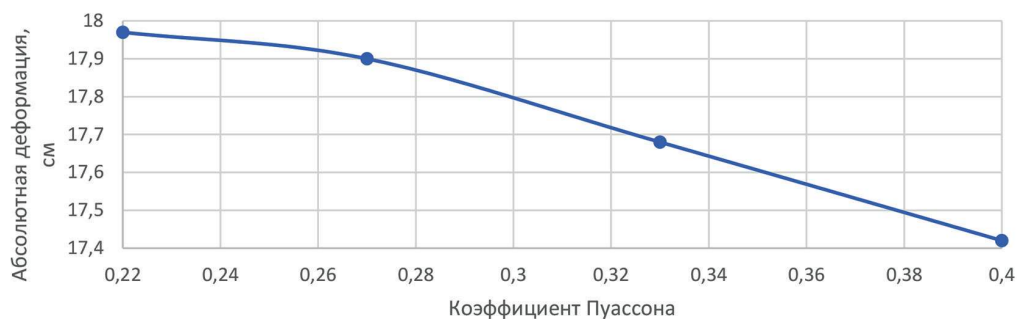


Рис. 9. График зависимости абсолютной деформации грунта от коэффициента Пуассона

Fig. 9. Graph of the dependence of absolute soil deformation on Poisson's ratio

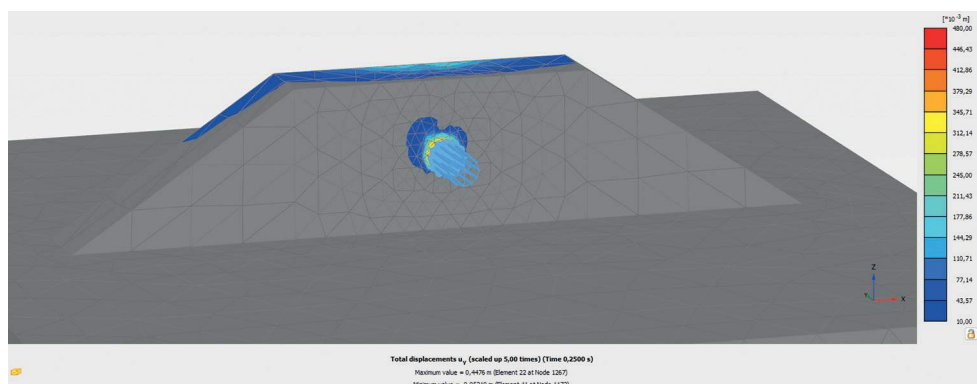


Рис. 10. Распределение деформации грунта предохранительного вала по направлению приложения нагрузки при $d = 3$ м, $c = 45$ кПа, $E = 44$ МПа, $\varphi = 20^\circ$, $\nu = 0,33$

Fig. 10. Isolines of soil deformation of the safety embankment in the direction of load application at $d = 3$ м, $c = 45$ kPa, $E = 44$ MPa, $\varphi = 20$ deg., $\nu = 0,33$

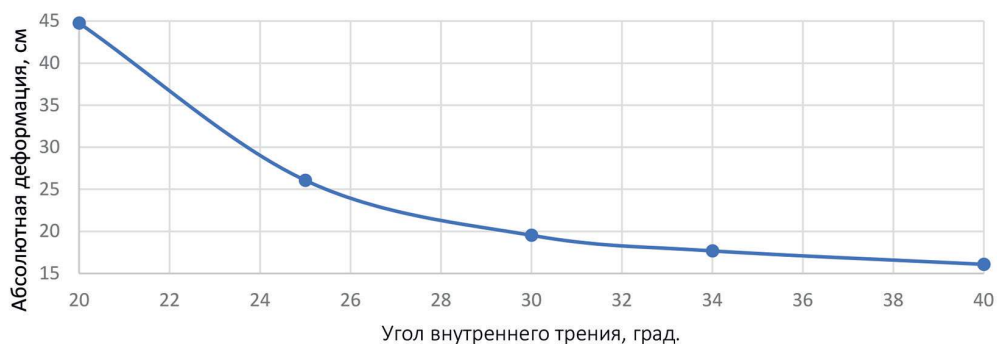


Рис. 11. График зависимости абсолютной деформации грунта от угла внутреннего трения
 Fig. 11. Graph of the dependence of absolute soil deformation of the angle of internal friction

Таблица 2

Результаты численного моделирования энергии поглощения предохранительных валов
Results of numerical modeling of energy absorption of safety embankment

Глубина вала, м	Характеристики грунта					энергия поглощения барьера, кДж
	грунт	удельное сцепление, кПа	модуль Юнга, МПа	коэффициент Пуассона	угол внутреннего трения, град.	
3	супеси и пески элювиальные	15	44	0,33	34	6027
3		20	44	0,33	34	8255
3		25	44	0,33	34	9564
3		30	44	0,33	34	10 553
3		35	44	0,33	34	11 578
3		40	44	0,33	34	11 682
3		45	44	0,33	34	12 384
3		45	14	0,33	34	11 492
3		45	19	0,33	34	11 991
3		45	24	0,33	34	12 168
3		45	29	0,33	34	12 248
3		45	34	0,33	34	12 318
3		45	39	0,33	34	12 348
3	щебень	45	44	0,22	34	12 271
3	брекчия	45	44	0,27	34	12 328
3	суглинок	45	44	0,4	34	12 448
3	супеси и пески элювиальные	45	44	0,33	20	6487
3		45	44	0,33	25	8482
3		45	44	0,33	30	10 749
3		45	44	0,33	40	14 935
2		45	44	0,33	34	4027
1		45	44	0,33	34	595
4		45	44	0,33	34	22 946
5		45	44	0,33	34	38 695

[М] и физико-механические характеристики грунта (модуль Юнга E [МПа], коэффициент Пуассона ν , удельное сцепление c [кПа], угол внутреннего трения γ [град.]) с его энергией поглощения, значение коэффициента детерминации R^2 составило 0,963. Уравнение имеет вид полинома второй степени, коэффициенты для подстановки приведены в табл. 3.

$$A_{def} = S \cdot d \cdot (k_0 + k_d \cdot d + k_c \cdot c + k_E \cdot E + k_\nu \cdot \nu + k_\phi \cdot \phi + k_{d2} \cdot d^2 + k_{dA} \cdot d \cdot c + k_{de} \cdot d \cdot E + k_{d\nu} \cdot d \cdot \nu + k_{d\phi} \cdot d \cdot \phi + k_{c2} \cdot c^2 + k_{cE} \cdot c \cdot E + k_{c\nu} \cdot c \cdot \nu + k_{c\phi} \cdot c \cdot \phi + k_{E2} \cdot E^2 + k_{E\nu} \cdot E \cdot \nu + k_{E\phi} \cdot E \cdot \phi + k_{\nu2} \cdot \nu^2 + k_{\nu\phi} \cdot \nu \cdot \phi + k_{\phi2} \cdot \phi^2)$$

где S — площадь контакта обломка с валом, равная $1,1 \text{ м}^2$

По формуле (4) был произведен расчет энергии поглощения для каждого набора входных данных, сравнение представлено в табл. 4.

Сходимость результатов численного моделирования и расчетных значений составила 97,5%, что является достаточным для оценки энергии поглощения барьера без проведения численного моделирования.

Заключение

В результате проведения численного моделирования предохранительных валов в программном комплексе Plaxis 3D определено, что наибольшее влияние из физико-механических характеристик грунтов, входящих в конечно-элементную модель Мора-Кулона, на энергию поглощения предохранительного вала оказывает удельное сцепление, а наименьшее влияние — коэффициент Пуассона. Следовательно, при проектирова-

Таблица 3

Коэффициенты подстановки для уравнения энергии поглощения
Substitution coefficients for the absorption energy equation

Коэффициент	Значение	Размерность
k_0	-8150,913	кН/м ²
k_d	-0,386	кН/(м·м ²)
k_c	0,340	кН/(кПа·м ²)
k_E	-0,030	кН/(МПа·м ²)
k_ν	-14,381	кН/м ²
k_ϕ	-0,094	кН/(град·м ²)
k_{d2}	1911,141	кН/(м·м·м ²)
k_{dc}	-16,328	кН/(м·кПа·м ²)
k_{dE}	-17,052	кН/(м·МПа·м ²)
$k_{d\nu}$	-43,270	кН/(м·м ²)
$k_{d\phi}$	-13,390	кН/(м·град·м ²)
k_{c2}	-6,704	кН/(кПа·кПа·м ²)
k_{cE}	13,639	кН/(кПа·МПа·м ²)
$k_{c\nu}$	-647,036	кН/(кПа·м ²)
$k_{c\phi}$	7,343	кН/(кПа·град·м ²)
k_{E2}	-2,832	кН/(МПа·МПа·м ²)
$k_{E\nu}$	-632,777	кН/(МПа·м ²)
$k_{E\phi}$	-5,142	кН/(МПа·град·м ²)
$k_{\nu2}$	111 420,377	кН/м ²
$k_{\nu\phi}$	-488,987	кН/(град·м ²)
$k_{\phi2}$	8,118	кН/(град·град·м ²)

нии данного вида барьеров рекомендуется подбирать грунты с максимальным возможным удельным сцеплением, либо предусматривать мероприятия по увеличению степени связности грунтов путем внесения органических или неорганических вяжущих веществ.

На основании вышесказанного следует, что при проектировании противокамнепадных предохранительных валов следует подбирать грунты отсыпки с максимальным значением удельного сцепления, а именно глины и суглинки, что позволит оптимизировать размеры кон-

Таблица 4

Сравнение результатов численного моделирования энергии поглощения предохранительных валов и расчетных значений

Comparison of the results of numerical modeling of the energy absorption of safety embankment and calculated values

Глубина вала, м	Характеристики грунта					Энергия поглощения вала, кДж	
	грунт	удельное сцепление, кН/м ²	модуль Юнга, МПа	коэффициент Пуассона	угол внутреннего трения, град.	результаты моделирования	расчетные значения
3	супеси и пески элювиальные	15	44	0,33	34	6027	6354
3		20	44	0,33	34	8255	8119
3		25	44	0,33	34	9564	9548
3		30	44	0,33	34	10 553	10 643
3		35	44	0,33	34	11 578	11 402
3		40	44	0,33	34	11 682	11 826
3		45	44	0,33	34	12 384	11 915
3		45	14	0,33	34	11 492	11 475
3		45	19	0,33	34	11 991	11 902
3		45	24	0,33	34	12 168	12 188
3		45	29	0,33	34	12 248	12 332
3		45	34	0,33	34	12 318	12 335
3		45	39	0,33	34	12 348	12 196
3	щебень	45	44	0,22	34	12 271	13 284
3	брекчия	45	44	0,27	34	12 328	12 328
3	суглинок	45	44	0,4	34	12 448	12 448
3	супеси и пески элювиальные	45	44	0,33	20	6487	7142
3		45	44	0,33	25	8482	8481
3		45	44	0,33	30	10 749	10 227
3		45	44	0,33	40	14 935	14 935
2		45	44	0,33	34	4027	4314
1		45	44	0,33	34	595	536
4		45	44	0,33	34	22 946	23 338
5		45	44	0,33	34	38 695	38 583

струкции и избежать дополнительных мероприятий по укреплению, что существенно снизит итоговые размеры и стоимость конструкции.

Также выведено уравнение, которое позволяет оценить предельную энергию, которую может поглотить предохранительный вал без разрушения. При помощи данного уравнения, зная физико-

механические характеристики грунта, который будет использован для отсыпки, и прогнозируемые значения максимальной кинетической энергии обломка, можно подобрать оптимальную глубину d предохранительного вала. Высоту предохранительного вала h следует назначать исходя из максимальной прогнозируемой высоты отскока обломка, угол

заложения откосной части α не должен превышать угол внутреннего трения грунта, ширина предохранительного ва-

ла b определяется индивидуально для каждого проекта в зависимости от зоны, которую следует оградить от обломков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбачева Т. М. Обеспечение безопасности объекта под скалистым уступом от камнепадов: решение «Маккаферри» во Франции // Геоинфо. — 2022. — № 12. — С. 46–55.
2. Фольквейн А., Фулде М., Кригер-Хауксон И. Оценка возможностей и надежности гибких систем защиты от камнепадов // Геоинфо. — 2021. — № 7. — С. 42–47.
3. Шеина Т. В., Авдеева Е. А. Технологии защиты автодорог от камнепадов // Градостроительство и архитектура. — 2018. — № 8(1). — С. 28–34.
4. Bichler A., Stelzer G. Special solutions in hazard mitigation // Proceedings of the 6-th Canadian GeoHazards Conference (GeoHazards 6), Queen's University in Kingston, Kingston, Ontario, Canada, 2014. The Canadian Geotechnical Society (CGS), pp. 1–8.
5. Решетняк С. П., Фокин В. А., Тарасов Г. Е., Александров В. А., Тогунов М. Б., Данилкин А. А., Каира В. Е. Гравитационные аспекты обеспечения безопасности работ в прибортовой зоне карьера // Горный журнал. — 2005. — № 2. — С. 71–72.
6. Мелихов М. В., Чащинов Г. В. Применение технологии скейлинг для защиты карьерного автотранспорта от камнепадов // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. — 2017. — № 14. — С. 311–314.
7. Белов О. Д. Зависимость кинетической энергии, максимальной высоты отскока, горизонтального перемещения и скорости обломка камнепада от его формы // Труды РАНИМИ. — 2024. — № 3-1(41). — С. 246–267. DOI: 10.24412/2519-2418-2024-341-246-267.
8. Kwan J. S. H., Sze E. H. Y., Lam C. Finite element analysis for rockfall and debris flow mitigation works // Canadian Geotechnical Journal. 2019, vol. 56, no. 9, pp. 1225–1250. DOI: 10.1139/cgj-2017-0628.
9. Vigna S., Marchelli M., Biagi V., Peila D. Numerical simulation of rockfall protection embankments in natural soil // Geosciences. 2023, vol. 368. DOI: 10.3390/geosciences13120368.
10. Lambert S., Bourrier F. Design of rockfall protection embankments: A review // Engineering Geology. 2013, vol. 154, pp. 77–88. DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.12.012.
11. Ronco C., Oggeri C., Peila D. Design of reinforced ground embankments used for rockfall protection // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2009, vol. 9, no. 4. DOI: 10.5194/nhess-9-1189-2009.
12. Maegawa K. Experiments on rockfall protection embankments with geogrids and cushion // International Journal of GEOMATE. 2011, vol. 1, no. 1, pp. 19–24.
13. Zhiwei X., Liang Lu G. Numerical investigation on the response of ground-reinforced embankments under repeated impact // Engineering Geology. 2025, vol. 345, article 107875. DOI: 10.1016/j.enggeo.2024.107875.
14. Lambert S., Gupta R., Bourrier F., Vincent A. On the simulation-based quantification of energy dissipation in rockfall protection structures: Case of an articulated wall modelled with the NSCD method // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2025, vol. 58, pp. 1957–1973. DOI: 10.1007/s00603-024-04222-9.
15. Maheshwari S., Bhowmik R. Performance assessment of a protection embankment designed for a rockfall-prone slope along lesser Himalayas of Jammu and Kashmir, India // Natural Hazards. 2024. DOI: 10.1007/s11069-024-06959-6.
16. Maheshwari S., Bhowmik R., Cuomo S. Impact performance of unreinforced and geogrid-reinforced rockfall protection embankment // Geosynthetics International. 2024, vol. 19, no. 6, pp. 1–21. DOI: 10.1680/jgein.23.00159.
17. Luc Leroy Mambou Ngueyep, Kenmoe Oscar Rodrigue Michel, Tchognia Nkuissi Hervé Joël, Lawou Kouayep Sylvain, Nkenwoum Chebou Gael, Chéagé Chamgoué André, Mohamadou Innoua Comparative analysis of the slope stability using slide and plaxis 2D software: A case study of Tombel Pozzolan Quarry (South-West Cameroon) // Applied and Environmental Soil Science. 2024, vol. 8, article 8260177. DOI: 10.1155/2024/8260177.

18. Wang Z., Sheng X. Rockfall on the slope of the embankment of finite element analysis of the impact of the impact // *Advanced Materials Research*. 2011, vol. 261 – 263, pp. 1119 – 1123. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.261-263.1119.
19. La Porta G., Lambert S., Bourrier F. DEM modeling of rockfall rebound on protective embankments / 6th International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications, Barcelona. 2019, pp. 238 – 249.
20. Maheshwari S., Kudu S., Bhowmik R. Rockfall in Himalayan Region: Trajectory simulation, design, and analysis of protective embankment / *Geo-Congress*. 2024, pp. 74 – 84. DOI: 10.1061/9780784485354.008. **ИДБ**

REFERENCES

1. Gorbacheva T. M. Ensuring the safety of an object under a rocky ledge from rockfalls: the Maccaferri solution in France. *Geoinfo*. 2022, no. 12, pp. 46 – 55. [In Russ].
2. Fol'kvejn A., Fulde M., Kriger-Haukson I. Evaluation of the capabilities and reliability of flexible rockfall protection systems. *Geoinfo*. 2021, no. 7, pp. 42 – 47. [In Russ].
3. Sheina T. V., Avdeeva E. A. Technologies for protecting roads from rockfalls. *Urban construction and architecture*. 2018, no. 8(1), pp. 28 – 34. [In Russ].
4. Bichler A., Stelzer G. Special solutions in hazard mitigation. *Proceedings of the 6-th Canadian GeoHazards Conference (GeoHazards 6)*, Queen's University in Kingston, Kingston, Ontario, Canada, 2014. The Canadian Geotechnical Society (CGS), pp. 1 – 8.
5. Reshetnjak S. P., Fokin V. A., Tarasov G. E., Aleksandrov V. A., Togunov M. B., Danilkin A. A., Kaira V. E. Gravitational aspects of ensuring safety of work in the quarry edge zone. *Gornyi Zhurnal*. 2005, no. 2, pp. 71 – 72. [In Russ].
6. Melihov M. V., Chashhinov G. V. Application of scaling technology to protect quarry vehicles from rockfalls. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNC RAN*. 2017, no. 14, pp. 311 – 314. [In Russ].
7. Belov O. D. Dependence of kinetic energy, maximum bounce height, horizontal movement and velocity of a rockfall piece on its shape. *Trudy RANIMI*. 2024, no. 3-1(41), pp. 246 – 267. [In Russ]. DOI: 10.24412/2519-2418-2024-341-246-267.
8. Kwan J. S. H., Sze E. H. Y., Lam C. Finite element analysis for rockfall and debris flow mitigation works. *Canadian Geotechnical Journal*. 2019, vol. 56, no. 9, pp. 1225 – 1250. DOI: 10.1139/cgj-2017-0628.
9. Vigna S., Marchelli M., Biagi V., Peila D. Numerical simulation of rockfall protection embankments in natural soil. *Geosciences*. 2023, vol. 368. DOI: 10.3390/geosciences13120368.
10. Lambert S., Bourrier F. Design of rockfall protection embankments: A review. *Engineering Geology*. 2013, vol. 154, pp. 77 – 88. DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.12.012.
11. Ronco C., Oggeri C., Peila D. Design of reinforced ground embankments used for rockfall protection. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2009, vol. 9, no. 4. DOI: 10.5194/nhess-9-1189-2009.
12. Maegawa K. Experiments on rockfall protection embankments with geogrids and cushion. *International Journal of GEOMATE*. 2011, vol. 1, no. 1, pp. 19 – 24.
13. Zhiwei X., Liang Lu G. Numerical investigation on the response of ground-reinforced embankments under repeated impact. *Engineering Geology*. 2025, vol. 345, article 107875. DOI: 10.1016/j.enggeo.2024.107875.
14. Lambert S., Gupta R., Bourrier F., Vincent A. On the simulation-based quantification of energy dissipation in rockfall protection structures: Case of an articulated wall modelled with the NSCD method. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2025, vol. 58, pp. 1957 – 1973. DOI: 10.1007/s00603-024-04222-9.
15. Maheshwari S., Bhowmik R. Performance assessment of a protection embankment designed for a rockfall-prone slope along lesser Himalayas of Jammu and Kashmir, India. *Natural Hazards*. 2024. DOI: 10.1007/s11069-024-06959-6.
16. Maheshwari S., Bhowmik R., Cuomo S. Impact performance of unreinforced and geogrid-reinforced rockfall protection embankment. *Geosynthetics International*. 2024, vol. 19, no. 6, pp. 1 – 21. DOI: 10.1680/jgein.23.00159.
17. Luc Leroy Mambou Nguayep, Kenmoe Oscar Rodrigue Michel, Tchognia Nkuisi Hervé Joël, Lawou Kouayep Sylvain, Nkenwoum Chebou Gael, Chéagé Chamgoué André, Mohamadou Innoua

Comparative analysis of the slope stability using slide and plaxis 2D software: A case study of Tombel Pozzolan Quarry (South-West Cameroon). *Applied and Environmental Soil Science*. 2024, vol. 8, article 8260177. DOI: 10.1155/2024/8260177.

18. Wang Z., Sheng X. Rockfall on the slope of the embankment of finite element analysis of the impact of the impact. *Advanced Materials Research*. 2011, vol. 261 – 263, pp. 1119 – 1123. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.261-263.1119.

19. La Porta G., Lambert S., Bourrier F. DEM modeling of rockfall rebound on protective embankments. *6th International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications*, Barcelona. 2019, pp. 238 – 249.

20. Maheshwari S., Kudu S., Bhowmik R. Rockfall in Himalayan Region: Trajectory simulation, design, and analysis of protective embankment. *Geo-Congress*. 2024, pp. 74 – 84. DOI: 10.1061/9780784485354.008.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Белов Олег Дмитриевич — аспирант,
НИТУ МИСИС, e-mail: below2idknet@inbox.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0129-9484.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

O.D. Belov, Graduate Student, NUST MISIS,
119049, Moscow, Russia, e-mail: below2idknet@inbox.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0129-9484.

Получена редакцией 15.03.2025; получена после рецензии 15.04.2025; принята к печати 10.06.2025.
Received by the editors 15.03.2025; received after the review 15.04.2025; accepted for printing 10.06.2025.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ГЕОЭКОЛОГИЯ. СБОРНИК НАУЧНЫХ СТАТЕЙ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ (2025, № 3, СВ 5, 100 с.)

В сборник вошли статьи молодых ученых, работающих в области геоэкологии. Тематика статей посвящена широкому кругу актуальных проблем в области управления отходами добычи минерального сырья и его переработки, оценки безопасности добываемых углей в части содержания в них потенциально-опасных элементов и рисков самовозгорания, разработки метрологического обеспечения для контроля измерений показателей безопасности углей и отходов, а также перспективным технологиям улавливания парниковых газов.

GEOECOLOGY. COLLECTION OF SCIENTIFIC ARTICLES BY YOUNG SCIENTISTS

The collection includes articles by young scientists working in the field of geoecology. The topic of the articles is devoted to a wide range of topical issues in the field of waste management of mining and processing of mineral raw materials, assessment of the safety of mined coal in terms of the content of potentially dangerous elements and risks of spontaneous combustion, development of metrological support for monitoring measurements of safety indicators of coal and waste, as well as promising technologies for greenhouse gas capture.

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА КАРСТОВЫЙ РЕЛЬЕФ ЗАКАЗНИКА (АРХАНГЕЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ)

В.А. Наход¹, А.И. Малов¹, К.Б. Данилов¹, Г.Д. Горелик²

¹ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения РАН, Архангельск, Россия,
e-mail: Nakhod.vitaliy@knauf.ru

² Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Представлены результаты экспериментальных исследований воздействия горнодобывающего предприятия на уникальные карстовые образования Чугского заказника, в частности на пещеру Апрельский Узел. Рассмотрено два сценария сейсмического воздействия: рутинная деятельность (дробление горной массы на дробильно-сортировочном комплексе, вторичное дробление негабаритов с помощью навесного гидромолота, буровые работы, погрузка горной массы) и режим взрывного рыхления горных пород. Для определения интенсивности сейсмических колебаний было установлено пять сейсмометров по направлению от места взрыва к пещере Апрельский узел. Продолжительность исследований составила сорок пять календарных дней. Установлено, что текущая деятельность горного предприятия не оказывает воздействия на целостность горного массива Чугского заказника. В сравнении с нормативной базой РФ превышения не выявлены. Однако при проведении взрывных работ отмечаются превышения предельных значений согласно национальному стандарту Германии DIN 4150-3:1999 для сооружений, имеющих высокую социальную важность (например, охраняемых памятников архитектуры) на расстоянии до 680 м. Итогом работы стало получение эмпирической зависимости скорости распространения волн от массы заряда взрывчатого вещества. На основании данной зависимости определены максимальные величины массы зарядов, которые позволяют проводить массовые взрывы без риска воздействия на карстовый массив заказника.

Ключевые слова: сейсмическое воздействие, взрывные работы, пещера, карстовый рельеф, гипсовый камень, карьер, горные работы, буферная зона.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации государственного задания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН (FUUW-2025-0011 № 1022040400658-8-1.5.6;1.5.8;1.5.13).

Для цитирования: Наход В. А., Малов А. И., Данилов К. Б., Горелик Г. Д. Оценка воздействия взрывных работ на карстовый рельеф заказника (Архангельская область) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 7. – С. 38–54. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_38.

Impact of blasting on karst relief of a nature reserve in the Arkhangelsk Region

V.A. Nakhod¹, A.I. Malov¹, K.B. Danilov¹, G.D. Gorelik²

¹ N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences, 163020, Arkhangelsk, Russia, e-mail: Nakhod.vitaliy@knauf.ru

² Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract: The article describes the field studies into impact exerted by mining on the unique karst formation of the Chuga nature reserve, in particular, on the Aprelsky Uzel cave. There are two scenarios of seismic effect: routine activities (rock crushing on a screening-and-crushing machine, secondary grinding of oversize rocks by a mounted hydraulic hammer, drilling operations, rock loading) and softening of rock mass by blasting. For determining intensity of seismic vibrations, five seismometers were set in the line from a blasting point to the Aprelsky Uzel cave. The studies lasted for 45 calendar days. It is found that the current mining activities have no impact on the rock mass integrity in the Chuga nature reserve. No overcharges of standards from the regulatory framework of Russia are revealed. On the other hand, some blasting-induced excess is observed in case of comparison with Germany's national standard DIN 4150-3:1999 for the structures of high social value (for instance, guarded monuments of architecture) at a distance up to 680 m. The result of the studies was an empirical dependence of wave velocities on explosive weights. The dependence made it possible to find the maximal weights of explosives for the mass blasting without impact on the karst rock mass of the nature reserve.

Key words: seismic impact, blasting, cave, karst relief, gypsum stone, open pit mine, mining operations, buffer zone.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the state contract with the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch RAS, Projects U UW-2025-0011 No. 1022040400658-8-1.5.6;1.5.8;1.5.13.

For citation: Nakhod V. A., Malov A. I., Danilov K. B., Gorelik G. D. Impact of blasting on karst relief of a nature reserve in the Arkhangelsk Region. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(7):38-54. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_38.

Введение

На территории Холмогорского округа Архангельской области в 1996 г. был организован государственный природный ландшафтный заказник, имеющий региональное значение. Охраняемая природная территория была создана с целью сохранения уникальных форм рельефа, представленных пещерами, карстовыми логами, шелошняковыми полями и другими формами карстовых образований. В ее пределах находится более 100 пещер. Количество пещер, расположенных

на территории Чугского рельефа, позволяет ему занимать первое место на Севере России. На данный момент отсутствует должное внимание к изучению пещер Чугского заказника, особенно это касается гидрологии и экодинамики подземной среды. В то же время в зарубежных странах карстологический мониторинг и исследования воздействия взрывных работ активно внедряются и используются [1–3]. Для сохранения естественных форм рельефа между заказником и горным отводом промыш-

ленного предприятия, расположенного на месторождении гипса «Глубокое», установлена 200-метровая буферная зона, целью которой является снижение негативного антропогенного воздействия на биогеоценоз заказника. Данное мероприятие является требованием природного законодательства. Решения, принимаемые для оценки условий разработки месторождений полезного ископаемого, должны быть оптимальными для получения прибыли, интеграции компании в перерабатывающую промышленность, а также выполняющими социальные и экологические условия [4–6]. В этой связи важно оценить достаточность 200-метровой буферной зоны для защиты ландшафта заказника.

Месторождение гипса «Глубокое» разрабатывается открытым способом с формированием карьера. Конечная глубина карьера составляет около 20 м. В структуре карьера можно выделить один добычной и один вскрышной уступы. Ввиду того, что горные выработки расположены на расстоянии более 200 м от границ заказника, основное воздействие на рельеф Чугской площади оказывают буровзрывные работы; процессами ведения добычных и вскрышных работ можно пренебречь, поскольку их негативное влияние на таком расстоянии не сказывается на элементах рельефа. Ежегодно предприятие проводит от 10 до 12 массовых взрывов. Общий объем горной массы, подверженный рыхлению взрывным способом, составляет в пределах 300–350 тыс. м³ горной породы. Количество эмульсионных взрывчатых веществ промышленного производства составляет около 300 т.

Методы

Целью работы являлось определение степени воздействия деятельности горнодобывающего предприятия на наиболее близко расположенную к карьере

пещеру Апрельский Узел, внесенную в кадастр гипсовых пещер мира [7]. При этом рассматривались два техногенных источника. Первый — ежедневная эксплуатация горно-добычного оборудования: дробление негабаритных кусков горной массы с помощью навесного оборудования на экскаватор (гидромолот фирмы Atlas Copco HB3500), погрузка взорванной горной породы в дробильно-сортировочный комплекс, дробление и классификация, транспортировка вскрышных и добычных пород, буровые работы. Анализировались разные дневные интервалы, а именно: рабочая смена (с 7 до 19 ч) и нерабочее время (с 19 до 7 ч). Второй техногенный источник — массовые взрывные работы с применением неэлектрических систем инициирования. Целью научной работы являлось определение степени затухания упругих волн на участке, образованном между северной границей горных работ и ближайшим входом в пещеру Апрельский Узел; данные показатели позволяют определить воздействие взрывных работ на карстовые образования. На настоящий момент не существует критериев сейсмической безопасности для природных объектов, поэтому в данной работе авторы опирались на значения предельно допустимой скорости колебаний пород (3–5 см/с), при которой нет рисков нарушения целостности массива и исключены локальные деформации для зданий и сооружений [8–10].

Кроме того, ранее при исследовании пещер были выявлены факты присутствия ихтиофауны в подземных реках Чугского спелеологического массива [11]. Одним из надежных параметров оценки воздействия взрывных работ на ихтиофауну является величина удельной энергии в максимальной фазе гидроударной волны; основная причина гибели рыб — разрыв плавательного пузыря [12].

Для регистрации сейсмического сигнала использовались 5 комплектов велосиметров. Три — Güralp 6TD производства компании Güralp Systems Limited (Великобритания), и два — Trillium Compact с цифровыми регистраторами Pegasus компании Nanometrics (Канада). Данные велосиметры используются для регистрации различных вибраций: дальних землетрясений, фоновых микросейсмических колебаний и т.д. [13, 14]. Датчики были установлены вдоль прямой, соединяющей проекцию центра массового взрыва со входом в пещеру Апрельский Узел, с шагом 200—250 м. Три датчика располагались в карьере, один датчик — в буферной зоне и один — у входа в пещеру Апрельский Узел.

Приборы расположены так, что первый установлен в центре карьера, а последний — у входа в пещеру. В течение эксперимента удалось зарегистрировать два массовых взрыва. Схема расположения датчиков и взрывных блоков представлена на рис. 1.

В основе схемы функционирования велосиметра лежит превращение сейсмических колебаний в электрический

сигнал, амплитуда и частота которого пропорциональны внешнему воздействию. Каждый прибор состоит из трех однокомпонентных датчиков, ориентированных ортогонально друг к другу, и встроенного аналогового-цифрового преобразователя.

При установке приборов оси датчиков ориентировались в направлениях север — юг, восток — запад; третья ось — вертикальная компонента движения.

Используемое оборудование позволяло проводить исследование скорости колебаний пород, ускорение в работе рассчитывалось как первая производная скорости по времени. Согласно спецификации на приборы, номинальная выходная чувствительность используемых регистраторов составляет $2 \cdot 10^{-9}$ м/с на отсчет. Шаг дискретизации записей по времени составляет 10 мс, что обуславливает наличие в каждой суточной записи 8 640 000 отсчетов.

Для определения ускорения была написана специальная программа, где для всего массива данных рассчитывается первая производная по времени.

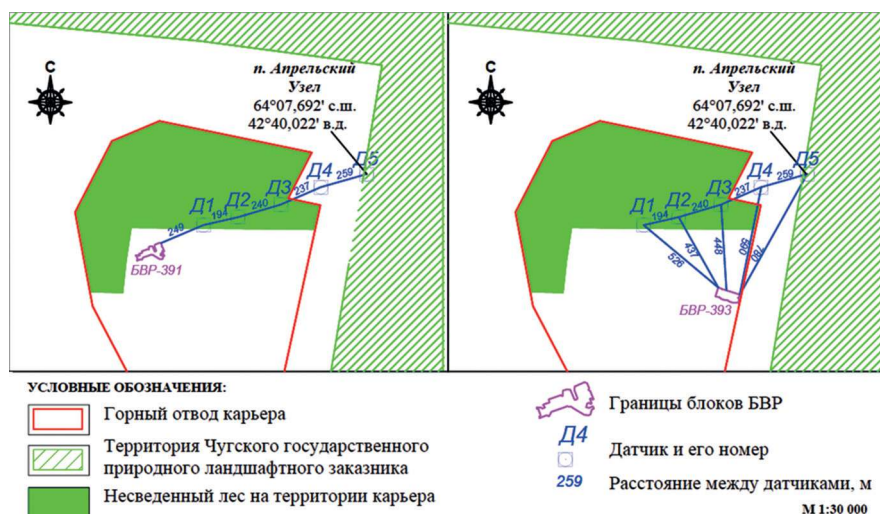


Рис. 1. Схема расположения сейсмических датчиков и блоков буровзрывных работ

Fig. 1. Location scheme of seismic sensors and drilling and blasting blocks

Результаты экспериментального исследования

Для анализа сейсмического воздействия рутинной деятельности карьера на массив горных пород были обработаны данные, полученные в течение 45 сут ежедневного мониторинга. На рис. 2 изображены записи сейсмических колебаний, зафиксированные датчиком Д1 1 июля 2024 г. Пример полученных данных за 01.07.2024 по трем датчикам, находящимся на минимальном расстоянии от мест проведения горных работ, представлен в табл. 1.

Для определения максимального воздействия были выделены пиковые значения по каждой компоненте в течение суточной активности. Полученные данные за 01.07.2024 представлены в табл. 2.

Анализ полученных данных и сравнение их с нормативными документами свидетельствует о том, что скорости смещения горных пород, выявленные при оценке ежедневной деятельности горнодобывающего предприятия, находятся в пределах значений, не оказывающих критического воздействия на сооружения, имеющие высокую социальную значимость (ГОСТ Р 52892-2007). Максимальные пиковые значения, выявленные датчиком Д1 в центре карьера, на расстоянии 249 м от места проведения горных работ, в 20 раз меньше установленных государственным стандартом; если же провести сравнение полученных данных с методическими рекомендациями по оценке устойчивости бортов осушаемых карьеров, фактические скорости смеще-

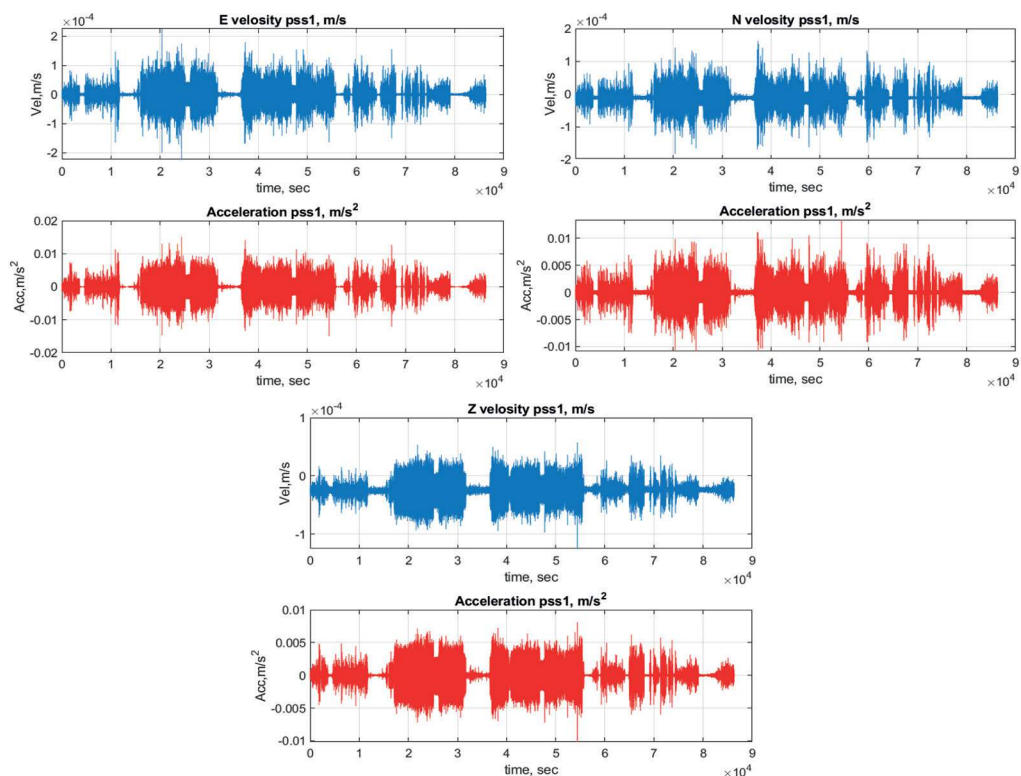


Рис. 2. Графики скорости (синий) и ускорения (красный), зарегистрированных датчиком Д1 в течение 01.07.2024

Fig. 2. Graphs of velocity (blue) and acceleration (red) recorded by sensor D1 during 01.07.2024

Таблица 1

Суточные данные сейсмического воздействия**Daily seismic impact data**

Датчик	Компонента	0—7 ч		7—19 ч		19—24 ч	
		(простой карьера)		(работа карьера)		(простой карьера)	
		средняя скорость, мм/с	среднее ускорение, мм/с ²	средняя скорость, мм/с	среднее ускорение, мм/с ²	средняя скорость, мм/с	среднее ускорение, мм/с ²
Д1	EW	0,000223	0,000000	0,000219	0,000000	0,000192	0,000000
	NS	-0,011191	0,000001	-0,011626	0,000000	-0,011579	0,000000
	Z	-0,025070	0,000001	-0,023433	0,000000	-0,023541	0,000000
Д2	EW	0,000181	0,000000	-0,000099	0,000000	0,000333	0,000000
	NS	-0,003207	0,000000	-0,002651	0,000000	-0,002153	0,000000
	Z	-0,018592	0,000000	-0,017043	0,000000	-0,017640	0,000000
Д3	EW	-0,069549	0,000000	-0,069728	0,000000	-0,068941	0,000000
	NS	-0,022573	0,000000	-0,022129	0,000000	-0,022261	0,000000
	Z	0,011609	0,000001	0,013610	0,000000	0,006531	0,000000

ния горных пород в массиве в 800 раз меньше допустимых значений. По итогам эксперимента можно утверждать, что деятельность карьера по добыче гипсового камня не приводит к возникновению деформаций в толще горных пород и буферная зона протяженностью 200 м достаточна для сохранения уникального карстового рельефа Чугского заказника.

Для анализа сейсмического воздействия взрывных работ на массив горных пород были обработаны данные, зарегистрированные 13 июня и 13 июля 2024 г. Хочется обратить внимание на тот факт, что данное месторождение гипса относится ко второй категории по сложности геологического строения. Данное обстоятельство обусловлено сильной закарстованностью массива; так, степень

Таблица 2

Пиковые значения сейсмического воздействия**Peak values of seismic impact**

Датчик	Компонента	Максимальная скорость, мм/с	Время	Максимальное ускорение, мм/с ²	Время
Д1	EW	0,22645	5:39:48	15,0310	6:45:39
	NS	-0,18138	5:39:48	13,4100	15:06:40
	Z	-0,12569	15:06:40	-10,1560	15:06:40
Д2	EW	-0,05173	3:06:22	6,6398	16:13:42
	NS	-0,02855	7:44:09	-3,3312	15:06:40
	Z	-0,04326	2:56:37	-2,2824	1:46:04
Д3	EW	-0,10318	5:45:14	2,5376	5:45:08
	NS	-0,03587	20:49:22	-2,7172	5:45:08
	Z	0,03751	5:45:08	3,5416	5:45:08

Таблица 3

Параметры массовых взрывов
Parameters of mass explosions

Показатель	13.06.2024		13.07.2024
Номер блока	391	392А, 392Б	393
Объем взрываемого массива, м ³	43091	4153	53 074
Диаметр скважины, мм	127	127	127
Средняя высота уступа ($H_{уст}$), м	7,0	2,4	9,8
Количество скважин, шт.	346	151	308
Величина одновременно взрываемой массы ВВ, кг	1597		3077
Количество боевиков в скважине, шт.	1	1	1
Масса боевика сибирит-ПМ-0,5; кг	0,5	0,5	0,5

закарстованности территории на глубину 2 м составляет 80–90%, мелкий поверхностный карст, образующий каровую поверхность, занимает 40% территории карьера.

Основные показатели проведенных в эти дни массовых взрывов представлены в табл. 3, а также на схеме конструкции заряда и боевика с указанием места размещения боевика в заряде (рис. 3), схемах буровзрывных блоков (см. рис. 4, 5).

Для определения максимальных пиковых значений результирующей скоро-

сти сейсмических колебаний использовалась следующая формула:

$$V = \sqrt{V_{EW}^2 + V_{NS}^2 + V_Z^2}, \quad (1)$$

где V_{EW} , V_{NS} , V_Z – максимальные скорости сейсмических колебаний по восточной (EW), северной (NS) и вертикальной (Z) компоненте.

Пиковые значения скоростей колебания поверхности земли представлены в табл. 4. и на рис. 6.

Скорости колебаний, имеющие максимальные величины, от взрывных работ 13.06.2024 при величине одновре-

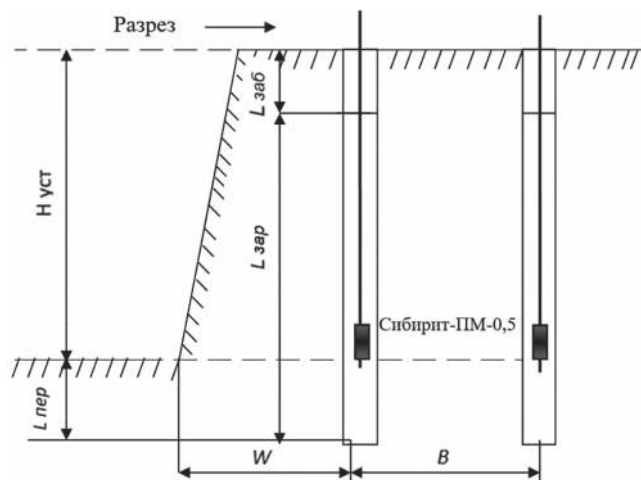


Рис. 3. Конструкции заряда и боевика с указанием места размещения боевика в заряде
 Fig. 3. Charge and fuze designs showing the location of the fuze in the charge

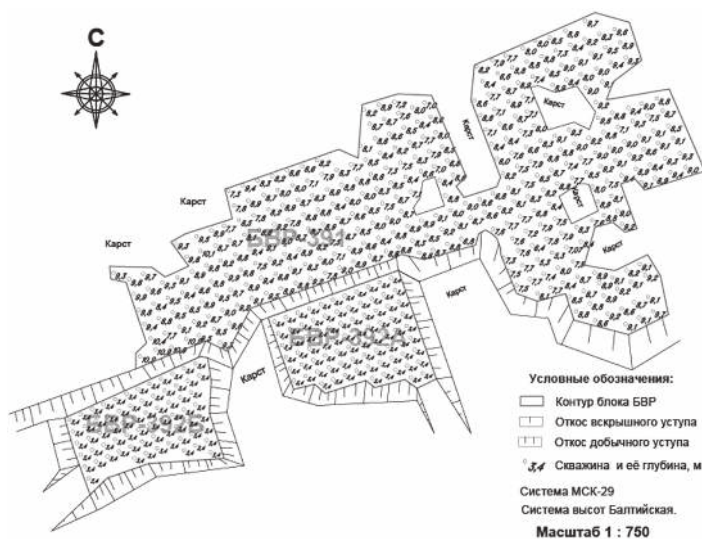


Рис. 4. Схемы буровзрывных блоков 391, 392А, 392Б

Fig. 4. Diagrams of drilling and blasting units 391, 392A, 392B

менно взрывающей массы взрывчатого вещества в 1597 кг отмечается на расстоянии 249 м от эпицентра взрыва датчиком Д1 и составляет 0,0344 м/с, минимальные пиковые значения выявлены датчиком Д4 на расстоянии 920 м и составили 0,0020 м/с. Максимальное пиковое значение скорости для взрывных работ от 13.07.2024 при величине

одновременно взрывающей массы взрывчатого вещества в 3077 кг отмечается датчиком Д2 на расстоянии 438 м и составляет 0,0321 м/с, минимальные пиковые значения также выявлены датчиком Д4 на расстоянии 590 м от взрыва и соответствуют 0,0023 м/с. По результатам анализа двух массовых взрывов установлено увеличение значений ско-

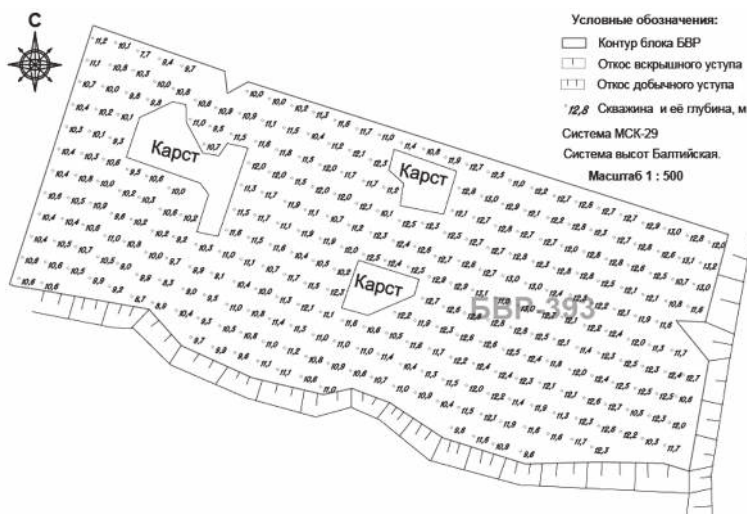


Рис. 5. Схемы буровзрывных блоков 393

Fig. 5. Diagrams of drilling and blasting units 393

Таблица 4

Пиковые значения сейсмических колебаний от взрывов
Peak values of seismic vibrations from explosions

Расстояние от места взрыва до датчика, м	Датчик	Пиковые значения скорости, м/с			Пиковые значения результирующей скорости, м/с
		Z компонента	EW компонента	NS компонента	
13.06.2024					
249	Д1	−0,0209	−0,0186	0,0199	0,0344
443	Д2	0,0187	0,0204	0,0173	0,0326
683	Д3	0,0097	0,0117	−0,0147	0,0211
920	Д4	−0,0006	−0,0014	−0,0012	0,0020
1179	Д5	0,0013	−0,0049	0,0023	0,0055
13.07.2024					
526	Д1	0,0172	−0,0166	−0,0164	0,0290
438	Д2	−0,0189	−0,0192	0,0174	0,0321
448	Д3	−0,0157	0,0155	−0,0165	0,0275
590	Д4	0,0012	0,0009	−0,0017	0,0023
780	Д5	−0,0015	−0,0065	0,0023	0,0071

рости сейсмических волн, регистрируемых датчиком Д5, расположенным непосредственно у входа в пещеру Апрельский Узел. Данные значения могут быть обусловлены заполнением пещеры водой, что в свою очередь усиливает влияние сейсмических волн и снижает устойчивость горных пород [15, 16]. Диаграмма скорости распространения

сейсмических колебаний в зависимости от расстояния до места взрывных работ по итогам экспериментов, проведенных в 2019 и 2024 гг., представлена на рис. 7.

Сейсмические параметры воздействия взрывных работ в определенных горно-геологических условиях карьеров описываются на основании решения равенства между предельной скоростью и

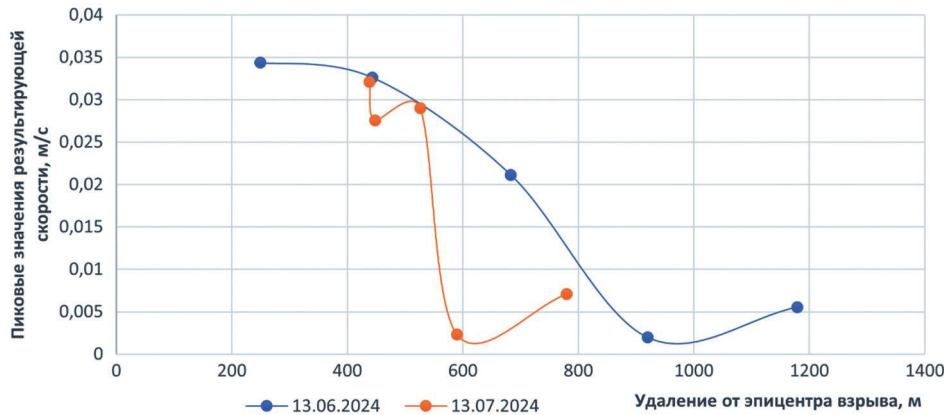


Рис. 6. Пиковые значения скорости в зависимости от удаления прибора от эпицентра взрыва
Fig. 6. Peak velocity values depending on the distance of the instrument from the explosion epicentre

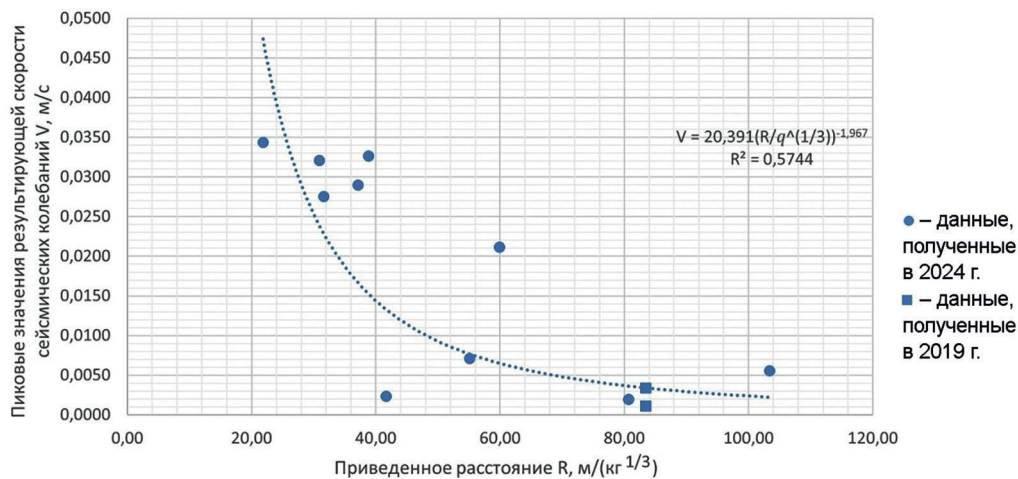


Рис. 7. Диаграмма скорости распространения сейсмических колебаний от приведенного расстояния для условий карьера гипса «Глубокое»

Fig. 7. Diagram of the seismic propagation velocity versus the reduced distance for the conditions of the Glubokoye gypsum quarry

скоростью, образующейся в среде при проведении массового взрыва группы зарядов одной степени инициирования массой Q на расстоянии R от объекта исследования (сооружения) и определяющейся по уравнению М.А. Садовского [17, 18]:

$$V = k \left(\frac{\sqrt[3]{q}}{R} \right)^n, \quad (2)$$

где V — результирующая скорость колебаний; R — расстояние от эпицентра взрыва до охраняемого объекта; q — масса взрывчатого вещества в группе зарядов; k — коэффициент сейсмичности, зависящий от физико-механических свойств массива; n — показатель затухания сейсмических колебаний.

По итогам экспериментальных работ нами получены эмпирические значения коэффициента сейсмичности $k = 20,391$ и показателя затухания колебаний $n = 1,967$ для горно-геологических условий карьера гипса «Глубокое». Поэтому зависимость результирующей скорости сейсмических колебаний массива горных пород от приведенного расстояния можно описать следующей формулой:

$$V = 20,391 \left(\frac{\sqrt[3]{q}}{R} \right)^{1,967}, \quad (3)$$

где V — результирующая скорость колебаний; q — масса заряда в группе взрывчатого вещества (на одну ступень замедления); R — эпицентрального расстояние.

В настоящее время отсутствуют нормативные документы, регламентирующие допустимые скорости смещения пород для естественных уникальных форм рельефа, таких как пещеры. Для сравнения полученных данных мы можем обратиться к ГОСТ Р 52892-2007 и к методическому изданию [21] (табл. 5).

В справочном Приложении Б к ГОСТу представлено три варианта определения критических значений: согласно национальному стандарту Германии DIN 4150-3:1999, согласно национальному стандарту Великобритании BS 7835-2:1993 и согласно Office of Surface Mining (Управление открытых горнорудных разработок) США. В стандарте Office of Surface Mining предельные значения установлены для невысоких зданий,

Таблица 5

Сравнение значений сейсмических колебаний от взрывов с нормативными показателями
Comparison of the value of seismic vibrations from explosions with normative indicators

Расстояние от места взрыва до датчика, м	Датчик	Пиковые значения результирующей скорости, м/с	Предельные значения сейсмических колебаний от взрывов, согласно национальным стандартам					Office of Surface Mining (Управление открытых горнорудных разработок), США	Допустимые скорости смещения пород в массиве, не вызывающие деформаций (согласно учебному пособию «Устойчивость бортов и осушение карьеров. Лабораторный практикум») в различных породах									
			национальный стандарт Германии DIN 4150-3:1999 (Вибрация сооружений. Часть 3. Воздействие вибрации на сооружения)		национальный стандарт Великобритании BS 7835-2:1993		невысокие здания (одно- или двухэтажные), подвергающиеся воздействию сейсмических волн											
			сооружения, не относящиеся к категориям 1 или 2, имеющие высокую социальную важность	жилые здания (категория 2)	здания делового назначения, производственные здания и сооружения (категория 1)	здания делового назначения, имеющие облегченную конструкцию (категория 1)				жилые здания и здания делового назначения, имеющие облегченную конструкцию (категория 2)								
Массовый взрыв от 13 июня 2024																		
249	Д1	0,03437	0,008*	0,015*	0,040*	0,040*	0,05*	69%**	0,028*	123%**	0,032*	107%**	0,12*	29%**	0,48*	7%**	0,96*	4%**
443	Д2	0,03262	0,008*	0,015*	0,040*	0,040*	0,05*	82%**	0,028*	117%**	0,032*	102%**	0,12*	27%**	0,48*	7%**	0,96*	3%**
683	Д3	0,02113	0,008*	0,015*	0,040*	0,040*	0,05*	53%**	0,028*	75%**	0,032*	66%**	0,12*	18%**	0,48*	4%**	0,96*	2%**
920	Д4	0,00196	0,008*	0,015*	0,040*	0,040*	0,05*	5%**	0,028*	7%**	0,032*	6%**	0,12*	2%**	0,48*	0%**	0,96*	0%**
1179	Д5	0,00555	0,008*	0,015*	0,040*	0,040*	0,05*	14%**	0,028*	20%**	0,032*	17%**	0,12*	5%**	0,48*	1%**	0,96*	1%**
Массовый взрыв от 13 июля 2024																		
526	Д1	0,02899	0,008*	0,015*	0,040*	0,040*	0,05*	72%**	0,028*	104%**	0,032*	91%**	0,12*	24%**	0,48*	6%**	0,96*	3%**
438	Д2	0,03208	0,008*	0,015*	0,040*	0,040*	0,05*	80%**	0,028*	115%**	0,032*	100%**	0,12*	27%**	0,48*	7%**	0,96*	3%**
448	Д3	0,02755	0,008*	0,015*	0,040*	0,040*	0,05*	69%**	0,028*	98%**	0,032*	86%**	0,12*	23%**	0,48*	6%**	0,96*	3%**
590	Д4	0,00231	0,008*	0,015*	0,040*	0,040*	0,05*	6%**	0,028*	8%**	0,032*	7%**	0,12*	2%**	0,48*	0%**	0,96*	0%**
780	Д5	0,00709	0,008*	0,015*	0,040*	0,040*	0,05*	18%**	0,028*	25%**	0,032*	22%**	0,12*	6%**	0,48*	1%**	0,96*	1%**
* предельные значения по стандартам; ** пиковые экспериментальные значения в процентах от предельно установленных.																		

* предельные значения по стандартам; ** пиковые экспериментальные значения в процентах от предельно установленных.

подвергающихся воздействию сейсмических волн, которые образуются в результате взрывов при разработке открытых месторождений.

Сопоставление экспериментальных величин с нормативными значениями показало, что полученные пиковые значения скоростей (от 0,0019 до 0,0344 м/с) составляют 6 – 107,5% от предельно установленного значения 0,032 м/с. Сравнение экспериментально полученных данных с нормативными документами представлено в табл. 5.

Требования стандарта Германии DIN 4150-3:1999 «Structural vibration – Part 3: Effects of vibration on structures» для зданий, имеющих высокую социальную важность, являются самым строгим критерием оценки. Согласно этосу стан-

дарту, превышение допустимых показателей отмечается тремя датчиками, а именно Д1 определяет превышение значения в 4,3 и 3,6 раза на расстоянии 249 и 526 м от эпицентра взрывов от 13.06.2024 и 13.07.2024 соответственно, Д2 – превышение в 4 раза на расстоянии 440 м от эпицентра взрывов от 13.06.2024 и 13.07.2024, Д3 – превышение в 2,6 и 3,4 раза на расстоянии 683 и 448 м от эпицентра взрывов от 13.06.2024 и 13.07.2024 соответственно. Все значения, превышающие допустимые показатели, наблюдаются в пределах контура горного отвода предприятия.

В принципе контроля за устойчивостью и сохранностью зданий и сооружений от сейсмической нагрузки при проведении массовых взрывов лежит

Таблица 6

Шкала балльности сейсмической интенсивности
Scale of seismic intensity score

Балл	Характеристика воздействия	Скорость колебаний грунта, мм/с	
		шкала MSK-64 для землетрясений	шкала Медведа для горных взрывов
1	Колебания отмечаются только приборами	< 1,25	< 2
2	Колебания ощущаются при тишине	1,25 – 2,5	2 – 4
3	Колебания ощущаются только знающими о взрыве	2,5 – 5	4 – 8
4	Колебания отмечаются многими людьми,дребезжание стекол	5 – 10	8 – 15
5	Осыпание побелки, повреждение ветхих зданий	11 – 20	15 – 30
6	Тонкие трещины в штукатурке; повреждение зданий, имевших деформации	21 – 40	30 – 60
7	Повреждение зданий, находящихся в удовлетворительном состоянии: трещины в штукатурке, тонкие трещины в стенах	41 – 80	60 – 120
8	Значительные повреждения зданий: трещины в несущих конструкциях и стенах, большие трещины в перегородках	81 – 160	120 – 240
9	Разрушение зданий: большие трещины в стенах, расслоение кладки, падение некоторых участков стен	161 – 320	240 – 480
10–12	Большие разрушения и обвалы зданий	> 320	> 480

определение максимально возможной и предельно допустимой скоростей колебаний грунта у основания объекта, так как данное воздействие приводит к трещинообразованиям и разрушениям элементов конструкций. Такой подход основан на экспериментально полученной зависимости степени разрушения зданий от скорости смещения грунта в их основании и реализуется путем определения допустимых и предельных скоростей колебаний сооружений при помощи специально разработанных шкал для оценки последствий взрывов [19, 20] (см. табл. 6).

Результатом сопоставления экспериментальных значений с показателями шкал является вывод, что значительное воздействие на массив горных пород, сопоставимое с землетрясениями 6 бал-

лов, отмечается в трех точках датчиками Д1, Д2 и Д3, оставшиеся два датчика фиксируют незначительные колебания, сопоставимые с двух-трехбалльными землетрясениями.

При проведении спелеологических работ на территории Чугской площади учеными были выявлены виды пещерных рыб, имеющих сходные признаки троглобионтной ихтиофауны (пещерный вид гольцов) [11]. На основании этих данных просчитана оценка воздействия ударных волн на ихтиофауну. Для оценки применялось измерение удельного потока энергии E . Для речных рыб средней чувствительности расчетное предельно допустимое значение удельной плотности потока энергии гидроударной волны принято равным 150 Дж/м^2 (Инструкция по определению радиуса

Таблица 7

Плотность потока энергии от массовых взрывов
Energy flux density from mass explosions

Расстояние до взрыва, м	Пиковые значения результирующей скорости сейсмических колебаний, см/с	Масса заряда, кг	Плотность потока энергии продольной волны, Дж/м ²
249	3,4365	1597	0,2334
443	3,2620	1597	0,1213
683	2,1130	1597	0,0410
920	0,1965	1597	0,0009
1179	0,5547	1597	0,0032
526	2,8987	3077	0,1063
438	3,2082	3077	0,1486
448	2,7546	3077	0,1156
590	0,2309	3077	0,0021
780	0,7087	3077	0,0087
1025	0,1111*	2000	0,0004
1025	0,3355**	2000	0,0019

* датчик был установлен на поверхности, ** датчик установлен в пещере.

Таблица 8

Допустимые массы группы одновременно взрывааемых зарядов в зависимости от расстояния между эпицентром взрыва и объектом исследования при скорости колебаний объекта не более 0,008 м/с
Permissible masses of a group of simultaneously detonated charges depending on distance between the explosion epicentre and the object of investigation at a velocity of object vibrations not exceeding 0.008 m/s

Эпицентральное расстояние, м	Масса взрывчатого вещества в группе зарядов, кг
200	51
250	100
300	172
350	274
400	408
450	581
500	797
550	1061
600	1378

опасной зоны действия гидроударной волны подводных взрывов на ихтиофауну).

Для определения плотности потока энергии при проведении взрывных работ используется формула

$$E = 0,8V^{1,5} \left(\frac{Q^{0,33}}{R} \right), \quad (4)$$

где V — скорость смещения породы в продольной волне, см/с; Q — масса взрывчатого вещества в группе зарядов одной степени инициирования, кг; R — расстояние от эпицентра взрыва до объекта, м.

Полученные значения потока энергии для двух массовых взрывов представлены в табл. 7.

Полученные данные потока энергии свидетельствуют о том, что 200-метровая буферная зона минимизирует воздействие ударных волн на ихтиофауну и не приводит к негативным воздействиям. Максимально полученное значение в $0,2334$ Дж/м² на расстоянии 249 м составляет $0,15\%$ от допустимого значения.

Принимая в формуле (3) значение $V = 0,008$ м/с, то есть соответствующим предельно допустимой скорости колебаний сооружений, имеющих высокую социальную значимость, согласно национальному стандарту Германии DIN 4150-3:1999, мы рассчитали допустимые значения массы взрывчатого вещества (q) группы одновременно инициируемых зарядов на эпицентральной дистанции $R = 200 - 600$ м от соору-

жения с шагом в 50 м (табл. 8). Минимальное значение 200 м соответствует буферной зоне.

Закключение

По итогам выполненных экспериментальных работ можно сделать следующие выводы.

1. Рутинная деятельность горнодобывающего предприятия не приводит к возникновению критических деформаций в толще горных пород Чугского заказника, и буферная зона протяженностью 200 м достаточна для сохранения его уникального рельефа.

2. Проведение массовых взрывов в карьере в настоящее время не оказывает негативного воздействия на близлежащую пещеру Апрельский Узел.

3. Дальнейшее развитие карьера и продвижение фронта работ может привести к ситуации, когда скорость распространения сейсмических волн будет превышать допустимые значения. Для исключения негативного сценария рассчитаны допустимые значения массы используемого взрывчатого вещества в зависимости от расстояния до Чугского заказника.

4. Проведена оценка возможного воздействия массовых взрывов на ихтиофауну Чугского заказника. Согласно полученным результатам, буферная зона протяженностью 200 м достаточна для исключения негативного воздействия. Поток энергии на расстоянии 249 м от эпицентра взрыва составляет $0,15\%$ от допустимого значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berthelin R., Hartmann A. The shallow subsurface of karst systems: review and directions / Eurokarst 2018, Besançon. Advances in Karst Science. Cham: Springer, 2020, pp. 61–68. DOI: 10.1007/978-3-030-14015-1_7.
2. Chong Yu, Haibo Li, Haozhen Yue, Xiaohu Wang, Xiang Xia A case study of blasting vibration attenuation based on wave component characteristics // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical

Engineering. 2023, vol. 15, no. 5, pp. 1298 – 1311. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.09.013, available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775522002001>.

3. Longhua Guan, Jing Zhang, Junchao Li, Yang Ding, Yubing Wang, Qiang Lu Ground deformation and blast wave propagation in dry sand subjected to buried explosion. A centrifuge modelling study // International Journal of Impact Engineering. 2024, vol. 188, article 104935. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2024.104935, available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X24000599>.

4. Дабиев Д. Ф., Чульдун А. Ф. Оценка инвестиционного потенциала региона с преимущественно минерально-сырьевой ориентацией при различных сценариях освоения минеральных ресурсов // Фундаментальные исследования. — 2020. — № 12. — С. 57 – 62. DOI: 10.17513/fr.42909.

5. Исайченков А. Б., Леонов Е. И., Кутовой А. В., Галимьянов А. А., Заляднов В. Ю., Караулов Н. Г. Обоснование рациональных параметров рабочей зоны при отработке разреза «Буреинский» // Уголь. — 2020. — № 11. — С. 22 – 28. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-11-22-28.

6. Ghorbani Y., Kuan S. H. A review of sustainable development in the Chilean mining sector: past, present and future // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2016, vol. 31, no. 2, pp. 137 – 165. DOI: 10.1080/17480930.2015.1128799.

7. Наход В. А., Малов А. И. Исследование сейсмического воздействия на карстовый рельеф ландшафтного заказника при ведении взрывных работ на месторождении гипсов в Архангельской области / Сергеевские чтения. Вып. 24. — М.: ГеоИнфо, 2023. — С. 311 – 314.

8. Жариков С. Н., Берсенов Г. П., Кутуев В. А., Флягин А. С. Научные исследования сейсмического действия взрыва на подземный газопровод высокого давления // Проблемы недропользования. — 2019. — № 3 (22). — С. 145 – 154.

9. Hudaverdi T., Akyildiz O. Investigation of the site-specific character of blast vibration prediction // Environmental Earth Sciences. 2017, vol. 76, no. 3, article 138.

10. Xu J., Kang Y., Wang X., Feng G., Wang Z. Dynamic characteristics and safety criterion of deep rock mine opening under blast loading // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019, vol. 119, pp. 156 – 167.

11. Семиколенных А. А. Особенности экологии живых организмов в пещерах Пинеги // Северный спелеоальманах. — 1999. — № 3. — С. 31 – 38.

12. Yong Fan, Huihui Liao, Guangdong Yang, Tao Zhou, Ke Deng, Bin Tian Dynamic behaviour of fish with swim bladders subjected to underwater explosions and methods for mitigating injuries // Biological Conservation. 2024, vol. 300, article 110849. DOI: 10.1016/j.biocon.2024.110849, available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320724004117>.

13. Antonovskaya G. N., Konechnaya Y. V., Vaganova N. V., Basakina I. M., Morozov A. N., Shakhova E. V., Mikhaylova Y. A., Danilov K. B. Contribution of the large-scale research facilities «Arkhangelsk seismic network» to the Russian Arctic seismicity study // Geodynamics & Tectonophysics. 2022, vol. 13, no. 2. DOI: 10.5800/GT-2022-13-2-0587.

14. Antonovskaya G. N., Konechnaya Y. V., Morozova E. R., Mikhailova Y. A., Shakhova E. V. Potential of the Arkhangelsk seismic network for European Arctic monitoring // Earthquake Science. 2024, vol. 37, no. 5, pp. 434 – 444. DOI: 10.1016/j.eqs.2024.06.005.

15. Железняк И. И., Манилюк В. В. Исследование устойчивости карстовой пещеры Хээтэй к динамическим воздействиям при взрывном способе разработки Усть-Борзинского месторождения известняков в Восточном Забайкалье // Литосфера. — 2017. — Т. 17. — № 4. — С. 137 – 143.

16. Саваренский Е. В., Киринос Д. П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. — М.: ГИТТЛ, 1955. — 543 с.

17. Мосинец В. Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. — М.: Недра, 1976. — 271 с.

18. Садовский М. А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва. — М.: Наука, 2004. — 440 с.

19. Пергамент В. Х., Овчаров Ю. Е., Гончаров Е. В. Интенсивность по сейсмической шкале, скорость колебаний и эквивалентные приведенные расстояния при взрывах // Записки Горного института. — 2001. — Т. 148. — № 2. — С. 84 – 90.

20. Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности / Под ред. Назарова А. Т., Шебалина Н. В. — М.: Наука, 1975. — 279 с.

REFERENCES

1. Berthelin R., Hartmann A. The shallow subsurface of karst systems: review and directions. *Euro-karst 2018, Besançon. Advances in Karst Science*. Cham: Springer, 2020, pp. 61 — 68. DOI: 10.1007/978-3-030-14015-1_7.
2. Chong Yu, Haibo Li, Haozhen Yue, Xiaohu Wang, Xiang Xia A case study of blasting vibration attenuation based on wave component characteristics. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023, vol. 15, no. 5, pp. 1298 — 1311. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.09.013, available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775522002001>.
3. Longhua Guan, Jing Zhang, Junchao Li, Yang Ding, Yubing Wang, Qiang Lu Ground deformation and blast wave propagation in dry sand subjected to buried explosion. A centrifuge modelling study. *International Journal of Impact Engineering*. 2024, vol. 188, article 104935. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2024.104935, available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X24000599>.
4. Dabiev D. F., Chuldum A. F. Evaluation of investment potential of the region with a predominantly raw-material orientation under different scenarios of development of mineral resources. *The Fundamental researches*. 2020, no. 12, pp. 57 — 62. [In Russ]. DOI: 10.17513/fr.42909.
5. Isaychenkov A. B., Leonov E. I., Kutovoy A. V., Galimyanov A. A., Zalyadnov V. Yu., Karaulov N. G. Justification of rational parameters of working zone during mining in «Bureinsky» open-pit mine. *Ugol'*. 2020, no. 11, pp. 22 — 28. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-11-22-28.
6. Ghorbani Y., Kuan S. H. A review of sustainable development in the Chilean mining sector: past, present and future. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2016, vol. 31, no. 2, pp. 137 — 165. DOI: 10.1080/17480930.2015.1128799.
7. Nakhod V. A., Malov A. I. Study of seismic impact on karst relief of the landscape reserve during blasting operations at the gypsum deposit in the Arkhangelsk region. *Sergeevskie chteniya*. Vyp. 24. [Sergeevskie readings, iss. 24], Moscow, GeoInfo, 2023, pp. 311 — 314.
8. Zharikov S. N., Bersenev G. P., Kutuev V. A., Flyagin A. S. Scientific studies of the seismic effect of an explosion on an underground high-pressure gas pipeline. *Problems of Subsoil Use*. 2019, no. 3 (22), pp. 145 — 154. [In Russ].
9. Hudaverdi T., Akyildiz O. Investigation of the site-specific character of blast vibration prediction. *Environmental Earth Sciences*. 2017, vol. 76, no. 3, article 138.
10. Xu J., Kang Y., Wang X., Feng G., Wang Z. Dynamic characteristics and safety criterion of deep rock mine opening under blast loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019, vol. 119, pp. 156 — 167.
11. Semikolennykh A. A. Peculiarities of the ecology of living organisms in the caves of Pinega. *Severniy speleol'manakh*. 1999, no. 3, pp. 31 — 38. [In Russ].
12. Yong Fan, Huihui Liao, Guangdong Yang, Tao Zhou, Ke Deng, Bin Tian Dynamic behaviour of fish with swim bladders subjected to underwater explosions and methods for mitigating injuries. *Biological Conservation*. 2024, vol. 300, article 110849. DOI: 10.1016/j.biocon.2024.110849, available at: <https://www.Sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320724004117>.
13. Antonovskaya G. N., Konechnaya Y. V., Vaganova N. V., Basakina I. M., Morozov A. N., Shakhova E. V., Mikhaylova Y. A., Danilov K. B. Contribution of the large-scale research facilities «Arkhangelsk seismic network» to the Russian Arctic seismicity study. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022, vol. 13, no. 2. DOI: 10.5800/GT-2022-13-2-0587.
14. Antonovskaya G. N., Konechnaya Y. V., Morozova E. R., Mikhailova Y. A., Shakhova E. V. Potential of the Arkhangelsk seismic network for European Arctic monitoring. *Earthquake Science*. 2024, vol. 37, no. 5, pp. 434 — 444. DOI: 10.1016/j.eqs.2024.06.005.
15. Zheleznyak I. I., Manilyuk V. V. Study of the resistance of the Kheetei karst cave to dynamic impacts during the explosive development of the Ust-Borzinsky limestone deposit in Eastern Transbaikalia. *Lithosphere*. 2017, vol. 17, no. 4, pp. 137 — 143. [In Russ].
16. Savarenskiy E. V., Kirnos D. P. *Elementy seysmologii i seysmometrii* [Elements of seismology and seismometry], Moscow, GITTL, 1955, 543 p.
17. Mosinets V. N. *Drobnyashchee i seysmicheskoe deystvie vzryva v gornykh porodakh* [Crushing and seismic effect of explosion in rocks], Moscow, Nedra, 1976, 271 p.

18. Sadovskiy M. A. *Izbrannye trudy: Geofizika i fizika vzryva* [Selected works: Geophysics and explosion physics], Moscow, Nauka, 2004, 440 p.

19. Permanent V. Kh., Ovcharov Yu. E., Goncharov E. V. Intensity on the seismic scale, vibration speed and equivalent reduced distances during explosions. *Journal of Mining Institute*. 2001, vol. 148, no. 2, pp. 84–90. [In Russ].

20. *Seysmicheskaya shkala i metody izmereniya seysmicheskoy intensivnosti*. Pod red. Nazarova A. T., Shebalina N. V. [Seismic scale and methods of measuring seismic intensity. Nazarov A. T., Shebalin N. V. (Eds.)], Moscow, Nauka, 1975, 279 p.

21. Stafeev A. A., Lobanova T. V. *Ustoychivost' bortov i osushenie kar'erov. Laboratorniy praktikum* [Stability of the sides and drainage of quarries. Laboratory practice], Novokuznetsk, SibGIU, 2008, 39 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Наход Виталий Александрович¹ — аспирант,

e-mail: nakhod.vitaliy@knauf.ru,

ORCID ID: 0009-0002-5358-409X,

Малов Александр Иванович¹ — д-р геол.-минерал. наук,

доцент, e-mail: malovai@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0585-8893,

Данилов Константин Борисович¹ — канд. физ.-мат. наук,

старший научный сотрудник,

e-mail: danilov_kostea@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-1248-5095,

Горелик Глеб Дмитриевич — канд. техн. наук, доцент,

Санкт-Петербургский горный университет

императрицы Екатерины II, e-mail: gorelik_gd@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-9890-5275,

¹ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения РАН.

Для контактов: Наход В. А., e-mail: Nakhod.vitaliy@knauf.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.A. Nakhod¹, Graduate Student,

e-mail: nakhod.vitaliy@knauf.ru,

ORCID ID: 0009-0002-5358-409X,

A.I. Malov¹, Dr. Sci. (Geol. Mineral.),

Assistant Professor, e-mail: malovai@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0585-8893,

K.B. Danilov¹, Cand. Sci. (Phys. Mathem.),

Senior Researcher, e-mail: danilov_kostea@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-1248-5095,

G.D. Gorelik, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining

University, 199106, Saint-Petersburg, Russia,

e-mail: gorelik_gd@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-9890-5275,

¹ N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 163020, Arkhangelsk, Russia.

Corresponding author: V.A. Nakhod, e-mail: Nakhod.vitaliy@knauf.ru.

Получена редакцией 20.01.2025; получена после рецензии 14.02.2025; принята к печати 10.06.2025.

Received by the editors 20.01.2025; received after the review 14.02.2025; accepted for printing 10.06.2025.

ВЛИЯНИЕ СТЫКОВ НА ПОВЕДЕНИЕ СЕГМЕНТНОЙ ОБДЕЛКИ ТОННЕЛЯ КВАЗИ-ПРЯМОУГОЛЬНОГО ОЧЕРТАНИЯ

Нгуен Тай Тиен¹, М.А. Карасев², До Нгок Ань¹

¹ Исследовательская группа по устойчивому развитию в подземном строительстве,
Ханойский университет горного дела и геологии, Вьетнам

² Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
e-mail: Karasev_MA@pers.spmi.ru

Аннотация: Рост численности населения в крупных городах по всему миру требует существенного улучшения транспортной инфраструктуры, которое может быть достигнуто за счет развития подземного пространства городов. Речь идет о расширении строительства дополнительных линий метрополитена и увеличении пропускной способности тоннелей. В области подземного строительства наметилась тенденция к использованию круглых и прямоугольных форм поперечного сечения тоннелей, последние сочетают в себе преимущества обеих форм. Квази-прямоугольное поперечное сечение является частным случаем таких сечений. Изучению формирования напряженного состояния таких обделок посвящены лишь отдельные научные работы. Представлена методика расчета напряженного состояния сборной обделки квази-прямоугольного поперечного сечения с учетом наличия связей между отдельными сегментами, характеризующимися конечной жесткостью. Исследование направлено на изучение влияния вращательной жесткости соединения двух смежных сегментов, а также их количества на напряженное состояние тоннельной обделки. Полученные результаты показывают, что по мере уменьшения жесткости вращения и увеличения числа сегментов обделки внутренние силы в обделке тоннеля уменьшаются, в то время как радиальные смещения увеличиваются, то есть наблюдается снижение жесткости обделки. При дальнейшем увеличении количества сегментов обделки наблюдается снижения влияния их количества на интегральные показатели напряженного состояния обделки и ее радиальные смещения.

Ключевые слова: квази-прямоугольная форма, тоннель, расчетный метод, сборная обделка, жесткость, напряжения, напряженное состояние, отпор массива.

Благодарность: Это исследование было профинансировано Ханойским университетом горного дела и геологии в рамках гранта T23-44.

Для цитирования: Нгуен Тай Тиен, Карасев М. А., До Нгок Ань Влияние стыков на поведение сегментной обделки тоннеля квази-прямоугольного очертания // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 7. – С. 55–72. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_55.

Effect of joints on the behavior of a segmental sub-rectangular tunnel lining

Nguyen Tai Tien¹, M.A. Karasev², Do Ngoc Anh¹

¹ Sustainable Development in Underground Engineering Research Team,
Hanoi University of Mining, and Geology, Vietnam

² Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
Saint-Petersburg, Russia, e-mail: Karasev_MA@pers.spmi.ru

Abstract: The increasing population in major cities around the world requires a significant improvement in transport infrastructure, which can be achieved by developing the underground space of cities. This involves expanding the construction of additional underground lines and increasing the capacity of tunnels. In the field of underground construction, there is a trend towards cross-sectional shapes that combine circular and rectangular tunnels. This innovative shape combines the advantages of both shapes. The sub-rectangular cross-section is a special case of such cross-sections. Only separate scientific works are devoted to the study of stress state formation of such linings. The paper presents a method of calculating the stress state of a prefabricated lining of a sub-rectangular cross-section, taking into account the presence of connections between individual segments characterised by finite stiffness. The study is aimed at investigating the influence of the rotational stiffness of the connection of two adjacent segments, as well as their number on the stress state of the tunnel lining. The results obtained in this paper show that as the rotational stiffness decreases and the number of lining segments increases, the internal forces in the tunnel lining decrease, while the radial displacements increase, i.e. the stiffness of the lining decreases. With further increase in the number of lining segments, a decrease in the influence of their number on the integral indices of the stress state of the lining and its radial displacements is observed.

Key words: sub-rectangular tunnel, joint stiffness, joint location, number of joints, stiffness, stresses: stress state, lining behavior.

Acknowledgements: This research was supported by the Hanoi University of Mining and Geology under grant T23-44. This funding is greatly appreciated.

For citation: Nguyen Tai Tien, Karasev M. A., Do Ngoc Anh Effect of joints on the behavior of a segmental sub-rectangular tunnel lining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(7):55-72. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_55.

Introduction

The population growth in major cities around the world demands significant development in transportation infrastructure, while the available surface areas in urban continue to shrink. Hence, the development of metro lines is essential in large cities. Twin circular tunnels with one-way traffic in each single tunnel are usually the typical metro line solution. Compared to a large single circular tunnel, twin tunnels have technical advantages such as less sur-

face settlement and smaller internal forces induced in the tunnel lining [1]. However, the twin tunnels solution causes a greater surface settlement trough. The sub-rectangular tunnel, which was studied by Huang et al., 2018 [2], is a combination of the circular and rectangular tunnels. Compared with a large circular tunnel, a sub-rectangular tunnel allows increasing the efficiency of underground space utilization by around 20%, and the tunnel depth can also be reduced by a corresponding proportion [1].

Studies on the behavior of sub-rectangular tunnel linings can be conducted using experimental methods [3], analytical methods [4–6], and numerical methods [7, 8]. It is worth noting that a large amount of research is devoted to the lining structures in the mining industry [9, 10]. The practice of assessing the stress – strain behavior of the soil mass and lining of the St. Petersburg underground has succeeded, which is noted in the researches [11–13].

Huang et al., 2018 [2] conducted a study on the behavior of sub-rectangular tunnel linings (Fig. 1) through a full-scale test considering the self-weight of the structure. A new loading configuration was developed to experimentally load the full-scale sub-rectangular tunnel lining, enabling the comprehensive assessment of the mechanical properties of the segmental tunnel lining

under full loading conditions for the first time. The experimental results were compared with numerical simulations using the Abaqus program. The results indicated that the maximum positive moment was observed near the crown and the bottom part of the tunnel lining, while the maximum negative moment was observed at the shoulder parts.

Zhu et al., 2018 [14] conducted numerical simulations to study the mechanical behavior of sub-rectangular tunnel linings. In the study, the behavior of circular, sub-rectangular, and rectangular tunnel lining with the same external dimensions were clarified. The results indicated that circular tunnels exhibited high load-bearing capabilities but were less economically efficient compared to sub-rectangular tunnels. Meanwhile, rectangular tunnels pro-

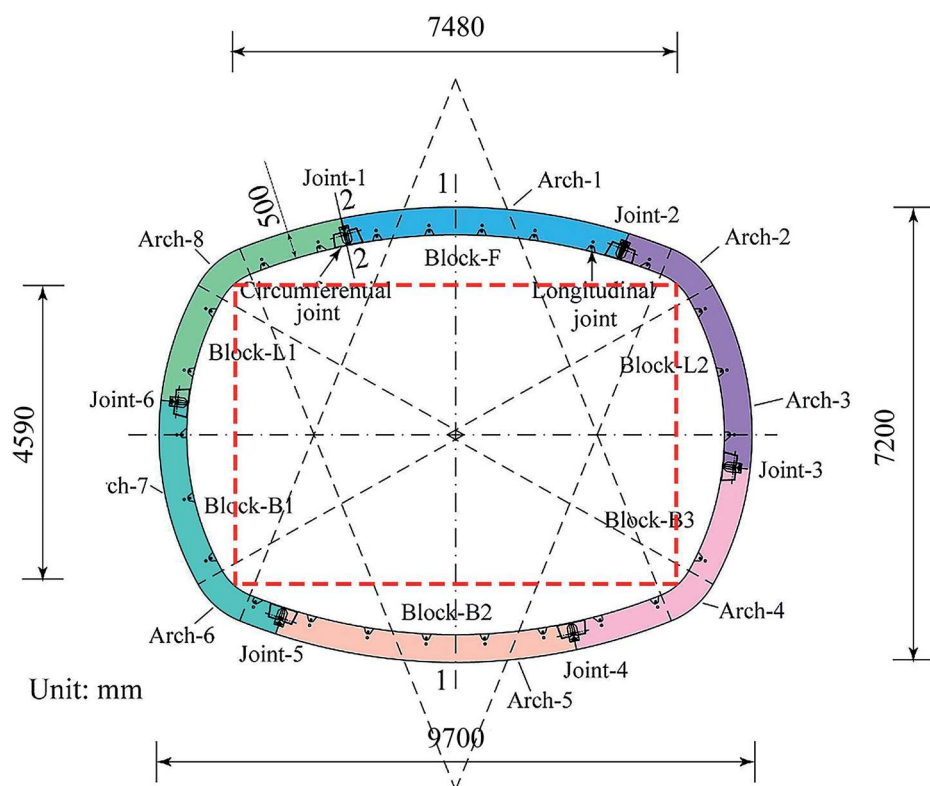


Fig. 1. Sub-rectangular tunnel lining [3, 8]

Рис. 1. Квази-прямоугольная обделка тоннеля [3, 8]

ved to be unfavorable for load transfer and required additional reinforcement at the corners.

Zhang et al., 2020 [4] investigated the influence of rotational stiffness on the behavior of joints in the segmental lining of a quasi-rectangular tunnel with an interior column. An equation expressing the relationship between the joint rotation angle, bending moment and axial force is proposed for a specific tunnel geometry, based on numerical model results and experimental data. Zhang also concludes that the width of the interior column and the shear stiffness of the joint significantly affect the lining behavior.

Zhang et al., 2021 [15] conducted studies to optimize longitudinal joints (enhancing concrete properties, increasing the number and diameter of bolts, and expanding the lever arm distance between bolts and the compressed zone) in a quasi-rectangular shield tunnel with an interior column. Results from experiments and numerical simulations performed by Zhang et al., 2021 [15] demonstrate that increasing the distance between bolts and the compressed zone most effectively improves the performance of the joints.

Although many authors have previously studied the influence of joint stiffness, joint position, and the number of joints on the performance of structures. These studies have been conducted on the tunnel lining with circular cross-sections. In the study of Zhang et.al, the impact of joint stiffness on the behavior of the quasi-rectangular tunnel lining with an interior column was investigated. However, the influence of the joint position and the number of joints was not addressed in Zhang's study. On the other hand, in the quasi-rectangular cross-section tunnel studied by Zhang, which includes an interior column, the presence of this column leads to differences in the mechanical behavior compared to a sub-rectangular tunnel lining

without an interior column. Therefore, the effect of joints on the behavior of sub-rectangular tunnel linings (without column) is investigated using numerical methods in this study. This approach allows a more detailed analysis of the structural behavior under variations in the rotational stiffness of joints, the number of joints and the position of joints.

The stiffness of segmental lining

Currently, there are four practical calculation methods utilized in the design of segmental tunnel linings: (a) the routine method, which completely disregards the impact of segmental joints; (b) the multi-hinge ring method, where joints are treated as free hinges [16]; (c) the modified routine method (MRM), which assumes a uniformly rigid ring with an average rigidity derived from a rigidity reduction factor and bending moment transmission [17, 18]; and (d) the beam-spring model (BSM), which treats segments as beams and joints as springs [19–21]. Generally, the existence of joints results in a decrease in the stiffness of the segmental lining. This suggests that the segmental lining's deformability is higher compared to that of a continuous lining [5, 22], this fact is also reflected in the works [23–25].

In the structural analyses, a longitudinal joint can be conceptualized as a combination of an axial spring (KA), a rotational spring (KRO), and a radial spring (KR), as shown in Fig. 2.

According to the research conducted by Do, 2014 [19], under axial stiffness conditions ranging from 10 to 3000 MN/m, it is revealed that the axial stiffness of the joint has an insignificant impact on the behavior of the segmental tunnel lining. Additionally, in this study, when evaluating the influence of the radial stiffness of joints with and without padding (made of rubber, bitumen material) with varying stiffness. Do, 2014 [19] also points out that

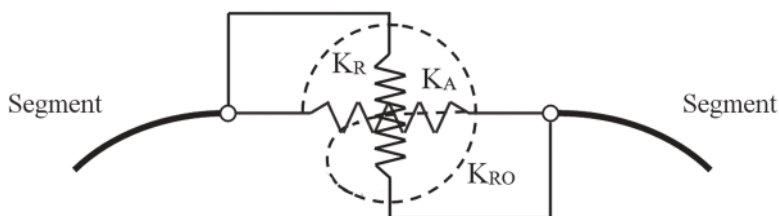


Fig. 2. Axial stiffness (K_A), radial stiffness (K_R) and rotational stiffness (K_{RO}) of a longitudinal joint [22]

Рис. 2. Осевая жесткость (K_A), радиальная жесткость (K_R) и жесткость при вращении (K_{RO}) продольного стыка K_{RO} [22]

radial stiffness does not significantly affect the behavior of the segmental tunnel lining.

Therefore, this study focuses on evaluating the influence of the rotational stiffness of longitudinal joints on the behavior of the joints and internal forces induced in segmental tunnel lining.

The rotational stiffness value is the bending moment per unit length needed to induce a unit rotation angle along the joints of the segmental lining. It can be simply

estimated using the following equation [14]:

$$K_{RO} = \frac{M}{\varphi}. \quad (1)$$

Here, M is the bending moment per unit length of joint; kN.m/m ; φ is the unit rotation angle of joint, degree.

Determination of rotational stiffness according to Leonhardt

Stiffness of the joint is determined by the formula:

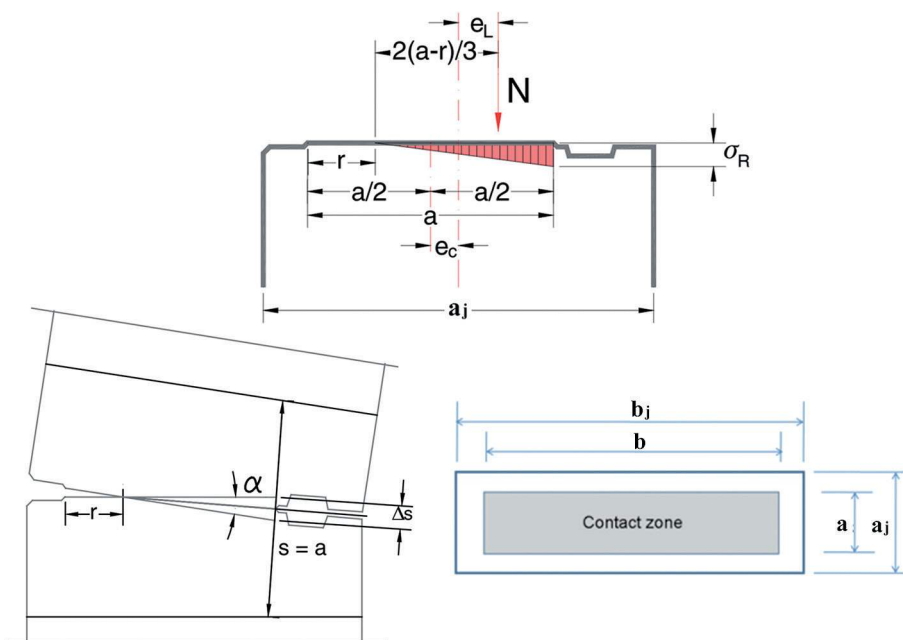


Fig. 3. Approaches for estimating the torsional resistance of concrete hinges $e_L = M/N$ – eccentricity of the normal force; e_c – eccentricity of the hinge neck

Рис. 3. Подходы к оценке сопротивления скручиванию бетонных петель $e_L = M/N$ – эксцентриситет нормальной силы; e_c – эксцентриситет относительно центра шарнира

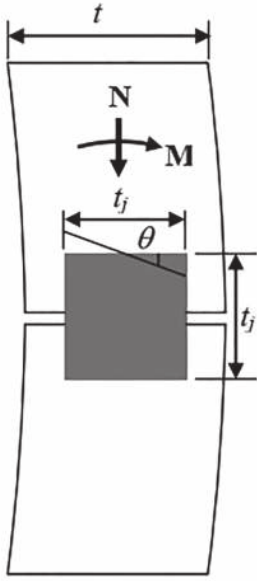


Fig. 4. Cross-section of the longitudinal joint [23]
Рис. 4. Поперечное сечение продольного стыка [23]

$$k_{\varphi} = 1.125a^2 b E_c m (1 - 2m)^2. \quad (2)$$

Here, a is the width of the contact surface in the joint, m; b is the length of the contact surface in the joint, m; E_c is Young's modulus of the lining material, kN/m²; m is the eccentricity ratio, $m = M/aN$; M and N are the bending moment and normal force in the joint, respectively; α is the torsional angle.

Determination of rotational stiffness according to Janssen

The rotational stiffness of the segmental joints is determined using Janssen's formulas. Janssen's joint posits that the contact area can be modeled as a concrete beam. This beam depth equals the width of the joint contact area, and its height matches the contact height of the joint (Fig. 4). The joint opening is considered as the concrete beam is unable to bear any tensile stresses.

For an increasing rotation of the joint, two stages can be identified [14, 26]:

1. Closed joint (rotation $\theta \leq \frac{2N}{E_c b t_j}$);
2. Opened joint (rotation $\theta > \frac{2N}{E_c b t_j}$),

where b is the length of the surface part in the joint, m; E_c is Young's modulus of the lining material, kN/m²; t_j is the height and width of the contact surface in the joint, m; N is the normal force, kN/m; θ is the rotational angle of joint, degree.

Rotational stiffness throughout the operational phases of the joint:

$$K_{RO} = \frac{b \cdot t_j^2 \cdot E_c}{12}, \text{ Closed joint.} \quad (3)$$

$$K_{RO} = \frac{9 b t_j E_c M \left(\frac{2M}{N t_j} - 1 \right)^2}{8N}, \text{ Opened joint.} \quad (4)$$

Rotational stiffness of the joint in a sub-rectangular lining.

Zhang, 2020 [4] presented a third-degree formula for bending moments and axial forces with corresponding polynomial coefficients (5). This formula is developed to determine the rotational angle of the joint in the segmental lining of a quasi-rectangular tunnel with an interior column. These results are built upon the convergence of numerical methods and experimental outcomes.

$$\varphi(M, N) = M^3 + M^2 \cdot N + M \cdot N^2 + M^2 + M \cdot N + M. \quad (5)$$

To avoid excessive length in the article, the values of polynomial coefficients are not presented; interested readers can refer to Zhang's article for details [4]. Zhang [4] also notes that the formula is associated with a specific tunnel geometry. However, Zhang et al. [4] are confident that param-

ters related to the tunnel's shape could be integrated into the formula in future developments. The rotational stiffness value can be determined according to the formula (6), as follows [16]:

$$K_{RO} = \frac{M}{\varphi(M, N)} = \frac{1}{M^2 + M \cdot N + N^2 + M + N} \quad (6)$$

It can be observed that, in reality, the rotational stiffness of joints within a segmental ring varies and depends on the magnitude of moments and axial forces within the joint. However, for the purpose of simplification, the rotational stiffness of the joints is assumed to be uniform across all joints in this study.

To depict the correlation between structural forces and displacements of the lining based on joint rotational stiffness, the dimensionless factor termed the rotational stiffness ratio, denoted as $\lambda = (K_{RO} l) / (E_l I_l)$ is utilized. This factor is employed to signify the relative joint stiffness compared to the bending stiffness of the lining segment. Typically, a standard unit length for a lining segment, denoted as l , is set at 1 m in calculations.

Numerical simulations

Geometric dimensions of the tunnel cross-section

The sub-rectangular tunnel was first researched by Huang (2018) [2] using full-scale loading tests with outer dimension of 10.7×7.7 m. The tunnel lining is composed of 6 segments (B1, B2, B3, L1, L2 and F block) with a segment thickness of 500 mm. The sub-rectangular tunnel structure is formed by 8 arches, including 2 arches on the sides with an angle of 53 degrees each, and the crown arch and bottom arch with an angle of 45 degrees each, and 4 shoulder arches have an angle of 41 degrees each (Fig. 1).

Numerical simulation using FEM model

To investigate the behavior of sub-rectangular (with and without interior columns) the Plaxis 2D program, based on the Finite Element Method (FEM), was employed [27]. The soil parameters were obtained

Table 1

Geometrical features of tunnel shapes (compiled by authors)

Геометрические особенности фигур тоннелей (составлено авторами)

Parameters	Sub-rectangular
Tunnel Width, W (m)	10.200
Tunnel Height, H (m)	7.700
W/H ratio	1.325
Outer Perimeter	29.795
Internal Perimeter	26.654
Internal Area (m^2)	52.926
Outer Area (m^2)	67.038

Table 2

Input parameters (compiled by authors)

Входные параметры (составлено авторами)

Parameter	Symbol	Value	Unit
Properties of soil			
Density	γ_s	20	kN/m ³
Young's modulus	E_s	10	MPa
Poisson's ratio	ν_s	0.31	—
Internal friction angle	φ	0	degree
Cohesion	c	0.0256	MPa
The lateral earth pressure coefficient	K_0	$1 - \sin(\varphi)$	—
Overburden	H	10	m
Properties of tunnel lining			
Material Model	linear elastic		
Young's modulus	E	35,000	MPa
Density	γ_c	24	kN/m ³
Lining thickness	t	0.50	m

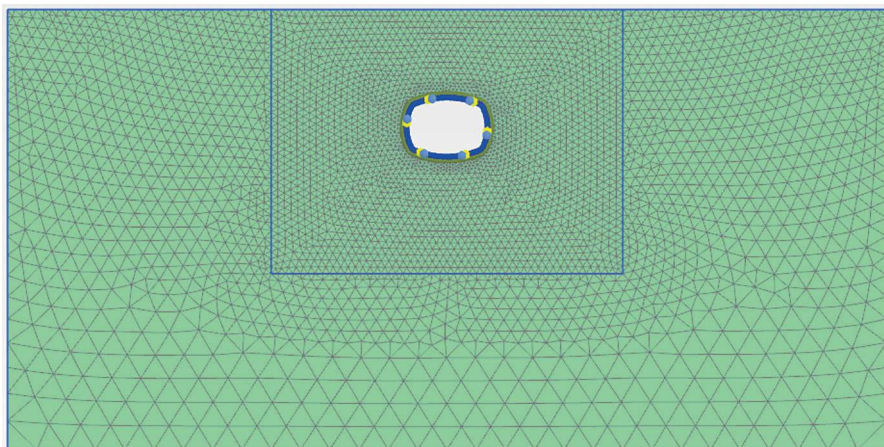


Fig. 5. Geometry and finite element mesh of the tunnel model (compiled by authors)

Рис. 5. Геометрия и конечно-элементная сетка тоннельной модели (составлено авторами)

from dense clay sand layer of the Hanoi Metro Line 3 tunnel project [17]. The parameters of the tunnels were sourced from the Shanghai Metro Line 4 project [17].

The utilized input parameters are detailed in Tables 1 and Tables 2. The numerical model possesses dimensions of 100 m in width and 50 m in height (comprising approximately 8900 elements and 72 100 nodes. The model boundary conditions are specified as follows: the model bottom is fixed in both vertical and horizontal directions; the horizontal direction of the two sides of the model is fixed; the model top is free.

For simplicity, the soil is represented using the linear elastic-perfect plastic material model based on the Mohr–Coulomb (MC) criteria [28]. Despite the MC model's lower accuracy in depicting soil behavior during settlement compared to the Hardening soil model, as noted by Çelik [29], it remains widely employed in structural behavior studies [30] due to its straightforward input parameters and reduced computational time. The joint between two segments in the segmental lining is simulated using a connected node. This node possesses stiffness equivalent to the rotational stiffness of the joint, as calculated in section 2.3.

Results and Discussion

Influence of the rotational stiffness on the behavior of tunnel lining

In the reference case, the segmental tunnel lining consists of 6 segments (6 joints) with geometric parameters as depicted in Fig. 1 and detailed in Table 1. The joints are located at the angles of 34°, 84°, 133°, 214°, 264° and 313° measured counter-clockwise with respect to the bottom of invert part.

As presented in section 2, to evaluate the influence of the rotational stiffness of the joint K_{RO} , a non-dimensional parameter, λ , is employed. The value of λ varies within the range from 0.01 to 1.0. The numerical model results regarding the impact of the rotational stiffness ratio of the joint on internal forces and total displacement are illustrated in Fig. 6.

From Fig. 6, it is evident that when the rotational stiffness ratio is less than 0.3, changes in the internal forces and total displacements are significantly affected by variations in the rotational stiffness. However, when the value of λ exceeds 0.3, changes in the rotational stiffness have a smaller impact on both internal forces and total displacements. It is evident that a decrease in the rotational stiffness of the

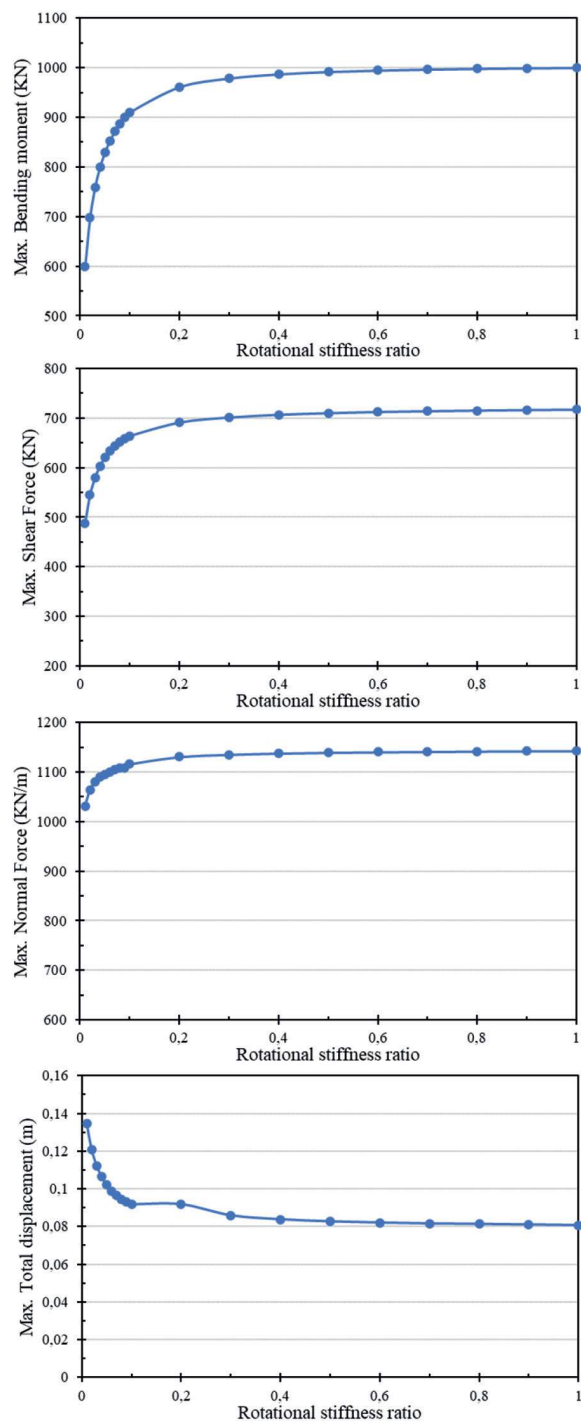


Fig. 6. Maximum internal force induced in tunnel lining and total displacement (compiled by authors)

Рис. 6. Максимальное внутреннее усилие, возникающее в обделке тоннеля, и полное смещение (составлено авторами)



Fig. 7. Cases of joint location of segmental tunnel lining (compiled by authors)

Рис. 7. Случаи стыкового расположения сегментной обделки тоннеля (составлено авторами)

joint leads to a reduction in the overall stiffness of the tunnel lining, resulting in an increase in total displacement of the tunnel lining. Consequently, the internal forces generated in tunnel lining are reduced. This aligns with previous studies on the influence of the rotational stiffness of the joint on internal forces and displacements in tunnel lining structures with circular cross-sections.

The influence of the rotational stiffness on the maximum bending moment and maximum shear force is greater compared to the maximum axial force.

Influence of the number and position of joints on the behavior of tunnel lining

1. Influence of the position of joints

In this case, a tunnel lining with 6 joints has been investigated. Assuming each joint is evenly spaced at an angle of 60° (angle measured from the center of the tunnel)

and the reference joint is located at the crown of the tunnel. The rotational stiffness ratio of the joints is assumed to be 0.1. Soil parameters are determined from Table 2. The joint positions are illustrated in Fig. 7.

Fig. 9 shows the results of bending moments and normal force generated in the segmental lining with 6 joints, considering the joints' orientation angles of 0° , 15° , 30° and 45° relative to the tunnel crown. While the normal force undergoes minimal change with variations in the angle of the joint relative to the reference joint, the magnitude of the bending moment exhibits much greater variations. In Fig. 9a, the bending moment is the largest when the joint is oriented at 0° relative to the reference joint, while it is the smallest at a 30-degree.

This can be explained as follows: the presence of joints reduces the overall stiffness of the structure. However, the effect

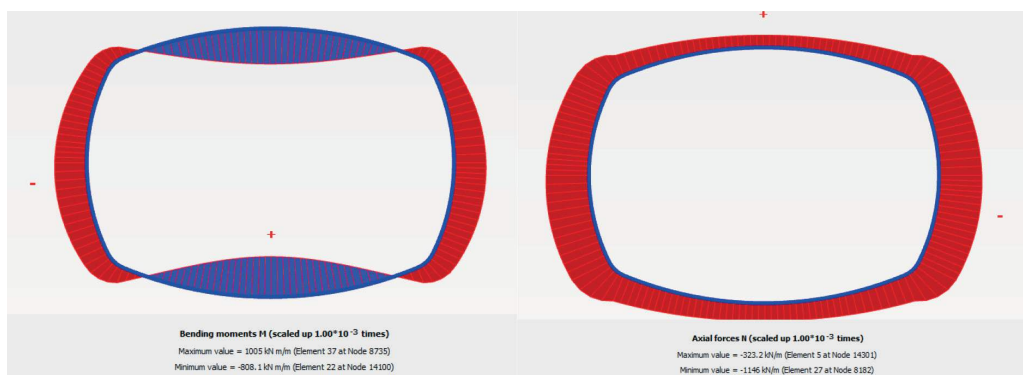


Fig. 8. Internal force induced in the tunnel lining without joints (compiled by authors)

Рис. 8. Внутреннее усилие, возникающее в обделке тоннеля без стыков (составлено авторами)

tiveness of the joint also depends on its position. In the case of joints at the reference joint position (0°), where the bending moment is the largest (Fig. 8), the introduction of a joint at this position leads to the most significant reduction in the

bending moment. However, other joints are located at the shoulders of the tunnel, where the bending moment values are smallest (Fig. 8).

Therefore, the effectiveness of reducing bending moments at these joints is mi-

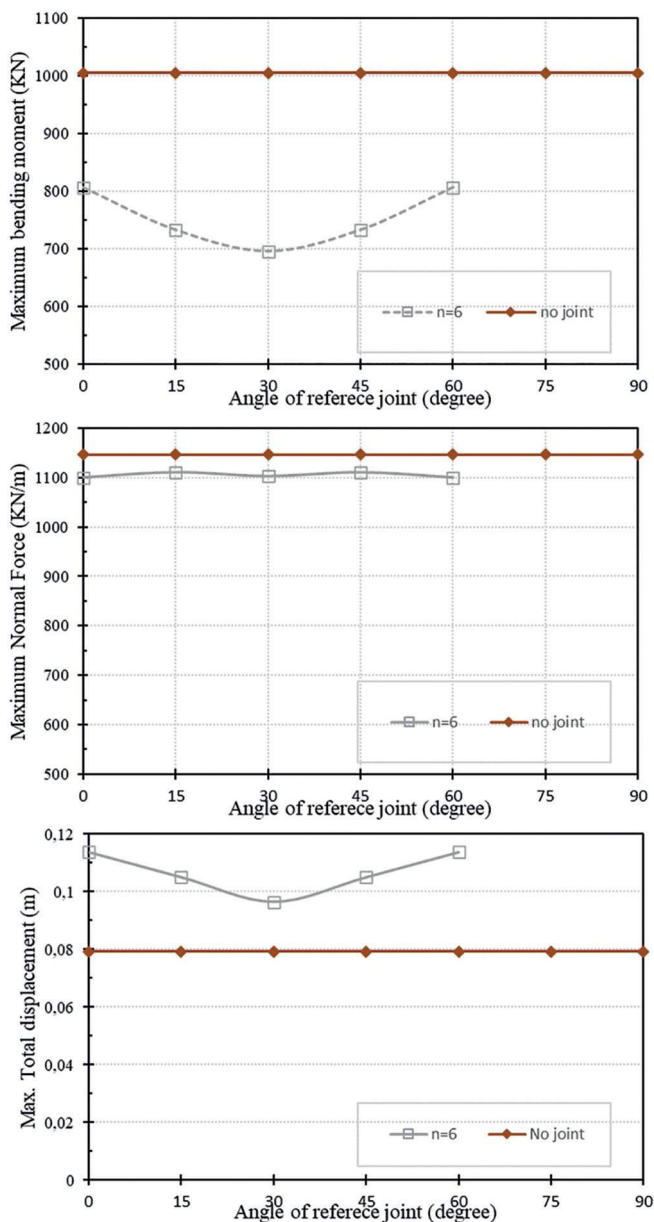


Fig. 9. Effect of the joint location on the internal force and total displacement (compiled by authors)

Рис. 9. Влияние расположения шарнира на внутреннюю силу и полное смещение (составлено авторами)

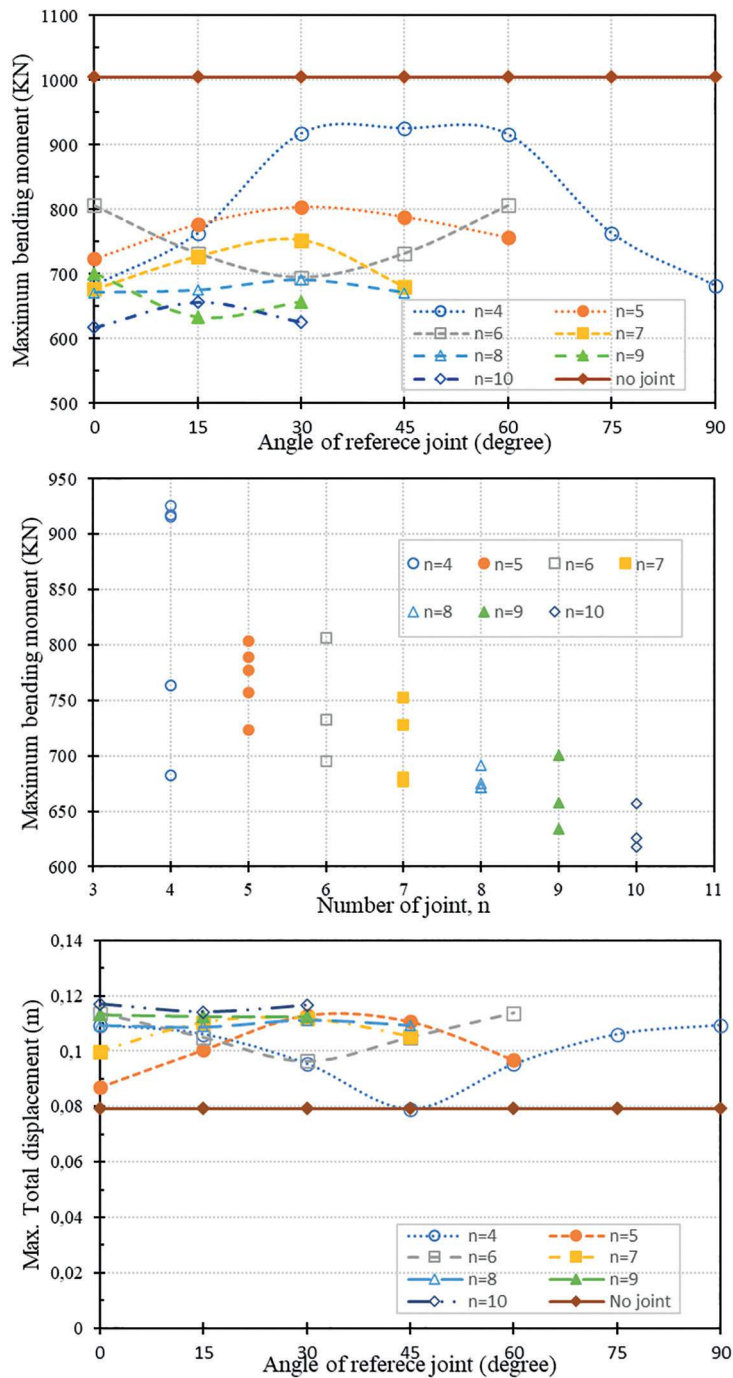


Fig. 10. Effect of the location and the number of joints on the internal force and total displacement (compiled by authors)

Рис. 10. Влияние расположения и количества шарниров на внутреннюю силу и общее смещение (составлено авторами)

nimal. In the case where the angle of the joint and the reference joint is 30° , there are 2 joints at the tunnel crown, 2 joints at the tunnel invert, and one joint on each sidewall.

All joints are positioned at locations with large bending moments. Consequently, the reduction in bending moments within the segmental tunnel lining is most effective.

The total displacement at the joint position relative to the reference angle of 30 degrees is also the smallest, as observed in Fig. 9c.

Influence of the number of joints

The number of joints varies in value from 4 to 10, the position of the joints in each case is also changed in steps of 15° .

Fig. 10 shows that an increase in joint number will result in a reduction in the maximum bending moment in the segmental lining and total displacement, its magnitude is also affected by the joint location.

The results indicate that as the number of joints increases, the maximum moment in the tunnel lining decreases. This is evidently attributed to the reduced stiffness of the segmental lining with an increased number of joints, leading to a smaller bending moment generated in the tunnel lining and a larger total displacement.

As per Fig. 10, the impact of the joint orientation is not similar to that of the joint number. Broadly, the discrepancy in the maximum bending moment, stemming from changes in joint orientation, diminishes with an increase in joint number. This implies that with a higher number of joints, the effect of joint orientation diminishes. This occurrence can be elucidated by the shorter span of each segment in a tunnel ring with a greater segment number. Consequently, the loads acting on each segment become nearly uniform in magnitude, irrespective of joint orientation.

The larger the number of joints, the smaller the influence of the joint position on the internal force and total displacement of the tunnel lining. When the number of joints is large, the joints are arranged more evenly and closer on the tunnel boundary. Therefore, when changing the position of the joint, the internal force and total displacement will not change significantly. It can be clearly seen in the case of segmental tunnel linings with 8, 9 and 10 joints in Figs. 10b and 10c.

In the case of a tunnel lining with 4 joints, a shift in joint position results in a substantial alteration in both the maximum bending moment and the maximum total displacement. This underscores the significant impact of joint orientation on the development of the maximum bending moment in a segmental lining. This phenomenon can be attributed to the reduced importance of a joint's influence when it is situated near a point where the bending moment equals zero. Conversely, the influence of a joint on reducing the bending moment becomes more pronounced when the joint is positioned near points of maximum bending moments.

It is intriguing to observe that, for cases with 4 joints, 5 joints, 7 joints, 8 joints and 10 joints, the favorable direction of the joint is characterized by an angle (θ) nearly approaching zero. The reference joint is positioned near the top of the tunnel, and the critical orientation of the joint corresponds to the maximum value of the maximum bending moment at angles θ of 45° , 30° (5, 7 and 8 joints) and 15° , respectively.

Conversely, in cases where the joint number is 6 joints or 9 joints, the favorable orientation of the joints is indicated by an angle of 30° for the reference joint θ and 15° , respectively. In these scenarios, the critical orientation of the joints is denoted by an angle of zero degrees for the reference joint (0°).

Conclusions

In the study, numerous numerical simulations were conducted, exploring variations in the rotational stiffness of the joint, the location of joints, and the number of joints for the segmental lining of the sub-rectangular cross-section.

The following conclusions were drawn:

- The greater the rotational stiffness of the joint, the greater the internal force generated in the tunnel lining and the smaller the total displacement. When the rotational stiffness coefficient is less than 0.3, the change in the stiffness coefficient has a significant influence on the internal force and total displacement;
- The position of the joint significantly affects the internal force in the tunnel lining. When the joint is located in a position with a small bending moment, its influence on the internal force in the tunnel lining is minimal. Conversely, when the joint is located in a position with a large

bending moment, its impact on the internal force in the tunnel lining is substantial;

- The number of joints also has a significant impact on the internal force and total displacement of the tunnel lining. The greater the number of joints, the smaller the internal force and the larger the total displacement.

In this study, exclusive focus has been placed on examining the rotational stiffness of the joint, without delving into the effects of normal and shear stiffness. While certain authors have investigated and demonstrated that the normal and shear stiffness of a joint do not significantly affect the internal force induced in circular tunnel linings, it's worth noting that these studies were specific to circular configurations. Moving forward, our research will be expanded to explore the influence of normal and shear stiffness on the behavior of sub-rectangular tunnel linings.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li P., Wang F., Fan L. Analytical scrutiny of loosening pressure on deep twin-tunnels in rock formations // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 84, pp. 373–380. DOI: 10.1016/j.tust.2018.10.007.
2. Huang X., Zhua Y., Zhanga Z., Zhu Y., Wang S., Zhuang Q. Mechanical behaviour of segmental lining of a sub-rectangular shield tunnel under self-weight // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 74, pp. 131–144. DOI: 10.1016/j.tust.2018.01.016.
3. Liu X., Liu Z., Yuan Y., Zhu Y. Quasi-rectangular shield tunneling technology in the Ningbo rail transit project / *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*. Springer International Publishing, 2018, pp. 2765–2773. DOI: 10.1007/978-3-319-59471-2_314.
4. Zhang W., Corte W. D., Liu X., Taerwe L. Influence of rotational stiffness modeling on the joint behavior of quasi-rectangular shield tunnel linings // *Applied Sciences*. 2020, vol. 10, pp. 1–27. DOI: 10.3390/app10238396.
5. Zhang W., Corte W. D., Liu X., Taerwe L. A comparative investigation between the beam spring method and the modified routine method in special-section shield tunnels. A case study for quasi-rectangular tunnels // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2022, vol. 46, no. 9, pp. 1754–1781. DOI: 10.1002/nag.3367.
6. Yuhang Y., Xian L., Zhen L., Zhu Y. Study on design model of quasi-rectangular shield tunnel linings (in Chinese) // *Journal of Southwest Jiaotong University*. 2019, vol. 20, no. 6, pp. 1188–1195. DOI: 10.3390/app10238396.
7. Ильинов М. Д., Петров Д. Н., Карманский Д. А., Селихов А. А. Аспекты физического моделирования процессов структурных изменений образцов горных пород при термобарических условиях больших глубин // *Горные науки и технологии*. — 2023. — Т. 8. — № 4. — С. 290–302. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-09-150.

8. Li Y., Zou Z. Numerical investigation on the influence of super-large-diameter shield tunneling on Nearby existing metro tunnels and the protection scheme // *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, no. 24, article 13179. DOI: 10.3390/app132413179.

9. Коршунов В. А., Павлович А. А., Бажуков А. А. Оценка сдвиговой прочности горных пород по трещинам на основе результатов испытаний образцов сферическими инденторами // *Записки Горного института*. — 2023. — Т. 262. — С. 606–618. DOI: 10.31897/PMI.2023.16.

10. Господариков А. П., Киркин А. П., Трофимов А. В., Ковалевский В. Н. Определение физико-механических свойств горных пород при применении противоударных разгрузочных мероприятий // *Горный журнал*. — 2023. — № 1. — С. 26–34. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.04.

11. Господариков А. П., Зацепин М. А. Математическое моделирование нелинейных краевых задач геомеханики // *Горный журнал*. — 2019. — Т. 12. — С. 16–20.

12. Набатов В. В., Вознесенский А. С. Геомеханический анализ влияния строительства новых тоннелей в окрестности действующих подземных сооружений метрополитена на состояние грунтового массива // *Записки Горного института*. — 2023. — Т. 264. — С. 926–936.

13. Дашко Р. Э., Колосова Д. Л. Безопасность проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений различного назначения на водонасыщенных глинистых грунтах: инженерно-геологические и геотехнические аспекты // *Геотехника*. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 54–67. DOI: 10.25296/2221-5514-2023-15-1-54-67.

14. Zhu Y., Zhang Z., Huang X., Zhu Y. Numerical investigation on the mechanical characteristics of a special-shaped shield lining with a large cross-section / *Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Tunnelling and Underground Construction*. Springer Singapore, 2018, pp. 384–391. DOI: 10.1007/978-981-13-0017-2_39.

15. Zhang W., Corte W. D., Liu X. Optimization study on longitudinal joints in quasi-rectangular shield tunnels // *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 2, article 0573. DOI: 10.3390/app11020573.

16. Lei M., Lin D., Shi C., Ma J., Yang W. A structural calculation model of shield tunnel segment: Heterogeneous equivalent beam model // *Advances in Civil Engineering*. 2018, vol. 2018, pp. 1–16. DOI: 10.1155/2018/9637838.

17. Do N. A., Dias D., Oreste P., Djeran-Maigre I. Internal forces in segmental tunnel linings – A comparison between current design methods // *Journal of Mining Science*. 2014, vol. 50, no. 2, pp. 326–334. DOI: 10.1134/S1062739114020161.

18. Wu H. N., Shen S. L., Yang J., Zhou A. Soil-tunnel interaction modelling for shield tunnels considering shearing dislocation in longitudinal joints // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 78, pp. 168–177. DOI: 10.1016/j.tust.2018.04.009.

19. Do N. A. Numerical analyses of segmental tunnel lining under static and dynamic loads. Doctoral Thesis. Civil Engineering. INSA de Lyon, Lyon, V. 1, 2014.

20. Nguyen C., Gospodarikov A. P. Hyperstatic reaction method for calculations of tunnels with horseshoe-shaped cross-section under the impact of earthquakes // *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2020, vol. 19, pp. 179–188. DOI: 10.1007/s11803-020-0555-0.

21. Nguyen C. T., Do N. A., Dias D., Pham V. V., Alexandr G. Behaviour of square and rectangular tunnels using an improved finite element method // *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, no. 4, article 2050. DOI: 10.3390/app12042050.

22. Протосеня А. Г., Алексеев А. В., Вербило П. Э. Прогноз напряженно-деформированного состояния и устойчивости лба забоя тоннеля при пересечении нарушенных зон грунтового массива // *Записки Горного института*. — 2022. — Т. 254. — С. 252–260. DOI: 10.31897/PMI.2022.26

23. Нгуен Тай Тиен, Карасев М. А. Расчет оптимальных геометрических параметров тоннеля квазипрямоугольного поперечного очертания по силовому фактору // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2021. — № 6. — С. 59–71. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_59.

24. Nguyen T. T., Do N. A., Karasev M. A., Kien D. V., Dias D. Influence of tunnel shape on tunnel lining behaviour // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*. 2021, vol. 174, no. 4, pp. 355–371. DOI: 10.1680/jgeen.20.00057.

25. Попов М. Г., Синегубов В. Ю. Исследование свойств двухслойных бетонно-фибробетонных конструкций при различных соотношениях толщины слоев // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 70–82. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-70-82.

26. Kroetz H. M., Do N. A., Dias D., Beck A. T. Reliability of tunnel lining design using the hyperstatic reaction method // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 77, pp. 59–67.
27. Протосеня А. Г., Иовлев Г. А. Прогноз напряженно-деформируемого состояния в окрестности подземного сооружения в нелинейно-деформируемых грунтовых массивах // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. — 2020. — № 2. — С. 215–228.
28. Ильинов М. Д., Коршунов В. А., Поспехов Г. Б., Шоков А. Н. Комплексные экспериментальные исследования механических свойств горных пород: проблемы и пути их решения // *Горный журнал*. — 2023. — № 5. — С. 11–18. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.02.
29. Çelik S. Comparison of mohr-coulomb and hardening soil models numerical estimation of ground surface settlement caused by tunneling // *Iğdır University Journal of the Institute of Science and Technology*. 2017, vol. 7, no. 4, pp. 96–102. DOI: 10.21597/jist.2017.202.
30. Abdellah W. R., Ali M. A., Yang H. S. Studying the effect of some parameters on the stability of shallow tunnels // *Journal of Sustainable Mining*. 2018, vol. 17, no. 1, pp. 20–33. DOI: 10.1016/j.jsm.2018.02.001. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Li P., Wang F., Fan L. Analytical scrutiny of loosening pressure on deep twin-tunnels in rock formations. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 84, pp. 373–380. DOI: 10.1016/j.tust.2018.10.007.
2. Huang X., Zhua Y., Zhanga Z., Zhu Y., Wang S., Zhuang Q. Mechanical behaviour of segmental lining of a sub-rectangular shield tunnel under self-weight. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 74, pp. 131–144. DOI: 10.1016/j.tust.2018.01.016.
3. Liu X., Liu Z., Yuan Y., Zhu Y. Quasi-rectangular shield tunneling technology in the Ningbo rail transit project. *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*. Springer International Publishing, 2018. pp. 2765–2773. DOI: 10.1007/978-3-319-59471-2_314.
4. Zhang W., Corte W. D., Liu X., Taerwe L. Influence of rotational stiffness modeling on the joint behavior of quasi-rectangular shield tunnel linings. *Applied Sciences*. 2020, vol. 10, pp. 1–27. DOI: 10.3390/app10238396.
5. Zhang W., Corte W. D., Liu X., Taerwe L. A comparative investigation between the beam spring method and the modified routine method in special-section shield tunnels. A case study for quasi-rectangular tunnels. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2022, vol. 46, no. 9, pp. 1754–1781. DOI: 10.1002/nag.3367.
6. Yuhang Y., Xian L., Zhen L., Zhu Y. Study on design model of quasi-rectangular shield tunnel linings (in Chinese). *Journal of Southwest Jiaotong University*. 2019, vol. 20, no. 6, pp. 1188–1195. DOI: 10.3390/app10238396.
7. Ilyinov M. D., Petrov D. N., Karmanskiy D. A., Selikhov A. A. Aspects of physical modelling of processes of structural changes in rock samples under thermobaric conditions of great depths. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023, vol. 8, no. 4, pp. 290–302. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-09-150.
8. Li Y., Zou Z. Numerical investigation on the influence of super-large-diameter shield tunneling on Nearby existing metro tunnels and the protection scheme. *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, no. 24, article 13179. DOI: 10.3390/app132413179.
9. Korshunov V. A., Pavlovich A. A., Bazhukov A. A. Estimation of shear strength of rock fractures based on the results of testing samples with spherical indenters. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 262, pp. 606–618. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.16.
10. Gospodarikov A. P., Kirkin A. P., Trofimov A. V., Kovalevskiy V. N. Determination of physical and mechanical properties of rocks at the application of anti-shock unloading measures. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 1, pp. 26–34. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.04.
11. Gospodarikov A. P., Zatsepin M. A. Mathematical modelling of nonlinear boundary value problems of geomechanics. *Gornyi Zhurnal*. 2019, vol. 12, pp. 16–20. [In Russ].
12. Nabatov V. V., Voznesensky A. S. Geomechanical analysis of the influence of the new tunnels construction in the vicinity of the existing underground metro structures on the ground mass state. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 264, pp. 926–936. [In Russ].

13. Dashko R. E., Kolosova D. L. Safety of design, construction and operation of buildings and structures for various purposes on water-saturated clay soils: engineering-geological and geotechnical aspects. *Geotekhnika*. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 54 – 67. [In Russ]. DOI: 10.25296/2221-5514-2023-15-1-54-67.
14. Zhu Y., Zhang Z., Huang X., Zhu Y. Numerical investigation on the mechanical characteristics of a special-shaped shield lining with a large cross-section. *Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Tunnelling and Underground Construction*. Springer Singapore, 2018, pp. 384 – 391. DOI: 10.1007/978-981-13-0017-2_39.
15. Zhang W., Corte W. D., Liu X. Optimization study on longitudinal joints in quasi-rectangular shield tunnels. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 2, article 0573. DOI: 10.3390/app11020573.
16. Lei M., Lin D., Shi C., Ma J., Yang W. A structural calculation model of shield tunnel segment: Heterogeneous equivalent beam model. *Advances in Civil Engineering*. 2018, vol. 2018, pp. 1 – 16. DOI: 10.1155/2018/9637838.
17. Do N. A., Dias D., Oreste P., Djeran-Maigre I. Internal forces in segmental tunnel linings – A comparison between current design methods. *Journal of Mining Science*. 2014, vol. 50, no. 2, pp. 326 – 334. DOI: 10.1134/S1062739114020161.
18. Wu H. N., Shen S. L., Yang J., Zhou A. Soil-tunnel interaction modelling for shield tunnels considering shearing dislocation in longitudinal joints. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 78, pp. 168 – 177. DOI: 10.1016/j.tust.2018.04.009.
19. Do N. A. *Numerical analyses of segmental tunnel lining under static and dynamic loads*. Doctoral Thesis. Civil Engineering. INSA de Lyon, Lyon, V. 1, 2014.
20. Nguyen C., Gospodarikov A. P. Hyperstatic reaction method for calculations of tunnels with horseshoe-shaped cross-section under the impact of earthquakes. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2020, vol. 19, pp. 179 – 188. DOI: 10.1007/s11803-020-0555-0.
21. Nguyen C. T., Do N. A., Dias D., Pham V. V., Alexandr G. Behaviour of square and rectangular tunnels using an improved finite element method. *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, no. 4, article 2050. DOI: 10.3390/app12042050.
22. Protosenya A. G., Alekseev A. V., Verbilo P. E. Forecast of the stress-strain state and stability of the tunnel face at crossing the disturbed zones of the ground massif. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 254, pp. 252 – 260. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.26
23. Nguyen T. T., Karasev M. A. Optimization of geometry design of quasi-rectangular section tunnel by the force criterion. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 6, pp. 59 – 71. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_59.
24. Nguyen T. T., Do N. A., Karasev M. A., Kien D. V., Dias D. Influence of tunnel shape on tunnel lining behaviour. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*. 2021, vol. 174, no. 4, pp. 355 – 371. DOI: 10.1680/jgeen.20.00057.
25. Popov M. G., Sinegubov V. Yu. Investigation of properties of two-layer concrete-fibre concrete structures at different ratios of layer thickness. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 1, pp. 70 – 82. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-70-82.
26. Kroetz H. M., Do N. A., Dias D., Beck A. T. Reliability of tunnel lining design using the hyperstatic reaction method. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 77, pp. 59 – 67.
27. Protosenya A. G., Iovlev G. A. Forecast of stress-strain state in the vicinity of the underground structure in nonlinearly deformable soil massifs. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020, no. 2, pp. 215 – 228. [In Russ].
28. Ilyinov M. D., Korshunov V. A., Pospekhov G. B., Shokov A. N. Complex experimental studies of mechanical properties of rocks: problems and ways of their solution. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 5, pp. 11 – 18. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.02.
29. Çelik S. Comparison of mohr-coulomb and hardening soil models numerical estimation of ground surface settlement caused by tunneling. *Iğdır University Journal of the Institute of Science and Technology*. 2017, vol. 7, no. 4, pp. 96 – 102. DOI: 10.21597/jist.2017.202.
30. Abdellah W. R., Ali M. A., Yang H. S. Studying the effect of some parameters on the stability of shallow tunnels. *Journal of Sustainable Mining*. 2018, vol. 17, no. 1, pp. 20 – 33. DOI: 10.1016/j.jsm.2018.02.001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Нгуен Тай Тиен*¹ — канд. техн. наук, доцент,

e-mail: taitien12@gmail.com.vn,

ORCID ID: 0000-0002-5246-9252,

Карасев Максим Анатольевич — д-р техн. наук,

доцент, Санкт-Петербургский горный

университет императрицы Екатерины II,

e-mail: Karasev_MA@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0001-8939-0807,

*До Нгок Ань*¹ — канд. техн. наук, доцент,

e-mail: dongocanh@humg.edu.vn,

ORCID ID: 0000-0002-4862-1688,

¹ Исследовательская группа по устойчивому

развитию в подземном строительстве,

Ханойский университет горного дела и геологии, Вьетнам.

Для контактов: Карасев М.А., e-mail: Karasev_MA@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Nguyen Tai Tien*¹, Cand. Sci. (Eng.)

e-mail: taitien12@gmail.com.vn,

ORCID ID: 0000-0002-5246-9252,

M.A. Karasev, Dr. Sci. (Eng.),

Assistant Professor, Empress Catherine II

Saint-Petersburg Mining University,

199106, Saint-Petersburg, Russia,

e-mail: karasevma@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0001-8939-0807,

*Do Ngoc Anh*¹, Cand. Sci. (Eng.),

e-mail: dongocanh@humg.edu.vn,

ORCID ID: 0000-0002-4862-1688,

¹ Sustainable Development in Underground

Engineering Research Team,

Hanoi University of Mining, and Geology, Vietnam.

Corresponding author: M.A. Karasev, e-mail: karasevma@gmail.com.

Получена редакцией 15.04.2024; получена после рецензии 11.03.2025; принята к печати 10.06.2025.

Received by the editors 15.04.2024; received after the review 11.03.2025; accepted for printing 10.06.2025.



ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПХГ МЕТОДОМ ГАЗОВОЙ ТОМОГРАФИИ (НА ПРИМЕРЕ ВОЛГОГРАДСКОГО ПХГ)

А.В. Оборин¹, А.С. Батугин², В.И. Диваков³, Е.В. Хотченков⁴, А.Д. Степанова²

¹ ПАО «Газпром», Санкт-Петербург, Россия

² НИТУ МИСИС, Москва, Россия

³ ООО Центр комплексных исследований недр «Катари», Москва, Россия

⁴ Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия,
e-mail: jek79@mail.ru

Аннотация: Геодинамические зоны различного порядка и тектонические поля напряжений способны оказывать влияние на надежную работу подземных хранилищ газов и экологическую ситуацию в районах их расположения. Одним из путей оценки геодинамического состояния районов расположения подземных хранилищ газов является комбинирование методов геодинамического районирования и микрогеодинамического картирования, использующего материалы газовой съемки, что показано в статье на примере Волгоградского хранилища. Методом геодинамического районирования выявлены региональные геодинамически активные зоны в районе расположения объекта. С использованием материалов газовой съемки (29 профилей) построены глубинные геодинамические разрезы, на которых показаны геодинамические зоны сжатия и растяжения. Напряженное состояние массива оценено на основе анализа динамического взаимодействия блоков земной коры и последующего компьютерного моделирования. Представление данных в виде серии глубинных геодинамических разрезов составляет сущность объединенного метода газовой томографии, позволяющего детально анализировать геодинамическое состояние массива. Анализ взаимного расположения геодинамических зон и подземных резервуаров, созданных в отложениях каменной соли для хранения газов, показывает важность подобных исследований для понимания происходящих в массиве геодинамических процессов и их влияния на условия эксплуатации ПХГ. Полученные данные позволили подтвердить дальнейшую безопасную эксплуатацию Волгоградского подземного хранилища газов.

Ключевые слова: подземное хранилище газов, экологическая ситуация, газовая съемка, напряженное состояние, геодинамическая зона, геодинамическое районирование, газовая томография, условия эксплуатации.

Для цитирования: Оборин А. В., Батугин А. С., Диваков В. И., Хотченков Е. В., Степанова А. Д. Исследование геодинамического состояния массива в районе расположения ПХГ методом газовой томографии (на примере Волгоградского ПХГ) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 7. – С. 73-89. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_73.

Gas tomography-based study of geodynamics in location area of underground gas storage: A case-study of the Volgograd UGS

A.V. Oborin¹, A.S. Batugin², V.I. Divakov³, E.V. Khotchenkov⁴, A.D. Stepanova²

¹ PJSC Gazprom, Saint-Petersburg, Russia

² NUST MISIS, Moscow, Russia

³ LLC Center for Comprehensive Research of Subsoil «Katari», Moscow, Russia

⁴ V.I. Vernadsky State Geological Museum, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,
e-mail: jek79@mail.ru

Abstract: Various intensity geodynamic activity and tectonic stresses affect reliable underground gas storage and local ecology. One of the approaches to estimation of geodynamics in location areas of underground gas storages is combination of geodynamic zoning and microgeodynamic mapping using gas survey data. The article illustrates this approach as a case-study of the Volgograd UGS. Geodynamic zoning revealed the regional geodynamically active zones in the location area of the test object. Using gas survey results (29 lines), depth profiles of geodynamic activity are plotted with the geodynamic zones of compression and tension. The stresses are estimated using the analysis of dynamic interaction of crustal blocks with the subsequent computer-aided modeling. The information presentation as a series of depth profiles of geodynamics is the core of the hybrid method of gas tomography, which allows a detailed analysis of geodynamic activity of rock mass. The study of positional relationship between zones of geodynamic activity and locations of underground gas storages in rock salt formations proves the importance of such research for understanding geodynamics of rock masses and its impact on operating conditions of underground gas storages.

Key words: underground gas storage, ecological situation, gas survey, stress state, geodynamic activity zone, geodynamic zoning, gas tomography, operating conditions.

For citation: Oborin A. V., Batugin A. S., Divakov V. I., Khotchenkov E. V., Stepanova A. D. Gas tomography-based study of geodynamics in location area of underground gas storage: A case-study of the Volgograd UGS. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(7):73-89. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_73.

Введение

Подземные хранилища газа (ПХГ) являются важной составной частью системы газоснабжения страны и служат для покрытия пиковой неравномерности газопотребления. В мировой истории эксплуатации ПХГ известен ряд опасных инцидентов, связанных с разрушением и разгерметизацией подземных резервуаров, вплоть до возникновения техногенной сейсмичности в районах их расположения [1–5]. Согласно российскому законодательству ПХГ отнесены к опасным промышленным объектам и по-

этому профилактика и предупреждение инцидентов и аварий, связанных с их строительством и эксплуатацией, является важной технической, экологической и социальной задачей. Считается, что строительство ПХГ в соляных отложениях обеспечивает более надежную герметичность резервуаров за счет пластичности вмещающих пород [6]. Определение давления газа в резервуарах и другие проектные решения по строительству ПХГ основываются на информации прогнозного характера о структурном строении соляного массива, его

напряженно-деформированном состоянии и физико-механических свойствах слагающих пород [7]. В практике эксплуатации зарубежных ПХГ в солях вопросам геомеханической безопасности уделяется большое внимание [5, 8, 9].

Согласно существующим требованиям, для контроля состояния подземных резервуаров и профилактики возникновения аварий, связанных с поступлением в окружающую среду хранящихся в них веществ, необходимо проводить оценку и контроль их технического состояния. Например, в соответствии с действующими Рекомендациями Р Газпром 2-3.5-368-2009 для оценки геомеханического состояния резервуара проводят геофизические исследования, в том числе звуколокацию подземного резервуара.

При мониторинговых работах в пределах горного отвода проводят маркшейдерские наблюдения за процессом сдвижения земной поверхности с последующим построением графиков оседания, по которым оценивается геомеханическое состояние ПХГ [10].

Также проводят мониторинг содержания газов в почвенном воздухе, что регламентируется ГОСТ Р 53239-2008 «Хранилища природных газов подземные. Правила мониторинга при создании и эксплуатации». Аналогичные исследования проводят и на зарубежных хранилищах газа [11, 12] и в целом при освоении недр [13 – 15].

Перечисленные мониторинговые исследования дают ценную информацию, однако требуется их совершенствование с учетом текущего развития научной базы. Например, часто принимается, что распределение напряжений в соляных массивах близко к гидростатическому, что задается как граничное условие в геомеханической модели. Вместе с тем имеются данные о сложном напряженном состоянии не только породных и

грунтовых массивов [16, 17], но и соляных толщ на месторождениях [18], а в практике их разработки известны сильные горные удары и техногенные землетрясения [19]. В условиях неравнокомпонентного поля напряжений в горном массиве, имеющем структурные неоднородности, возникают тектонически напряженные и разгруженные зоны, взаимодействующие с техногенными полями напряжений [20 – 22]. В конструктивных документах по безопасности включены требования о геодинамическом районировании шахтных полей, однако для ПХГ подобные исследования находятся в начальной стадии [23].

Волгоградское подземное хранилище газа, введенное в эксплуатацию в 2018 г., лишь второе в России, созданное в отложениях каменной соли. Поэтому исследования, направленные на полноту изучения геологического строения и геодинамического состояния вмещающего массива в районах расположения ПХГ в солях, являются актуальными. Цель настоящей статьи — продемонстрировать возможности нового метода газовой томографии, возникшего при слиянии методов геодинамического районирования и микрогеодинамического зонирования [24].

Теоретические положения и методы

В настоящее время считается установленным факт взаимодействия глобальных геодинамических процессов и локальных геомеханических, возникающих при освоении недр [25]. Проявление глобальных геодинамических процессов связывают с тектоническими процессами планетарного масштаба, взаимодействием литосферных плит и делением их на более мелкие блоки разных иерархических уровней, вплоть до размеров шахтных полей и их участков [26]. Так как ПХГ оказывают цикличес-

ское механическое воздействие на вмещающий массив, блоки горного массива под воздействием возникающих напряжений испытывают ответную реакцию в форме постоянно повторяющихся резонансных колебаний, энергетические характеристики которых обуславливают периодическое эманирование летучих компонентов и образование в приповерхностных условиях аномалий различных газов.

Напряженное состояние района расположения изучаемого объекта оценивается в два этапа: на первом проводится тектонофизический анализ современных активных тектонических элементов, на втором — компьютерное моделирование полей напряжений. Установлено, что рельеф земной поверхности и глубинные структуры находятся в определенной связи, которая присуща не только горным областям, но и платформам и равнинам [27]. По особенностям строения рельефа выявляются активные разломы осадочного чехла и фундамента, устанавливается их кинематика, и полученные данные обрабатываются методами тектонофизики для оценки современных полей напряжений. Также для оценки напряженного состояния массива применяется структурно-геоморфологический (СГ) метод реконструкции полей напряжений, основанный на дешифрировании всех прямолинейных элементов рельефа, отождествляемых с мегатрещинами [28]. При наличии соответствующей информации ориентировка осей главных напряжений, приложенных к системе блоков, определяется также по сейсмологическим данным. После определения ориентации главных осей регионального поля напряжений производится моделирование локальных полей напряжений [20]. Такой подход оправдывает себя как при крупномасштабных, так и при мелкомасштабных исследованиях [29, 30].

Для выявления деталей геодинамического состояния массива используется анализ данных о пространственном распределении концентрации почвенных газов [31]. После работ В.И. Вернадского [32] многочисленными исследованиями показано, что разломы земной коры обладают повышенной проницаемостью и благоприятны для миграции газов из земных недр на поверхность [33–35]. Кроме того, в тектонически напряженных и разгруженных геодинамических зонах в процессе развития трещиноватости и дизъюнктивных деформаций происходит высвобождение газов, в том числе радиоактивных, из порового пространства [36]. Таким образом, аномалии радиоактивных газов связаны как с разломами земной коры, так и с участками ее деструкции и предельно напряженного состояния (геодинамическими зонами) на глубине. Кроме радона и торона высокими миграционными способностями обладают метан и его гомологи, гелий, сероводород, углекислый газ, некоторые другие летучие. При регистрации газов по площадной сетке можно получать информацию об источниках их формирования и их размерах, что в комплексе с данными геодинамического районирования о структурном строении массива и его напряженном состоянии дает новую, дополнительную информацию о его геодинамическом состоянии, которая может быть использована для мониторинга и оценки условий работы ПХГ.

Результаты исследования

Согласно современным научным данным, изучаемый район расположен на участке интенсивных поднятий земной коры, что отражено в современном рельефе земной поверхности [37] и в современных движениях земной коры [38]. В районе Волгоградского ПХГ наблюдается центробежный рисунок

речной сети, создаваемый водотоками, текущими в разные стороны от центра поднятия и огибающими его по дуге. Наблюдается кольцевая морфоструктура, огибаемая р. Россошка (рис. 1, а). Очертания русла р. Россошка на карте повторяют характерные изгибы на северо-запад рек Волги и Дона в этом районе. Правый берег р. Волга поднят на 150 м над левым и расчленен густой сетью глубоко врезаанных балок и оврагов, которые рассматриваются как

один из признаков интенсивных современных вертикальных движений (поднятия) в этом районе. Согласно исследованиям [37], в регионе наблюдается связь соляных диапиров с новейшими поднятиями. Отмечается, что практически все высокоамплитудные новейшие поднятия расположены в области развития солянокупольной тектоники. На рис. 1, б показана схема блоков (I – II ранга, по классификации из [24] земной коры исследуемого района).

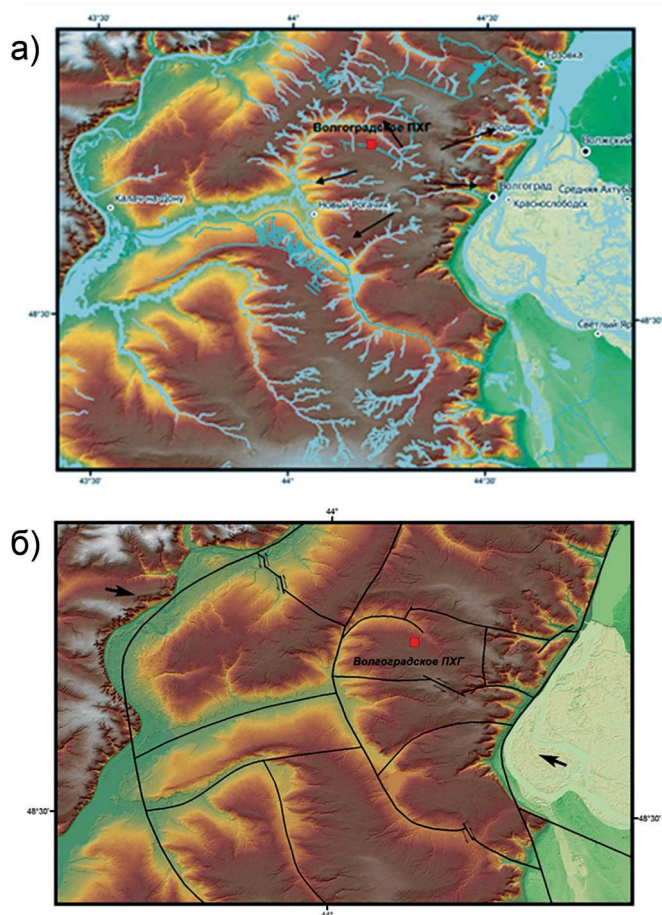


Рис. 1. Формы расчлененного рельефа с центробежной сетью водотоков в районе ПХГ (показано стрелками) и общими характерными изгибами речных долин на северо-запад (а) и объединенная схема блоков I – II ранга (границы блоков показаны черными линиями) (б)

Fig. 1. Forms of dissected relief with a centrifugal network of watercourses in the area of the UGS (shown by arrows) and common characteristic bends of river valleys to the northwest (a) and a combined scheme of blocks of I-II rank (block boundaries are shown by black lines) (b)

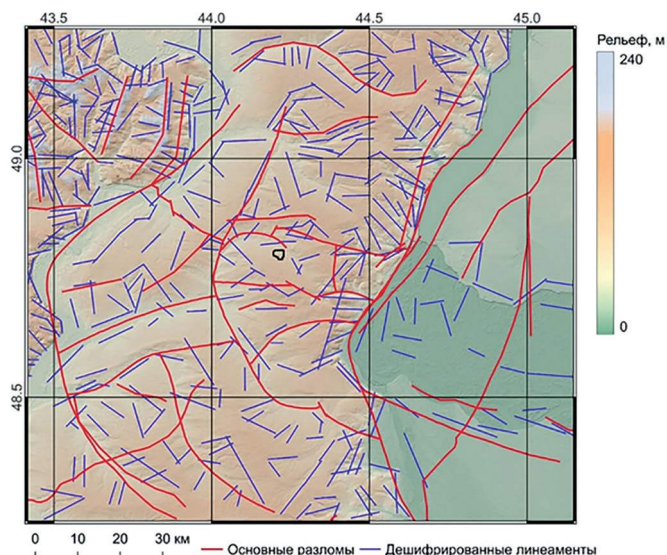


Рис. 2. Сводная тектоническая схема района Волгоградского ПХГ (черный контур) с использованием данных листов Государственной геологической карты М-38-XXVII и М-38-XXVIII

Fig. 2. Summary tectonic scheme of the Volgograd UGS area (black outline) using data from sheets of the State Geological Map М-38-XXVII and М-38-XXVIII

Фрагменты границ блоков земной коры, дешифрованные на основе геоморфологических данных, а также извлеченные линейменты методом направленной фильтрации позволили составить сводную тектоническую схему района с использованием данных листов Государственной геологической карты М-38-XXVII и М-38-XXVIII (рис. 2).

На схеме выделяются линейменты практически всех направлений, из которых фрагменты северо-восточного направления (30, 50, 85°) имеют правосдвиговую кинематику, а фрагменты северо-западного направления (300, 330 и 340°) — левосдвиговую (см. рис. 1, б и

рис. 2). На рис. 3 показаны результаты оценки направлений действия главных напряжений в районе расположения ПХГ двумя разными методами.

По полученным данным (см. рис. 3) принята следующая ориентация главных напряжений (см. таблицу).

При газовой съемке было пройдено 29 профилей общей длиной 136 км и расстоянием между ними около 200 м. Шаг между пикетами — 50 м. База данных для обработки составила около 17 500 значений по 12 параметрам. Геодинамические зоны прослеживаются большинством регистрируемых газов и паров и локализованы при комплексной

Ориентация главных напряжений района расположения Волгоградского ПХГ по материалам тектонофизических оценок
Orientation of the principal stresses in the area of the Volgograd UGS facility based on tectonophysics assessments

Ось максимального сжатия σ_1	110°
Ось минимального сжатия σ_3	20°
Ось промежуточных напряжений σ_2	вертикальна

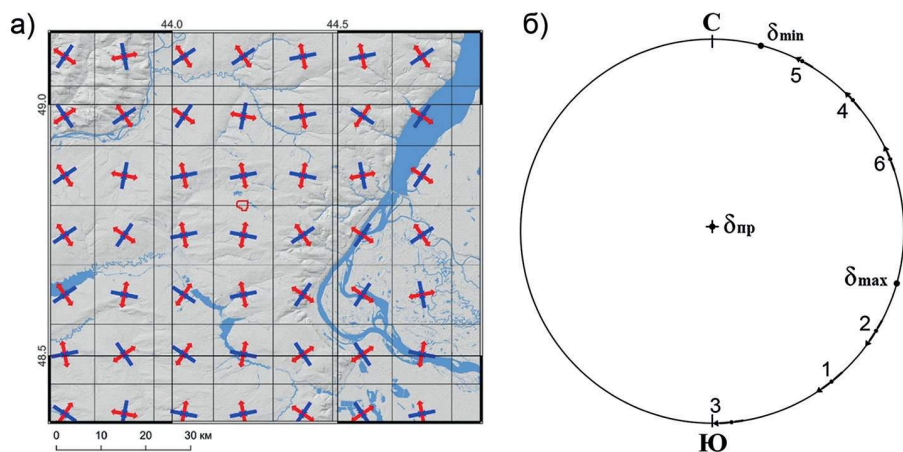


Рис. 3. Направления максимального и минимального сжатия (синие и красные стрелки соответственно) по методу Л.А. Сим [23] (а); стереограмма направлений главных напряжений по методу О.И. Гущенко [39] при условии вертикального падения сдвиговых нарушений (б)

Fig. 3. Directions of maximum and minimum stress (blue and red arrows, respectively) according to the method of L.A. Sim [23] (a); stereogram of directions of principal stresses according to the method of O.I. Gushchenko [39] under the condition of vertical dip of shear faults (b)

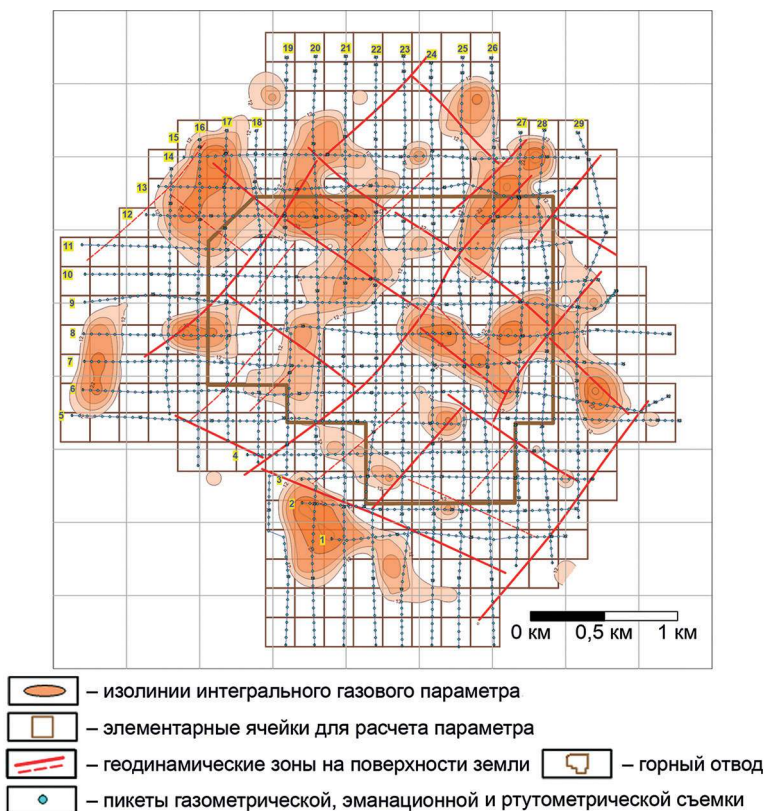


Рис. 4. Карта интегрального газового параметра

Fig. 4. Map of integrated gas parameter of Volgograd underground gas storage

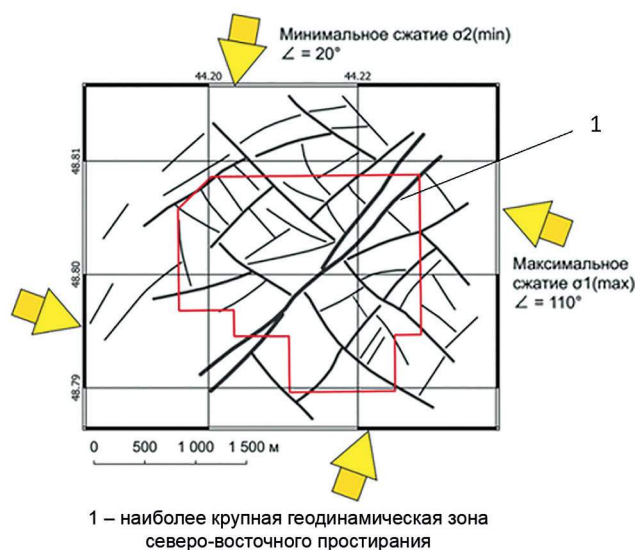


Рис. 5. Схема расположения геодинамических зон (черным цветом) района размещения ПХГ (красным цветом)

Fig. 5. Layout of geodynamic zones (in black) of the UGS location (in red)

интерпретации всех карт. Составлена карта интегрального газового параметра, позволяющего учитывать вклад каждой переменной в формирование результирующей структуры газового поля на поверхности земли (рис. 4). На карте интегрального газового параметра фиксируются несколько аномалий северо-западного и северо-восточного прости-

рания, интерпретируемых как геодинамические зоны и разломы.

Детальная структурная схема района, построенная с учетом данных газовой съемки, представлена на рис. 5.

На рис. 6 показано распределение интенсивности напряжений по данным компьютерного моделирования с учетом направлений действия главных напря-

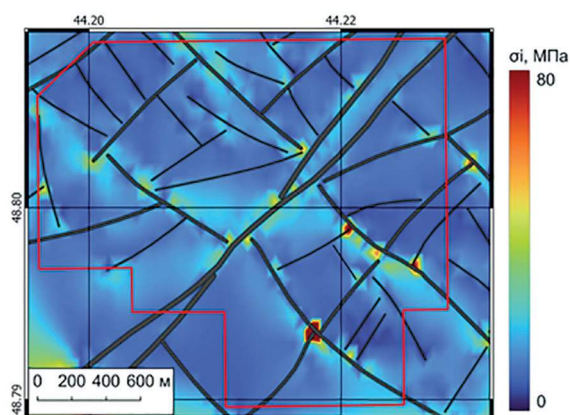
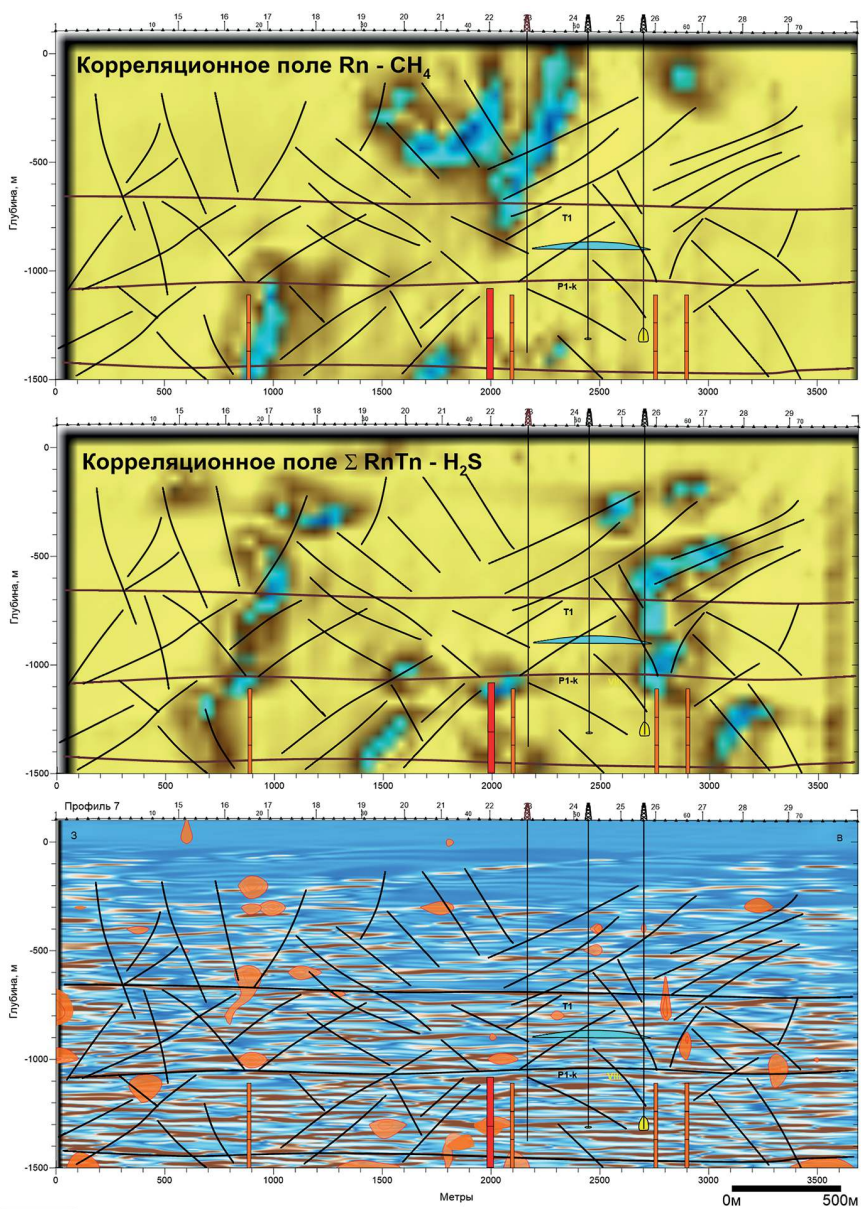


Рис. 6. Распределение интенсивности напряжений σ_i в горном массиве на глубине 1000 м (условные обозначения см. рис. 5)

Fig. 6. Distribution of stress intensity σ_i in a rock mass at a depth of 1000 m (for symbols, see Fig. 5)










-  – границы в разрезе, рассчитанные по интегральному газовому параметру
-  – зоны потери корреляции границ (геодинамические зоны)
-  – предполагаемые литологические границы
-  – разломы I и II порядка по данным газовой томографии
-  – геохимические аномалии (объекты)
-  – аномалии корреляционного поля глубинных параметров
-  – пикеты газометрической, эманационной и ртутнометрической съемки

Рис. 7. Структурно-геодинамическая модель массива по профилю 7 (см. рис. 4)

Fig. 7. Tectonic-structural model (section) along line 7 (see Fig. 4)

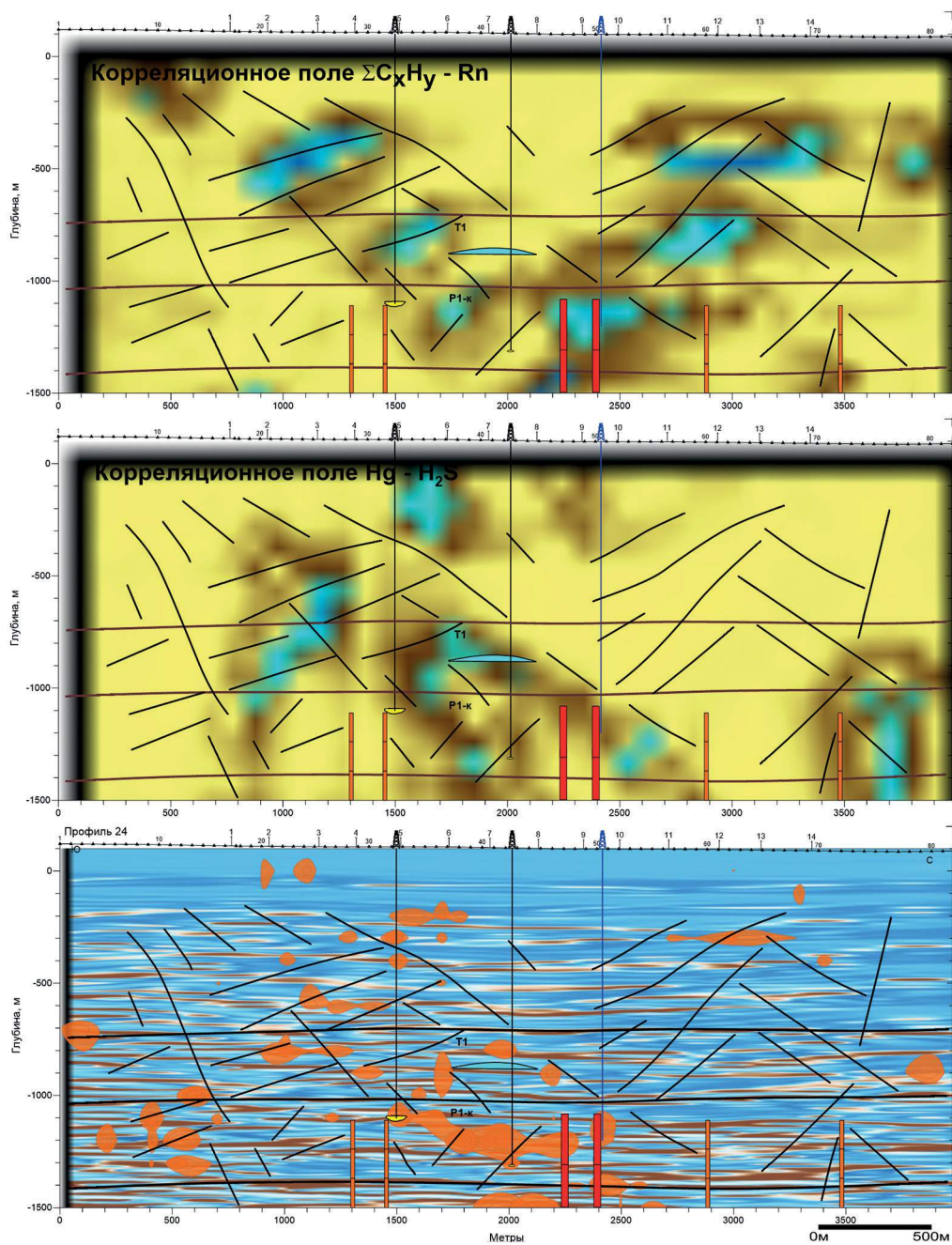


Рис. 8. Структурно-геодинамическая модель массива по профилю 24 (условные обозначения см. рис. 7)
 Fig. 8. Tectonic-structural model (section) along line 24 (For legend, see Fig. 7)

жений (см. таблицу) и блочной структуры участка (см. рис. 5).

Обсуждение результатов

Как видно из рис. 4, северо-западная и юго-восточная части площади различаются по плотности аномалий интегрального газового параметра, и границей этих различий служит, во всей видимости, разлом северо-восточного простирания 1 (см. рис. 5), пересекающий площадь по диагонали. Разломы меньшего порядка северо-восточного и северо-западного простирания разбивают участок на приподнятые и опущенные секторальные блоки. Статус блоков определен по геоморфологическим признакам, а их границы интерпретируются как ослабленные зоны, к которым относятся как разломы разного порядка, так и геодинамические зоны — зоны повышенной трещиноватости пород. Выявленные блоки разных порядков определяют современную тектоническую и геодинамическую структуру площади Волгоградского ПХГ.

На рис. 7 и 8 приведены примеры глубинных разрезов по профилям. Видно, что геодинамические зоны и мелкие разломы формируют в разрезе характерный веерообразный рисунок в виде конуса, что соответствует модели давления соли вверх вдоль разломов в условиях преобладающего горизонтального сжатия. Поскольку вершина конуса приурочена к пласту соли, то можно предполагать, что при горизонтальном сжатии массива соль оказывает давление на вышележащие породы при выдавливании (течении) вверх вдоль разломов. Такая структура разрушения обеспечивает проницаемость массива пород практически по всей площади и может создавать сложности при эксплуатации ПХГ в том случае, если резервуары оказываются в зоне влияния активных тектонических нарушений и зон.

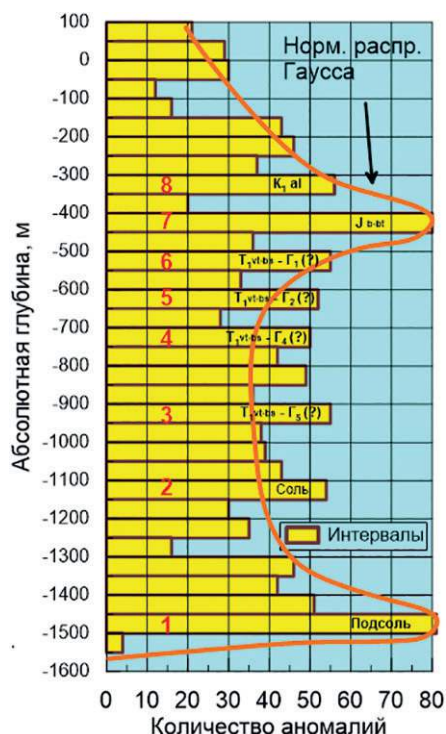


Рис. 9. Распределение газовых аномалий по геологическому разрезу (обозначены геологические ярусы)

Fig. 9. Distribution of gas anomalies across the geological section (geological sections are indicated)

Локализация геохимических аномалий на глубине подчиняется закону нормального распределения Гаусса с трендом уменьшения вниз и вверх по разрезу (рис. 9).

В разрезе уверенно выделяются два основных (1, 7) и шесть дополнительных интервалов концентрации аномалий.

Самый глубокий интервал (1) расположен в подсольевых отложениях ($-1500 \div -1450$ м), а самый верхний (7) — приурочен к терригенному коллектору средней юры ($-450 \div -400$ м).

Четыре интервала (3–6), видимо, привязаны к песчаным горизонтам (Г1–Г5) нижнего триаса, а еще два соответственно к пласту внутри соли (2) и альбскому горизонту нижнего мела (8).

Вероятными источниками формирования газовых полей и аномалий на поверхности земли являются скопления газа под основной покрывкой региона, каковой является соль, а также небольшие ловушки в терригенных коллекторах триаса, юры и нижнего мела.

Анализ карты напряженного состояния массива показывает, что участки с превышением фоновых значений напряжений расположены за пределами горного отвода, примерно на расстоянии до 5 км. Тектонический блок, вмещающий границы ПХГ, находится в стабильном состоянии и в условиях действующего поля внешних напряжений, это не несет рисков разрушения геологической среды.

В целом геодинамическая ситуация в районе Волгоградского ПХГ оценивается как стабильная, но наличие геодинамических зон на разных глубинных уровнях может создавать геомеханические аномалии в районе резервуаров и влиять на их нормальную работу.

В связи с этим рекомендуется проводить регулярный мониторинг состояния и геометрии геодинамических зон в районе ПХГ.

Заключение

Волгоградское ПХГ находится на участке земной коры с выраженной геодинамической активностью — район испытывает современное поднятие, максимальное сжатие действует в горизонтальном направлении, имеются разломы со сдвиговой составляющей смещения, выраженной в современном рельефе земной поверхности. В пределах горного отвода выявлен основной разлом северо-восточного простирания, разбивающий площадь на два больших блока и находящий отражение в рельефе земной поверхности.

Геодинамические зоны и мелкие разломы формируют характерный вееро-

образный рисунок в разрезе, свидетельствующий об активности разломов и реализации напряжений за счет подвижек с вертикальной составляющей. Вершина конуса приурочена к пласту соли, и, по-видимому, соль оказывает давление на вышележащие породы при течении вверх вдоль разломов.

Выявлено, что вероятным источником формирования газовых полей и аномалий на поверхности земли являются подсолевые отложения, а также вторичные газовые источники (скопления) в коллекторах выше по разрезу.

При планировании скважин (резервуаров) рекомендуется использовать полученные результаты, в соответствии с которыми стоит располагать резервуары вне выявленных разломов и геодинамических зон. Рекомендуется также проводить мониторинговые наблюдения, направленные на оценку рисков развития негативных геодинамических процессов.

Проведенные исследования показали возможность получения новой полезной информации методом газовой томографии при решении задач, связанных с эксплуатацией подземных хранилищ газа.

Этот метод рекомендуется также использовать в качестве экспресс-метода на стадии оценки площадок для строительства ПХГ и размещения резервуаров.

В организации исследований и подготовке настоящей статьи принимал участие к.т.н. С.В. Шевчук.

В полевых исследованиях и интерпретации геоморфологических данных принимала участие Е.И. Чесалова.

В расчетах принимали участие А.И. Маневич и И.А. Лосев.

Все рисунки авторские, ранее не опубликованы в других изданиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казанкова Э. Р., Корнилова Н. В. Геоэкологические проблемы подземного хранения газа в России // Геоэкология нефти и газа. — 2016. — № 3. — С. 102 — 106.
2. Никонов А. И. Роль геодинамических процессов в функционировании подземных хранилищ газа (на примере Щелковского и Касимовского подземных хранилищ): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: Институт проблем нефти и газа РАН и МО РФ, 2003. — 26 с.
3. Жуков В. С. Воздействие современных геодинамических процессов на фильтрационно-емкостные свойства коллекторов ПХГ / Международная конференция «Современная геодинамика недр и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса». — М.: ИПНГ РАН, 2009. https://oilgasjournal.ru/vol_3/zhukov.html.
4. Foulger G. R., Wilson M. P., Gluyas J. G., Julian B. R., Davies R. J. Global review of human-induced earthquakes // *Earth-Science Reviews*. 2017, vol. 178, pp. 438 — 514. DOI: 10.1016/j.earsci-rev.2017.07.008.
5. Benetatos C., Málek J., Verga F. Moment tensor inversion for two micro-earthquakes occurring inside the Hájek gas storage facilities, Czech Republic // *Journal of Seismology*. 2013, vol. 17, pp. 557 — 576.
6. Шкуратник В. Л., Кравченко О. С., Филимонов Ю. Л. Экспериментальное исследование зависимостей акустико-эмиссионных и реологических характеристик каменной соли от напряжений и температуры // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2019. — № 4. — С. 20 — 26.
7. Wu C., Liu J., Zhou Z. Study on creep properties of salt rock with impurities during triaxial creep test // *Gongcheng Kexue Yu Jishu, Advanced Engineering Science*. 2017, vol. 49, pp. 165 — 172. DOI: 10.15961/j.jsuese.201600854.
8. Guang-chuan L., Huang X., Peng X. Investigation on the cavity evolution of underground salt cavern gas storages // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016, vol. 33, pp. 118 — 134. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.05.018.
9. Tongtao W., Chunhe Y., Jiasong Ch., Daemen J. J. K. Geomechanical investigation of roof failure of China's first gas storage salt cavern // *Engineering Geology*. 2018, vol. 243, pp. 59 — 69. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.06.013.
10. Арутюнов А. Е., Грунин А. Г., Зубарев А. П., Кузьмин Ю. О., Никонов А. И., Осипов А. А., Полухина С. С. Горно-геологическое обоснование и проектирование геодинамических полигонов на подземных хранилищах газа на примере Касимовского ПХГ // *Маркшейдерский вестник*. — 2012. — № 4. — С. 43 — 51.
11. Elio J., Ortega M. F., Mazadiego L. F. Monitoring of soil gases in the characterization stage of CO₂ storage in saline aquifers and possible effects of CO₂ leakages in the groundwater system // *Geologic Carbon Sequestration*, 2016, pp. 81 — 95. DOI: 10.1007/978-3-319-27019-7_5.
12. Fibbi G., Del Soldato M., Fanti R. Review of the Monitoring Applications Involved in the Underground Storage of Natural Gas and CO₂ // *Energies*. 2023, vol. 16, no. 1, article 12. DOI: 10.3390/en16010012.
13. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Geoecological monitoring during mining operations // *Sustainable Development of Mounting Territories*. 2024, vol. 16, no. 2, pp. 580 — 588. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-580-588.
14. Маневич П. П., Антошин В. В., Коликов К. С. Вегетационные и почвенные индексы для спутникового мониторинга земель в районах открытой разработки угля // *Горная промышленность*. — 2025. — № 1. — С. 118 — 122. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1-118-122.
15. Кутепов Ю. И., Кутепова Н. А., Пономаренко М. Р., Кутепов Ю. Ю. Геомеханический мониторинг устойчивости бортов разрезов и отвалов при разработке угольных месторождений // *Горный журнал*. — 2023. — № 5. — С. 69 — 74. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.10.
16. Козырев А. А., Онуприенко В. С., Жукова С. А., Журавлева О. Г. Развитие инструментального и методического обеспечения контроля наведенной сейсмичности на Хибинских апатит-нефелиновых месторождениях // *Горный журнал*. — 2020. — № 9. — С. 19 — 26.
17. Морозов В. Н., Татаринов В. Н., Маневич А. И. Моделирование напряженно-деформированного состояния эпицентральной зоны сильного землетрясения в Турции (Измит, 1999 г., М 7.4) // *Вулканология и сейсмология*. — 2020. — № 2. — С. 43 — 54. DOI: 10.31857/so203030620020042.

18. Леонтьев А. В., Скулкин А. А. Об использовании метода гидроразрыва при контроле действующих напряжений в соляном массиве // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. — 2017. — Т. 17. — № 1. — С. 188–190.
19. Маловичко А. А., Дягилев Р. А., Шулаков Д. Ю., Баранов Ю. В. Мониторинг природно-техногенной сейсмичности на территории Верхнекамского района / Проблемы геодинамики, сейсмичности и минерализации подвижных поясов и платформенных областей литосферы: Материалы международной конференции. — Екатеринбург, 1998. — С. 118–120.
20. Петухов И. М., Батугина И. М. Геодинамика недр. — М.: Недра коммуникэйшенз, 1999. — 288 с.
21. Рассказов И. Ю., Федотова Ю. В., Аникин П. А., Мигунов Д. С., Константинов А. В. Совершенствование методов и средств геомеханического мониторинга на основе цифровых технологий // Горная промышленность. — 2023. — № 55. — С. 18–24. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-55-18-24.
22. Кобылкин С. С., Пугач А. С. Методика прогноза горных ударов и выбора безопасного направления фронта очистных работ // Горные науки и технологии. — 2022. — № 7(2). — С. 126–136.
23. Шевчук С. В., Квятковская С. С., Шевчук Р. В., Шерматова С. С., Головкин И. В. К вопросу геодинамического мониторинга территории Калининградской области // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 2-1. — С. 298–309. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-298-309.
24. Батугин А. С., Хан С. А., Диваков В. И., Оборин А. В., Хотченков Е. В., Шевчук С. В. Исследование геодинамического состояния района расположения Калининградского ПХГ методом газовой томографии // Газовая промышленность. — 2024. — № 9 (871). — С. 28–33.
25. Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах. Т. 1. / Под ред. Н. Н. Мельникова. — Новосибирск: СО РАН, 2018. — 541 с.
26. Батугина И. М., Петухов И. М. Геодинамическое районирование при строительстве и эксплуатации рудников. — М.: Недра, 1988. — 166 с.
27. Орлова А. В. Блоковые структуры и рельеф. — М: Недра, 1975. — 232 с.
28. Сим Л. А. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации) // Известия вузов. Геология и разведка. — 1991. — № 10. — С. 3–22.
29. Сидоров Д. В., Пономаренко Т. В. Методология оценки геодинамического состояния природно-техногенных систем при реализации проектов освоения месторождений // Горный журнал. — 2020. — № 1. — С. 42–48. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.09.
30. Диваков В. И. Метод микрогеодинамических исследований — новый метод в геологии // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Геология и разведка полезных ископаемых. — 1996. — С. 71–79.
31. Вернадский В. И. О газовом обмене земной коры // Известия Императорской Академии Наук. — 1912. — Т. VI. — № 6:2. — С. 141–162.
32. Khilyuk L. F., Robertson J. O., Endres B., Chilingarian G. V. Gas migration: Events preceding earthquakes. Houston, Texas, Gulf Publishing Company, 2000, 390 p.
33. Корчагина Т. В., Ефимова Н. В., Жабин А. Б., Ишутина С. А. Исследование эмиссии угольного метана на поверхность из ликвидируемых шахт // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2017. — № 4. — С. 48–60.
34. Кузин А. М. Дегазация Земли — от землетрясений до образования месторождений полезных ископаемых флюидного генезиса // Актуальные проблемы нефти и газа. — 2018. — № 4(23). — С. 1–16.
35. Riggio A., Santulin M. Earthquake forecasting: a review of radon as seismic precursor // Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata. 2015, vol. 56, no. 2, pp. 95–114. DOI: 10.4430/bgta0148.
36. Панина Л. В., Зайцев В. А. Неотектоника Северного Прикаспия. Альманах // Пространство и Время. — 2016. — Т. 13. — № 1. — С. 188–190.
37. Корчуганова Н. И., Загубный Д., Соколов С. А. Неотектоническое районирование Русской плиты // Разведка и охрана недр. — 2012. — № 2. — С. 13–20.
38. Кузнецов Ю. Г., Кафтан В. И., Бебутова В. К., Серебрякова Л. И., Верещетина А. В. Современные вертикальные движения земной поверхности прикаспийского региона // Геодезия и картография. — 1997. — № 9. — С. 29–34.

39. Гущенко О. И. Анализ ориентировок сколовых тектонических смещений и их тектонофизическая интерпретация при реконструкции палеонапряжений // ДАН СССР. — 1973. — Т. 210. — № 2. — С. 331 — 334. **ПИАБ**

REFERENCES

1. Kazankova E. R., Kornilova N. V. Geocological problems of underground gas storage in Russia. *Geologiya Nefti i Gaza (Russian Oil and Gas Geology)*. 2016, no. 3, pp. 102 — 106. [In Russ].
2. Nikonov A. I. *Rol' geodinamicheskikh protsessov v funktsionirovanii podzemnykh khranilishch gaza (na primere Shchelkovskogo i Kasimovskogo podzemnykh khranilishch)* [The role of geodynamic processes in the functioning of underground gas storage facilities (using the Shchyolkovskoye and Kasimovskoye underground storage facilities as an example)], Candidate's thesis, Moscow, 2003, 26 p.
3. Zhukov V. S. Impact of modern geodynamic processes on filtration-capacitive properties of UGS reservoirs. *Mezhdunarodnaya konferentsiya «Sovremennaya geodinamika neдр i ekologo-promyshlennaya bezopasnost' ob"ektov neftegazovogo kompleksa»* [International conference «Modern geodynamics of the subsoil and ecological-industrial safety of oil and gas facilities»], Moscow, 2009. [In Russ]. https://oilgasjournal.ru/vol_3/zhukov.html.
4. Foulger G. R., Wilson M. P., Gluyas J. G., Julian B. R., Davies R. J. Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*. 2017, vol. 178, pp. 438 — 514. DOI: 10.1016/j.earsci-rev.2017.07.008.
5. Benetatos C., Málek J., Verga F. Moment tensor inversion for two micro-earthquakes occurring inside the Hájek gas storage facilities, Czech Republic. *Journal of Seismology*. 2013, vol. 17, pp. 557 — 576.
6. Shkuratnik V. L., Kravchenko O. S., Filimonov Yu. L. Experimental study of the dependences of acoustic-emission and rheological characteristics of rock salt on stress and temperature. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2019, no. 4, pp. 20 — 26. [In Russ].
7. Wu C., Liu J., Zhou Z. Study on creep properties of salt rock with impurities during triaxial creep test. *Gongcheng Kexue Yu Jishu, Advanced Engineering Science*. 2017, vol. 49, pp. 165 — 172. DOI: 10.15961/j.jsuese.201600854.
8. Guang-chuan L., Huang X., Peng X. Investigation on the cavity evolution of underground salt cavern gas storages. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016, vol. 33, pp. 118 — 134. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.05.018.
9. Tongtao W., Chunhe Y., Jiasong Ch., Daemen J. J. K. Geomechanical investigation of roof failure of China's first gas storage salt cavern. *Engineering Geology*. 2018, vol. 243, pp. 59 — 69. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.06.013.
10. Arutyunov A. E., Grunin A. G., Zubarev A. P., Kuzmyin Yu. O., Nikonov A. I., Osipov A. A., Polukhina S. S. Mining and geological substantiation and design of geodynamic polygons at underground gas storage facilities using the example of the Kasimovskoye UGS. *Mine Surveying Bulletin*. 2012, no. 4, pp. 43 — 51.
11. Elio J., Ortega M. F., Mazadiego L. F. Monitoring of soil gases in the characterization stage of CO₂ storage in saline aquifers and possible effects of CO₂ leakages in the groundwater system. *Geologic Carbon Sequestration*, 2016, pp. 81 — 95. DOI: 10.1007/978-3-319-27019-7_5.
12. Fibbi G., Del Soldato M., Fanti R. Review of the Monitoring Applications Involved in the Underground Storage of Natural Gas and CO₂. *Energies*. 2023, vol. 16, no. 1, article 12. DOI: 10.3390/en16010012.
13. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Geocological monitoring during mining operations. *Sustainable Development of Mounting Territories*. 2024, vol. 16, no. 2, pp. 580 — 588. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-580-588.
14. Manevich P. P., Antoshin V. V., Kolikov K. S. Vegetation and soil indices for satellite monitoring of lands in areas of surface coal mining. *Russian Mining Industry Journal*. 2025, no. 1, pp. 118 — 122. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1-118-122.
15. Kutepov Yu. I., Kutepova N. A., Ponomarenko M. R., Kutepov Yu. Yu. Geomechanical monitoring of slope stability in pitwall and dumps in coal mining. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 5, pp. 69 — 74. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.10.
16. Kozyrev A. A., Onuprienko V. S., Zhukova S. A., Zhuravleva O. G. Development of instrumental and methodological support for monitoring induced seismicity at the Khibiny apatite-nepheline deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 9, pp. 19 — 26. [In Russ].

17. Morozov V. N., Tatarinov V. N., Manevich A. I. Modeling the stress-deformations in the epicentral zone of a strong earthquake in Turkey (Izmit, 1999, M 7.4). *Vulkanologiya i seysmologiya*. 2020, no. 2, pp. 43 – 54. [In Russ]. DOI: 10.31857/so203030620020042.
18. Leontiev A. V., Skulkin A. A. Usage of the hydraulic fracturing method in monitoring in the acting stresses in a salt massif. *Herald of KRSU*. 2017, vol. 17, no. 1, pp. 188 – 190. [In Russ].
19. Malovichko A. A., Dyagilev R. A., Shulakov D. Yu., Baranov Yu. V. Monitoring of natural-technogenic seismicity in the Verkhnekamsk region. *Problemy geodinamiki, seysmichnosti i mineragenii podvizhnykh poyasov i platformennykh oblastey litosfery: Materialy mezhdunarodnoy konferentsii* [Problems of geodynamics, seismicity, and minerageny of mobile belts and platform regions of the lithosphere: Proceedings of the International Conference], Ekaterinburg, 1998, pp. 118 – 120. [In Russ].
20. Petukhov I. M., Batugina I. M. *Geodinamika nedr* [Subsoil geodynamics], Moscow, 1999, 288 p.
21. Rasskazov I. Yu., Fedotova Iu. V., Anikin P. A., Migunov D. S., Konstantinov A. V. Improvement of methods and means of geomechanical monitoring based on digital technologies. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. 5S, pp. 18 – 24. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-5S-18-24.
22. Kobylkin S. S., Pugach A. S. Rock burst forecasting technique and selecting a safe coal face advance direction. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022, no. 7(2), pp. 126 – 136. [In Russ].
23. Shevchuk S. V., Kvyatkovskaya S. S., Shevchuk R. V., Shermatova S. S., Golovko I. V. About of geodynamic monitoring of the Kaliningrad region. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2-1, pp. 298 – 309. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-298-309.
24. Batugin A. S., Khan S. A., Divakov V. I., Oborin A. V., Khotchenkov E. V., Shevchuk S. V. Study of the geodynamics in the area of the Kaliningrad UGS by the method of gas tomography. *Gas Industry Journal*. 2024, no. 9 (871), pp. 28 – 33. [In Russ].
25. *Geomekhanicheskie polya i protsessy: eksperimental'no-analiticheskie issledovaniya formirovaniya i razvitiya ochagovykh zon katastroficheskikh sobytiy v gornotekhnicheskikh i prirodnykh sistemakh*, vol. 1. Pod red. N. N. Mel'nikova [Geomechanical fields and processes: experimental and analytical studies of the formation and development of catastrophic events in mining and natural systems, vol. 1, Mel'nikov N. N. (Ed.)], Novosibirsk, 2018, 541 p.
26. Batugina I. M., Petukhov I. M. *Geodinamicheskoe rayonirovanie pri stroitel'stve i ekspluatatsii rudnikov* [Geodynamic zoning in the construction and exploitation of mines], Moscow, Nedra, 1988. 166 p.
27. Orlova A. V. *Blokovye struktury i rel'ef* [Block structures and relief], Moscow, Nedra, 1975, 232 p.
28. Sim L. A. Study of tectonic stresses by geological indicators (methods, results, recommendations). *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 1991, no. 10, pp. 3 – 22. [In Russ].
29. Sidorov D. V., Ponomarenko T. V. Methodology for assessing the geodynamics of natural and man-made systems in the implementation of deposit development projects. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 1, pp. 42 – 48. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.09.
30. Divakov V. I. Method of microgeodynamic studies – a new method in geology. *Vestnik RUDN. Geology and prospecting*. 1996, pp. 71 – 79. [In Russ].
31. Vernadsky V. I. About gas exchange in the earth's crust. *Izvestiya Imperatorskoy Akademii Nauk*. 1912, vol. VI, no. 6:2, pp. 141 – 162. [In Russ].
32. Khilyuk L. F., Robertson J. O., Endres B., Chilingarian G. V. *Gas migration: Events preceding earthquakes*. Houston, Texas, Gulf Publishing Company, 2000, 390 p.
33. Korchagina T. V., Efimova N. V., Gabin A. B., Ishutina S. A. Researching methane emission into earth surface from liquidated mines. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2017, no. 4, pp. 48 – 60. [In Russ].
34. Kuzin A. M. Degasation of the Earth: from earthquakes to the formation of deposits of mineral fluid genesis. *Actual Problems of Oil and Gas*. 2018, no. 4(23), pp. 1 – 16. [In Russ].
35. Riggio A., Santulin M. Earthquake forecasting: a review of radon as seismic precursor. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. 2015, vol. 56, no. 2, pp. 95 – 114. DOI: 10.4430/bgta0148.
36. Panina L. V., Zaitsev V. A. Neotectonics of the Northern Caspian Region. *Space and Time*. 2016, vol. 13, no. 1, pp. 188 – 190. [In Russ].
37. Korchuganova N. I., Zagubny D. G., Sokolov S. A. Neotectonic zoning of the Russian Plate. *Prospect and protection of mineral resources*. 2012, no. 2, pp. 13 – 20. [In Russ].

38. Kuznetsov Yu. G., Kaftan V. I., Bebutova V. K., Serebryakova L. I., Vereshchetina A. V. Modern vertical movements of the earth's surface in the Caspian region. *Geodesy and Cartography*. 1997, no. 9, pp. 29–34. [In Russ].

39. Gushchenko O. I. Analysis of orientations of shear tectonic displacements and their tectono-physical interpretation in the reconstruction of paleostresses. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1973, vol. 210, no. 2, pp. 331–334. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Оборин Антон Викторович — заместитель начальника отдела

ПАО «Газпром», e-mail: gazpromgeotech@gmail.com,

Батугин Андриан Сергеевич — д-р техн. наук,
профессор, НИТУ МИСИС, e-mail: as-bat@mail.ru,

Диваков Валентин Иванович — канд. геол.-минерал. наук,
доцент, ООО Центр комплексных исследований недр
«Катари», e-mail: vdivakov@mail.ru,

Хотченков Евгений Викторович — канд. техн. наук,
заведующий отделом, Государственный геологический музей
им. В.И. Вернадского РАН, e-mail: jek79@mail.ru,

Степанова Александра Дмитриевна — студент магистратуры,
НИТУ МИСИС, e-mail: stepasasa3@gmail.com.

Для контактов: Хотченков Е.В., e-mail: jek79@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.V. Oborin, Deputy Head of Department,

PJSC Gazprom, Saint-Petersburg, Russia,

A.S. Batugin, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia,

V.I. Divakov, Cand. Sci. (Geol. Mineral.),

Assistant Professor, LLC Center for Comprehensive Research
of Subsoil «Katari», Moscow, Russia, e-mail: vdivakov@mail.ru,

E.V. Khotchenkov, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department,

V.I. Vernadsky State Geological Museum,

Russian Academy of Sciences, 125009, Moscow, Russia,

A.D. Stepanova, Master's Degree Student, NUST MISIS,

119049, Moscow, Russia, e-mail: stepasasa3@gmail.com.

Corresponding author: E.V. Khotchenkov, e-mail: jek79@mail.ru.

Получена редакцией 04.03.2025; получена после рецензии 14.04.2025; принята к печати 10.06.2025.

Received by the editors 04.03.2025; received after the review 14.04.2025; accepted for printing 10.06.2025.



ОЦЕНКА ЭВОЛЮЦИИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОГЕННОМ МАССИВЕ РЕКУЛЬТИВИРОВАННОГО ОБЪЕКТА ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В.А. Фоменко¹, А.А. Соколов¹, А.Б. Лолаев², И.И. Башмашников¹, Г.Ж. Турметова³

¹ Филиал Южного федерального университета в г. Геленджике, Геленджик, Россия

² Владикавказский научный центр РАН, с. Михайловское, РСО–Алания, Россия

³ Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави,
Республика Казахстан, Туркестан, e-mail: gulmira.turmetova@ayu.edu.kz

Аннотация: Рассмотрены результаты экспедиционных исследований авторов (2022–2025 гг.) по оценке эволюции деформационных процессов в техногенном массиве рекультивированного объекта горного производства – Унальского хвостохранилища. На основе обработанных данных полевых работ по нивелированию построен план изолиний поверхности хвостохранилища. Выявлены значительные, более 0,4 м проседания центральной части хвостохранилища и установлены факты образования новых нарушений поверхности. С учетом сформированных компетенций по исследованию и анализу текущих деформационных процессов и геологических условий месторасположения хвостохранилища, собственного опыта полевых работ был разработан и опробован в качестве тестового эксперимента экспресс-метод определения просадок рекультивированной поверхности лазерным способом. Результаты исследований подтвердили необходимость осуществления постоянного мониторинга хвостохранилища по причине прогрессирующей деформации. Сформированы выводы о необходимости продолжения исследований, направленных на возможное создание наблюдательного геофизического полигона, включающего следующие виды наблюдений: ежегодное нивелирование с расширением зон нивелирования, включая весь периметр ограждающей дамбы; геомеханический мониторинг; мониторинг метеоусловий; наблюдение за ореолами образующихся озер на поверхности хвостохранилища по следам высолов и мест попадания влаги внутрь тела хвостохранилища по вновь образующимся и существующим трещинам; выполнение работы по электроразведке для выявления общей засоленности поверхности хвостохранилища поверхности и возможных мест разгрузки образующихся электролитов ниже по периметру дамбы, в том числе на уровне течения реки Ардон.

Ключевые слова: деформационные процессы, нивелирование поверхности хвостохранилища, рельеф поверхности хвостохранилища, сдвигание горных пород, иссушение тела хвостохранилища, опасные геологические процессы, экспресс-методы, контрольные реперы, сейсмоакустическое зондирование.

Благодарность: Исследования выполнены в Южном федеральном университете за счет средств Российского научного фонда (проект № РНФ/23-37-ГЛ, № 23-77-00015).

Для цитирования: Фоменко В. А., Соколов А. А., Лолаев А. Б., Башмашников И. И., Турметова Г. Ж. Оценка эволюции деформационных процессов в техногенном массиве рекультивированного объекта горного производства // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 7. – С. 90–101. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_90.

Evolution of deformations inside reclaimed man-made object of mining practice

V.A. Fomenko¹, A.A. Sokolov¹, A.B. Lolaev², I.I. Bashmashnikov¹, G.Z. Turmetova³

¹ Gelendzhik Branch of Southern Federal University, Gelendzhik, Russia

² Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Mikhailovskoye, Republic of North Ossetia-Alania, Russia

³ Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkistan, Kazakhstan, e-mail: gulmira.turmetova@ayu.edu.kz

Abstract: The article describes the authors' expedition research (2022–2025) into evolution of deformation processes inside a man-made mining object after its reclamation—the Unal tailings pond. After processing the field data of leveling survey, the contour map of the tailings pond surface was plotted. Large sags, more than 0.4 m deep are detected in the center of the tailings pond, and new damages are revealed on its surface. Based on the available knowledge on current deformations and geological conditions at the tailings pond, and using the hands-on experience of field surveys, the authors developed and tested an experimental rapid method of laser-assisted determination of reclaimed surface subsidence. The test results confirmed the requirement of continuous monitoring of the tailings pond because of its progressive deformation. The further research should be focused on creation of a geophysical observation and testing site to carry out: annual leveling survey with its persistent expansion to cover the whole perimeter of embankment; geomechanical monitoring; weather monitoring; observation of blue cups generated on the surface of the tailings pond by blooms and points of water inflows inside the body of the tailings pond along the old and new fissures; electric exploration to find total salt content on the surface of the tailings pond and to locate discharge points for electrolytic solutions down the dam perimeter, including the level of the flow line of the Ardon river.

Key words: deformation processes, leveling survey of tailings pond surface, tailings pond surface topography, rock movements, dehydration of tailings pond body, hazardous geological process, rapid methods, check points, seismic sounding.

Acknowledgements: The study was carried out at the Southern Federal University and was supported by the Russian Science Foundations, Projects Nos. RNF/23-37-GL and 23-77-00015.

For citation: Fomenko V. A., Sokolov A. A., Lolaev A. B., Bashmashnikov I. I., Turmetova G. Z. Evolution of deformations inside reclaimed man-made object of mining practice. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(7):90-101. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_90.

Введение

Выведенные из эксплуатации объекты горного производства, к которым относятся насыпные и намывные техногенные массивы (хвостохранилища и шламонакопители), представляют потенциальную угрозу экологической безопасности. В случае если высота плотины и/или дамбы хвостохранилищ, шламонакопителей превышает 35 м, их

относят к особо опасным объектам, так как их разрушение может привести к техногенным катастрофам. Хвостохранилища с высокой дамбой, вмещающие значительные объемы шламовых хвостов разных классов опасности, расположенные на наклонных участках горных территорий с сейсмической активностью и примыкающие дамбой к горным рекам, гидрографическая сеть которых

формирует значительный бассейновый округ, следует выделить в отдельное направление исследований ввиду их особой опасности, даже после их рекультивации.

Одной из установленных причин аварий сооружений хвостохранилищ, шламонакопителей является потеря их устойчивости из-за сейсмических воздействий, возникающих при землетрясениях. Зафиксированные многочисленные случаи разрушения дамб хвостохранилищ отражены в научных публикациях [1 – 4]. Некоторые из них привели к техногенным катастрофам. Известны и иные случаи разрушения ограждающих элементов хвостохранилищ [5, 6], которые указывают на наличие проблемы в проектировании и сооружении хвостохранилищ, расположенных в сейсмоактивных регионах [7]. Актуальность этой проблеме придают планы строительства в восточных регионах России новых крупных наливных хвостохранилищ.

Вопросу сейсмостойкости хвостохранилищ посвящен ряд публикаций [8 – 10]. При землетрясении складированные хвосты могут испытывать значительные сейсмические нагрузки, так как при их водонасыщении и слабой консолидации

они обладают малой сдвиговой прочностью [11, 12], даже в условиях хранения после рекультивации в них могут длительное время сохраняться значительные разжиженные объемы [13, 14].

Объектом исследований настоящей работы является Унальское хвостохранилище, эволюционными процессами которого авторы занимаются в рамках проекта РНФ [15 – 17]. Официально Мизурская обогатительная фабрика была открыта в марте 1929 г. и являлась длительное время главным источником техногенного загрязнения окружающей среды прилегающих территорий. Хвостохранилище Мизурской обогатительной фабрики (далее МОФ) построено в 1984 г. в пойме р. Ардон на левом берегу современного русла [18]. Каждые сутки МОФ направляла по пульпопроводу в хвосты около 7000 м³, в которых твердые фракции составляли около 2000 т измельченных фракций, с концентрацией Zn от 0,15 до 0,25% и концентрацией Pb от 0,13 до 0,19%. В хвостах содержатся следующие минералы — сфалерит, галенит, пирит, пирротин, халькопирит, арсенопирит, марказит и магнетит; нерудные — кварц, хлорит, борнит, сидерит, кальцит [18]. При нормальном



Рис. 1. Вид хвостохранилища до рекультивации (фото из личного архива А.Б. Лолаева)

Fig. 1. View of the tailings dam before reclamation (photo from the personal archive of A.B. Lolaev)

обеспечении технологии добычи МОФ за сутки перерабатывала до 20 000 т руды. Полученные в результате селективной флотации свинцовые и цинковые концентраты, содержащие Pb, Bi, Sb, Ag, Au, Cu, Zn, Co, As (свинцовый); Zn, Cd, Co, Pb, S, Sb, Ag, Fe, In (цинковый), затем транспортировались в г. Владикавказ для дальнейшей выплавки металлов на заводе «Электроцинк» [19]. Поверхность хвостохранилища представляла сплошное покрытое водой искусственное образование с выступающими из воды намытыми фрагментами различных по консистенции твердых фракций (см. рис. 1).

В соответствии с разработанной технической документацией в 2019 г. были выполнены работы по рекультивации Унальского хвостохранилища с высадкой на образовавшейся поверхности различных растений с целью дернообразования.

В результате обмерных работ 2019 г. высота гребня дамбы от уреза воды р. Ардон составляет — 11,16÷21,14 м, ширина по верху 5÷7 м, крутизна низового откоса дамбы обвалования — 1:2. Нижняя часть откоса земляной дамбы хвостохранилища с северо-восточной стороны выполнена из самих хвостов, в дальнейшем отсыпка производилась из местного гравийно-галечникового материала [15, 18, 19].

По истечении некоторого времени поверхность хвостохранилища начала проседать, скорее всего, по причине постепенного обезвоживания (усыхания) укрытого от осадков образовавшегося техногенного массива. На поверхности рекультивированного слоя по итогам геотехнического мониторинга обнаружилось проседания с провалами в центральной части и трещинообразование, так называемые геоморфологические эволюционные изменения [15 — 17].

В связи с этим и с учетом стремительно возрастающего рекреационного

потенциала региона для обеспечения его экологической безопасности мониторинг эволюции деформационных процессов в техногенном массиве Унальского хвостохранилища является особенно актуальным. При проведении систематического мониторинга деформационных процессов следует принимать во внимание сейсмические, гидрогеологические, климатические, другие особенности хвостохранилища, расположенного в условиях горных территорий.

Одним из природных факторов, влияющих на скорость эволюционных процессов хвостохранилища и, как следствие, на его экологическую устойчивость [20, 21], связанную непосредственно с окружающей средой прилегающих к хвостохранилищу территорий, являются местные горно-долинные ветра и фены. Горная долина Алагирского ущелья имеет меридиональную направленность, в связи с чем здесь преобладают горно-долинные ветра, ночью имеющие южное или юго-западное направление, а днем зачастую — северо-восточное и северное [18]. Зимой характерно увеличение ветров южного направления, а летом — северо-восточных ветров. Переменчивые горно-долинные ветра циклично увлажняют и высушивают поверхность хвостохранилища, что приводит к переработке верхней части слоя рекультивации и повышенному трещинообразованию. С повышением скорости ветра увеличивается перенос образовавшихся техногенных загрязнений в газовой и твердой фазе и пыли с поверхности хвостохранилища.

В процессе полевых исследований было зафиксировано явление фена, который представляет собой нисходящий ветер, для которого характерно изменение температуры воздуха, его влажности. Фены возникают при наличии определенной разницы атмосферного давления по разные стороны горного массива.

Продолжительность фенов — от нескольких часов до двух недель, скорость ветра при этом может достигать штормовых значений [18]. Скорость ветра фенов способствует повышению вероятности более обильного массопереноса техногенных мелкодисперсных частиц, которые претерпели физико-механические изменения от климатических воздействий, вследствие чего возможно запыление шламовым материалом с. Унал и прилегающих к нему угодий [18, 19].

Средняя годовая температура воздуха на рассматриваемой территории 8,2 °С, самого теплого месяца (июля) +21,1 °С, самого холодного (января) –4,5 °С. Абсолютный максимум +36 °С (в июле и августе), абсолютный минимум –31 °С (в январе). Датами перехода среднесуточных температур воздуха через 0 °С является 7 марта и 26 ноября. Средний годовой минимум на этой территории составляет 4,0–4,2 °С. Средний минимум января –8,3 °С.

Годовая норма осадков — 901 мм. Наибольшее количество осадков выпадает в июне месяце и составляет 121 мм. Наименьшее количество осадков выпадает зимой (XII—II) и составляет 26–29 мм. Среднегодовая величина абсолютной влажности — 10 мб (парциальное давление — миллибар). Зимой она равна соответственно 4,1–4,7 мб, летом в июле 17,9 мб. Относительная влажность — 78%. Приведенные выше данные основаны на многолетних наблюдениях на ближайшей предгорной метеорологической станции в г. Алагир. В связи с тем, что проведение полевых работ осуществлялось в условиях горного ущелья, где возможны отклонения метеорологических параметров, исследователями были осуществлены дополнительные метеорологические исследования с помощью метеостанции «СОКОЛ М-1».

Сейсмичность района полевых работ определялась по таблице Приложения Б «Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации ОСР-97» СП 14.13330.2011. Согласно разделу 4, п. 4.3. СП, оценка степени сейсмической опасности производится по карте А — объект нормальной ответственности (массовое строительство), в баллах шкалы MSK-64, в течение 50 лет, субъект — РСО–Алания, пункт — г. Алагир: А (10%) — 8, В (5%) — 9, С (1%) — 9. Необходимо отметить, что за период наблюдений зафиксированы два землетрясения магнитудой более 4.

Исследования авторов в течение 2023 г. показали, что поверхность хвостохранилища претерпевает значительные изменения в виде общей просадки с последующими разрывами в виде трещин и локальных просадок [15]. Анализ и оценке эволюции за прошедший год и посвящены описываемые ниже исследования.

Нивелирование поверхности хвостохранилища и определение просадок

Согласно разработанной и реализованной схеме полевых исследований были реализованы методы с малыми временными затратами. Благодаря применению современных аппаратурно-технических средств и мат. обработки, обеспечивающих требуемую информативность [15], в ходе экспедиционных исследований 2024 г. были реализованы аналогичные методы. По реперам, установленным ранее, было выполнено повторное нивелирование. Полученные данные позволили с применением программы SURFER 15 построить изолинии равных высот, приведенные на рис. 2. Далее полученное распределение изолиний было совмещено с результатами измерений, выполненных в 2023 г. Так, на поверхности ранее выявленного ме-

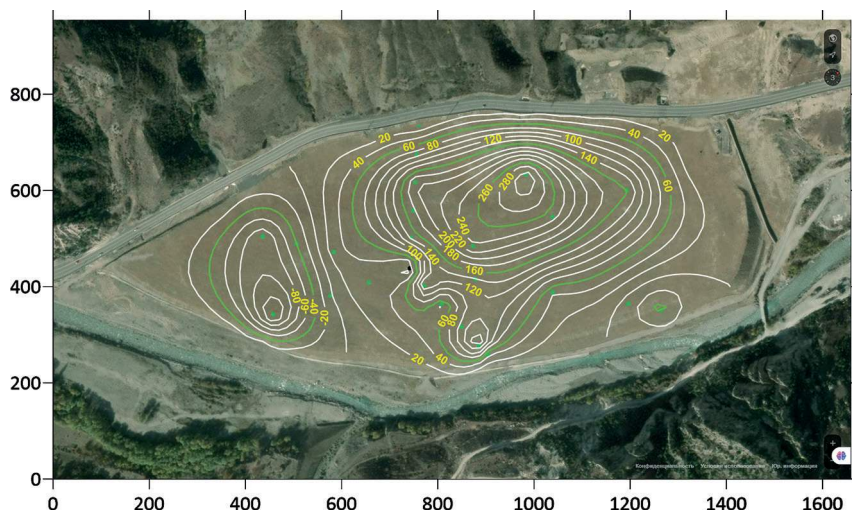


Рис. 2. Результат нивелирования поверхности хвостохранилища на основе данных, полученных в сентябре 2024 г.

Fig. 2. The result of leveling the surface of the tailings dam based on data obtained in September 2024

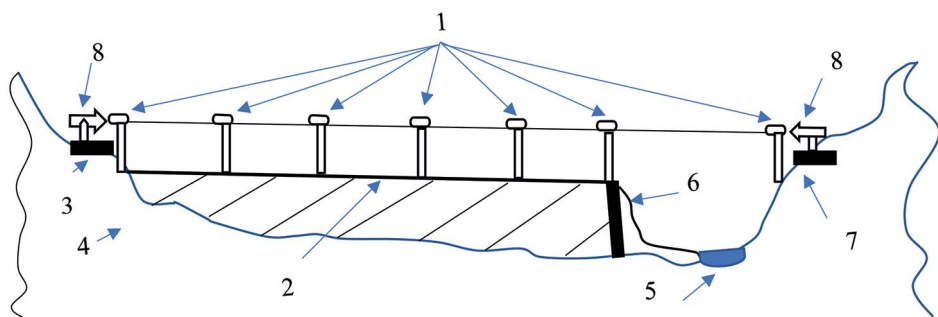
ста возможной просадки поверхности рекультивации была организована линия реперов для фиксации изменений (смещений) расстояния между ними для оценки возможных горизонтальных смещений поверхности с шагом 30 м.

Анализ расположения изолиний показывает распределение проседаний рекультивированной поверхности центральной части хвостохранилища от 40 до 50 см по сравнению с результатами, полученными в 2023 г. Наибольшее проседание выявлено в местах разгрузки паводковых вод, стекающих с прилегающих гор. Сезонное поступление воды, очевидно, способствует прогрессирующему проседанию рекультивированной поверхности. Места подтоплений поверхности с образованием временных озер характеризуется осветленной поверхностью почвы слоя рекультивации с наличием высолов и угнетенного растительного покрова. Анализ отобранных проб почвы с поверхности показывает, что практически вся поверхность слоя рекультивации подвержена глубокому проникновению влаги осадков и, как следствие, инфильтрации части ток-

сичных рассолов, образующихся в теле хвостохранилища, на поверхность.

На основе сформированных компетенций по исследованию и анализу эволюции деформационных процессов и геологических условий месторасположения хвостохранилища, собственного опыта полевых работ был разработан и опробован в качестве тестового эксперимента экспресс-метод определения линейных смещений рекультивированной поверхности лазерным способом. Схема реализации примененного экспресс-метода показана на рис. 3.

Методология реализации состоит из нескольких последовательных этапов и заключается в следующем: рейка 1 с отражателем катафотного типа устанавливалась поочередно на специальные основания реперов, вбитых в поверхность слоя рекультивации хвостохранилища 2, на протяжении от автодороги 3 на левом берегу 4 р. Ардон 5 до откоса дамбы 6 и до контрольной площадки репера 7 на правом берегу р. Ардон. Рейка выставлялась по отвесу, на линии визирования устанавливался отражатель катафотного типа.



- 1 – рейка с отражателем катафотного типа; 2 – поверхность слоя рекультивации хвостохранилища; 3 – обочина автодороги с контрольной площадкой установки лазерного дальномера; 4 – левый берег р. Ардон; 5 – р. Ардон; 6 – откос дамбы; 7 – контрольная площадка установки лазерного дальномера на правом берегу р. Ардон; 8 – лазерный дальномер

Рис. 3. Схема экспресс-метода определения просадок рекультивированной поверхности лазерным способом

Fig. 3. Diagram of the express method for determining settlements of the reclaimed surface using a laser-based approach

С целью повышения точности измерений определение расстояний осуществлялось с обеих сторон линии визуирования лазерным дальномером 8.

При реализации предложенного экспресс-метода приборы типа тахеометров в ходе экспедиции 2024 г. не применялись. Применение приборов такого класса планируется в дальнейших запланированных экспедициях. Их эксплуатация требует определенного уровня компетенций экспедиционного персонала, а данные, полученные с их помощью, несомненно, повысят полноту и достаточность информации по определению качественных величин просадок поверхности и ее смещений.

В ходе работ 2024 г. на основании полученных данных возникла необходимость в корректировке дальнейших исследований, а именно:

- для оценки воздействий местных сейсмических колебаний (землетрясений) необходимо в теле хвостохранилища разместить не менее двух датчиков измерителей линейных смещений вдоль малой оси хвостохранилища для определения величин амплитуды смещений, а также возможных опасных резонанс-

ных колебаний обводненной части тела хвостохранилища;

- для оценки величины возможной разгрузки токсичных водных растворов свинцовых и цинковых концентратов в р. Ардон необходимо произвести одним из электроразведочных методов измерение электропроводности величины проводимости водной части левого примыкающего берега р. Ардон, а также по возможности выполнить электрические разрезы по осям хвостохранилища с целью определения мест и степени их обводненности для оценки сейсмической устойчивости хвостохранилища;

- для дополнительной оценки изменения толщины слоя рекультивации и рельефа наклонной поверхности подошвы хвостохранилища при наличии технических возможностей необходимо осуществить сейсмоакустическое зондирование в ходе последующих экспедиций;

- для осуществления мониторинга степени обводненности тела хвостохранилища необходимо выполнить «прокол» специальным инструментом малого диаметра в центральной части и провести необходимые измерения водонасыщен-

ности хвостов, слагающих тело хвостохранилища по глубине.

Обсуждение результатов

В результате анализа приведенных выше данных нивелирования 2023 г. в сравнении с результатами 2024 г. определено общее понижение поверхности рекультивации. Наибольшие проседания зафиксированы в центральной части хвостохранилища — более чем на 40 см. Результаты нивелирования показывают проседание в центре рекультивированной поверхности хвостохранилища с геометрическими границами, характерными как «цирк» проседания (см. рис. 2). Контур, который был выявлен ранее в результате нивелирования 2023 г. низкой части данного проседания, характеризуется наличием высолов на поверхности. Поверхность рекультивированного слоя хвостохранилища проседает практически везде неравномерно, при этом отметки высот периметра ограждающей дамбы изменились незначительно. В месте примыкания хвостохранилища к автодороге на расстоянии 25 м от нее наметилась параллельная протяженная зона «разрыва» рекультивированной поверхности хвостохранилища, обозначенная нарушениями поверхности в виде трещин с «разрывом» некоторых более 20 см. Необходимо отметить, что в 40 м от дороги, по предварительному заключению, появился протяженный участок «вспучивания», в нижних границах которого наблюдаются также трещинные разрывы.

В ходе обсуждения результатов повторного нивелирования и оценки годовых изменений геоморфологии участка авторы выдвигают следующие предположения:

- неравномерность проседания, очевидно, связана с попаданием влаги осадков и стока воды с прилегающего слева горного склона по открытым трещинам

внутрь иссушенного тела хвостохранилища;

- неравномерное увлажнение тела хвостохранилища в результате попадания дождевых стоков и осадков вызывает периодическое обводнение с изменением плотности измельченных горных пород, их физико-механических свойств и, как следствие, изменением напряженно-деформированного состояния;

- за время экспедиционных исследований в период 2023—2024 гг. произошел ряд сейсмических событий, которые могли также повлиять на изменение напряженно-деформированного состояния тела хвостохранилища с реальными отображениями последствий на поверхности рекультивированного слоя. Предстоит также исследовать возможность резонансного совпадения собственных колебаний жидкого тела хвостохранилища с сейсмическими воздействиями в виде последовательности форшоков, самого сейсмического события и афтершоков ближних и дальних землетрясений;

- очевидно, что наличие уклона подошвы хвостохранилища аллювиального геологического строения (примерно 14° к р. Ардон) также влияет на величину эволюции деформационных процессов и общего стока растворенных фракций свинцовых и цинковых концентратов в сторону р. Ардон.

Выводы

Возникает очевидная необходимость продолжения исследований в связи с отмеченной динамикой эволюции хвостохранилища с развитием деформационных процессов, выявленных на поверхности хвостохранилища.

В связи с вышеобозначенным, необходимо дальнейшее осмысление полученных результатов, создание баз данных и выполнение комплекса дополнительных исследований:

- выработка оптимальных предложений, направленных на возможное создание наблюдательного геофизического полигона, включающего следующие виды наблюдений: ежегодное нивелирование с повышением его детальности, включая и весь периметр ограждающей дамбы и определение горизонтальных смещений;

- детальный геотехнический мониторинг;

- мониторинг метеоусловий;

- наблюдение за ореолами образующихся озер на поверхности хвостохранилища по следам выходов, угнетения растительности и мест попадания влаги внутрь тела хвостохранилища по вновь образующимся и существующим трещинам;

- выполнение работ по электроразведке.

Также следует дооборудовать несколько реперов для наблюдения смещений поверхности относительно стационарных жестко привязанных реперов, к примеру, закрепленных на автострате и на правом берегу р. Ардон.

Необходимо провести сейсмоакустическое зондирование (профилирование) с целью определения изменений толщины слоя рекультивации и рельефа наклонной подошвы хвостохранилища.

Заключение

Экспедиционные исследования позволили осуществить оценку эволюции деформационных процессов в техногенном массиве рекультивированного Унальского хвостохранилища, которая подтвердила необходимость осуществления дальнейшего мониторинга хвостохранилища по причине прогрессирующих деформаций. Реализуемые и намечаемые методы исследований в данной работе могут быть применены к мониторингу и оценке эволюции деформационных процессов и на иных выведенных из эксплуатации объектах горно-обогатительной отрасли, с учетом специфических гидрогеологических и сейсмических и других особенностей их территориального расположения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саинов М. П., Талалаев Н. С. Оценка сейсмостойкости дамбы наливного хвостохранилища // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 1.
2. Du Z., Ge L., Ng A. H. M., Zhu Q., Horgan F. G., Zhang Q. Risk assessment for tailings dams in brumadinho of Brazil using InSAR time series approach // Science of the Total Environment. 2020, vol. 717, article 137125. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137125.
3. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Kukartsev V. V., Konyukhov V. Y., Kononenko R. V., Gendon A. L., Oparina T. A. Radon emanation and dynamic processes in highly dispersive media // Geosciences. 2024, vol. 14, no. 4, article 102. DOI: 10.3390/geosciences14040102.
4. Garcia L. C., Ribeiro D. B., de Oliveira Roque F., Ochoa-Quintero J. M., Laurance W. F. Brazil's worst mining disaster: corporations must be compelled to pay the actual environmental costs // Ecological Applications. 2017, vol. 27, no. 1, pp. 5 – 9. DOI: 10.1002/eap.1461.
5. Sun Y., Chang H., Miao Z., Zhong D. Solution method of overtopping risk model for earth dams // Safety Science. 2012, vol. 50, no. 9, pp. 1906 – 1912. DOI: 10.1016/j.ssci.2012.05.006.
6. Delenne C., Cappelaere B., Guinot V. Uncertainty analysis of river flooding and dam failure risks using local sensitivity computations // Reliability Engineering & System Safety. 2012, vol. 107, pp. 171 – 183. DOI: 10.1016/j.ress.2012.04.007.
7. Andreini M., Gardoni P., Pagliara S., Sassu M. Probabilistic models for the erosion rate in embankments and reliability analysis of earth dams // Reliability Engineering and System Safety. 2019, vol. 181, pp. 142 – 55. DOI: 10.1016/j.ress.2018.09.023.

8. Macedo J., Torres P., Vergaray L., Paihua S., Arnold C. Dynamic effective stress analysis of a centreline tailings dam under subduction earthquakes // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*. 2022, vol. 175, no. 2, pp. 224–246. DOI: 10.1680/jgeen.21.00017a.

9. Solans D., Kontoe S., Zdravković L. Impact of foundation layer characteristics on the seismic response of a tailings dam // 10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE 2023), 2023. DOI: 10.53243/NUMGE2023-307.

10. Тер-Мартirosян А. З., Сергеев С. А., Ермошина Л. Ю. Сравнительный анализ методов расчета коэффициентов устойчивости ограждающей дамбы хвостохранилища с учетом сейсмического воздействия // *Гидротехническое строительство*. — 2021. — № 6. — С. 40–44. DOI: 10.34831/EP.2021.94.31.005.

11. Cavaleiro Paulelli A. C., Cesila C., Devos P. P., Ruella de Oliveira S., Bianchi Ximenez J. P., Pedreira W. R., Barbosa F. Fundão tailings dam failure in Brazil: Evidence of a population exposed to high levels of Al, As, Hg, and Ni after a human biomonitoring study // *Environmental Research*. 2021, vol. 205, no. 1-2, article 112524. DOI: 10.1016/j.envres.2021.112524.

12. Sanchez L. E., Alger K., Alonso L., Francisco B., Brito M. C., Laureano F., May P., Roeser H., Kakabadse Y. Impacts of the Fundão Dam failure: a pathway to sustainable and resilient mitigation. 2018. DOI: 10.2305/iucn.ch.2018.18.en.

13. Adamo N., Al-Ansari N., Sissakian V., Laue J., Knutsson S. Dam safety: monitoring of tailings dams and safety reviews // *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*. 2021, vol. 11, no. 1, pp. 249–289. DOI: 10.47260/jesge/1117.

14. Omachi C. Y., Siani S. M. O., Chagas F. M., Mascagni M. L., Cordeiro M., Garcia G. D., Thompson C. C., Siegle E., Thompson F. L. Atlantic forest loss caused by the world's largest tailing dam collapse (Fundão Dam, Mariana, Brazil) // *Remote Sensing Applications Society and Environment*. 2018, vol. 12, pp. 30–34. DOI: 10.1016/j.rsase.2018.08.003.

15. Фоменко В. А., Лолаев А. Б., Соколов А. А., Кузь О. В., Плахотин Д. А. Отдельные результаты геоэкологического мониторинга рельефа поверхности Унальского хвостохранилища // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2024. — № 8. — С. 38–50. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_38.

16. Соколов А. А., Мирошников А. С., Соколова Е. А. Алгоритмы управления устойчивостью системы «предприятие горно-металлургического комплекса – внешняя среда» // *Горный журнал*. — 2016. — № 12. — С. 83–86. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.17.

17. Маковозова З. Э., Соколов А. А., Фоменко В. А., Сарбаева М. Т. Влияние гидрогеологических особенностей Унальского хвостохранилища на загрязнение экосистемы тяжелыми металлами // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2023. — № 6. — С. 126–138. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_126.

18. Дзедобоев С. О. Влияние техногенеза на формирование природно-технической системы – намывной техногенный грунтовый массив и экологическая безопасность горных территорий (на примере Унальского хвостохранилища, Республика Северная Осетия – Алания). Автореф. дисс. ... канд. геол.-минер. наук. 2022, 21 с.

19. Пряничникова Е. В. Эколого-геохимическая оценка горнорудного района: На примере Садоно-Унальской котловины, Республика Северная Осетия – Алания. Автореф. дисс. ... канд. геол.-минер. наук. 2005, 28 с.

20. Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В. Геоэкологический мониторинг при ведении горных работ // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 580–588. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-580-588.

21. Каменецкий Е. С., Радионов А. А., Тимченко В. Ю., Панаэтова О. С. Математическое моделирование распределения химических веществ и твердой фазы хвостов, осаждающихся на горных склонах в районе Фиагонского хвостохранилища РСО – Алания // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 349–361. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-349-361. **ПЛАБ**

REFERENCES

1. Sainov M. P., Talalaev N. S. Evaluation of seismic stability of tailings pond. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024, vol. 16, no. 1. [In Russ].

2. Du Z., Ge L., Ng A. H. M., Zhu Q., Horgan F. G., Zhang Q. Risk assessment for tailings dams in brumadinho of Brazil using InSAR time series approach. *Science of the Total Environment*. 2020, vol. 717, article 137125. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137125.

3. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Kukartsev V. V., Konyukhov V. Y., Kononenko R. V., Gendon A. L., Oparina T. A. Radon emanation and dynamic processes in highly dispersive media. *Geosciences*. 2024, vol. 14, no. 4, article 102. DOI: 10.3390/geosciences14040102.
4. Garcia L. C., Ribeiro D. B., de Oliveira Roque F., Ochoa-Quintero J. M., Laurance W. F. Brazil's worst mining disaster: corporations must be compelled to pay the actual environmental costs. *Ecological Applications*. 2017, vol. 27, no. 1, pp. 5 – 9. DOI: 10.1002/eap.1461.
5. Sun Y., Chang H., Miao Z., Zhong D. Solution method of overtopping risk model for earth dams. *Safety Science*. 2012, vol. 50, no. 9, pp. 1906 – 1912. DOI: 10.1016/j.ssci.2012.05.006.
6. Delenne C., Cappelaere B., Guinot V. Uncertainty analysis of river flooding and dam failure risks using local sensitivity computations. *Reliability Engineering & System Safety*. 2012, vol. 107, pp. 171 – 183. DOI: 10.1016/j.ress.2012.04.007.
7. Andreini M., Gardoni P., Pagliara S., Sassu M. Probabilistic models for the erosion rate in embankments and reliability analysis of earth dams. *Reliability Engineering and System Safety*. 2019, vol. 181, pp. 142 – 55. DOI: 10.1016/j.ress.2018.09.023.
8. Macedo J., Torres P., Vergaray L., Paihua S., Arnold C. Dynamic effective stress analysis of a centrelined tailings dam under subduction earthquakes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*. 2022, vol. 175, no. 2, pp. 224 – 246. DOI: 10.1680/jgeen.21.00017a.
9. Solans D., Kontoe S., Zdravković L. Impact of foundation layer characteristics on the seismic response of a tailings dam. *10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE 2023)*, 2023. DOI: 10.53243/NUMGE2023-307.
10. Ter-Martirosyan A. Z., Sergeev S. A., Ermoshina L. Yu. Comparative analysis of the methods for calculation of the stability coefficients of the tailings dam, taking into account seismic impact. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 2021, no. 6, pp. 40 – 44. [In Russ]. DOI: 10.34831/EP.2021.94.31.005.
11. Cavalheiro Paulelli A. C., Cesila C., Devos P. P., Ruella de Oliveira S., Bianchi Ximenez J. P., Pedreira W. R., Barbosa F. Fundão tailings dam failure in Brazil: Evidence of a population exposed to high levels of Al, As, Hg, and Ni after a human biomonitoring study. *Environmental Research*. 2021, vol. 205, no. 1-2, article 112524. DOI: 10.1016/j.envres.2021.112524.
12. Sanchez L. E., Alger K., Alonso L., Francisco B., Brito M. C., Laureano F., May P., Roeser H., Kakabadse Y. Impacts of the Fundão Dam failure: a pathway to sustainable and resilient mitigation. 2018. DOI: 10.2305/iucn.ch.2018.18.en.
13. Adamo N., Al-Ansari N., Sissakian V., Laue J., Knutsson S. Dam safety: monitoring of tailings dams and safety reviews. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*. 2021, vol. 11, no. 1, pp. 249 – 289. DOI: 10.47260/jesge/1117.
14. Omachi C. Y., Siani S. M. O., Chagas F. M., Mascagni M. L., Cordeiro M., Garcia G. D., Thompson C. C., Siegle E., Thompson F. L. Atlantic forest loss caused by the world's largest tailing dam collapse (Fundão Dam, Mariana, Brazil). *Remote Sensing Applications Society and Environment*. 2018, vol. 12, pp. 30 – 34. DOI: 10.1016/j.rsase.2018.08.003.
15. Fomenko V. A., Lolaev A. B., Sokolov A. A., Kuz O. V., Plakhotin D. A. Selected results of geoeological monitoring of Unal tailings dump topography. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 8, pp. 38 – 50. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_38.
16. Sokolov A. A., Miroshnikov A. S., Sokolova E. A. Control algorithms for mining and metallurgical plant ambient environment system stability. *Gornyi Zhurnal*. 2016, no. 12, pp. 83 – 86. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.17.
17. Makovozova Z. E., Sokolov A. A., Fomenko V. A., Sarbaeva M. T. Influence of hydrogeology at Unal tailings pond on ecosystem pollution with heavy metals. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 6, pp. 126 – 138. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_126.
18. Dzeboev S. O. *Vliyanie tekhnogeneza na formirovanie prirodno-tekhnicheskoy sistemy – namyvnoy tekhnogenniy gruntoviy massiv i ekologicheskaya bezopasnost' gornyh territoriy (na primere Unal'skogo hvostohranilishcha, Respublika Severnaya Osetiya – Alaniya)* [The influence of technogenesis on the formation of a natural-technical system – alluvial technogenic soil massif and environmental safety of mountainous territories (on the example of the Unal tailings dump, Republic of North Ossetia – Alania)], Candidate's thesis, 2022, 21 p.
19. Pryanichnikova E. V. *Ekologo-geohimicheskaya otsenka gornorudnogo rayona: Na primere Sadono-Unal'skoy kotloviny, Respublika Severnaya Osetiya – Alaniya* [Ecological and geochemical assessment of the mining region: On the example of the Sadono-Unal basin, Republic of North Ossetia – Alania], Candidate's thesis, 2005, 28 p.

20. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Geocological monitoring during mining operations. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 2, pp. 580–588. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-580-588.

21. Kamenetsky E. S., Radionoff A. A., Timchenko V. U., Panaetova O. S. Mathematical modeling of distribution of the chemicals and the solid phase of tailings deposited on the mountain gorge slopes near the Fiagdonskoye tailings, North Ossetia – Alania. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 3, pp. 349–361. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-349-361.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фоменко Владимир Александрович¹ — канд. техн. наук, доцент,
e-mail: vafomenko@sfedu.ru, ORCID ID: 0000-0003-4725-3673,

Соколов Андрей Андреевич¹ — канд. техн. наук,
доцент, зав. кафедрой, e-mail: anso@sfedu.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1127-9612,

Лолаев Алан Батразович — д-р техн. наук, профессор,
заместитель директора по инновационному развитию,
Владикавказский научный центр РАН, зав. кафедрой,
Северо-Осетинский государственный университет, им. Коста Левановича Хетагурова,
e-mail: abl-2010@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0943-6807,

Башмашников Илья Игоревич¹ — студент,
e-mail: bash@sfedu.ru, ORCID ID: 0009-0009-5440-2850,
Турметова Гульмира Жусуповна — канд. техн. наук,
старший преподаватель, Международный казахско-турецкий
университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, Республика Казахстан,
Туркестан, e-mail: gulmira.turmetova@ayu.edu.kz,
ORCID ID: 0000-0001-7754-3829,

¹ Филиал Южного федерального университета в г. Геленджике.

Для контактов: Турметова Г.Ж., e-mail: gulmira.turmetova@ayu.edu.kz.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.A. Fomenko¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: vafomenko@sfedu.ru, ORCID ID: 0000-0003-4725-3673,

A.A. Sokolov¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Head of Chair,
e-mail: anso@sfedu.ru, ORCID ID: 0000-0002-1127-9612,

A.B. Lolaev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy Director for Innovative Development,
Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
Mikhailovskoye, Republic of North Ossetia-Alania, Russia;
Head of Chair, Kosta Levanovich Khetagurova North Ossetian State University,
Vladikavkaz, Russia, e-mail: abl-2010@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0943-6807,

I.I. Bashmashnikov¹, Student, e-mail: bash@sfedu.ru,
ORCID ID: 0009-0009-5440-2850,

G.Z. Turmetova, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer,
Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University,
Turkistan, Kazakhstan, e-mail: gulmira.turmetova@ayu.edu.kz,
ORCID ID: 0000-0001-7754-3829,

¹ Gelendzhik Branch of Southern Federal University, Gelendzhik, Russia.

Corresponding author: G.Z. Turmetova, e-mail: gulmira.turmetova@ayu.edu.kz.

Получена редакцией 01.03.2025; получена после рецензии 14.04.2025; принята к печати 10.06.2025.

Received by the editors 01.03.2025; received after the review 14.04.2025; accepted for printing 10.06.2025.

РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ОБРАЗОВАНИЯ ШЛАМОВОГО РЕЖИМА НА ЗАБОЕ СКВАЖИНЫ

Р.У. Джураев¹, М.В. Меркулов², Д.Н. Хатамова¹, А.Т. Асанов¹

¹ Навоийский государственный горно-технологический университет,
Навои, Узбекистан, e-mail: dilyon_hat@bk.ru

² Российский государственный геологоразведочный университет
им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), Москва, Россия

Аннотация: Безаварийный процесс бурения скважин во многом зависит от эффективной очистки ствола скважины. Образование шламового режима на забое скважины приводит к процессу повторного измельчения буровой мелочи, это в свою очередь приводит к снижению механической скорости бурения, увеличению энергозатрат породоразрушающего инструмента на повторное измельчение, а также повышает риск возникновения сальников. Кроме того, образование шламового режима на забое скважины увеличивает интенсивность абразивного износа бурового снаряда. Приведено теоретическое описание движения частицы пробуренной породы, доказывающее необходимость воздействия внешней силы, направляющей частицу на поверхность. Описана усовершенствованная конструкция трехшарошечного долота, позволяющая создать вихревое течение шламового раствора при вращении долота в забое, максимально направляя частицы из-под породоразрушающего инструмента к стенкам скважины. Также приведена конструкция разработанного завихрителя, ускоряющего поднятие промывочного раствора на верхнюю часть бурового снаряда, что предотвращает оседание шлама и сальникообразование в бурильной колонне. Дано описание экспериментальных исследований предложенных технических решений, в результате которых определены рациональные углы сгиба лапы долота, количество и углы сгиба винтов завихрителя. Аналитический анализ экспериментальных исследований показывает, что применение разработанного бурового снаряда, повышающего качество промывки забоя скважины, позволит повысить эффективность процесса бурения скважин за счет предупреждения образования шламового режима на забое скважины, повышения механической скорости бурения, а также уменьшения расхода электроэнергии на работу двигателя бурового вращателя и насоса.

Ключевые слова: бурение, мелочь, шлам, шламовый режим, прихват, аварии, простои бурового оборудования, долото, буровая колонна, механическая скорость бурения, стойкость долота.

Для цитирования: Джураев Р. У., Меркулов М. В., Хатамова Д. Н., Асанов А. Т. Разработка технических решений по предотвращению образования шламового режима на забое скважины // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 7. – С. 102–114. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_102.

Engineering solutions for sludging prevention at bottomhole

R.U. Djuraev¹, M.V. Merkulov², D.N. Khatamova¹, A.T. Asanov¹

¹ Navoi State University of Mining and Technology, Navoi, Uzbekistan, e-mail: dilyon_hat@bk.ru

² Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI), Moscow, Russia

Abstract: Failure-free drilling in many ways depends on efficiency of borehole cleanout. Sludging at bottomhole leads to regrinding of rock cuttings, and this, in its turn, results in reduction of rate of penetration, increases energy consumed by a rock-cutting tool for regrinding, and elevates risks of wall packing. For another thing, sludging at bottomhole intensifies abrasive wear of a drilling assembly. The article gives a theoretical description of movement of drilled rock particle, proving the need to apply an external force to direct the particle to the surface. The described improved design of a tricone drill bit enables a vortex flow of sludge at bottomhole, which full-blast directs rock particles from under the rock cutting tool toward the borehole walls. The developed vortex generator speeds up the upward motion of washing solution to the top of the drilling assembly, which prevents sludging and wall packing in the drilling string. The tests of the proposed engineering solutions are described. The tests allowed determining efficient bent angles for the drilling bit leg, as well as the number and bent angles of screws for the vortex generator. The analysis of the test data shows that the designed drilling assembly improves the quality of cleanout at bottomhole and enhances efficiency of drilling owing to prevention of sludging at the bottomhole, increased rate of penetration and reduced power consumed by the motor of the swivel head and pump.

Key words: drilling, rock cuttings, sludging, seizure, accidents, drilling equipment downtime, drill bit, drilling string, rate of penetration, drill bit fastness.

For citation: Djuraev R. U., Merkulov M. V., Khatamova D. N., Asanov A. T. Engineering solutions for sludging prevention at bottomhole. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(7):102-114. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_102.

Введение

Образованный в результате разрушения горной породы на забое скважины шлам состоит из частиц разбуренной породы и очистного агента [1, с. 114]. Затруднение выноса буровой мелочи с забоя скважины на поверхность оказывает отрицательное воздействие на износостойкость долота и проходку скважины [2, с. 753]. Оседание частиц пробуренной породы под породоразрушающим инструментом ускоряет процесс износа и разлом зубьев в результате образования щелей и царапин на поверхности инструмента [3, с. 3]. Кроме того, неэффективный вынос шлама значительно снижает механическую скорость бурения

и повышает энергоемкость бурения за счет повторного разбуривания шлама.

Скорость разрушения горной породы в процессе бурения зависит от тела и зуба долота, на состояние которого существенным образом оказывает влияние движение частиц пробуренной породы под телом породоразрушающего инструмента [4, с. 174–175].

Исследование влияния шламового режима на эффективность бурения скважины

На практике бурения применяются несколько способов очистки забоя скважины: шнекопневматическая очистка,

очистка шнеками, продувка водно-воздушной смесью или сжатым воздухом, промывка глинистыми растворами или водой, отсасывание пробуренной мелочи [5].

Продувка и промывка скважины получили наибольшее распространение при буровых работах. Для снижения удельных затрат энергии и достижения требуемой скорости бурения необходимы точный расчет и учет свойств породы, типа и размера долота, параметров режима бурения [6].

Вынос буровой мелочи происходит при условии превышения подъемной силы восходящей струи над массой частиц породы. При этом немаловажным показателем является и размер частиц. При превышении размеров буровой мелочи над величиной зазора пробуренная порода не может подниматься вверх и требуется дополнительное дробление [7, с. 176–177].

Промывка забоя скважины получила большое распространение при применении станков колонкового бурения в геологоразведочных работах, а также при бурении нефтяных и газовых скважин [8]. Для эффективной очистки скважины используют очистной раствор высокой степени вязкости, однако при этом снижается скорость бурения и увеличиваются энергетические затраты [9, с. 12]. Так же широко практикуется подача очистного раствора к забою через насадку долота, что требует точного технико-экономического обоснования для каждого случая использования, так как повышение скорости циркуляции может привести к размыву стенок скважины, увеличению шлама в буровом растворе и кавернозности ствола [10, с. 21–23].

Увеличение твердой коллоидной фазы в составе бурового шлама, а также диспергирование шлама отрицательно влияют на проницаемость призабойной зоны пласта, снижается эффективность

работы оборудования, очищающего буровой раствор, увеличиваются затраты на ремонт насоса и вертлюга, за счет чего увеличивается стоимость бурового раствора [11].

Вынос шлама возможен в случае превышения скорости восходящего потока над скоростью оседания твердой фазы, которая определяется по формуле [12, с. 20]

$$v_{\text{ч}} = \frac{gd_{\text{ч}}^2(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})}{\eta},$$

где $v_{\text{ч}}$ — скорость оседания пробуренной породы в растворе, м/с; g — ускорение свободного падения, м/с²; $d_{\text{ч}}$ — средний диаметр частицы, м; $\rho_{\text{ч}}$ и $\rho_{\text{ж}}$ — плотность частицы и очистного раствора соответственно, кг/м³; η — вязкость бурового раствора, м²/с.

Накопление шлама в забое скважины приводит к механическому прихвату бурильной колонны [13]. В условиях неполного выноса пробуренная горная порода выпадает на забой скважины, образуя «шламовые подушки», удерживающиеся на нижней стенке за счет силы трения [14, с. 7]. «Шламовые подушки» приводят к закупориванию кольцевого пространства, в результате происходит прихват колонны, сопровождающийся полной или частичной потерей циркуляции. «Шламовые подушки» вызывают посадки при спусках бурильной колонны.

Помимо этого, неполный вынос пробуренной породы вызывает сальникообразование, приводящее к уменьшению гидромеханического диаметра, а следовательно, к повышению давления в забое и насосе при промывке скважины, а также к прихватам колонны [15].

Шламовый режим является основной причиной повышения аксиального трения и крутящего момента бурильной колонны, что вызывает «подвисание» колонны, а также уменьшение нагрузки на долото [16, с. 43].

На количество шлама основное влияние оказывают его размеры, конструкция и направление очистки забоя, качество очистного агента, устойчивость стенки скважины и др. При некачественной очистке забоя на поверхность выносятся только мелкие частицы шлама, а более крупные куски остаются в забое, образуя «шламовые подушки». Шлам повторно проходит разрушение долотом, выделяя большое количество тепла в результате многократного трения. Также при движении по кольцевому пространству шлам повторно разламывается буровыми трубами [17, с. 112 – 115].

Исследование воздействия сил на частицу разбуренной горной породы

Для теоретического описания движения частицы допустим, что породоразрушающий инструмент отрывает частицу горной породы в точке «М» (рис. 1) [18, с. 42].

Составим систему уравнений движения для точки «М» [18, с. 42]:

$$\begin{aligned}x &= r \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi \cdot \omega \cdot t \\y &= r \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi \cdot \omega \cdot t, \\z &= v \cdot t\end{aligned} \quad (1)$$

где r — радиус породоразрушающего инструмента, м; θ — угол движения отделившейся частицы, град; ω — угловая скорость движения частицы, град/с; t — время движения частицы, с; v — скорость движения частицы, м/с.

Отделившаяся частица в результате сложного движения теряет часть энергии, максимальную энергию она имеет в точке отрыва от горного массива. В этой точке кинетическая энергия будет иметь максимальное значение.

Зададимся направлением движения частицы в скважине, тогда система уравнений движения частицы по направлению имеет следующий вид [18, с. 42]:

$$\begin{aligned}v_x &= r \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi \cdot \omega \\v_y &= r \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi \cdot \omega \\v_z &= v\end{aligned} \quad (2)$$

В точке «М» абсолютная скорость частицы имеет следующее значение [18, с. 42]:

$$\begin{aligned}v_{abc} &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = \\&= \sqrt{r^2 \cdot \cos^2 \theta \cdot \omega^2 \cdot (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) + v_z^2}\end{aligned} \quad (3)$$

Упростив выражение (3), имеем [18, с. 42]:

$$v_{abc} = \sqrt{r^2 \cdot \cos^2 \theta \cdot \omega^2 + v_z^2} \quad (4)$$

Выражение (4) показывает, что значение общей скорости частицы горной породы, отделившейся от массива в результате воздействия на нее разрушающей силы породоразрушающего инструмента, будет двигаться по стволу скважины со скоростью, теоретически зависящей от радиуса породоразрушающего инструмента, глубины внедрения зуба, угловой и начальной скорости движения частицы.

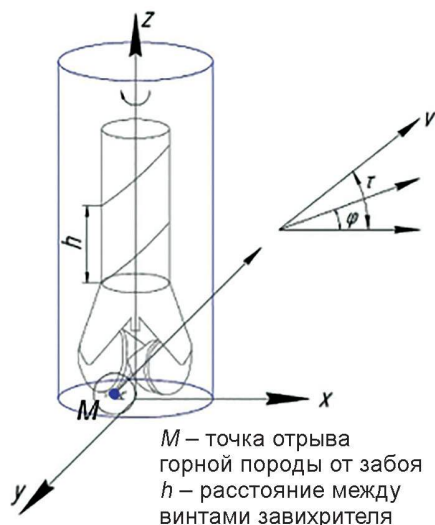


Рис. 1. Схема движения частицы

Fig. 1. Particle motion diagram

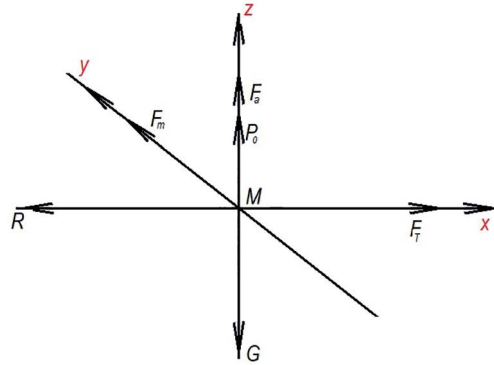


Рис. 2. Силы, действующие на отделившуюся от забоя скважины частицу
Fig. 2. Forces acting on particles separated from the bottom of the well

Составим систему уравнений тангенциальной силы F_T , нормальной силы F_m , силы Архимеда F_a , осевой силы P_o , силы тяжести G , действующих на частицу [18, с. 42], представленных на рис. 2:

$$\begin{aligned}\sum F_x &= m \cdot a_x; \\ \sum F_y &= m \cdot a_y; \\ \sum F_z &= m \cdot a_z.\end{aligned}\quad (5)$$

где m — масса частицы, кг; a — ускорение частицы, м/с².

$$\begin{aligned}F_T - R &= m \cdot a_x; \\ F_m &= m \cdot a_y; \\ F_a + P_o - G &= m \cdot a_z.\end{aligned}\quad (6)$$

где F_T — тангенциальная сила, Н; F_m — нормальная сила, Н; F_a — сила Архимеда, Н; P_o — осевая сила, Н; G — сила тяжести, Н.

Составим систему уравнений относительно ускорения [18, с. 42]:

$$\begin{aligned}\frac{F_T - R_x}{m} &= a_x; \\ \frac{F_m - R_y}{m} &= a_y; \\ \frac{F_a + P_o - G - R_z}{m} &= a_z.\end{aligned}\quad (7)$$

Найдем из системы уравнений (3) абсолютное ускорение [18, с. 42]:

$$a = \frac{1}{m} \cdot \sqrt{(F_T - R_x)^2 + (F_m - R_y)^2 + (F_a + P_o - G - R_z)^2} \quad (8)$$

где R_x, R_y, R_z — сопротивления, действующие на частицу шлама,

$$R_x = v_x \cdot t_1;$$

$$R_y = v_y \cdot t_2;$$

$$R_z = v_z \cdot t_3.$$

Выражение (8) не учитывает взаимодействующие силы; эти силы возникают только во время движения потока. Силу инерции, действующую на частицу шлама, можно выразить в следующей форме:

$$\begin{aligned} \vec{F}_I &= m \cdot \vec{a} \\ F_I &= m \cdot \frac{1}{m} \cdot \sqrt{(F_x - R_x)^2 + (F_y - R_y)^2 + (F_z + P_o - G - R_z)^2} = \\ &= \sqrt{(F_x - R_x)^2 + (F_y - R_y)^2 + (F_z + P_o - G - R_z)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

Так как общая действующая сила имеет изменчивое направление и значение [19, с. 112], необходимо воздействие внешней силы на частицу шлама, которая будет способствовать направлению частицы со дна скважины на поверхность; определим изменяющиеся значения угла:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \gamma &= \frac{h}{2\pi r} = \frac{A}{2\pi \sqrt{\frac{v_u^2 - v_{ep}^2}{\cos^2 \theta \cdot \omega^2 \cdot (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)}}} = \\ &= \frac{N_{дв}}{2\pi t} \sqrt{\frac{(v_u^2 - v_{ep}^2) \left[(F_T - R_x)^2 + (F_y - R_y)^2 + (F_z + P_o - G - R_z)^2 \right]}{\cos^2 \theta \cdot \omega^2}} = \\ &= \frac{N_{дв} \cdot \cos \theta \cdot \omega}{2\pi t} \sqrt{(v_u^2 - v_{ep}^2) \left[(F_T - R_x)^2 + (F_y - R_y)^2 + (F_z + P_o - G - R_z)^2 \right]} \end{aligned} \quad (10)$$

где A — работа, затрачиваемая на поднятие частицы шлама с призабойной зоны, Дж; $N_{дв}$ — мощность двигателя вращателя буровой установки, необходимая для выполнения работы A , кВт.

Разработанная математическая модель движения доказывает необходимость воздействия внешней силы, способной направлять частицы шлама на поверхность. Поставленную задачу можно решить путем создания вихревого движения очистной жидкости, для этого необходимо усовершенствовать конструкцию бурового снаряда. Полученное выражение (10) позволяет определить рациональное значение угла, направляющего частицу шлама на поверхность [18].

Конструкция трехшарошечного долота и забойного завихрителя

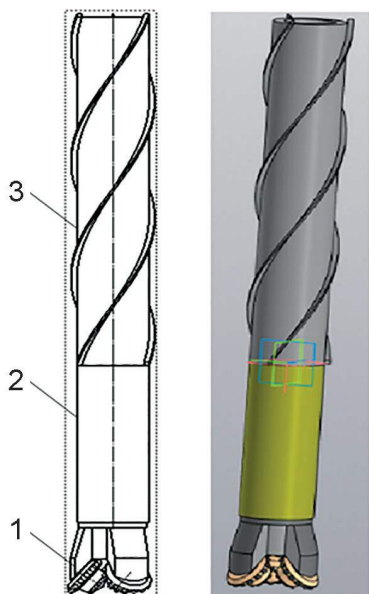
Для эффективной очистки забоя скважины от частиц шлама и предотвращения отрицательного воздействия шламового режима усовершенствована конструкция породоразрушающего инструмента. При этом часть лапы трехшарошечного долота согнута по винтовой линии, что создает вихревую силу, способную поднимать шламовый раствор в процессе вращения долота, а также максимально направлять



Рис. 3. Общий вид усовершенствованного трехшарошечного долота

Fig. 3. General view of an improved tricone bit

частицы шлама из-под долота к стенкам скважины, обеспечивая течение шлама. За счет изменения формы лапы трехшарошечного долота увеличен канал между лапами, по которому вытекает промывочный раствор, что позволяет предотвратить обратное течение жидкости и, соответственно, уменьшить передробление разрушенной породы.



1 – долото; 2 – бурильная труба; 3 – завихритель

Рис. 4. Буровой снаряд, повышающий эффективность промывки забоя скважины

Fig. 4. Drilling tool that increases the efficiency of flushing the bottom of the well

На рис. 3 представлен общий вид усовершенствованного трехшарошечного долота.

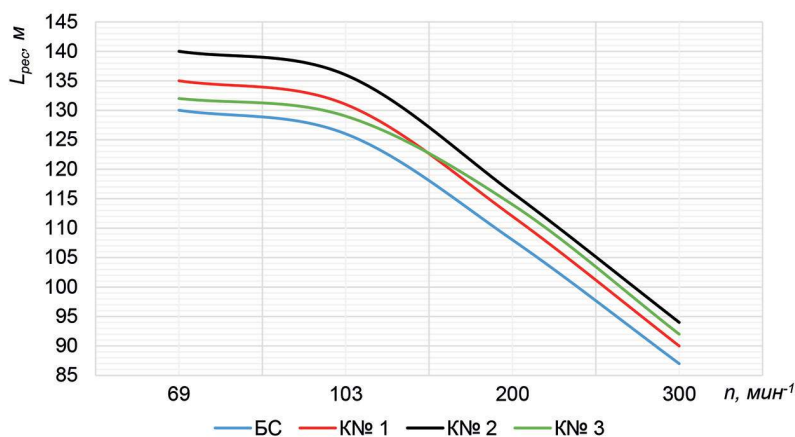
Также для предотвращения оседания шлама, сальникообразования в бурильной колонне и уменьшения гидравлического сопротивления промывочного раствора разработана конструкция забойного завихрителя потока, устанавливаемого над долотом.

На рис. 4 представлены усовершенствованное трехшарошечное долото и общий вид бурового снаряда с забойным завихрителем.

На основе теоретических исследований и расчетов были определены конструктивные параметры, обеспечивающие наиболее высокую эффективность бурового снаряда, повышающего качество промывки забоя скважины. При этом угол сгиба лапы трехшарошечного долота диаметром 76 мм был принят в трех вариантах: 45°, 60° и 70°. Выбран трехвинтовой завихритель с углами сгиба 45°, 60° и 70°.

С целью определения наиболее рациональных конструктивных параметров усовершенствованного бурового снаряда были проведены экспериментальные исследования базовой конструкции и всех трех новых предлагаемых конструкций для бурения мелкозернистых магматических горных пород средней абразивности (IV класс) с коэффициентом крепости $f = 7$. В результате установлено влияние частоты вращения буровой колонны на стойкость долота и на механическую скорость бурения, полученные зависимости представлены на рис. 5 и 6.

На графике, представленном на рис. 5, видно, что по мере увеличения частоты вращения стойкость долота падает (например, при достижении частоты вращения долота 103 мин^{-1} его ресурс резко снижается). С другой стороны, увеличение частоты вращения долота позволяет увеличить механическую скорость

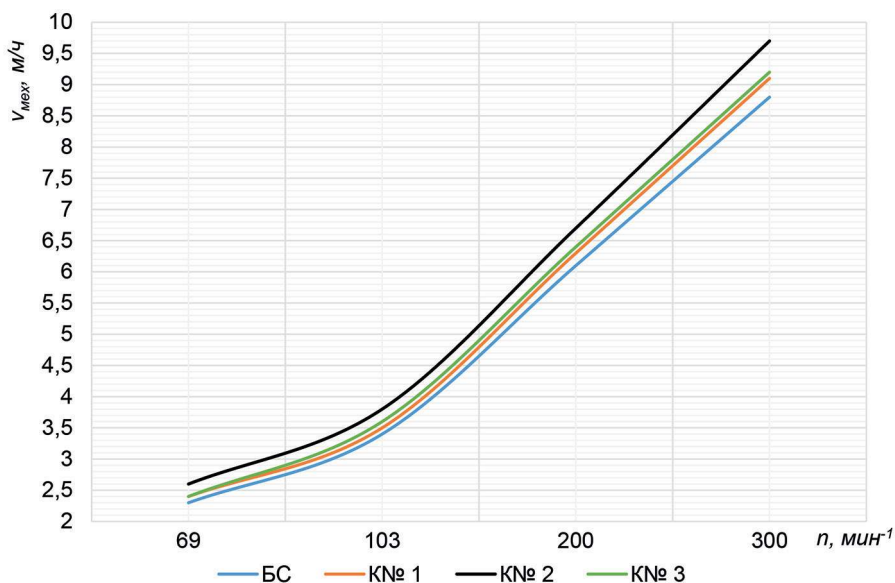


BC – базовый буровой снаряд; KN № 1 – буровой снаряд конструкции № 1 (β_d и β_3 – 45°);
 KN № 2 – буровой снаряд конструкции № 2 (β_d и β_3 – 60°);
 KN № 3 – буровой снаряд конструкции № 3 (β_d и β_3 – 70°)

Рис. 5. Зависимость стойкости долота от частоты вращения буровой колонны
 Fig. 5. Dependence of bit life on drill string rotation speed

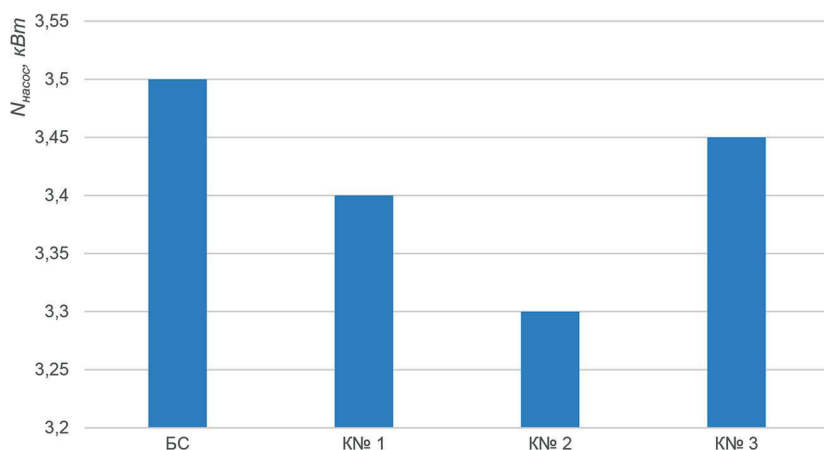
бурения (рис. 6) (например, при достижении частоты вращения долота 103 мин⁻¹ наблюдается увеличение механической скорости бурения).

Экспериментальным путем установлено, что высокие значения механической скорости и стойкости долота достигнуты при бурении скважины снаря-



BC – базовый буровой снаряд; KN № 1 – буровой снаряд конструкции № 1 (β_d и β_3 – 45°);
 KN № 2 – буровой снаряд конструкции № 2 (β_d и β_3 – 60°);
 KN № 3 – буровой снаряд конструкции № 3 (β_d и β_3 – 70°)

Рис. 6. Зависимость механической скорости бурения от частоты вращения буровой колонны
 Fig. 6. Dependence of mechanical drilling speed on drill string rotation speed



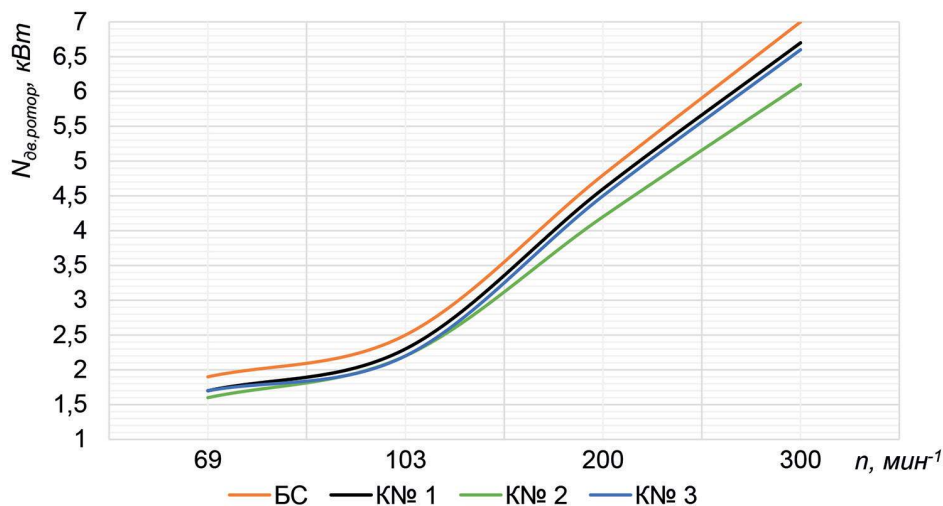
БС — базовый буровой снаряд; К№ 1 — буровой снаряд конструкции № 1 (β_d и $\beta_3 - 45^\circ$);
 К№ 2 — буровой снаряд конструкции № 2 (β_d и $\beta_3 - 60^\circ$);
 К№ 3 — буровой снаряд конструкции № 3 (β_d и $\beta_3 - 70^\circ$)

Рис. 7. Расход электроэнергии приводом бурового насоса при применении различных конструкций бурового снаряда

Fig. 7. Electricity consumption of the mud pump drive when using various designs of drilling string

дом усовершенствованной конструкции трехшарошечного долота с углом сгиба лапы $\beta_d = 60^\circ$ и углом сгиба винтов за-
 вихрителя $\beta_3 = 60^\circ$, увеличивающим эф-

фективность промывки забоя, которая позволила повысить стойкость долота на 7–8%, механическую скорость бурения на 9–10% [20].



БС — базовый буровой снаряд; К№ 1 — буровой снаряд конструкции № 1 (β_d и $\beta_3 - 45^\circ$);
 К№ 2 — буровой снаряд конструкции № 2 (β_d и $\beta_3 - 60^\circ$);
 К№ 3 — буровой снаряд конструкции № 3 (β_d и $\beta_3 - 70^\circ$)

Рис. 8. Зависимость расхода энергии вращателя от частоты вращения колонны при применении различных конструкций бурового снаряда

Fig. 8. Dependence of rotator energy consumption on string rotation frequency when using various drilling rig designs

От применения усовершенствованной конструкции бурового снаряда, повышающего эффективность гидравлической очистки, ожидалось уменьшение затрат электроэнергии на работу насоса и ротора, вращающего буровую колонну, путем снижения нагрузки на привод насоса на основе уменьшения гидравлического сопротивления, оказываемого на вращение бурильной колонны, и улучшение поднятия промывочной жидкости с забоя скважины за счет предотвращения образования шламового режима на забое скважины. По этой причине было экспериментально исследовано влияние бурового снаряда, повышающего эффективность промывки забоя скважины, на расход энергии привода насоса и бурового вращателя, полученные результаты представлены в виде графика на рис. 7 и 8. Таким образом, применение усовершенствованной конструкции бурового снаряда позволило снизить расход электроэнергии буровым вращателем на 8–9% и насоса — на 6–7%, за счет снижения нагрузки на привод насоса на основе уменьшения гидравлического сопротивления, оказываемого на вращение бурильной колонны, и улучшения поднятия промывочной жидкости с забоя скважины путем предотвращения образования шламового режима на забое скважины.

Буровой снаряд, повышающий эффективность гидравлической очистки забоя скважины, внедрен в государственное унитарное предприятие «Регионалгеология» Министерства горнодобывающей промышленности и геологии Республики Узбекистан. В результате стойкость долота увеличена на 5%, а механическая скорость бурения — на 7% [18, с. 47–48].

Заключение

Концентрация шлама между долотом и забоем скважины зависит от площади

и абразивности забоя, параметров долота, а также от углубления долота за один оборот, для эффективной очистки забоя от шлама скорость восходящего потока промывочной жидкости должна быть больше скорости оседания частиц шлама.

Разработанная математическая модель движения частицы шлама при бурении промывочной жидкостью в призабойной зоне скважины позволила определить рациональный угол сгиба винта лапы трехшарошечного долота и забойного завихрителя.

Новая конструкция бурового снаряда позволила предотвратить возникновение шламового режима на забое скважины за счет создания вихревого движения буровой жидкости, при котором происходит увеличение скорости восходящего потока промывочной жидкости.

На основе теоретических исследований и расчетов были определены конструктивные параметры, обеспечивающие наиболее высокую эффективность бурового снаряда, повышающего продуктивность промывки забоя скважины. Из предлагаемых конструкций, прошедших экспериментальные испытания, наиболее эффективной является конструкция бурового снаряда с углом сгиба лапы трехшарошечного долота $\beta_1 = 60^\circ$, углом сгиба винтов завихрителя $\beta_2 = 60^\circ$. При всех значениях частоты вращения буровой колонны данная конструкция показала наибольшую эффективность промывки забоя скважины от шлама.

При этом стойкость долота повышается на 8%, а механическая скорость бурения увеличивается в среднем на 9–10% относительно бурения базовым снарядом.

Применение усовершенствованной конструкции бурового снаряда, повышающего эффективность гидравлической очистки, снизило затраты электроэнергии на работу насоса и ротора, вращающего буровую колонну, путем снижения

нагрузки на привод насоса на основе уменьшения гидравлического сопротивления, оказываемого на вращение бурильной колонны, и улучшения поднятия промысловой жидкости с забоя скважины за счет предотвращения образования шла-

мового режима на забое скважины. При этом расход электроэнергии на работу двигателя бурового насоса снизился на 6–7%, на работу бурового вращателя — на 8–9% относительно бурения базовым снарядом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барвинок В. А., Бикбулатов И. К., Блинков О. Г., Ищук А. Г., Торгашов А. В. Современные шарошечные долота, проблемы их совершенствования и повышения надежности. — Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2000. — 190 с.
2. Miska S. Z., Mitchell R. F., Ozbayoglu E. M. Drilling mechanics. Advanced applications and technology. McGraw-Hill Book Company, 2022, 963 p.
3. Гусман А. М. Управление процессом очистки забоя бурящейся скважины. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — М., 2000. — 50 с.
4. Ramsey M. Practical wellbore hydraulics and ole cleaning: Unlock faster, more efficient, and trouble-free drilling operations. Texas: Gulf Professional Publishing, 2019, 329 p.
5. Богомолов Р. М., Сериков Д. Ю. Пути совершенствования систем очистки забоя при бурении долотами с продувкой // Территория «НЕФТЕГАЗ». — 2019. — № 4. — С. 14–19.
6. Виноградов Ю. И., Хохлов С. В., Зигангиров Р. Р., Мифтахов А. А., Суворов Ю. И. Оптимизация удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом на месторождениях со сложным геологическим строением // Записки Горного института. — 2024. — Т. 266. — С. 231–245.
7. Guan Z., Chen T., Liao H. Theory and technology of drilling engineering. China University of Petroleum Press and Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2021, 557 p.
8. Barskii I. L., Gusman A. M., Povalikhin A. S. Development of a method for drilling of straight section of various type wellbores / Proceeding ETCE/OMAE 2000 Joint Conference, New Orleans, Louisiana, USA, 2000.
9. Рябченко В. И. Управление свойствами буровых растворов. — М.: Недра, 1990. — 230 с.
10. Каменских С. В. Прихваты бурильного инструмента. — Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. — 120 с.
11. Закиров Н. Н. Влияние технологических параметров процесса бурения на износ узлов долота // Известия вузов. Нефть и газ. — 2004. — № 9. — С. 69–74.
12. Давиденко А. Н., Игнатов А. А., Полищук П. П. Транспортировка продуктов разрушения при бурении скважин. — Днепропетровск: НГУ, 2016. — 116 с.
13. Aseel A., Aslam Abdullah M., Rithul R., Sidharth P. V., Karthik K. O., Jerry J. Analysis of pipe sticking due to wellbore uncleanness using machine learning // Heliyon. 2023, vol. 9, no. 4. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e22366.
14. Кадочников В. Г. Разработка технологии гидромеханической очистки наклонно направленных скважин от шлама при роторном бурении. Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. — СПб.: СПГУ, 2022. — 22 с.
15. Тошов Ж. Б. Пути и средства борьбы с процессом сальникообразования при бурении скважин // Горный вестник Узбекистана. — 2016. — № 1. — С. 42–48.
16. Mitchell J. Trouble-free drilling. Houston: Dilbert Engineering Inc., 2001, 334 p.
17. Бабин И. М. Методика прогнозирования дифференциального прихвата бурильной колонны / Сборник трудов 76-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ — 2022». — М., 2022. — С. 33–47.
18. Хатамова Д. Н. Научные основы эффективной эксплуатации буровых установок на основе разработки ресурсосберегающих технологий. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Навои: НГГТУ, 2024. — 58 с.
19. Crumpton H. Well control for completions and interventions. Texas: Gulf Professional Publishing, 2018, 815 p.
20. Хатамова Д. Н. Повышение эффективности гидравлической очистки забоя скважины на основе совершенствования конструкции бурового снаряда // Journal of Advances in Engineering Technology. 2024, vol. 3 (15), pp. 91–99. DOI: 10.24412/2181-1431-2024-3-91-99. **UIAS**

REFERENCES

1. Barvinok V. A., Bikbulatov I. K., Blinkov O. G., Ishchuk A. G., Torgashov A. V. *Sovremennye sharoshechnye dolota, problemy ikh sovershenstvovaniya i povysheniya nadezhnosti* [Modern roller bits, problems of their improvement and increasing reliability], Samara, 2000, 190 p.
2. Miska S. Z., Mitchell R. F., Ozbayoglu E. M. *Drilling mechanics. Advanced applications and technology*. McGraw-Hill Book Company, 2022, 963 p.
3. Gusman A. M. *Upravlenie protsessom ochestki zaboya buryashcheysya skvazhiny* [Controlling the process of cleaning the bottom of a well being drilled], Doctor's thesis, Moscow, 2000, 50 p.
4. Ramsey M. *Practical wellbore hydraulics and ole cleaning: Unlock faster, more efficient, and trouble-free drilling operations*. Texas, Gulf Professional Publishing, 2019, 329 p.
5. Bogomolov R. M., Serikov D. Yu. Ways to improve bottomhole cleaning systems when drilling with blowing bits. *NEFTEGAZ Territory*. 2019, no. 4, pp. 14–19. [In Russ].
6. Vinogradov Yu. I., Khokhlov S. V., Zigangirov R. R., Miftakhov A. A., Suvorov Yu. I. Optimization of specific energy consumption for crushing rocks by explosion in deposits with a complex geological structure. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 266, pp. 231–245. [In Russ].
7. Guan Z., Chen T., Liao H. *Theory and technology of drilling engineering*. China University of Petroleum Press and Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2021, 557 p.
8. Barskii I. L., Gusman A. M., Povalikhin A. S. Development of a method for drilling of straight section of various type wellbores. *Proceeding ETCE/OMAE 2000 Joint Conference*, New Orleans, Louisiana, USA, 2000.
9. Ryabchenko V. I. *Upravlenie svoystvami burovyykh rastvorov* [Control of the properties of drilling fluids], Moscow, Nedra, 1990, 230 p.
10. Kamenskikh S. V. *Prikhvaty buril'nogo instrumenta* [Clamps of drilling tools], Vologda, Infra-Inzheneriya, 2023, 120 p.
11. Zakirov N. N. Influence of technological parameters of the drilling process on the wear of bit components. *Higher educational institutions news. Neft' i Gaz*. 2004, no. 9, pp. 69–74. [In Russ].
12. Davidenko A. N., Ignatov A. A., Polishchuk P. P. *Transportirovka produktov razrusheniya pri burenii skvazhin* [Transportation of destruction products during well drilling], Dnepropetrovsk, NGU, 2016, 116 p.
13. Aseel A., Aslam Abdullah M., Rithul R., Sidharth P. V., Karthik K. O., Jerry J. Analysis of pipe sticking due to wellbore uncleanliness using machine learning. *Heliyon*. 2023, vol. 9, no. 4. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e22366.
14. Kadochnikov V. G. *Razrabotka tekhnologii gidromekhanicheskoy ochestki naklonno napravlenykh skvazhin ot shlama pri rotornom burenii* [Development of technology for hydromechanical cleaning of inclined wells from sludge during rotary drilling], Doctor's thesis, Saint-Petersburg, SPGU, 2022, 22 p.
15. Ways and means of combating the process of oil seal formation when drilling wells. *Mining Bulletin of Uzbekistan*. 2016, no. 1, pp. 42–48. [In Russ].
16. Mitchell J. *Trouble-free drilling*. Houston: Dilbert Engineering Inc., 2001, 334 p.
17. Babin I. M. Methodology for predicting differential sticking of a drill string. *Sbornik trudov 76-y Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii «Neft' i gaz — 2022»* [Collection of proceedings of the 76th international youth scientific conference «Oil and Gas — 2022»], Moscow, 2022, pp. 33–47. [In Russ].
18. Khatamova D. N. *Nauchnye osnovy effektivnoy ekspluatatsii burovyykh ustanovok na osnove razrabotki resursosberegayushchikh tekhnologiy* [Scientific principles of effective operation of drilling rigs based on the development of resource-saving technologies], Doctor's thesis, Navoi, NGGTU, 2024, 58 p.
19. Crumpton H. *Well control for completions and interventions*. Texas, Gulf Professional Publishing, 2018, 815 p.
20. Khatamova D. N. Increasing the efficiency of hydraulic cleaning of the well bottom based on improving the design of the drilling rig. *Journal of Advances in Engineering Technology*. 2024, vol. 3 (15), pp. 91–99. [In Russ]. DOI: 10.24412/2181-1431-2024-3-91-99.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Джуряев Рустам Умарханович*¹ — д-р техн. наук,

профессор, e-mail: r.u.djuraev@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2712-3003,

Меркулов Михаил Васильевич — д-р техн. наук, профессор,

Российский государственный геологоразведочный университет

им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), e-mail: mvm.07@mail.ru,

*Хатамова Дилшода Нармуратовна*¹ — д-р техн. наук,

доцент, e-mail: dilyon_hat@bk.ru,

ORCID ID: 0009-0002-8336-9884,

*Асанов Анвар Тошмурод угли*¹ — ассистент,

¹ Навоийский государственный горно-технологический университет, Навои, Узбекистан.

Для контактов: Хатамова Д.Н., e-mail: dilyon_hat@bk.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*R.U. Djuraev*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: r.u.djuraev@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2712-3003,

M.V. Merkulov, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

Sergo Ordzhonikidze Russian State University

for Geological Prospecting (MGRI), 117997,

Moscow, Russia, e-mail: mvm.07@mail.ru,

*D.N. Khatamova*¹, Dr. Sci. (Eng.),

Assistant Professor, e-mail: dilyon_hat@bk.ru,

ORCID ID: 0009-0002-8336-9884,

*A.T. Asanov*¹, Assistant,

¹ Navoi State University of Mining and Technology,

Navoi, 210100, Uzbekistan.

Corresponding author: D.N. Khatamova, e-mail: dilyon_hat@bk.ru.

Получена редакцией 13.01.2025; получена после рецензии 06.02.2025; принята к печати 10.06.2025.

Received by the editors 13.01.2025; received after the review 06.02.2025; accepted for printing 10.06.2025.



ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОВЫШЕНИЯ КОНТРАСТНОСТИ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ В ШАХТАХ

Е.В. Зайцева¹, А.А. Кочнева¹, Е.В. Катунцов¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Zaytseva_EV@pers.spmi.ru

Аннотация: Рассмотрена оптимизация технологического процесса повышения контрастности на изображениях, полученных в шахтах за счет автоматизации оценки количественных характеристик качества. Приведены нотации технологического процесса в методологии IDEF0 до и после оптимизации. Произведен анализ методов и алгоритмов повышения контрастности, применяемых для обработки цифровых изображений, полученных с видеокамер, встроенных в головной светильник шахтера. Рассмотрены особенности цифровых изображений с головного светильника шахтера, их яркостные характеристики. Приведены гистограммы распределения яркости на изображениях до и после обработки исследуемыми методами. Рассчитаны количественные характеристики контрастности изображений. Сделаны рекомендации о выборе количественных характеристик качества для использования в работе при автоматическом выборе системой метода повышения контрастности.

Ключевые слова: промышленное видеонаблюдение, методология IDEF0, цифровое изображение, гистограмма распределения яркости, обработка изображений, контрастность, видеоданные в шахтах.

Для цитирования: Зайцева Е. В., Кочнева А. А., Катунцов Е. В. Оптимизация технологического процесса повышения контрастности на изображениях, полученных в шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 7. – С. 115–130. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_115.

Optimization of contrast enhancement in images obtained in mines

E.V. Zaitseva¹, A.A. Kochneva¹, E.V. Katuntsov¹

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: Zaytseva_EV@pers.spmi.ru

Abstract: Optimization of contrast enhancement in images obtained in mines through automation of evaluation of image quality factors is discussed in the article. The IDEF0 notations before and after optimization are presented. The methods and algorithms of contrast enhancement used in processing of digital images from miner lamp cameras are reviewed. The features of digital images from miner lamp cameras, and their brightness are discussed. The histograms

of brightness of the images before and after their processing using the test methods are given. The contrast quality factors of the images are calculated. The recommendations on automated selection of quality factors by the contrast enhancement system are made.

Key words: industrial video surveillance, IDEF0 function modeling method, digital image, brightness histogram, image processing, contrast, mine video data.

For citation: Zaitseva E. V., Kochneva A. A., Katuntsov E. V. Optimization of contrast enhancement in images obtained in mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(7):115-130. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_115.

Введение

На сегодняшний день для контроля за технологическими процессами на предприятиях используются различные системы видеонаблюдения. Такие системы разрабатываются и для наблюдения за технологическими процессами в горнодобывающей промышленности [1 – 3]. Видеосъемка производится в условиях плохой видимости: пыль, повышенная влажность, блики в области источников света [4, 5]. Одной из составляющих систем наблюдения являются мобильные видеокамеры, встроенные в головной светильник шахтера [1]. По мере следования по маршруту и на рабочих местах производится запись видеoinформации. Таким образом, видеоряд имеет временную дискретность, так как съемка производится эпизодически [1, 6].

Наиболее информативным при работе светильника с видеокамерой считается, если видеотрансляция с рабочего места каждого шахтера на верхний уровень горного диспетчера ведется в режиме реального времени в течение всей рабочей смены [1, 7]. В то же время при рутинном технологическом процессе очевидна избыточность и ненужность такой информации. Поэтому, как правило, запись происходит по решению шахтера или по запросу диспетчера при подтверждении со стороны шахтера. Также запись может быть доступна диспетчеру или руководителю спасательной операции без подтверждения непосредственно шахтером [1, 8, 9].

В работе рассматривается технологический процесс повышения контрастности на видеоизображениях, полученных

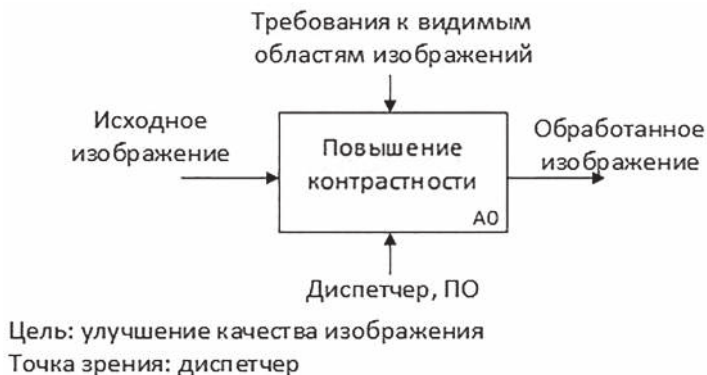


Рис. 1. Контекстная диаграмма технологического процесса повышения контрастности с точки зрения диспетчера

Fig. 1. Context diagram of contrast enhancement from dispatcher's eyesight



Рис. 2. Декомпозиция контекстной диаграммы технологического процесса повышения контрастности
Fig. 2. Decomposition of context diagram of contrast enhancement

в шахтах. Такие изображения характеризуются низкой яркостью. Для получения максимального объема информации из таких изображений целесообразно применять методы повышения контрастности [10]. При выборе такого метода следует учитывать временные промежутки, затрачиваемые на обработку изображений, поскольку видеосъемка ведется в опасных условиях труда и существует возможность того, что съемка производится в случае задействования плана ликвидации аварии, когда диспетчеру необходим максимальный объем достоверной видеоинформации [1].

Нотации технологического процесса в методологии IDEF0 показаны на рис. 1 и 2.

Как видно из декомпозиции технологического процесса A0 контекстной диаграммы, представленной на рис. 2, процесс разделен на три подпроцесса. Сначала производится качественная оценка полученного диспетчером от шахтера изображения. Оценка производится на основании личных ощущений диспетчера. Основными качественными характеристиками изображения является видимость и различимость областей изображения. Далее диспетчером принимается решение по применению одного из встроенных методов обработки. Но при

этом следует понимать, что в требования по уровню образования диспетчера не входит навык обработки изображений. Диспетчер выполняет действия, связанные с обработкой видеоинформации, по заранее определенному регламенту. При этом не всегда сразу удастся выбрать нужный метод повышения контрастности, а иногда применяется один из не самых эффективных методов. Далее, если диспетчер понимает, что изображение неинформативно, он либо использует другой метод повышения контрастности, либо просит шахтера переснять изображение. Такой алгоритм требует дополнительных затрат ресурсов, как временных, так и человеческих. Не всегда при возникновении аварийных ситуаций эти временные ресурсы в наличии или в избытке. Поэтому для эффективного внедрения видеонаблюдения в технологические процессы следует обеспечить максимальную автономность процесса и автоматическое применение методов повышения контрастности на основании количественных характеристик изображения [10, 11].

Постановка задачи

В работе предлагается рассмотреть возможные методы повышения контрастности на конкретных примерах изоб-

ражений, полученных в шахтах. Исходя из рассчитанных количественных характеристик изображений, оценить минимальные, средние, максимальные значения яркостей исходных и обработанных изображений. Из полученных значений яркостей рассчитать абсолютную и относительную контрастности. Далее предполагается оптимизировать технологический процесс повышения контрастности путем введения количественной характеристики качества исходного изображения. Исходя из произведенных в ходе работы вычислений, будет сделан выбор этой характеристики. На основании значений выбранной характеристики система будет задавать параметры обработки изображения и выдавать диспетчеру готовый или готовые варианты. И только в случае, когда предложенные системой обработанные изображения по качественной оценке диспетчера не будут пригодны для использования, потребуется повторная видеосъемка.

Для изображений, полученных со светильника видеокамеры [1], характерна максимальная яркость в области источников освещения и минимальная яркость в остальных областях изображения (рис. 3).

Изображения, полученные с видеокамер светильника, имеют недостаточную различимость отдельных фрагмен-

тов, которая может быть вызвана низкой освещенностью одной области и слишком большой освещенностью другой области [12–14]. В связи с этим важно использовать методы и алгоритмы регулировки контрастности. Регулировка контрастности переназначает значения интенсивности изображения на полный диапазон отображения типа данных [15]. Требования, предъявляемые к данным методам, заключаются в быстродействии, близком к режиму реального времени [16–18]. Предполагается, что шахтер передал изображения и диспетчер извлек из него необходимую информацию. Здесь ключевым ресурсом является время. Благодаря работе метода повышения контрастности нет необходимости просить шахтера переснимать нужный производственный участок.

Методы и алгоритмы повышения контрастности

Контрастность K монохромного изображения можно определить как [19, 20]

$$K = L_{\max} - L_{\min}, \quad (1)$$

где L_{\max} , L_{\min} — соответственно максимальная и минимальная яркость пикселей на изображении.

Относительная контрастность $K_{\text{отн}}$ [21, 22]

$$K_{\text{отн}} = K / 255, \quad (2)$$

а)



б)



Рис. 3. Варианты изображений (а) и (б), полученные с видеокамеры светильника
Fig. 3. Variants of images (a) and (b) from miner lamp camera

где 255 — максимально возможная яркость.

Методы увеличения контрастности классифицируются по преобразованию яркости на глобальные и адаптивные. В основе первой группы методов лежит преобразование яркости всего изображения, в основе второй — зависимость яркости каждого пикселя от характеристики окружающей его области [23–25].

Для изображений, представленных на рис. 3, построим гистограммы распределения яркости (рис. 4).

В табл. 1 представлены значения максимального, минимального и среднего значения яркости исходных изображений. Поскольку диапазоны яркостей близки к максимальному, было принято решение отказаться от линейного контрастирования в пользу степенного преобразования яркости или гамма-коррекции [26–28]

$$L' = L_{\max} k^n, \quad (3)$$

где $k = L/L_{\max}$ — относительная яркость, которая позволяет регулировать контрастность путем снижения максимальных значений в одной области изображения, тем самым увеличив локальную контрастность другой области изображения.

Поскольку плохо различимые участки изображений, полученных в шахтах,

Таблица 1

Зависимость коэффициента n гамма-коррекции от уровня средней яркости изображения
Relationship of gamma-coefficient n and average image brightness

Среднее значение яркости изображения	Коэффициент n гамма-коррекции
0–10	0,1
11–15	0,15
16–20	0,2
21–25	0,25
26–30	0,3
31–35	0,35
36–45	0,4
46–60	0,45
61–80	0,5

имеют низкую яркость, коэффициент n берется в диапазоне от 0,1 до 0,5. Коэффициент n выбирается исходя из диапазона среднего уровня яркости (см. табл. 1).

Табл. 1 была получена путем анализа изображений, снятых в шахтах, с характерными для них пониженными яркостями большинства областей и максимальной яркостью при съемке источника освещения. Именно для таких изображений она должна применяться.

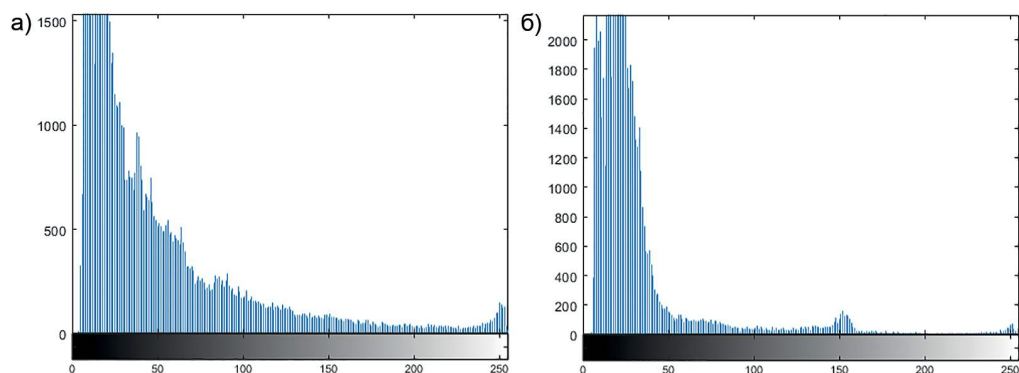


Рис. 4. Гистограммы распределения яркости изображений на рис. 3, а и б соответственно
 Fig. 4. (a) and (b) Histograms of brightness of images from Figs. 3a and 3b, respectively

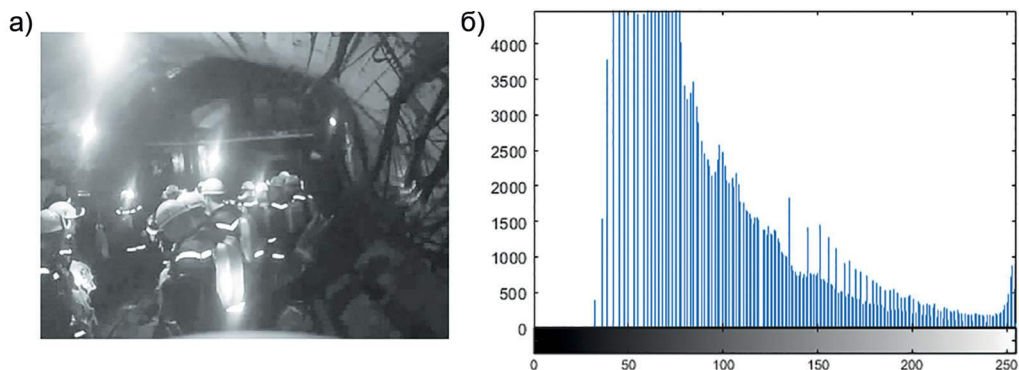


Рис. 5. Изображение с рис. 3, а после гамма-коррекции (а) и его гистограмма распределения яркости (б)
 Fig. 5. Image from Fig. 3a after gamma-correction (a) and its brightness histogram (b)

Для остальных изображений возможны свои соотношения среднего значения яркости и коэффициента гамма-коррекции, также основанием для использования того или иного значения коэффициента гамма-коррекции может являться другой количественный показатель.

На рис. 5 представлены обработанное с применением гамма-коррекции с коэффициентом 0,45 изображение с рис. 3, а и гистограмма полученного изображения.

Как видно из рис. 5, а, в результате применения метода контрастирования, стали различимы более темные участки изображения. Это подтверждается и ко-

личественной оценкой (табл. 2) — минимальная яркость принимает значение 32 вместо 4.

На рис. 6 представлены обработанное с применением гамма-коррекции изображение с коэффициентом 0,45 с рис. 3, б и гистограмма полученного изображения.

Из рис. 6, а также можно сделать вывод, что в результате применения метода гамма-коррекции стали различимы более темные участки изображения. Это также подтверждается и количественной оценкой (см. табл. 2) — минимальная яркость принимает значение 36 вместо 5.

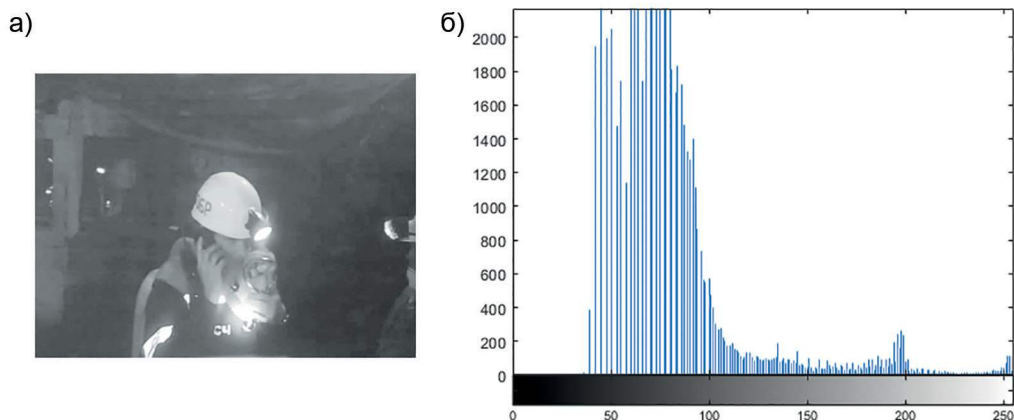


Рис. 6. Изображение с рис. 3, б после гамма-коррекции (а) и его гистограмма распределения яркости (б)
 Fig. 6. Image from Fig. 3b after gamma-correction (a) and its brightness histogram (b)

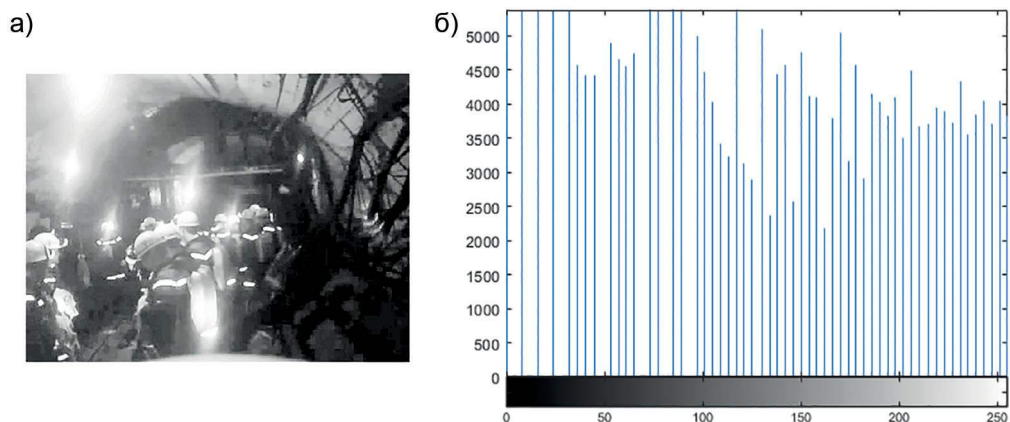


Рис. 7. Изображение с рис. 3, а после эквализации (а) и его гистограмма распределения яркости (б)
 Fig. 7. Image from Fig. 3a after equalization (a) and its brightness histogram (b)

Алгоритмы эквализации гистограммы используются для улучшения обрабатываемого изображения и имеют сравнительно невысокие вычислительные затраты.

Данные методы регулируют уровни полутонного изображения в соответствии с функцией распределения вероятности данного изображения; как следствие, увеличивается динамический диапазон распределения яркости. Метод эквализации гистограммы яркостей подразумевает такое преобразование изображения, при котором его гистограмма

яркостей отвечала бы равномерному закону распределения [29 – 31].

$$L = (L_{\max} - L_{\min})p + L_{\min}, \quad (4)$$

где p — плотность распределения яркости исходного изображения.

На рис. 7 представлены обработанное с применением эквализации гистограммы изображение с рис. 3, а и гистограмма полученного изображения.

Как видно из рис. 7, а, в результате применения метода стали еще более различимы темные участки изображения, их локальный контраст стал выше, чем

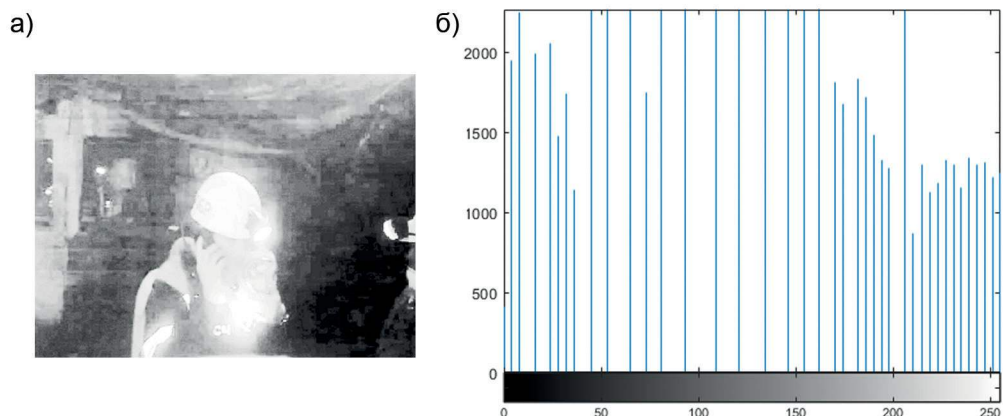


Рис. 8. Изображение с рис. 3, б после эквализации (а) и его гистограмма распределения яркости (б)
 Fig. 8. Image from Fig. 3b after equalization (a) and its brightness histogram (b)

при использовании метода гамма-коррекции, среднее значение яркости увеличилось с 50 до 127 (см. табл. 2). Но вместе с тем область изображения с источниками освещения (светильники, лампы в шахте) увеличилась в размерах за счет растяжения гистограммы.

На рис. 8 представлены обработанное с применением гамма-коррекции изображение с рис. 3, б и гистограмма полученного изображения.

Как видно из рис. 8, б, стали еще более различимы темные участки изображения, чем при использовании метода гамма-коррекции. Количественно это подтверждается тем, что среднее значение яркости увеличилось с 50 до 127 (см. табл. 1). Также область изображения с источником освещения увеличилась в размерах за счет растяжения гистограммы, что привело к засветке важной области изображения.

От метода соляризации было решено отказаться, так как его использование приведет к еще более засвеченным областям изображений, снятых в области осветительных приборов.

Из адаптивных методов контрастирования было решено применить уве-

личение контрастности на основе локального контраста окрестности KL , который вычисляется как [32 – 35]

$$K_L = \frac{|L - L_{mean}|}{L + L_{mean}}, \quad (5)$$

где L – текущая яркость элемента изображения; L_{mean} – средний уровень яркости изображения.

На рис. 9 представлены обработанное с применением локального контрастирования изображение с рис. 3, а и гистограмма полученного изображения.

Как видно из рис. 9, а, в результате применения метода контрастирования стали различимы более темные участки изображения, но при этом данные изменения произошли по локальным областям. Если в случае применения глобальных методов все изображение становилось «светлее», то при использовании локального контрастирования этого не происходит. Это подтверждается и количественной оценкой (см. табл. 2) – средняя яркость принимает значение 81 вместо 50. Сравнивая эти значения с результатами предыдущих методов, отмечаем уменьшение среднего значения яркости.

а)



б)

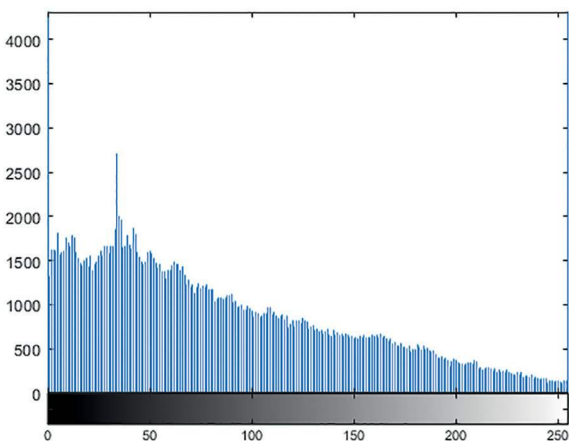


Рис. 9. Изображение с рис. 3, а после локального контрастирования (а) и его гистограмма распределения яркости (б)

Fig. 9. Image from Fig. 3a after contrast adjustment (a) and its brightness histogram (b)

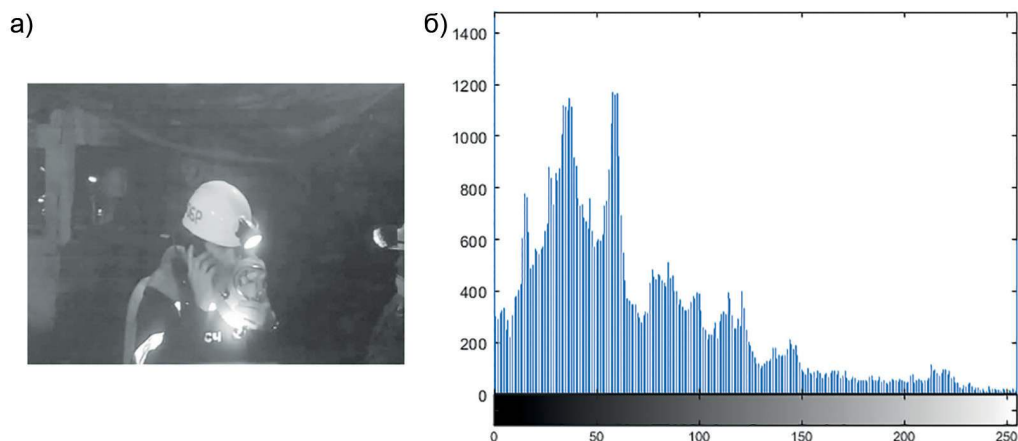


Рис. 10. Изображение с рис. 3, б после локального контрастирования (а) и его гистограмма распределения яркости (б)

Fig. 10. Image from Fig. 3b after contrast adjustment (a) and its brightness histogram (b)

На рис. 10 представлены обработанное с применением локального контрастирования изображение с рис. 3, б и гистограмма полученного изображения.

Полученные результаты

Среднеквадратичное отклонение яркости локальной окрестности рассчитывается по формуле [35, 36]

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (L - L_{mean})^2}. \quad (6)$$

В табл. 2 представлены рассчитанные по формулам (1), (2), (6) значения

количественных характеристик исходных и обработанных изображений.

Из анализа табл. 2 можно сделать следующие выводы:

- метод гамма-коррекции в целом «осветляет» изображение, поднимая нижнюю границу яркости;
- метод эквализации дает хорошие результаты, но его следует применять с осторожностью в связи с увеличением области высокой яркости вблизи источников освещения;
- метод локального контрастирования дает самый высокий показатель по

Таблица 2

Количественные характеристики качества исходного

и обработанного различными методами изображения с рис. 3

Quality factors of initial image from Fig. 3 and after its processing by different methods

Изображение / Параметры	Исходное изображение а/б	Гамма-коррекция а/б	Локальное контрастирование а/б	Эквализация гистограммы а/б
Максимальная яркость	255/253	255/255	255/255	255/255
Минимальная яркость	4/5	32/36	0/0	0/0
Среднее значение яркости	50/50	101/101	81/81	127/127
Контрастность	251/248	223/219	255/255	255/255
Относительная контрастность	0,984/0,973	0,875/0,859	1/1	1/1
СКО	8,27/5,85	9,32/7,09	9,84/9,18	10,95/10,81



Рис. 11. Контекстная диаграмма оптимизированного технологического процесса повышения контрастности с точки зрения программиста

Fig. 11. Context diagram of optimized contrast enhancement from programmer's eyesight

характеристике среднеквадратического отклонения яркости, но при этом в изображении становятся заметны отдельные пиксели;

- количественные характеристики контрастности малоинформативны для изображений, полученных в шахтах.

На основе рассчитанных характеристик исходных и обработанных изображений получаем следующие нотации оптимизированного технологического процесса (рис. 11, 12).

В качестве эталонной характеристик выбирается уровень средней яркости. Исходя из этого уровня, системой выбираются характеристики гамма-коррекции (см. табл. 1). Если диспетчера устраивает полученное изображение, процесс на этом заканчивается. Если результат не устраивает, в качестве второго варианта предлагается изображение, обработанное методом локального контрастирования. Идет обращение к диспетчеру — устраивает ли его полученный вариант,

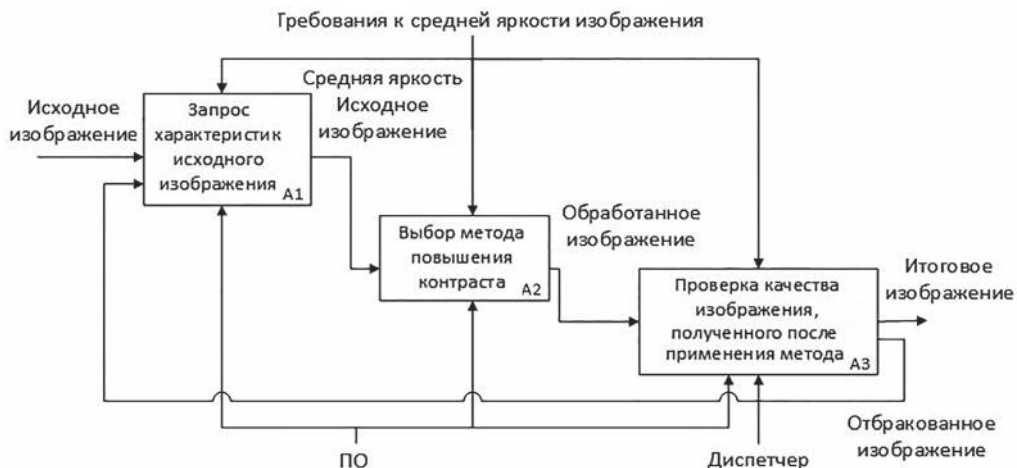


Рис. 12. Декомпозиция контекстной диаграммы оптимизированного технологического процесса повышения контрастности

Fig. 12. Decomposition of context diagram of optimized contrast enhancement

и если нет, в качестве третьего изображения предлагается вариант с применением метода эквализации. При таком подходе диспетчеру достаточно принять или отклонить предложенные варианты, никаких дополнительных действий или специальных знаний от него не требуется. Также возможен и второй вариант оптимизации процесса: диспетчеру предлагаются сразу три итоговых изображения — обработанные методами гамма-коррекции (с подобранными коэффициентами), локального контрастирования и эквализации. Далее диспетчер уже сам выбирает, с какой из трех картинок ему удобней работать. Все три метода отличаются быстродействием и малыми требованиями к ресурсам информационной системы.

Обсуждение результатов

В статье рассматривались быстродействующие методы повышения контрастности (гамма-коррекция, эквализация гистограммы, локального контрастирования). Был отвергнут метод соляризации, поскольку он приводил к «размытию» участков изображения вблизи источников освещения, что становится критичным, если съемка производится с головного светильника шахтера. Также не был рассмотрен метод CLANE — по причине недостаточной исследованности коэффициентов. В дальнейших исследованиях предполагается доработать автоматизированную систему таким образом, что диспетчер будет выбирать область на изображении и эта область будет обрабатываться методами повышения контрастности. В результате будут сняты проблемы области объектов освещения и расширен диапазон методов.

В качестве количественной характеристики был выбран уровень средней яркости, по его значению система определяет коэффициенты гамма-коррекции и следующих методов, если они потре-

буются. Уровень средней яркости был выбран, потому что более всего отражает особенности изображения, снятого с головного светильника шахтера: низкий уровень яркости по всей области изображения и высокий уровень в области источников освещения.

Заключение

В работе произведена оптимизация технологического процесса повышения контрастности на изображениях, полученных в шахтах за счет автоматизации оценки количественных характеристик качества. Были выбраны изображения с головного светильника шахтера, описаны их особенности, обусловленные общим низким уровнем освещенности помещений и повышенной яркостью фрагментов изображений вблизи источников света (головных светильников и т.п.), рассчитаны количественные характеристики качества.

Даны рекомендации, какие характеристики качества следует анализировать в цифровых изображениях, полученных в шахтах. Данные количественные характеристики подобных изображений могут в дальнейшем использоваться и учитываться при разработке методов и алгоритмов их обработки.

Произведен анализ методов и алгоритмов повышения контрастности, применяемых для обработки цифровых изображений, полученных в шахтах. При анализе методов учтены особенности цифровых изображений, снятых камерами, встроенными в головные светильники шахтеров.

Приведены гистограммы распределения яркости на изображениях до и после обработки исследуемыми методами. Рассчитаны количественные характеристики контрастности изображений.

Предложен критерий уровня средней яркости как количественная характеристика, на основании значений которой

можно провести автоматизацию обработки изображений.

В дальнейшем планируется совершенствование алгоритма в виде контрастирования отдельной выбранной об-

ласти, что позволит применить большее количество методов повышения контрастности и рассмотреть другие количественные характеристики автоматизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков А. В., Паневников К. В., Писарев И. В. Многофункциональная система безопасности угольных шахт — визуализация событий (горнотехнических процессов) с рабочего места шахтера // Горная промышленность. — 2021. — № 5. — С. 65–69. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-65-69.

2. Ol't Yu., Maksarov V. V., Makhov V. E. Intelligence systems for quality assessment of threaded surfaces and flaw monitoring based on digital light field recording // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020, vol. 56, no. 11, pp. 915–926. DOI: 10.1134/S1061830920110054.

3. Koteleva N., Valnev V. Automatic Detection of Maintenance Scenarios for Equipment and Control Systems in Industry // Applied Sciences (Switzerland). 2023, vol. 13, no. 24, article 12997. DOI: 10.3390/app132412997.

4. Rudakov M. L., Rabota E. N., Kolvakh K. A. Assessment of the individual risk of fatal injury to coal mine workers during collapses // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2020, vol. 4, pp. 88–93. DOI: 10.33271/nvngu/2020-4/088.

5. Непша Ф. С., Воронин В. А., Ливен А. С., Корнеев А. С. Оценка целесообразности применения когенерационных установок на угольных шахтах Кузбасса // Записки Горного института. — 2023. — Т. 259. — С. 141–150. DOI: 10.31897/PMI.2023.2.

6. Бузмаков С. А., Санников П. Ю., Кучин Л. С., Игошева Е. А., Абдулманова И. Ф. Применение беспилотной аэрофотосъемки для диагностики техногенной трансформации природной среды при эксплуатации нефтяного месторождения // Записки Горного института. — 2023. — Т. 260. — С. 180–193. DOI: 10.31897/PMI.2023.22.

7. Маховиков А. Б., Крыльцов С. Б., Матрохина К. В., Трофимовец В. Я. Система защищенной корпоративной связи для металлургического предприятия // Цветные металлы. — 2023. — № 4. — С. 5–13. DOI: 10.17580/tsm.2023.04.01.

8. Захаров В. Н., Гвишиани А. Д., Вайсберг Л. А., Дзеранов Б. В. Большие данные и устойчивое функционирование горнотехнических систем // Горный журнал. — 2021. — № 11. — С. 45–52. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.06.

9. Litvinenko V. S., Bowbrick I., Naumov I. A., Zaitseva Z. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: Implications for ESG principles and sustainable development goals // Journal of Cleaner Production. 2022, vol. 338, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130530.

10. Вальков В. А., Виноградов К. П., Валькова Е. О., Мустафин М. Г. Создание растров высокой информативности по данным лазерного сканирования и аэрофотосъемки // Геодезия и картография. — 2022. — Т. 989. — № 11. — С. 40–49. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-989-11-40-49.

11. Zhang H., Tao P., Meng X., Liu M., Liu X. An optimum deployment algorithm of camera networks for open-pit mine slope monitoring // Sensors. 2021, vol. 21, no. 4, article 1148. DOI: 10.3390/s21041148.

12. Обухова Н. А., Баранов П. С., Мотыко А. А., Чиркунова А. А., Поздеев А. А. Восстановление малоконтрастных текстов архивных документов на основе применения гиперспектральных технологий / Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA–2023. Доклады XXV Международной конференции. — М., 2023. — С. 210–214.

13. Пряхин Е. И., Трошина Е. А. Деградация после термического и химического воздействия матричных кодов, сформированных с помощью лазеров на изделиях из латуни и алюминиевого сплава // Цветные металлы. — 2022. — № 7. — С. 87–91. DOI: 10.17580/tsm.2022.07.10.

14. Грузман И. С., Киричук В. С., Косых В. П., Перетягин Г. И., Спектор А. А. Цифровая обработка изображений в информационных системах. — Новосибирск: НГТУ, 2000. — 156 с.

15. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2005. — 1072 с.
16. Сергеев М. Б., Соловьев Н. В., Стадник А. И. Методы повышения контрастности растровых изображений для систем цифровой обработки видеoinформации // Информационно-управляющие системы. — 2007. — № 1 (26). — С. 2–7.
17. Мазаков Е. Б. Из истории кибернетики: кафедра информационных систем и вычислительной техники Горного университета // Вопросы истории. — 2022. — № 5(1). — С. 107–117. DOI: 10.31166/VoprosyIstorii202205Statyi01.
18. Захлебин А. С., Калибеков А., Курячий М. И. Построение геопривязанного ортофотоплана участка местности по изображениям с телевизионной камеры БПЛА вертолетного типа / Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. — 2020. — № 1-2. — С. 187–189.
19. Sytko I. I., Makhov V. E. Study of dynamic properties of measuring equipment at the design stage // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 1728, no. 1, article 012020. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1728/1/012020>.
20. Мовчан А. К., Капустин В. В., Курячий М. И., Чалдина Е. С. Методы и алгоритмы прецизионного измерения дальности активно-импульсными телевизионными измерительными системами // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. — 2020. — Т. 23. — № 2. — С. 7–14. DOI: 10.21293/1818-0442-2020-23-2-7-14.
21. Motyko A. A., Chirkunova A. A., Baranov P. S., Obukhova N. A. Hyperspectral technology in state of the art computer vision application / Seminar on Information Computing and Processing (ICP), 2023, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICP60417.2023.10397293.
22. Chaldina E. S., Movchan A. K., Kapustin V. V., Kuryachiy M. I. Multi-area range measurement method using active—pulse television measuring systems / 21th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2020). 2021, no. 21, pp. 293–297. DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153500.
23. Brooks C. N., Dobson R. J., Dean D. B., Banach D., Oommen T., Havens T. C., Ahlborn T., Cook S. J., Clover A. Evaluating the use of unmanned aerial vehicles for transportation purposes. Michigan Department of Transportation, Michigan, USA, 2015. Report No. RC-1616, 201 p.
24. Potapov A. I., Makhov V. E., Smorodinskii Y. G., Manevich E. Y. Smart-camera-based linear sizing // Russian Journal of Non-destructive Testing. 2019, vol. 55, no. 7, pp. 524–532.
25. Temkin I., Myaskov A., Deryabin S., Konov I., Ivannikov A. Design of a digital 3D model of transport—technological environment of open-pit mines based on the common use of telemetric and geospatial information // Sensors. 2021, vol. 21, no. 18, article 6277. DOI: 10.3390/s21186277.
26. Chirkunova A. A. Methods for increasing the contrast sensitivity of the image sensor / 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2017, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ElConRus.2017.7910641.
27. Arena F., Pau G., Severino A. An overview on the current status and future perspectives of smart cars // Infrastructures. 2020, vol. 5, no. 7, article 53. DOI: 10.3390/infrastructures5070053.
28. Kamenskiy A. V. High-speed recursive-separable image processing filters // Computer Optics. 2022, vol. 46, no. 4, pp. 659–665.
29. Красильников Н. Н. Цифровая обработка изображений. — М.: Вузовская книга, 2001. — 320 с.
30. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. — 752 с.
31. Vostrikov A., Sergeev M., Balonin N., Chernyshev S. B. Digital masking using mersenne matrices and their special images / Procedia Computer Science. Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems: Proceedings of the 21st International Conference. 2017, pp. 1151–1159. DOI: 10.1016/j.procs.2017.08.156.
32. Востриков А. А., Сергеев М. Б., Литвинов М. Ю. Маскирование цифровой визуальной информации: термин и основные определения // Информационно-управляющие системы. — 2015. — № 5 (78). — С. 116–123. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2015.5.116.
33. Михайлов В. В., Колпащиков Л. А., Соболевский В. А., Соловьев Н. В., Якушев Г. К. Методологические подходы и алгоритмы распознавания и подсчета животных на аэрофотоснимках // Информационно-управляющие системы. — 2021. — № 5 (114). — С. 20–32. DOI: 10.31799/1684-8853-2021-5-20-32.

34. Убоженко Д. Ю., Закутаев А. А., Широбоков В. В. Исследование вопросов унификации калибровочного обеспечения квантово-оптических и радиолокационных средств // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2021. — № 6. — С. 244–250.
35. Подгорнова Ю. А., Садыков С. С., Самандаров И. Р., Воронцов С. А. Исследование критериев распознавания доброкачественных заболеваний на маммограммах / Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов и обработки изображений. Материалы XVI Международной научно-технической конференции. — Курск, 2021. — С. 279–281.
36. Podgornova Yu. A., Sadykov S. S. Comparative analysis of segmentation algorithms for the allocation of microcalcifications on mammograms / CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the 5th Information Technology and Nanotechnology-2019: Image Processing and Earth Remote Sensing. 2019, pp. 122–127. DOI: 10.18287/1613-0073-2019-2391-121-127. **PLAB**

REFERENCES

1. Novikov A. V., Panevnikov K. V., Pisarev I. V. Multifunctional security system for coal mines – visualization of events (mining processes) from the miner's workplace. *Russian Mining Industry Journal*. 2021, no. 5, pp. 65–69. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-65-69.
2. Ol't Yu., Maksarov V. V., Makhov V. E. Intelligence systems for quality assessment of threaded surfaces and flaw monitoring based on digital light field recording. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020, vol. 56, no. 11, pp. 915–926. DOI: 10.1134/S1061830920110054.
3. Koteleva N., Valnev V. Automatic Detection of Maintenance Scenarios for Equipment and Control Systems in Industry. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023, vol. 13, no. 24, article 12997. DOI: 10.3390/app132412997.
4. Rudakov M. L., Rabota E. N., Kolvakh K. A. Assessment of the individual risk of fatal injury to coal mine workers during collapses. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020, vol. 4, pp. 88–93. DOI: 10.33271/nvngu/2020-4/088.
5. Nepsha F. S., Voronin V. A., Liven A. S., Korneev A. S. Feasibility study of using cogeneration plants at Kuzbass coal mines. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 259, pp. 141–150. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.2.
6. Buzmakov S. A., Sannikov P. Yu., Kuchin L. S., Igosheva E. A., Abdulmanova I. F. The use of unmanned aerial photography for interpreting the echnogenic transformation of the natural environment during the oil field operation. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 260, pp. 180–193. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.22.
7. Makhovikov A. B., Kryltsov S. B., Matrokhina K. V., Trofimets V. Y. Secured communication system for a metallurgical company. *Tsvetnye Metally*. 2023, no. 4, pp. 5–13. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2023.04.01.
8. Zakharov V. N., Gvishiani A. D., Vaisberg L. A., Dzeranov B. V. Big data and sustainable functioning of geotechnical systems. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 11, pp. 45–52. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.06.
9. Litvinenko V. S., Bowbrick I., Naumov I. A., Zaitseva Z. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: Implications for ESG principles and sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*. 2022, vol. 338, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130530.
10. Valkov V. A., Vinogradov K. P., Valkova E. O., Mustafin M. G. Creating highly informative rasters based on laser scanning and aerial photography data. *Geodesy and Cartography*. 2022, vol. 989, no. 11, pp. 40–49. [In Russ]. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-989-11-40-49.
11. Zhang H., Tao P., Meng X., Liu M., Liu X. An optimum deployment algorithm of camera networks for open-pit mine slope monitoring. *Sensors*. 2021, vol. 21, no. 4, article 1148. DOI: 10.3390/s21041148.
12. Obukhova N. A., Baranov P. S., Motyko A. A., Chirkunova A. A., Pozdeev A. A. Restoration of low-contrast texts of archival documents based on the use of hyperspectral technologies. *Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primeneniye DSPA–2023. Doklady XXV Mezhdunarodnoy konferentsii* [Digital signal processing and its application DSPA–2023. Reports of the XXV International Conference], Moscow, 2023, pp. 210–214. [In Russ].

13. Pryakhin E. I., Troshina E. Y. Degradation induced by thermal and chemical on matrix codes installed on brass and aluminium alloy parts by laser. *Tsvetnye Metally*. 2022, no. 7, pp. 87 – 91. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2022.07.10.
14. Gruzman I. S., Kirichuk V. S., Kosykh V. P., Peretyagin G. I., Spektor A. A. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v informatsionnykh sistemakh* [Digital image processing in information systems], Novosibirsk, NGTU, 2000, 156 p.
15. Gonsales R., Vuds R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital image processing], Moscow, Tekhnosfera, 2005, 1072 p.
16. Sergeev M. B., Soloviev N. V., Stadnik A. I. Methods for increasing the contrast of raster images for digital video processing systems. *Information and Control Systems*. 2007, no. 1 (26), pp. 2 – 7. [In Russ].
17. Mazakov E. From the history of cybernetics on the example of the department of information systems and computer engineering of the mining university. *Voprosy Istorii*. 2022, no. 5(1), pp. 107 – 117. [In Russ]. DOI: 10.31166/VoprosyIstorii202205Statyi01.
18. Zakhlebin A. S., Kalibekov A., Kuryachiy M. I. Construction of a georeferenced orthophotomap of a terrain site based on images from a television camera of a helicopter-type UAV. *Electronic means and control systems. Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya. Materialy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Electronic tools and control systems. Materials of the reports of the International Scientific and Practical Conference], 2020, no. 1-2, pp. 187 – 189. [In Russ].
19. Sytko I. I., Makhov V. E. Study of dynamic properties of measuring equipment at the design stage. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1728, no. 1, article 012020. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1728/1/012020>.
20. Movchan A. K., Kapustin V. V., Kuryachiy M. I., Chaldina E. S. Methods and algorithms for precision range measurement by active-pulse television measuring systems. *Proceedings of TUSUR University*. 2020, vol. 23, no. 2, pp. 7 – 14. [In Russ]. DOI: 10.21293/1818-0442-2020-23-2-7-14.
21. Motyko A. A., Chirkunova A. A., Baranov P. S., Obukhova N. A. Hyperspectral technology in state of the art computer vision application. *Seminar on Information Computing and Processing (ICP)*, 2023, pp. 1 – 4. DOI: 10.1109/ICP60417.2023.10397293.
22. Chaldina E. S., Movchan A. K., Kapustin V. V., Kuryachiy M. I. Multi-area range measurement method using active – pulse television measuring systems. *21th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2020)*. 2021, no. 21, pp. 293 – 297. DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153500.
23. Brooks C. N., Dobson R. J., Dean D. B., Banach D., Oommen T., Havens T. C., Ahlborn T., Cook S. J., Clover A. *Evaluating the use of unmanned aerial vehicles for transportation purposes*. Michigan Department of Transportation, Michigan, USA, 2015. Report No. RC-1616, 201 p.
24. Potapov A. I., Makhov V. E., Smorodinskii Y. G., Manevich E. Y. Smart-camera-based linear sizing. *Russian Journal of Non-destructive Testing*. 2019, vol. 55, no. 7, pp. 524 – 532.
25. Temkin I., Myaskov A., Deryabin S., Konov I., Ivannikov A. Design of a digital 3D model of transport – technological environment of open-pit mines based on the common use of telemetric and geospatial information. *Sensors*. 2021, vol. 21, no. 18, article 6277. DOI: 10.3390/s21186277.
26. Chirkunova A. A. Methods for increasing the contrast sensitivity of the image sensor. *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2017, pp. 1 – 4. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910641.
27. Arena F., Pau G., Severino A. An overview on the current status and future perspectives of smart cars. *Infrastructures*. 2020, vol. 5, no. 7, article 53. DOI: 10.3390/infrastructures5070053.
28. Kamenskiy A. V. High-speed recursive-separable image processing filters. *Computer Optics*. 2022, vol. 46, no. 4, pp. 659 – 665.
29. Krasil'nikov N. N. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital image processing], Moscow, Vuzovskaya kniga, 2001, 320 p.
30. Shapiro L., Stockman J. *Komp'yuternoe zrenie* [Computer vision], Moscow, BINOM, 2006, 752 p.
31. Vostrikov A., Sergeev M., Balonin N., Chernyshev S. B. Digital masking using mersenne matrices and their special images. *Procedia Computer Science. Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems: Proceedings of the 21st International Conference*. 2017, pp. 1151 – 1159. DOI: 10.1016/j.procs.2017.08.156.

32. Vostrikov A. A., Sergeev M. B., Litvinov M. Yu. Masking digital visual information: term and basic definitions. *Information and control systems*. 2015, no. 5 (78), pp. 116–123. [In Russ]. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2015.5.116.

33. Mikhailov V. V., Kolpashchikov L. A., Sobolevsky V. A., Soloviev N. V., Yakushev G. K. Methodological approaches and algorithms for animal recognition and counting on aerial photographs. *Information and Control Systems*. 2021, no. 5 (114), pp. 20–32. [In Russ]. DOI: 10.31799/1684-8853-2021-5-20-32.

34. Ubozhenko D. Yu., Zakutaev A. A., Shirobokov V. V. Study of issues of unification of calibration support for quantum-optical and radar equipment. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2021, no. 6, pp. 244–250. [In Russ].

35. Podgornova Yu. A., Sadykov S. S., Samandarov I. R., Vorontsov S. A. Study of criteria for recognition of benign diseases on mammograms. *Optiko-elektronnye pribory i ustroystva v sistemakh raspoznavaniya obrazov i obrabotki izobrazheniy. Materialy XVI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Optoelectronic devices and devices in image recognition and image processing systems. Proceedings of the XVI International Scientific and Technical Conference], Kursk, 2021, pp. 279–281. [In Russ].

36. Podgornova Yu. A., Sadykov S. S. Comparative analysis of segmentation algorithms for the allocation of microcalcifications on mammograms. *CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the 5th Information Technology and Nanotechnology-2019: Image Processing and Earth Remote Sensing*. 2019, pp. 122–127. DOI: 10.18287/1613-0073-2019-2391-121-127.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зайцева Екатерина Викторовна¹ — канд. техн. наук,

доцент, e-mail: Zaytseva_EV@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-7944-0468,

Кочнева Алина Александровна¹ — канд. техн. наук,

доцент, e-mail: Kochneva_AA@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-8189-782X,

Катунцов Евгений Владимирович¹ — канд. техн. наук,

доцент, e-mail: Katuntsov_EV@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0001-8345-0979,

¹ Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II.

Для контактов: Зайцева Е.В., e-mail: Zaytseva_EV@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

E.V. Zaitseva¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: Zaytseva_EV@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-7944-0468,

A.A. Kochneva¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: Kochneva_AA@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-8189-782X,

E.V. Katuntsov¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: Katuntsov_EV@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0001-8345-0979,

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: E.V. Zaitseva, e-mail: Zaytseva_EV@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 27.09.2023; получена после рецензии 04.04.2025; принята к печати 10.06.2025.

Received by the editors 27.09.2023; received after the review 04.04.2025; accepted for printing 10.06.2025.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПАТРОНИРОВАННЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ ХЛОРАТА НАТРИЯ В ГОРНОМ ДЕЛЕ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Ю.И. Виноградов¹, Н.Н. Сергиенко¹, Т.В. Васильев², А.В. Песьяков²

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: forawsenn@mail.ru

² ООО «Промстройвзрыв», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Горная отрасль с давнего времени является основой экономики Российской Федерации, также отдельное место в экономике занимает строительная отрасль. В настоящее время для отбойки блочного камня, заоткоски бортов карьеров, создания выемок для строительства фундаментов сооружений в скальных грунтах и ведения работ в стесненных условиях существует немалое количество различных взрывчатых материалов, однако чаще всего они применимы только для одного из перечисленных видов работ, причем качество работ подлежит улучшению. Большую роль при производстве строительных работ в скальных грунтах (создание площадок под фундамент, выемок и траншей для инженерных коммуникаций) играет качество и производительность работ, что зачастую требует применения буровзрывного способа, однако возникают угрозы повреждения уже построенных сооружений при их близости к месту взрыва. Таким образом, поиск энергонасыщенного материала, который будет применим для всех указанных выше видов работ, является перспективным направлением, так как это не только повысит производительность отдельных предприятий, но и создаст условия для безопасного ведения работ.

Ключевые слова: направленный откол, отделение монолита от массива, блочный камень, дефлаграционное горение, хлорат натрия, газогенератор, элемент универсальный газогенераторный, рыхление скального грунта.

Для цитирования: Виноградов Ю. И., Сергиенко Н. Н., Васильев Т. В., Песьяков А. В. Перспективы применения патронированных газогенераторов на основе хлората натрия в горном деле и строительстве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 7. – С. 131–145. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_131.

Application prospects of cartridge-type sodium chlorate gas generators in mining and construction

Yu.I. Vingradov¹, N.N. Sergienko¹, T.V. Vasilyev², A.V. Pesyakov²

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining university, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: forawsenn@mail.ru

² LLC «Promstroyvzryv», Saint-Petersburg, Russia

Abstract: Mining industry is a longstanding pivot of Russia's economy, with a special economic sector of the construction industry. At the present time, for the dimension stone cutting, cutback in open pit mines, creation of excavations for foundations in hard rock masses and for operation in a confined environment, there are many various explosive materials, but certain explosives are mostly applicable in certain operations from the list above, and the quality of work must be improved. An important role in construction operations in hard rock masses (creation of areas for foundations, excavations and trenches for engineering services) belongs to the output and quality of works, which calls for using the drilling and blasting method. However, in this case, there is a risk of damage of the existing structures in the vicinity of a blasting site. Thus, finding an energy absorption material applicable in case of all listed operations is a promising area of research as the use of such material can both create safe operation conditions and enhance operating efficiency.

Key words: directional cleavage, detachment of monolith from rock mass, dimension stone, deflagration, sodium chlorate, gas generator, universal gas-generation unit, hard rock softening.

For citation: Vingradov Yu. I., Sergienko N. N., Vasilyev T. V., Pesyakov A. V. Application prospects of cartridge-type sodium chlorate gas generators in mining and construction. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(7):131-145. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_131.

Введение

В отличие от взрывных работ по рыхлению массива горных пород на рудных карьерах, где основным требованием является дробление массива на заданный гранулометрический состав и обеспечение необходимых параметров развала взорванной горной массы [1], на карьерах блочного камня всегда остро стоял вопрос о максимальной сохранности сырья [2], так как даже одна трещина может забраковать целый многотонный блок или сильно понизить его категорию, что скажется на конечной стоимости. Так, на некоторых карьерах блочного камня выход сырья в 10% считается рентабельным, что в абсолютных значениях является малой величиной [3].

На многих рудных карьерах борта, поставленные в конечное положение [4], зачастую осыпаются вследствие выветривания [5], что может зависеть от морозостойкости пород [6].

При проведении работ в городской черте или в стесненных условиях, при близости охраняемых объектов к месту

взрыва, часто не представляется возможным вести работы со взрывчатыми материалами из-за вероятности превышения амплитуды сейсмических колебаний, в силу чего принимается невзрывной метод работ, что увеличивает время и стоимость их выполнения.

С этой точки зрения выгодно выделяются композиции на основе хлората натрия [7] с твердыми или жидкими горючими добавками, которые потенциально способны решить вышеизложенные проблемы.

С увеличением темпа роста городов и загородных агломераций, среди которых особенно сильно выделяются Москва и Санкт-Петербург, спрос на строительное сырье растет, что требует от карьеров строительных материалов [8], в том числе и карьеров по добыче блочного камня, увеличения производительности с сохранением качества сырья.

Технология добычи блочного, штучного камня принципиально отличается от технологии открытой разработки месторождений других твердых полезных

ископаемых [9]. Так, если при отделении от массива полезного ископаемого на щебеночных и рудных карьерах его требуется разрушать до размеров, обусловленных технологией дальнейшей транспортировки и переработки [10] на дробильно-сортировочном комплексе, то при добыче блочного камня необходимо максимально сохранить его естественную монолитность и целостность [11], в противном же случае большая часть продукции становится отходами производства [12].

При добыче блочного камня широко используется как механический, так и взрывной метод добычи [13] с большим разнообразием механических устройств и взрывчатых материалов, кроме того, отдельное место занимает метод отделения блоков с использованием невзрывчатых разрушающих смесей. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки, и зачастую приходится идти на компромисс между качеством блоков и производительностью карьера [14].

Так, в зависимости от карьера и ценности камня, может быть принята любая из перечисленных технологий, обеспечивающая рентабельность производства.

Отделение блочного камня камнерезными машинами

Лучшее качество блочного камня достигается при использовании камнерезных машин различных конструкций, однако производительность таких комплексов оставляет желать лучшего, кроме того, возникают трудности с отодвиганием блоков от забоя для дальнейшей транспортировки, не говоря уже о высокой стоимости таких механизмов и необходимости учета трещиноватости массива во избежание искривления полотна пилы [15].

Для отделения от массива блоков породы небольшой и средней крепости

используют камнерезные машины различных конструкций.

Наибольшее распространение при добыче облицовочного камня с прочностью на сжатие до 25 МПа нашло механическое резание камнерезными машинами, оснащенными дисковыми пилами с твердосплавными резцами или алмазной крошкой, причем использование алмазных отрезных дисков увеличивает производительность резания в 2,5 раза по сравнению с машинами, оснащенными дисками, армированными твердыми сплавами.

Производительность таких машин составляет 5 – 8 м³/ч при глубине пропила дисковых пил 1 – 1,4 м.

Вторыми по популярности являются камнерезные машины с кольцевыми фрезами, которые лишены недостатка машин с дисковыми пилами в виде малого использования рабочего органа по диаметру, к тому же такие машины, в зависимости от материала кольцевой фрезы и технологий его обработки, могут разрабатывать породы с пределом прочности вплоть до 180 МПа на сжатие [16].

Большим недостатком машин такого типа является дороговизна фрез, необходимость подготовительных работ перед выемкой камня с нового горизонта, постоянный контроль скорости подачи и скорости вращения режущего органа, возможность заклинивания фрезы вследствие изменений физико-механических свойств массива в процессе резания, из-за чего происходит затупление резцов. Работа же затупившейся фрезой приводит к перерасходу твердосплавных резцов, поломкам, преждевременному износу деталей фрез и увеличенному расходу электроэнергии. Кроме того, в процессе резания необходимо следить за исправностью работы всех узлов и механизмов, периодически останавливать машину, осматривать фрезу и заменять затупленные зубья.

Одной из разновидностей машин для отделения блоков являются баровые машины [17]. Блоки, добываемые с помощью баровых машин, имеют большой объем (6–8 м³) и значительную массу (16–22 т). Область применения камнерезных баровых машин ограничивается месторождениями мраморизованных известняков, бескварцевых мраморов и других пород с содержанием кварца не более 3–5%. Массивы пород должны обладать хорошей блочностью, а угол падения залежи не должен превышать 30°. С ростом прочности горных пород производительность машин резко снижается с одновременным увеличением эксплуатационных расходов. Алмазно-канатный бар позволяет повысить скорость резания, уменьшить ширину пропила, а также снизить энергоемкость резания и расход воды для охлаждения режущего инструмента.

Существенными недостатками всех камнерезных машин являются их дороговизна, необходимость проведения обслуживания и постоянный контроль технического состояния как во время работы, так и при простоях, необходимость подготовки поверхности уступа и прокладка рельсов, ограничение размеров добываемых блоков, определяемых размерами режущего органа и мощностью машины, большой расход электроэнергии, большая потребность в расходных материалах, необходимость постоянного контроля режима резания, что требует опытного персонала, продолжительный шум и пыление в процессе работы.

Технология канатного пиления

При отделении камня средней прочности все шире применяется канатное пиление [18], которое в последние годы начинают использовать и для добычи блоков из высокопрочных пород. Широкое распространение канатных пил

при вырезке монолитов обусловлено высокой скоростью резания камня, возможностью получения пропилов значительной длины и небольшой ширины, экономичностью, низкой энергоемкостью и возможностью добычи больших блоков, практически без ограничения размеров.

Различают канатно-абразивные пилы, механизм действия которых основан на истирании камня под действием абразивного песка, находящегося между жилами каната, и канатно-алмазные пилы, которые отделяют блок действием шайб, закрепленных на канате и армированных канатами.

Эффективность канатно-абразивной распиловки зависит от комплекса факторов: фракционного и минералогического состава кварцевого песка, его соотношения с водой, количества подаваемого абразивного материала, скорости движения каната, удельного давления в зоне контакта, длины распила и прочего; к примеру, увеличение подачи абразива до 50 кг/ч повышает производительность пиления, дальнейшее увеличение количества абразива до 90 кг/ч роста производительности практически не обеспечивает. При подаче абразива более 90 кг/ч производительность пиления и вовсе падает вследствие забивания щели.

С увеличением скорости движения каната от 6 до 8 м/с производительность пиления возрастает, дальнейшее же увеличение скорости до 16 м/с приводит к снижению производительности. Также имеет место истирание каната со временем, что уменьшает его диаметр и снижает производительность.

Кварцевый песок должен иметь размер зерен 0,2–1 мм, содержать не менее 95% кварцевых и не более 2% глинистых частиц. Помимо кварцевого песка в качестве свободного абразива можно использовать другие материалы, напри-

мер, порошок белого электрокорунда и карбида кремния.

Канатно-алмазные пилы, несмотря на свою дороговизну, в последнее время вытесняют канатно-абразивные, так как им не требуется постоянная подача абразива к канату, а значит, и производительность пиления зависит только от скорости каната и его натяжения.

Общим же недостатком канатного пиления является дороговизна технологии и низкая производительность, а кроме того, необходимость устройства приводного-натяжной станции, предварительное точное бурение шпуров и постоянный контроль натяжения в процессе пиления, ограничение применения на карьерах с относительно большой трещиноватостью, простои при разрыве каната, большие отклонения реза вследствие неоднородности свойств пород в массиве, однако на некоторых месторождениях эта технология нашла применение, так как позволяет максимально сохранить блок камня ненарушенным, повышая эффективность предприятия.

Технология сплошного обуривания

Суть этого способа заключается в бурении по контуру выемки ряда шпуров на всю его высоту внахлест либо вплотную друг к другу. Такой способ отделения монолита от массива обладает сравнительно невысокой производительностью и дороговизной вследствие большого объема бурения, однако позволяет сохранить камень неповрежденным и добывать блоки разной формы, вследствие чего такая технология получила широкое распространение при добыче монолита для изготовления валов, катков и других изделий [19].

Критическим условием для такого способа бурения является прямолинейность шпуров, так как при отклонении от направления бурения не только уве-

личивается объем бурения, но и нарушается первоначально запроектированное положение, вследствие чего происходит порча камня. И чем меньше диаметр шпура, тем больше вероятность отклонения, а значит, более рационально и целесообразно производить бурение скважин, правильно подбирая вращательный момент и осевое усилие при бурении с исключением смещения станка, для чего требуется изготавливать специальные направляющие рамы.

Отделение расклиниванием

При отделении блока расклиниванием первой технологической операцией является бурение шпуров вдоль заданной границы блока с небольшим расстоянием между шпурами (порядка 9–30 см), определяющимся прочностными свойствами горных пород при растяжении и силой сцепления зерен минералов между собой, так как разрушающими являются касательные тангенциальные напряжения массива. Очень важно учитывать направление трещиноватости массива, так как откол по направлению развития трещины требует меньших напряжений. Большим недостатком такого метода является необходимость наличия трех обнаженных поверхностей блока, в противном случае сильно повышается и без того трудоемкий процесс отделения блоков клиньями или расклинивание не представляется возможным.

Применение ручных клиньев связано с большим объемом бурения и высокой трудоемкостью, однако для многих карьеров малой производительности этот способ является основным [20], так как отличается дешевизной, обеспечивая при этом сохранность монолита.

Для облегчения ручного труда широкое применение имеют и гидроклиновые установки [21], которые к тому же повышают производительность карьера. Недостатком является более высокая

цена в сравнении с ручными клиньями и многостадийный процесс добычи длинных блоков через постепенное раскрытие трещины от одного края к другому несколькими заходками, что создает риск образования трещин в направлении, перпендикулярном линии откола.

Чтобы снизить объем бурения, при высоте блока более 1 м шпур, пробуренный на всю высоту, чередуют со шпурами длиной 0,4–0,8 м.

Существенным недостатком клинового метода отделения монолита от массива является ограничение высоты отделяемых монолитов, так как по длине шпура раскалывающие напряжения снижаются, а после определенной длины и вовсе вырождаются в сжимающие.

Невзрывчатые разрушающие смеси (НРС)

Использование НРС при добыче камня позволяет, благодаря механизму действия, произвести медленное нарастающее нагружение породы [22].

НРС представляет собой порошок извести или оксидов щелочных металлов с незначительными добавками других веществ, смешанный с водой в определенном соотношении [23]. Такая смесь со временем затвердевает с расширением (от 6 до 24–48 ч), что и создает растягивающие напряжения при помещении ее в шпур.

Большими недостатками НРС являются их дороговизна вследствие энергоемкой технологии изготовления; большой объем бурения, так как создаваемые напряжения относительно невысоки, из-за чего возникает и ограничение по виду добываемого камня в зависимости от физико-механических свойств; ограниченный диапазон применения по температуре воздуха и массива [24], так как при температуре менее +5 °С смесь при затвердевании уже почти не расширяется, а при температуре более +25 °С воз-

можен самопроизвольный выброс смеси из шпура; нестабильность свойств при плохом растворении в воде; необходимость строгого массового соотношения порошка и воды при смешивании; гигроскопичность порошка при хранении и потеря свойств. Однако применение НРС является простой и относительно безопасной технологией, позволяющей добиться хорошей сохранности камня.

Отделение блоков с применением взрывчатых веществ

Современный подход при выборе типа взрывчатого вещества, исходя из его свойств, при направленном разрушении горных пород осесимметричными зарядами предполагает использование низкобризантных взрывчатых веществ (ВВ) и дымного пороха. Однако обеспечить надежность функционирования низкобризантного заряда в шпуре или скважине диаметром значительно большим, чем заряд, при диаметре заряда, близком к критическому для данного ВВ, задача весьма сложная. Горение пороха в шпуровом или скважинном заряде при инициировании его электровоспламенителем также отличается нестабильностью процесса, на который весьма существенно влияют внешние условия. На производстве для стабилизации процессов детонации низкобризантных ВВ и горения порохов их инициирование производят ниткой детонирующего шнура (ДШ), пропущенной по всей длине заряда. Такой подход нашел широкое применение на практике, несмотря на возможный контакт детонирующего шнура со стенкой шпура, что может являться причиной дополнительных трещин при его детонации.

Взрыв в наибольшей степени нарушает монолитность породы [25], что в конечном итоге приводит к уменьшению выхода готовой продукции с 1 м³ блоков,

особенно тонких и уточненных плит, однако при использовании взрывных работ существенно меньше трудоемкость работ и выше производительность.

В настоящее время буровзрывные способы имеют почти исключительное распространение в отечественной практике и отличаются наибольшей производительностью за счет снижения объемов бурения в 3–4 раза по сравнению, например, с гидроклиновым способом. С их помощью можно отбивать блоки любых размеров в породах любой крепости. Для наиболее крепких пород направленное разрушение взрывом остается в настоящее время вне конкуренции.

Традиционный подход при создании протяженных плоскостей разрыва и контуров представляет собой бурение ряда параллельных шпуров или скважин и взрывание в них осесимметричных удлиненных зарядов и является в настоящее время основным. Совершенствование его сводится к разработке специальных конструкций зарядов из низкобризантных составов ВВ для осуществления «мягкого» нагружения массива.

Главный недостаток — потери блоков за счет разрушения радиальными трещинами пришпуровой зоны, а также нарушение взрывом законтурной части массива. Кроме того, при этом способе приходится считаться с повышенной опасностью и цикличностью работ. Основной мерой, снижающей недостатки буровзрывных способов, является применение пороха или низкобризантных ВВ.

Значимыми достоинствами применения буровзрывных работ при добыче блочного камня является повышение производительности карьера, снижение объемов бурения, возможность получать блоки любого размера при любых физико-механических свойствах массива, низкие требования к подготовке рабочей площадки.

Виды взрывчатых материалов для добычи каменных блоков

Применение пороха при отбойке блочного камня имеет тенденцию к снижению вследствие его относительно высокой цены, нестабильности свойств, сложности при зарядании, а также высокой температуры сгорания, вследствие чего могут успеть развиваться термические напряжения и образоваться трещины в камне из-за локального местного разогрева. Эти факторы способствуют переходу на заряды других конструкций.

Применение удлиненных кумулятивных зарядов для отбойки блоков камня [26] является дорогостоящим и требует очень точного соблюдения технологического регламента — начиная от бурения шпуров строго на заданном расстоянии друг от друга без отклонений и заканчивая повышенными требованиями к расположению заряда в шпуре по всей длине, чтобы кумулятивный нож работал максимально эффективно [27], поэтому широкое применение нашли заряды других конструкций.

Известны шланговые заряды ЗША двух типов: ЗША-14 и ЗША-25 для размещения в шпурах и скважинах соответственно. ЗША-14 состоит из полиэтиленовой оболочки, наполненной аммиачной селитрой марки ЖВГ, и центрального инициирующего шнура из эластичного ВВ. Линейная масса 120–165 г/м. ЗША-25 представляет собой ту же оболочку, но наполненную взрывчатым веществом АТ-1, с центрально расположенным детонирующим шнуром ДШЭ-12 или ДША. Линейная масса составляет 350–550 г/м. Недостатком зарядов ЗША является невозможность регулировки линейной массы для размещения заряда равномерно по всей длине шпура или скважины, вследствие чего имеется часть шпура, не заполненная зарядом; в результате может возникать плохая проработка этой части и локальное уси-

ленное наведение трещин в части, где расположен заряд.

Почти аналогичной с ЗША является конструкция зарядов мягкого взрывания (ЗМВ) диаметром 17,5 мм, представляющих собой заряд из аммиачной селитры с угольным порошком или без него в полиэтиленовой оболочке с детонирующим шнуром внутри. Вследствие плохой восприимчивости к детонации гранулированной аммиачной селитры данные заряды имеют ограниченное применение по крепости разрабатываемых горных пород, а для детонации необходимо две нитки ДШЭ-12, что может вызвать образование покровов и трещин в местах контакта ДШ со стенками шнура.

Дорогостоящим, но эффективным средством для отделения блоков от массива является трубчатый эластичный заряд «Гранилен», который представляет собой цилиндрический заряд из смеси нитрата калия с гексогеном и другими добавками с центральным каналом для размещения детонирующего шнура. Такой состав обеспечивает низкоскоростной режим детонации, малую чувствительность к внешним тепловым и механическим воздействиям, высокую водостойкость, а само тело заряда гасит ударную волну от детонирующего шнура. «Гранилен» выпускается в трех типоразмерах диаметрами 11, 15 и 17 мм с линейной массой 140, 280 и 360 г/м соответственно, что позволяет подбирать нужный заряд под конкретные условия взрывания, чему дополнительно способствует возможность перемещения изделий вдоль оси заряда по детонирующему шнуру. Это позволяет существенно снизить наведенную трещиноватость и полностью устранить разрушение породы на контакте с зарядом.

Особенно удобны в обращении заряды с жестким корпусом, такие как К-трубчатые заряды фирмы «Форсит» (Финляндия). Корпус помимо хранения

взрывчатого вещества на начальном этапе развития детонации или взрывного горения уменьшает отток газов от заряда, повышая стабильность его детонации. Для инициирования достаточно одной нитки ДШ вдоль трубки по всей ее длине.

Похожими по конструкции и применяемому взрывчатому веществу являются заряды «Гурита» фирмы «Нитронобель» (Швеция), отличием является механизм стыковки патронов посредством соединительной муфты на корпусе. Во многих странах Европы заряды с жестким корпусом выпускаются в том или ином виде собственной промышленностью, что породило большое разнообразие зарядов данного типа.

Газогенерирующие устройства

Альтернативным направлением в разработке невзрывных разрушающих составов является создание таких средств воздействия на массив горной породы при направленном разрушении, которые сохранили бы все достоинства порохов и невзрывных разрушающих составов и в то же время легко адаптировались к широкому диапазону условий при добыче блочного камня. К таким средствам в настоящее время относятся газогенерирующие устройства. Их особенность состоит в том, что при срабатывании происходит дефлаграционное сгорание окислительной композиции с выделением большого количества газов, в результате чего удается избавиться от ударной волны, обеспечивая мягкое нагружение массива [28]. Все эти факторы обеспечивают снижение сейсмического воздействия на массив, что делает возможным применение газогенераторов для работ в условиях близости охраняемых объектов, в том числе и на стройплощадках с исключением разлета кусков при дроблении валунов или железобетонных конструкций.

Известны композиции на основе пероксида водорода и хлората натрия в качестве окислителей и твердых углеводородов (полиэтилена, полипропилена и полистирола) в качестве горючей добавки. Дефлаграционный режим горения указанных композиций обеспечивался использованием твердых углеводородов в виде трубок, пленки, гофр или в другой форме. Основной причиной отсутствия перехода режима горения с дефлаграционного в детонационный является диффузионное торможение реакции.

Наиболее применимыми являются доступные по цене окислители — нитрат калия и хлорат натрия. Большая работа по исследованию композиций на основе хлората натрия проделана учеными Санкт-Петербургского Горного университета, за счет чего этот состав нашел применение в промышленности в газогенераторах хлоратных патронированных (ГХП) [29], для которых после лабораторно-полевых испытаний кафедрой Взрывного дела Горного университета была разработана расчетная методика параметров буровзрывных работ.

ГХП состоит из пластмассового корпуса длиной 100 — 250 мм с внутренним диаметром 20 — 21 мм, загруженного композицией, состоящей из хлората натрия, и трубок из полиэтилена (полипропилена) массой 50 — 200 г, днища и головки с гнездом для установки электровоспламенителя типа ЭКВ-2. ГХП обладает способностью создавать динамическое давление газов только в замкнутом пространстве шнура, плотно заполненного песком. Полная идеальная работоспособность состава ГХП — 3200 кДж/кг, кислородный баланс при горении — минус 5%, температура вспышки — 300 — 350 °С. Объем газообразных продуктов сгорания ГХП при нормальных условиях составляет около 400 л на 1 кг состава. Основные продукты горения — CO_2 и H_2O (водяные пары). Благодаря

герметичному пластмассовому корпусу ГХП надежно работают в обводненных шпурах. Следует отметить, что темп нарастания давления в шпуре поддается плавному регулированию введением в окислитель разного количества горючего.

Недостатком ГХП является необходимость использования воспламенителя, что усложняет технологию проведения работ, особенно при помещении нескольких зарядов в один шпур. Сложности возникают и в связи с недостаточностью импульса для воспламенения композиции при использовании детонирующего шнура, что ставит под вопрос применимость данного типа зарядов для работ по отделению монолита от массива, однако он используется на некоторых карьерах [30].

Такого недостатка лишены элементы универсальные газогенерирующие (ЭУГ) [ТУ 20.51.11-001-27287946-2018], [31], представляющие собой полимерный цилиндрический пенал длиной 100 — 500 мм и диаметром 20 — 90 мм, закрытый с концов полиэтиленовыми заглушками или крышками, содержащий окислительную композицию (хлорат натрия) в количестве от 50 до 1000 г в зависимости от типоразмера элемента, пропитанную дизельным топливом (ДТ), что позволяет инициировать заряд в шпуре одной ниткой ДШЭ-6. Заряды ЭУГ предназначены для отделения (раскалывания) природных горных пород, дробления фундаментов и железобетонных конструкций в температурном диапазоне окружающей среды от -35 до +50 °С. ЭУГ обладает способностью создавать динамическое избыточное давление газов только в замкнутом (полузамкнутом) объеме, например, в шпуре или скважине. На открытом пространстве при штатном воспламенении изделия детонирующим шнуром горение не развивается.

Патроны ЭУГ в соответствии с ГОСТ 19433-88 относятся к грузам класса опас-

ности 5, подклассу 5.1 (окислители), № ООН 1495 — хлорат натрия (модифицированный). При перевозке в комбинированной таре упакованные в ограниченных количествах ЭУГ (количество окислительной композиции в каждом пенале не более 1000 г, масса брутто каждой упаковки не более 30 кг) перевозятся как неопасный груз (в соответствии с ДОПОГ в редакции 2017 г. (ECE/TRANS/242). Это позволяет экономить на доставке ЭУГ к месту работы, дизельное топливо добавляется к окислительной композиции вблизи мест работы с временем пропитывания не менее 2 ч.

Энергетические характеристики ЭУГ определяются параметрами сгорания композиции в смеси с дизельным топливом. Объем газов, приведенный к нормальным условиям — около 400 л/кг (водяной пар), полная идеальная работоспособность — 3200 кДж/кг. Стоит отметить, что в процессе сгорания помимо водяного пара выделяются и углекислый газ, гипс, хлорид натрия, который является пламегасителем.

Для крепления ДШ к патрону ЭУГ на одном из его концов на заглушке устроена выемка с отверстием. Небольшая масса зарядов и возможность размещать их внутри шпура на любом расстоянии друг от друга позволяют варьировать параметры рассредоточенного заряда в широких пределах в зависимости от физико-механических свойств горных пород и наличия естественных трещин.

Применение компанией ООО «Промстройвзрыв» зарядов ЭУГ на карьере гранита «Возрождение», участок № 8 ООО «Выборгские граниты», и «Винга» Кандалакшского района Мурманской области, а также габбро-долерита «Другорецкое» в Прионежском районе Республики Карелия позволило [данные компании ООО «Промстройвзрыв»]:

- снизить себестоимость БВР на 15 — 25% со снижением удельного расхода

материала на 1 м³ отделяемого монолита на 10 — 15% по отношению к варианту с применением дымных порохов, гранилена и ЗМВ;

- значительно снизить трудозатраты на подготовку взрывчатых материалов к работе, его пакетирование и гидроизоляция, зарядку шпуров;

- отказаться от применения забойки;
- сократить затраты на перевозку опасных грузов автомобильным транспортом;

- значительно сократить простои в технологическом процессе смежных участков одного карьера и соседних предприятий — за счет величины опасной зоны по разлету кусков породы 100 м [32].

Помимо отбойки блочного камня имеется обширный опыт применения ЭУГ на строительных площадках:

- реконструкция автомобильных дорог М-18 «Кола», Р-21 «Кола» при близости охраняемых объектов к месту ведения работ;

- обрушение конвейерной галереи в заданном направлении;

- строительство траншей под инженерные сети при проведении работ по реконструкции здания для создания музея Карельского фронта в Республике Карелия;

- строительство траншей под инженерные сети при проведении работ на объекте «Пограничное управление ФСБ России по Мурманской области», г. Мурманск.

При проведении анализа зарегистрированных сейсмических воздействий на охраняемые объекты [33] было выявлено, что применение ЭУГ в стесненных условиях оправданно и эффективно; так, при рыхлении скального массива в жилых районах были получены результаты скорости колебания грунта в основании охраняемых сооружений, не превышающие допустимой скорости колебаний — 5 — 20 мм/с.

Выводы

До настоящего времени вопрос выбора эффективной технологии буровзрывных работ при добыче блочного камня, обеспечивающей требуемое качество товарных блоков, решен не полностью, что в одних случаях приводит к неоправданно завышенным затратам на добычные работы, а в других — к недопустимому снижению качества конечной продукции. Поэтому совершенствование взрывной отбойки монолитов камня с использованием направленного раскола, позволяющего повысить производительность добычного процесса при обеспечении высокого качества блоков, не теряет своей актуальности. В связи со сложностью моделирования процессов отбойки блочного камня эффективность той или иной технологии определяют опытным путем в производственных условиях.

С этой точки зрения интерес для всестороннего исследования представляют заряды ЭУГ, которые кроме работ по отбойке блочного камня имеют хороший потенциал для применения на строительных площадках при близости охраняемых объектов к местам работ, где классические взрывчатые материалы не могут быть применены из соображений безопасности.

Существующая совокупность свойств зарядов ЭУГ делает их универсальным материалом как для добывающей сферы, так и для проведения специальных взрывных работ.

Авторы выражают благодарность компании ООО «Промстройвзрыв» за содействие в предоставлении материалов, касающихся опыта применения элементов универсальных газогенерирующих.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалевич С. В., Зырянов И. В., Чернобай В. И. Опыт проведения работ на алмазоносных месторождениях Якутии. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых // 2022. — № 58. — С. 953–965. DOI: 10.1134/S1062739122060102.
2. Yastrebova K. N., Moldovan D. V., Chernobai V. I. Influence of the nature of the outflow of explosion products from blast holes and boreholes on the efficiency of rock destruction // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 174, article 01017. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401017.
3. Jalalian M. H., Bagherpour R., Khoshouei M. Wastes production in dimension stones industry: resources, factors, and solutions to reduce them // Environmental Earth Sciences. 2021, vol. 80, article 560. DOI: 10.1007/s12665-021-09890-2.
4. Еременко А. А., Филиппов В. Н. Определение рациональных параметров буровзрывных работ для обеспечения устойчивости бортов карьеров Быстринского месторождения // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2020. — Т. 7. — № 1. — С. 64–73. DOI: 10.15372/FPVGN2020070110.
5. Кагермазова С. В., Пустовойтова Т. К. Закономерности выветривания и осыпания пород в откосах открытых горных выработок // Маркшейдерский вестник. — 2009. — № 1 (69). — С. 18–21.
6. Слепцов В. И., Курилко А. С. Расчет динамики осыпания борта карьера для карбонатных пород разной морозостойкости // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2013. — № 1. — С. 34–41.
7. Кирсанов О. Н., Кирсанов Н. О., Кирсанов И. О., Кирсанова М. О., Островский В. И. Патент RU 2004 119 481. Состав для буровзрывных работ. Заявл. 16.06.2004. Опубл. 27.01.2006. Бюл. № 03.
8. Лигоцкий Д. Н., Аргимбаева К. В. Технология секционного формирования техногенного месторождения с последующей его отработкой гидравлическим экскаватором // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 111–121. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-111-121.

9. Фомин С. И., Лелен А. Совершенствование методов определения потерь руды при проектировании разработки месторождения цементного сырья комбайнами послойного фрезерования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2024. — № 2. — С. 202 — 208. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4203.

10. Argimbaev K. R., Ligotsky D. N., Mironova K. V., Loginov E. V. Investigations on material composition of iron-containing tails of enrichment of combined mining and processing in Kursk Magnetic Anomaly of Russia // International Journal of Engineering and Technology. 2020, vol. 33, no. 7, pp. 1431 — 1439. DOI: 10.5829/ije.2020.33.07a.31.

11. Симонов П. С. Особенности расчета параметров буровзрывных работ на отрыв // Взрывное дело. — 2022. — № 137 — 94. — С. 66 — 79.

12. Исманов М. М. Современное состояние эксплуатации месторождений природного камня в Кыргызской Республике // Инженер: научное и периодическое издание Инженерной академии Кыргызской Республики. — 2023. — № 26. — С. 17 — 25.

13. Ковалевский В. Н., Мысин А. В., Сушкова В. И. Теоретические аспекты технологии взрывной отбойки блочного камня // Горные науки и технологии. — 2024. — № 9(2). — С. 97 — 104. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-12-187.

14. Кузнецов В. А., Соколов В. Е., Шабаев А. И., Кузьминых Е. Н. Математическое моделирование для оконтуривания запасов, проектирования добычи и анализа эффективности освоения месторождений блочного камня / Добыча, обработка и применение природного камня. Сборник научных трудов Международной технической конференции. — Магнитогорск, 2018. — С. 5 — 16.

15. Косарев Л. В. Обоснование технологических параметров процесса подготовки к выемке блоков мрамора камнерезным комплексом с учетом трещиноватости массива. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2012. — 21 с.

16. Усубалиев Ж., Эликбаев К. Т., Райымбабаев Т. О. Обзор технологий отделения блока природного камня от массива с помощью камнерезных машин и гидравлических раскалывателей // Машиноведение. — 2018. — № 2 (8). — С. 71 — 82.

17. Валиев Н. Г., Гармс А. Я., Бычков Г. В. Повышение эффективности баровых и алмазноканатных камнерезных машин для добычи природного камня открытым способом // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2010. — № 8. — С. 13 — 17.

18. Будник П. В., Баклагин В. Н., Галактионов О. Н., Семенов Д. С. Технические решения для распиловки блоков природного камня: анализ патентов // Наукосфера. — 2023. — № 5-1. — С. 181 — 186.

19. Cardu M., Saltarin S., Todaro C., Deangeli C. Precision rock excavation: Beyond controlled blasting and line drilling // Mining. 2021, vol. 1, pp. 192 — 210. DOI: 10.3390/mining1020013.

20. Маджид Ю., Эмад М. З., Рехман Г., Аршад М. Влияние способов добычи штучного камня в карьере Хевра на качество отделяемых блоков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2019. — № 4. — С. 105 — 121. DOI: 10.15372/FTPRPI20190412.

21. Усубалиев Ж., Эликбаев К. Т., Райымбабаев Т. О. Обзор конструкций гидравлических клиновых устройств для отделения блока камня от массива // Машиноведение. — 2021. — № 1(13). — С. 52 — 64.

22. Сахно И. Г., Касьян Н. Н. Направленное разрушение горных пород невзрывчатыми разрушающими смесями // Горный вестник. — 2013. — № 96. — С. 16 — 20.

23. Флягин А. С., Ворсин В. А., Уфимцев В. М. Производство и применение в промышленных условиях невзрывных разрушающих смесей // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. — 2018. — Т. 80. — № 2(76). — С. 290 — 296. DOI: 10.20914/2310-1202-2018-2-290-296.

24. Пшеничная Е. Г. Обоснование рациональных параметров технологии добычи гранитных блоков с применением невзрывчатых разрушающих средств. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2004. — 21 с.

25. Zhang Z. X., Chi L. Y., Qiao Y. Fracture initiation, gas ejection, and strain waves measured on specimen surfaces in model rock blasting // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2021, vol. 54, pp. 647 — 663. DOI: 10.1007/s00603-020-02300-2.

26. Котов Л. Р., Куценко Г. П., Зозуля А. Е., Розенберг Т. И. Линейные заряды для взрывной резки металла и отбойки блочного камня // Взрывное дело. — 2008. — Т. 100-57. — С. 233 — 238.

27. Paramonov G. P., Kovalevskiy V. N., Mysin A. V. Determination of the conditions of an effective functioning of elongated cumulative charges in processing the marble stone // *Key Engineering Materials*. 2020, vol. 83, pp. 19–24. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.836.19.

28. Кирсанов О. Н. Методы и средства щадящего взрывания при добыче блочного камня шпуровым способом / Добыча, обработка и применение природного камня. Сборник научных трудов Международной технической конференции. — Магнитогорск, 2017. — С. 33–40.

29. Парамонов Г. П., Ковалевский В. Н., Кирсанов О. Н. Патент на изобретение RU 2477791 С1, Газогенератор для направленного разрушения горных пород. 20.03.2013. Заявка № 2011133733/03 от 10.08.2011.

30. Парамонов Г. П., Ковалевский В. Н., Мозер П. Повышение сохранности минерального сырья при отделении монолита от массива горных пород с использованием газогенераторных патронов // Записки Горного института. — 2016. — Т. 220. — С. 532–537. DOI: 10.18454/PMI.2016.4.532.

31. Доможиров Д. В., Караулов Н. Г., Прохоров А. А. Анализ способов подготовки блочного камня на карьерах Уральского региона / Добыча, обработка и применение природного камня. Сборник научных трудов Международной технической конференции. — Магнитогорск, 2018. — С. 46–57.

32. Караулов Н. Г., Каримов Т. Р., Белесева К. В., Копрев И. Г. Применение газогенераторов хлоратных патронированных на Нижне-Санарском месторождении для добычи гранодиорита / Добыча, обработка и применение природного камня. Сборник научных трудов Международной технической конференции. — Магнитогорск, 2017. — С. 40–47.

33. Холодилов А. Н., Господарики А. П., Еременко А. А. Методические основы классификации взрывов по уровню их сейсмического воздействия // Горный журнал. — 2021. — № 5. — С. 98–102. DOI: 10.17580/gzh.2021.05.13. **ПТБ**

REFERENCES

1. Kovalevich S. V., Zyryanov I. V., Chernobay V. I. Experience of drilling-and-blasting in diamond fields in Yakutia. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2022, no. 58, pp. 953–965. [In Russ]. DOI: 10.1134/S1062739122060102.

2. Yastrebova K. N., Moldovan D. V., Chernobai V. I. Influence of the nature of the outflow of explosion products from blast holes and boreholes on the efficiency of rock destruction. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 174, article 01017. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401017.

3. Jalalian M. H., Bagherpour R., Khoshouei M. Wastes production in dimension stones industry: resources, factors, and solutions to reduce them. *Environmental Earth Sciences*. 2021, vol. 80, article 560. DOI: 10.1007/s12665-021-09890-2.

4. Eremenko A. A., Filippov V. N. Determination of rational parameters of drilling and blasting operations to ensure the stability of the sides of the quarries of the Bystrinskoye deposit. *Mining sciences: fundamental and applied issues*. 2020, vol. 7, no. 1, pp. 64–73. [In Russ]. DOI: 10.15372/FPVGN 2020070110.

5. Kagermazova S. V., Pustovoitova T. K. Patterns of weathering and rock shedding in open-pit mine slopes. *Mine Surveying Bulletin*. 2009, no. 1 (69), pp. 18–21. [In Russ].

6. Sleptsov V. I., Kurilko A. S. Calculation of the dynamics of shedding of the quarry side for carbonate rocks of different frost resistance. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2013, no. 1, pp. 34–41. [In Russ].

7. Kirsanov O. N., Kirsanov N. O., Kirsanov I. O., Kirsanova M. O., Ostrovskiy V. I. *Patent RU 2004 119 481*. 27.01.2006. [In Russ].

8. Ligotsky D. N., Argimbaeva K. V. The sectional formation technology of an anthropogenic deposit with its subsequent mining using a hydraulic pull shovel. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 1, pp. 111–121. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-111-121.

9. Fomin S. I., Lelen A. Improvement of the methods for determining ore losses when designing cement raw material deposit mining by surface miner combines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2024, no. 2, pp. 202–208. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4203.

10. Argimbaev K. R., Ligotsky D. N., Mironova K. V., Loginov E. V. Investigations on material composition of iron-containing tails of enrichment of combined mining and processing in Kursk Mag-

netic Anomaly of Russia. *International Journal of Engineering and Technology*. 2020, vol. 33, no. 7, pp. 1431 – 1439. DOI: 10.5829/ije.2020.33.07a.31.

11. Simonov P. S. Features of calculating the parameters of drilling and blasting operations for separation. *Explosion technology*. 2022, no. 137 – 94, pp. 66 – 79. [In Russ].

12. Ismanov M. M. Current state of exploitation of natural stone deposits in the Kyrgyz Republic. *Inzhener: nauchnoe i periodicheskoe izdanie Inzhenernoy akademii Kyrgyzskoy Respubliki*. 2023, no. 26, pp. 17 – 25. [In Russ].

13. Kovalevsky V. N., Mysin A. V., Sushkova V. I. Theoretical aspects of the technology of blasting block stone. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024, no. 9(2), pp. 97 – 104. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-12-187.

14. Kuznetsov V. A., Sokolov V. E., Shabaev A. I., Kuzminykh E. N. Mathematical modeling for reserve delineation, production design and analysis of the efficiency of development of block stone deposits. *Dobycha, obrabotka i primeneniye prirodnogo kamnya. Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy tekhnicheskoy konferentsii* [Extraction, processing and use of natural stone. Collection of scientific papers of the International Technical Conference], Magnitogorsk, 2018, pp. 5 – 16. [In Russ].

15. Kosarev L. V. *Obosnovanie tekhnologicheskikh parametrov protsessa podgotovki k vyemke blokov mramora kamnereznyim kompleksom s uchetom treshchinovatosti massiva* [Justification of the technological parameters of the process of preparing for the extraction of marble blocks by a stone-cutting complex, taking into account the fracturing of the massif], Candidate's thesis, Magnitogorsk, MG TU im. G.I. Nosova, 2012, 21 p.

16. Usabaliev Zh., Elikbaev K. T., Raimbabaev T. O. Review of technologies for separating a block of natural stone from an array using stone-cutting machines and hydraulic splitters. *Mashinovedenie*. 2018, no. 2 (8), pp. 71 – 82. [In Russ].

17. Valiev N. G., Garms A. Ya., Bychkov G. V. Increasing the efficiency of bar and diamond-wire stone-cutting machines for open-pit mining of natural stone. *Minerals and Mining Engineering*. 2010, no. 8, pp. 13 – 17. [In Russ].

18. Budnik P. V., Baklagin V. N., Galaktionov O. N., Semenov D. S. Technical solutions for sawing natural stone blocks: analysis of patents. *Naukosfera*. 2023, no. 5-1, pp. 181 – 186. [In Russ].

19. Cardu M., Saltarin S., Todaro C., Deangeli C. Precision rock excavation: Beyond controlled blasting and line drilling. *Mining*. 2021, vol. 1, pp. 192 – 210. DOI: 10.3390/mining1020013.

20. Majid Y., Emad M. Z., Rehman G., Arshad M. The influence of methods for extracting piece stone in the Khehra quarry on the quality of the separated blocks. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2019, no. 4, pp. 105 – 121. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20190412.

21. Usabaliev Zh., Elikbaev K. T., Raimbabaev T. O. Review of the designs of hydraulic wedge devices for separating a block of stone from an array. *Mashinovedenie*. 2021, no. 1(13), pp. 52 – 64. [In Russ].

22. Sakhno I. G., Kasyan N. N. Directed destruction of rocks with non-explosive destructive mixtures. *Gorniy vestnik*. 2013, no. 96, pp. 16 – 20. [In Russ].

23. Flyagin A. S., Vorsin V. A., Ufimtsev V. M. Production and use in industrial conditions of non-explosive destructive mixtures. *Proceeding of the Voronezh state university of engineering technologies*. 2018, vol. 80, no. 2(76), pp. 290 – 296. [In Russ]. DOI: 10.20914/2310-1202-2018-2-290-296.

24. Pshenichnaya E. G. *Obosnovanie ratsional'nykh parametrov tekhnologii dobychi granitnykh blokov s primeneniem nevzryvchatykh razrushayushchikh sredstv* [Justification of the rational parameters of the technology for extracting granite blocks using non-explosive destructive agents. Abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences], Candidate's thesis, Magnitogorsk, MG TU im. G.I. Nosova, 2004, 21 p.

25. Zhang Z. X., Chi L. Y., Qiao Y. Fracture initiation, gas ejection, and strain waves measured on specimen surfaces in model rock blasting. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021, vol. 54, pp. 647 – 663. DOI: 10.1007/s00603-020-02300-2.

26. Kotov L. R., Kutsenko G. P., Zozulya A. E., Rosenberg T. I. Linear charges for explosive cutting of metal and breaking of block stone. *Explosion technology*. 2008, vol. 100-57, pp. 233 – 238. [In Russ].

27. Paramonov G. P., Kovalevskiy V. N., Mysin A. V. Determination of the conditions of an effective functioning of elongated cumulative charges in processing the marble stone. *Key Engineering Materials*. 2020, vol. 83, pp. 19 – 24. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.836.19.

28. Kirsanov O. N. Methods and means of gentle blasting when extracting block stone using the blasthole method. *Dobycha, obrabotka i primeneniye prirodnogo kamnya. Sbornik nauchnykh trudov*

Mezhdunarodnoy tekhnicheskoy konferentsii [Extraction, processing and use of natural stone. Collection of scientific papers of the International Technical Conference], Magnitogorsk, 2017, pp. 33–40.

29. Paramonov G. P., Kovalevsky V. N., Kirsanov O. N. *Patent for invention RU 2477791 C1*. 20.03.2013. [In Russ].

30. Paramonov G. P., Kovalevsky V. N., Moser P. Increasing the safety of mineral raw materials when separating a monolith from a rock mass using gas generator cartridges. *Journal of Mining Institute*. 2016, vol. 220, pp. 532–537. [In Russ]. DOI: 10.18454/PMI.2016.4.532.

31. Доможилов Д. В., Караулов Н. Г., Прохоров А. А. Анализ способов подготовки блочного камня на карьерах Уральского региона / *Dobycha, obrabotka i primeneniye prirodnogo kamnya. Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy tekhnicheskoy konferentsii* [Extraction, processing and use of natural stone. Collection of scientific papers of the International Technical Conference], Magnitogorsk, 2018, pp. 46–57. [In Russ].

32. Karaulov N. G., Karimov T. R., Beleseva K. V., Koprev I. G. Use of cartridgeed chlorate gas generators at the Nizhne-Sanarsky deposit for the extraction of granodiorite. *Dobycha, obrabotka i primeneniye prirodnogo kamnya. Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy tekhnicheskoy konferentsii* [Extraction, processing and use of natural stone. Collection of scientific papers of the International Technical Conference], Magnitogorsk, 2017, pp. 40–47. [In Russ].

33. Kholodilov A. N., Gospodarikov A. P., Eremenko A. A. Procedural framework for explosion classification by the seismic load criterion. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 5, pp. 98–102. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.05.13.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Виноградов Юрий Иванович¹ — канд. техн. наук,

доцент, e-mail: vinogradov_yui@pers.spmi.ru

ORCID ID: 0000-0001-9468-2214,

Сергиенко Николай Николаевич¹ — аспирант,

e-mail: forawsenn@mail.ru,

Васильев Тимофей Вячеславович² — генеральный директор,

Песяков Алексей Владимирович² — главный инженер,

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,

² ООО «Промстройвзрыв», e-mail: mail@psv.spb.ru.

Для контактов: Сергиенко Н.Н., e-mail: forawsenn@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yu.I. Vinogradov¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: vinogradov_yui@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0001-9468-2214,

N.N. Sergienko¹, Graduate Student, e-mail: forawsenn@mail.ru,

T.V. Vasilyev², General Director, e-mail: mail@psv.spb.ru,

A.V. Pesyakov², Chief Engineer, e-mail: mail@psv.spb.ru,

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining university,

199106, Saint-Petersburg, Russia,

² LLC «Promstroyvzryv», 196070, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: N.N. Sergienko, e-mail: forawsenn@mail.ru.

Получена редакцией 22.11.2024; получена после рецензии 28.02.2025; принята к печати 10.06.2025.

Received by the editors 22.11.2024; received after the review 28.02.2025; accepted for printing 10.06.2025.



АНОМАЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР РАСТИТЕЛЬНОСТИ КАК ИНДИКАТОР ЛОКАЛЬНЫХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ НАРУШЕНИЙ В ТЕЛЕ НАСЫПНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Д.А. Максимов

Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

Аннотация: Рассмотрена проблема поиска потенциальных индикаторов наличия в теле насыпных гидротехнических сооружений фильтрационных нарушений. При рассмотрении механизма аварии на плотине Лагуна обращено внимание на наличие у подножия сооружения в створе, в котором произошла авария, высоких деревьев. Была сформулирована гипотеза о том, что высокие деревья могут быть связаны с фильтрационными нарушениями и, соответственно, служить индикатором таких нарушений. Международный опыт обследования насыпных дамб хвостохранилищ позволил подтвердить данную гипотезу. Выявлены два противоположных сценария взаимосвязи нарушения фильтрационных свойств и аномального характера растительности: усиление фильтрующегося потока и обводнение участков ГТС приводит к дополнительному питанию корневой системы растений и интенсификации роста растительности, или наличие фильтрующегося потока приводит к деградации растительного покрова вследствие изменения химического состава воды. Для целей апробации данного индикатора в натурных условиях, а также ответа на вопрос о применимости данного индикатора в неблагоприятных для развития растительного покрова условиях были рассмотрены результаты ежемесячного многолетнего визуального обследования дамбы хвостохранилища Мурманской области. Рассмотренный опыт обследования дамбы хвостохранилища показал, что аномальный характер растительности может эффективно использоваться и в неблагоприятных для растительности условиях, складывающихся на хвостохранилищах горнорудных предприятий, а также в климатических условиях Крайнего Севера. Также было отмечено, что ценной особенностью проявления данного индикатора является возможность обнаруживать фильтрационные нарушения, которые не имеют непосредственного выхода на поверхность.

Ключевые слова: гидротехническое сооружение, дамба, фильтрационные нарушения, аномальная растительность, индикаторы фильтрационных нарушений.

Для цитирования: Максимов Д. А. Аномальный характер растительности как индикатор локальных фильтрационных нарушений в теле насыпных гидротехнических сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 7. – С. 146–156. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_146.

Abnormal vegetation as an indicator of local permeation troubles in bodies of earthfill dams

D.A. Maksimov

Mining Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract: The article addresses a relevant problem connected with finding potential indicators of permeation troubles in bodies of earthfill dams. The analysis of the Laguna dam accident paid attention to the presence of high trees at the bottom of the damsite where the accident took place. It was hypothesized that the high trees could be connected with the permeation troubles and, accordingly, could serve the indicators of such troubles. The international experience of the earthfill dam inspection at tailings ponds proved the hypothesis. Two opposite scenarios of interrelation between permeation troubles and abnormal vegetation are revealed: intensification of flow and watering out of dam areas adds to plant root nutrition and stimulates vegetation growth; or the percolating flow leads to the vegetation cover degradation as a result of change of the chemical composition of water. Furthermore, for testing the found indicator on a full scale, and to determine effectiveness of the indicator in the unfavorable conditions for vegetation, the monthly long-term visual observation data on a dam at a tailings pond in the Murmansk Region were reviewed. The results showed that the abnormal vegetation indicator can be efficiently used both in the unfavorable conditions for vegetation at tailings ponds of the mining industry, and in the climatic conditions of the Extreme North. Moreover, a valuable feature of the indicator is its ability to display permeation troubles without their emergence on ground surface.

Key words: hydraulic structure, dam, permeation troubles, abnormal vegetation, permeation trouble indicator.

For citation: Maksimov D. A. Abnormal vegetation as an indicator of local permeation troubles in bodies of earthfill dams. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(7):146-156. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_146.

Введение

Насыпные гидротехнические сооружения (ГТС) получили широчайшее применение на предприятиях горнорудного профиля: дамбы хвостохранилищ, прудков осветления, накопителей жидких промышленных отходов; плотины, служащие для отведения вод от горных выработок и управления различными водными потоками, и другие. Так, в одном Китае насчитывается более 12 000 дамб хвостохранилищ [1]. В связи с этим надежность таких сооружений играет важную роль в современном мире.

При этом одной из основных причин аварий на насыпных ГТС являются протечки [2–5]. Это обуславливает актуальность проблемы обнаружения фильтрационных нарушений в теле насыпных дамб и плотин, которые могут привести к появлению протечек [6–8]. Чаще все-

го для этих целей используется целый комплекс различных геофизических методов. Однако данные методы кроме значительных преимуществ имеют и ряд недостатков: необходимость дорогостоящего оборудования и высококвалифицированного персонала, высокая стоимость проведения работ, зависимость от установленной контрольно-измерительной аппаратуры и других условий. Недостатки геофизических методов обуславливают, как правило, локальное их применение на заранее выделенных потенциально опасных участках ГТС. Для обследования же сооружения в целом и выделения участков, на которых происходит формирование и развитие локальных фильтрационных нарушений, подходит метод визуальных наблюдений. Однако для эффективного применения

визуального обследования для такого узкоспециализированного вида работ, как обнаружение фильтрационных нарушений, требуется специальная система индикаторов, которые могли бы свидетельствовать о наличии на тех или иных участках сооружения искомых нарушений. В связи с этим актуальной является задача поиска таких индикаторов [9].

Результаты

Для поиска потенциальных индикаторов наличия локальных фильтрационных нарушений рассмотрим схему разрушения плотины Лагуна, представленную на рис. 1. Авария на плотине произошла 31 октября 1969 г.

Как видно из представленной схемы, основной фильтрационный поток проходил под телом плотины в слое водопроницаемого выветренного туфа и базальта. При этом из-за глубокого расположения потока фильтрующейся воды формирование фильтрационного нарушения не проявлялось на поверхности сооружения. О формировании подобного нарушения свидетельствовало только наличие протечек на небольшом удалении от подножия плотины. При этом наблюдалось постепенное увеличение водопритока, что свидетельствовало о развитии нарушения, которое в итоге и привело к разрушению плотины.

При рассмотрении схемы разрушения плотины Лагуна обращает на себя внимание наличие в створе развивающегося нарушения высоких деревьев. При этом подобных деревьев не наблюдалось на соседних участках подножия плотины. Рост высоких деревьев на данном участке объясняется в первую очередь обилием фильтрующейся под ГТС воды, питающей корневую систему. Таким образом, в рассмотренном случае наличие аномально высоких деревьев связано с наличием фильтрационного нарушения. Другими словами, можно сделать вывод о том, что наличие высоких деревьев на данном участке могло служить индикатором наличия фильтрационного нарушения.

Также стоит отметить, что возможность возникновения такой аномальной растительности связана в первую очередь с крайне медленным развитием фильтрационного нарушения. Так, развитие данного нарушения проходило с 1927 г. до момента аварии в 1969 г. Такое продолжительное развитие локальных фильтрационных нарушений является скорее исключением, чем правилом, поэтому возникает вопрос о проявлении какого-либо характера аномальной растительности при отсутствии такого длительного периода времени развития нарушения.

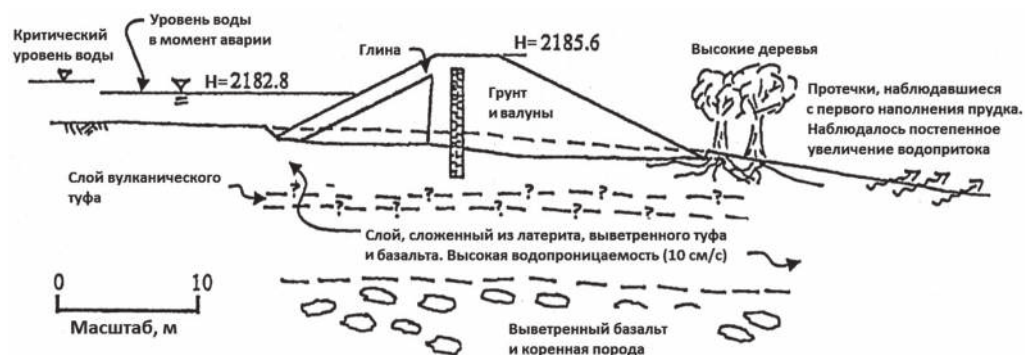


Рис. 1. Плотина Лагуна — интерпретация разрушения створа [10]

Fig. 1. Laguna dam — interpreted section at location of failure [10]

Таким образом, можно сформулировать гипотезу о том, что высокие деревья или другой аномальный характер растительности на поверхности и у подножия насыпных ГТС может указывать на наличие нарушений фильтрационных процессов, другими словами, являться индикатором фильтрационных нарушений. Для подтверждения или опровержения выдвинутой гипотезы проведем, во-первых, анализ литературных источников заданной тематики, а во-вторых, рассмотрим результаты специальных натурных наблюдений на насыпных ГТС горнорудного профиля.

Анализ международного опыта наблюдений на насыпных ГТС горнорудного профиля показывает, что на участках наличия фильтрационных нарушений, которые приводили к выходу фильтрующихся вод на поверхность или увлажнению поверхности ГТС, могут наблюдаться аномалии в растительном покрове. На рис. 2 представлены взаимно противоположные варианты воздействия фильтрующихся вод на растительный покров.

На рис. 2, а приведен пример обводненного участка хвостохранилища рудника Нью-Юнион. На фотоснимке вид-

но развитие растительности в виде отдельных видов трав на обводненном участке сооружения, что не встречалось на других участках сооружения [11]. При этом развитие растительности на данном участке наблюдалось, несмотря на агрессивную среду вод горнорудного предприятия. Таким образом, локальные фильтрационные процессы, выраженные обводнением участка ГТС, привели к более интенсивному развитию растительности на участке дамбы хвостохранилища.

На рис. 2, б представлен обратный пример воздействия локальных фильтрационных процессов на растительный покров: протекание фильтрующейся воды вблизи поверхности может приводить не только к развитию растительного покрова, но и к его деградации. Так, на дамбе хвостохранилища уранового рудника Рам Джангл в Австралии наблюдалась локальная деградация растительного покрова (см. рис. 2, б) [12]. Хвостовые отложения, полученные в результате переработки сульфидных руд, приводили к значительному изменению кислотности фильтрующейся в теле дамбы воды. На участке локального нарушения фильтрационных процессов, сопро-

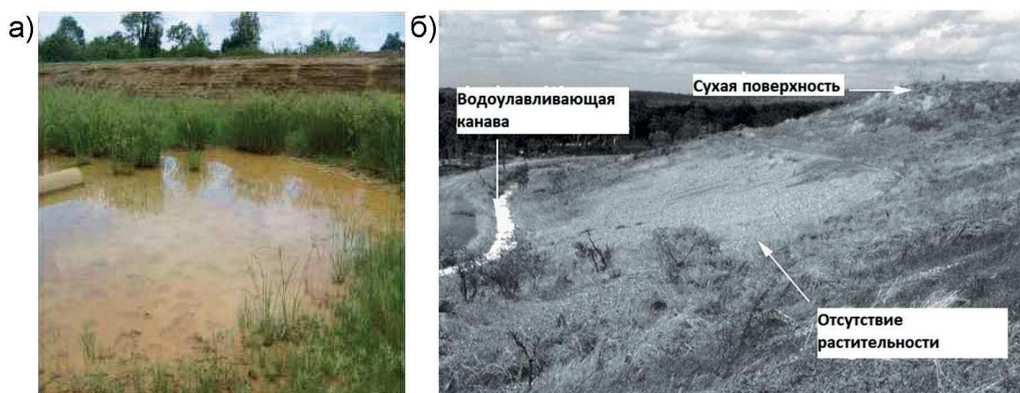


Рис. 2. Участки с аномальным характером растительности: некоторые виды трав, растущие на золотодобывающем руднике Нью-Юнион [11] (а); отвал Уайта, урановый рудник Рам Джангл, Австралия (б) [12]
Fig. 2. Areas with abnormal vegetation patterns: some of the grass species that were found growing at New Union Gold Mine (a); White's waste heap, Rum Jungle uranium mine, Australia (b) [12]

воздавшегося поднятием уровня фильтрующей воды, вода с измененной кислотностью воздействовала на корневую систему растений, приводя к деградации растительного покрова, а затем и к полному его исчезновению. Таким образом, в случае, представленном на рис. 2, б, деградация растительного покрова указывала на локальные нарушения фильтрационных процессов.

Таким образом, очевидно, что международный опыт подтверждает выдвинутую гипотезу об аномальном характере растительности как об индикаторе наличия фильтрационных нарушений на насыпных ГТС. Кроме того, ряд авторов отмечает, что растительность может приводить к негативному воздействию на сооружение и на состояние окружающей среды, вследствие чего аномальное развитие растительности может нести дополнительный риск для сооружения и обуславливает еще большую актуальность рассматриваемого индикатора [13–15].

Помимо подтверждения выдвинутой гипотезы на основании анализа международного опыта, остался немаловажный вопрос об апробации данного индикатора в натурных условиях. Кроме того, интересным представляется и вопрос о применимости данного индикатора в неблагоприятных для развития растительного покрова климатических условиях, таких, например, как условия Крайнего Севера.

Для ответа на поставленные вопросы хорошо подходят результаты многолетнего ежемесячного визуального обследования дамбы хвостохранилища горнорудного предприятия Мурманской области. В качестве метода выполнения работ использовалось наземное визуальное обследование. Стоит отметить, что для мониторинга растительного покрова на насыпных ГТС может использоваться космо- и аэрофотосъемка, однако данные методы требуют дорогостоящей техники, сложны в использовании и не оперативны (требуют значительных за-

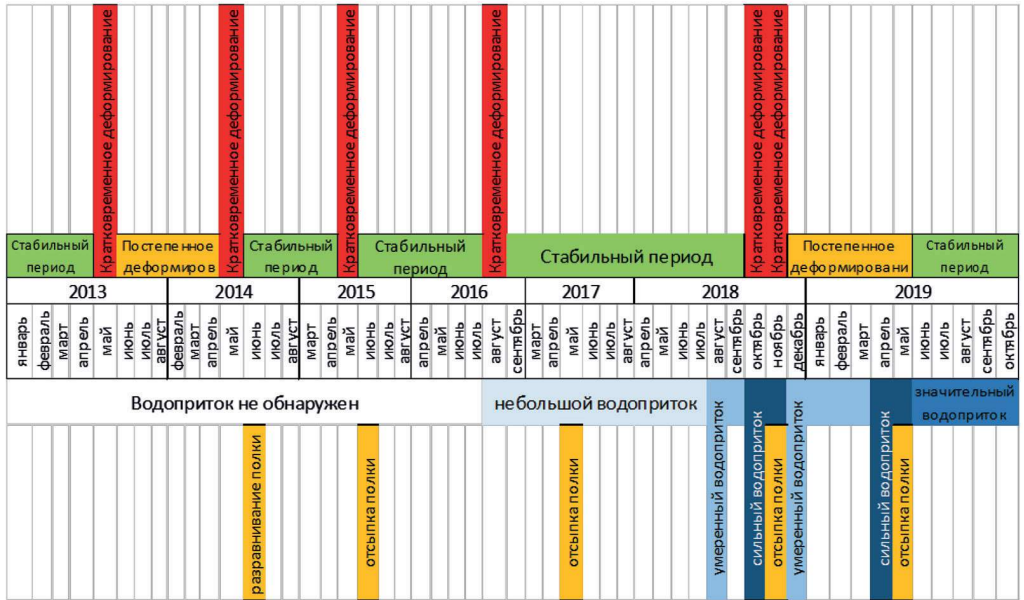


Рис. 3. Временной ряд проявлений фильтрационных и деформационных процессов [20]

Fig. 3. Time series of manifestations of filtration and deformation processes [20]

трат времени) в применении, что делает их использование нецелесообразным для поставленных задач [16 – 19].

Выбранное сооружение является крайне неблагоприятным для развития растительного покрова ввиду своего строения (намывная дамба с дефицитом питательных веществ) и нахождения в суровых климатических условиях Арктики. Кроме того, объект исследования был выбран исходя из имеющейся информации о наличии в его теле нарушений фильтрационных процессов [20, 21]. На рис. 3 представлен временной ряд проявлений на поверхности участка рассматриваемой дамбы хвостохранилища фильтрационных и деформационных процессов [20].

Временной ряд, представленный на рис. 3, объединяет данные многолетних ежемесячных визуальных наблюдений на участке ГТС и демонстрирует развитие локальных нарушений фильтрационных процессов по визуальным индикаторам [20]. Кроме визуального метода обследования, наличие локальных фильтрационных нарушений на выбранном объекте подтверждается и данными многолетнего ежемесячного геофизического обследования [21].

Визуальное обследование с поиском аномального характера растительности позволило выявить ряд подобных явлений. Первый характерный пример наблюдавшегося аномального растительного покрова представлен на рис. 4.

У подножия обследуемого сооружения наблюдался ряд сконцентрированных выходов фильтрующейся воды, один из которых показан на рис. 4 (сплошная линия). В области выхода фильтрующейся воды наблюдалось более интенсивное развитие растительного покрова по сравнению с остальными участками сооружения. Исходя из совпадения в локализации и геометрии наблюдавшихся протечек и аномальной растительности, можно рассматривать данный пример как подтверждение выдвинутой гипотезы. Другими словами, в рассмотренном случае аномальная растительность являлась индикатором наличия локального фильтрационного нарушения.

Также стоит отметить, что данный индикатор приобретает особенное значение, если прямая идентификация выхода фильтрующейся воды на поверхность невозможна по ряду причин, например, из-за невозможности подойти достаточ-

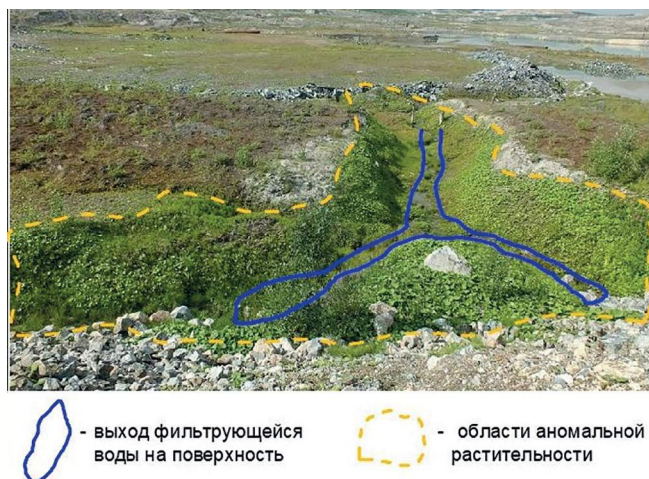


Рис. 4. Участок аномальной растительности у подножия дамбы хвостохранилища (июль 2019)

Fig. 4. An area of anomalous vegetation at the foot of the tailings dam (July 2019)

но близко к исследуемому участку, небольшого количества инфильтрующейся воды или наличия скрывающей выход воды скальной наброски.

Однако наибольшее значение аномальный характер растительности может приобретать в случаях, когда сформировавшиеся локальные фильтрационные потоки не имеют прямого выхода на поверхность и могут быть обнаружены только по косвенным признакам.

На рис. 5 представлен фотоснимок участка нижней полки рассматриваемой дамбы хвостохранилища. На этом участке не наблюдалось выходов фильтрующихся вод на поверхность сооружения. Прямое наблюдение выхода фильтрующихся вод, при его наличии, у подножия сооружения на данном участке также невозможно из-за укрепления откоса скальной наброской и имеющегося небольшого прудка. Однако на представленном фотоснимке видно, что на выделенном участке ГТС наблюдались другие индикаторы наличия локальных фильтрационных процессов. Так, штриховой линией выделена область аномальной растительности, которая имеет линейно протяженную структуру, начинаясь у под-

ножия вышележащего уступа дамбы и заканчиваясь в области деформации, выделенной штрихпунктирной линией. В выделенной области деформации на протяжении ряда лет наблюдалось проседание поверхности полки дамбы, которое устранялось засыпкой скальным материалом. В результате дамба на данном участке имеет сниженные противофильтрационные свойства.

В результате анализа был сделан вывод о том, что на участке, представленном на рис. 5, развивается локальное фильтрационное нарушение, в результате чего в теле сооружения на данном участке сформировался аномальный фильтрационный поток. Данный фильтрационный поток не имеет выхода на поверхность, однако привел к увлажнению материала сооружения и питанию корней растений, результатом чего стало развитие растительности над данным фильтрационным потоком на нижней полке сооружения. Далее этот поток, проходя под областью, на которой развилась аномальная растительность, инфильтруется в область деформации, обладающую сниженными противофильтрационными свойствами, и соединяется с пруд-

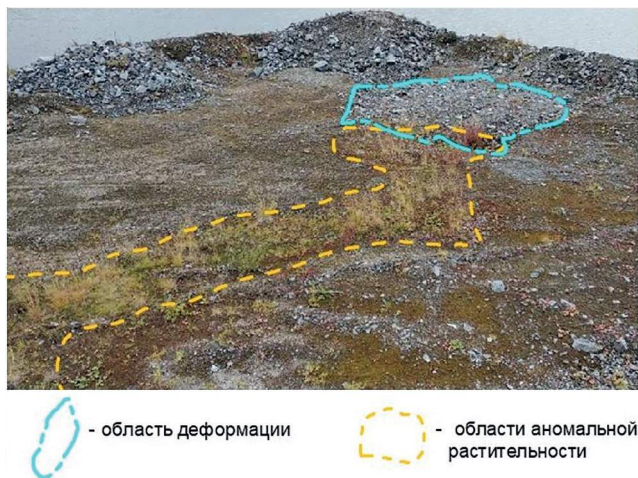


Рис. 5. Участок аномальной растительности на полке нижнего бьефа дамбы (сентябрь 2021)

Fig. 5. An area of anomalous vegetation on the shelf of the dam's tailwater (September 2021)

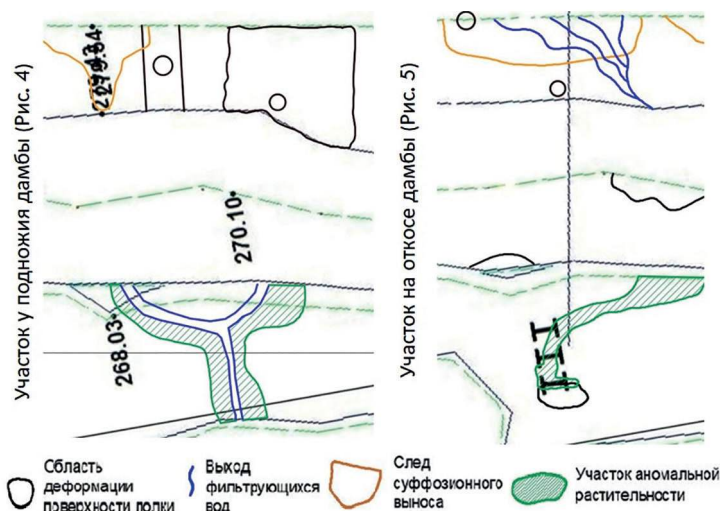


Рис. 6. Схема участков дамбы с аномальной растительностью

Fig. 6. Scheme of dam sections with anomalous vegetation

ком, находящимся у подножия сооружения.

В качестве дополнительного подтверждения наличия на участках с аномальной растительностью фильтрационных нарушений на рис. 6 приведены выделенные участки дамбы с нанесенными на них результатами визуального наблюдения.

Из рисунка видно, что в створах дамбы с аномальной растительностью наблюдаются и другие индикаторы наличия фильтрационных нарушений: выходы фильтрующихся вод, следы суффозионного выноса материала сооружения и области деформирования поверхности сооружения.

Таким образом, из представленных примеров можно сделать вывод, что аномальный характер растительности действительно может использоваться как индикатор наличия фильтрационных нарушений, приводящих к формированию локальных фильтрационных потоков. При этом, даже в отсутствие выхода фильтрующихся вод на поверхность сооружения или у его подножия, наличие фильтрационного потока может приво-

дить к изменению растительности, наблюдающейся на поверхности сооружения.

Кроме того, опыт обследования ГТС в натурных условиях показал, что идентификация локальных фильтрационных процессов по аномальному характеру растительного покрова осложнялась условиями неблагоприятного арктического климата, в том числе длительным периодом наличия снежного покрова, а также условиями дамб хвостохранилища горнорудного предприятия. Однако, несмотря на неблагоприятные условия, такая идентификация все же оказалась возможна и в достаточной мере эффективна, особенно в период лета и начала осени: в рассматриваемом регионе — с июня по сентябрь.

Закключение

Подводя итог, можно сказать, что рассмотренные случаи нарушения фильтрационных процессов на насыпных ГТС приводили к ряду аномалий в наблюдаемой растительности: рост аномально высоких деревьев, интенсификация или деградация растительного покрова.

В связи с этим аномальный характер растительности мог использоваться как индикатор наличия локальных нарушений фильтрационных процессов в теле насыпных ГТС.

Также эффективность использования данного индикатора подтверждается результатами ежемесячного многолетнего визуального обследования дамбы хвостохранилища Мурманской области, на которой ранние исследования позволили выявить рассматриваемые фильтрационные нарушения.

Рассмотренные в статье примеры показывают, что визуально наблюдаемая аномальная растительность тесно связана с фильтрационными потоками в те-

ле сооружения и может использоваться как индикатор наличия нарушений фильтрационных потоков в теле насыпных ГТС. При этом данный индикатор может проявляться и в случаях, когда непосредственный выход фильтрующейся воды на поверхность отсутствует.

Кроме того, рассмотренный пример дамбы хвостохранилища Мурманской области показывает, что аномальный характер растительности может эффективно использоваться и в неблагоприятных для растительности условиях, формирующихся на хвостохранилищах горнорудных предприятий, а также в климатических условиях Крайнего Севера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chen F., Yao Q., Tian J.* Review of ecological restoration technology for mine tailings in China // *Engineering Review*. 2016, vol. 36, no. 2, pp. 115 – 121.
2. *Evaluation and monitoring of seepage and internal erosion.* Interagency Committee on Dam Safety. Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2015, 576 p.
3. *Ma W., Zhang G., Yang Y., Wang P., Zhao Y., Lin Q.* The piping failure mechanism of a loess dam: The 2021 dam break of the Yang Village reservoir in China // *Frontiers in Earth Science*. 2022, vol. 10, pp. 1 – 10. DOI: 10.3389/feart.2022.892179.
4. *Piciullo L., Storrøsten E. B., Liu Z., Nadim F., Lacasse S.* A new look at the statistics of tailings dam failures // *Engineering Geology*. 2022, vol. 303, pp. 1 – 15. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106657.
5. *Roche C., Thygesen K., Baker E. et al.* Mine tailings storage: safety is no accident. A UNEP rapid response assessment. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal, Nairobi and Arendal, 2017, 70 p.
6. *Калашник А. И.* Комплексные исследования и мониторинг хвостохранилищ горнопромышленных предприятий Кольского региона // *Горный журнал*. – 2020. – № 9. – С. 101 – 106. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.15.
7. *Калашник А. И., Калашник Н. А., Запорожец Д. В.* Исследование состояния насыпного гидротехнического сооружения на моренном основании // *Ученые записки ПетрГУ. Серия: Естественные и технические науки*. – 2014. – № 6 (143). – С. 92 – 98.
8. *Мельников Н. Н., Калашник А. И., Калашник Н. А., Запорожец Д. В.* Комплексная многоуровневая система геомониторинга природно-технических объектов горнодобывающих комплексов // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2018. – Т. 54. – № 4. – С. 3 – 10. DOI: 10.15372/FTPRPI20180401.
9. *Максимов Д. А.* Индикаторы наличия в теле насыпного гидротехнического сооружения локальных нарушений фильтрационной устойчивости // *Проблемы недропользования*. – 2018. – № 2 (17). – С. 98 – 105. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.02.098.
10. *Marsal R. J., Pohlentz W.* The failure of Laguna dam // *Performance of Earth and Earth-Supported Structures*, ASCE. 1972, vol. 1, pp. 489 – 505.
11. *Mulugisi G., Gumbo J. R., Dacosta F. A., Muzerengi C.* The use of indigenous grass species as part of rehabilitation of mine tailings: A case study of New Union Gold Mine / *Proceedings of the International Mine Water Conference International Mine Water*, 2009, pp. 1 – 8.

12. Bernd G. L. Mine wastes. Characterization, treatment, environmental impacts. Springer, 2007, 315 p.
13. Bahn G.-S., Kim S.-Y., Choi J.-Y. Comparative study on flora characteristics and species diversity on dam slopes for sustainable ecological management: Cases of Eight Dams in Korea // *Land*. 2021, vol. 10, no. 12, article 1403. DOI: 10.3390/land10121403.
14. Suhatri M., Osman N., Azura Sari P., Shariati M., Marto A. Significance of surface eco-protection techniques for cohesive soils slope in Selangor, Malaysia // *Geotechnical and Geological Engineering*. 2019, vol. 37, pp. 2007 – 2014. DOI: 10.1007/s10706-018-0740-3.
15. Punetha P., Samanta M., Sarkar S. Bioengineering as an effective and ecofriendly soil slope stabilization method: A review // *Landslides: Theory, Practice and Modelling*. 2019, vol. 1, pp. 201 – 224. DOI: 10.1007/978-3-319-77377-3_10.
16. Leite D. H., Marcelino J. Application of drones and oss for mapping and visual inspection of embankment dams / Fourth International DAM WORLD Conference. 2020, vol. 1, pp. 1 – 13.
17. Martins W. B. R., Lima M. D. R., Barros U. O., Amorim L. S. V.-B., Oliveira F., Schwartz G. Ecological methods and indicators for recovering and monitoring ecosystems after mining: A global literature review // *Ecological Engineering*. 2020, vol. 145, pp. 1 – 11. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.105707.
18. Mesyats S. P., Ostapenko S. P. A satellite data driven study of the relief impact on the assessment of the vegetable cover created to suppress the wind and water erosion of stored ore processing waste / 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020, Albena. 2020, pp. 11 – 18. DOI: 10.5593/sgem2020/5.1/s20.002.
19. Mesyats S. P., Ostapenko S. P. Perspective of using satellite observing data to monitor the grass sod state while conserving stockpiled ore processing wastes / 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019, Albena. 2019, pp. 533 – 540. DOI: 10.5593/sgem2019/5.1/s20.067.
20. Максимов Д. А. Динамика деформационных и фильтрационных процессов на участке насыпного гидротехнического сооружения по данным визуального мониторинга // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2021. — № 10. — С. 80 – 89. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_80.
21. Максимов Д. А., Дьяков А. Ю. Мониторинг локальных нарушений фильтрационных процессов в дамбах хвостохранилищ горнорудных предприятий комплексом геофизических и визуальных методов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2021. — № 8. — С. 154 – 163. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_154. **ПЛАЭ**

REFERENCES

1. Chen F., Yao Q., Tian J. Review of ecological restoration technology for mine tailings in China. *Engineering Review*. 2016, vol. 36, no. 2, pp. 115 – 121.
2. *Evaluation and monitoring of seepage and internal erosion*. Interagency Committee on Dam Safety. Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2015, 576 p.
3. Ma W., Zhang G., Yang Y., Wang P., Zhao Y., Lin Q. The piping failure mechanism of a loess dam: The 2021 dam break of the Yang Village reservoir in China. *Frontiers in Earth Science*. 2022, vol. 10, pp. 1 – 10. DOI: 10.3389/feart.2022.892179.
4. Piciullo L., Storrøsten E. B., Liu Z., Nadim F., Lacasse S. A new look at the statistics of tailings dam failures. *Engineering Geology*. 2022, vol. 303, pp. 1 – 15. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106657.
5. Roche C., Thygesen K., Baker E. et al. Mine tailings storage: safety is no accident. A UNEP rapid response assessment. *United Nations Environment Programme and GRID-Arendal, Nairobi and Arendal*, 2017, 70 p.
6. Kalashnik A. I. Integrated research and monitoring of mine tailings on the Kola Peninsula. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 9, pp. 101 – 106. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.15.
7. Kalashnik A. I., Kalashnik N. A., Zaporozhets D. V. Evaluation of bulk earth structure on morainic foundation. *Proceedings of Petrozavodsk state university. Natural & engineering sciences*. 2014, no. 6 (143), pp. 92 – 98. [In Russ].
8. Mel'nikov N. N., Kalashnik A. I., Kalashnik N. A., Zaporozhets D. V. Integrated multi-level geomonitoring of natural-and-technical objects in the mining industry. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2018, vol. 54, no. 4, pp. 3 – 10. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI.20180401.

9. Maksimov D. A. Indicators for the presence of local filtration stability disturbances in the made ground hydrotechnical facility body. *Problems of Subsoil Use*. 2018, no. 2 (17), pp. 98 – 105. [In Russ]. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.02.098.
10. Marsal R. J., Pohlentz W. The failure of Laguna dam. *Performance of Earth and Earth-Supported Structures*, ASCE. 1972, vol. 1, pp. 489 – 505.
11. Mulugisi G., Gumbo J. R., Dacosta F. A., Muzerengi C. The use of indigenous grass species as part of rehabilitation of mine tailings: A case study of New Union Gold Mine. *Proceedings of the International Mine Water Conference International Mine Water*, 2009, pp. 1 – 8.
12. Bernd G. L. *Mine wastes. Characterization, treatment, environmental impacts*. Springer, 2007, 315 p.
13. Bahn G.-S., Kim S.-Y., Choi J.-Y. Comparative study on flora characteristics and species diversity on dam slopes for sustainable ecological management: Cases of Eight Dams in Korea. *Land*. 2021, vol. 10, no. 12, article 1403. DOI: 10.3390/land10121403.
14. Suhatrik M., Osman N., Azura Sari P., Shariati M., Marto A. Significance of surface eco-protection techniques for cohesive soils slope in Selangor, Malaysia. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2019, vol. 37, pp. 2007 – 2014. DOI: 10.1007/s10706-018-0740-3.
15. Punetha P., Samanta M., Sarkar S. Bioengineering as an effective and ecofriendly soil slope stabilization method: A review. *Landslides: Theory, Practice and Modelling*. 2019, vol. 1, pp. 201 – 224. DOI: 10.1007/978-3-319-77377-3_10.
16. Leite D. H., Marcelino J. Application of drones and oss for mapping and visual inspection of embankment dams. *Fourth International DAM WORLD Conference*. 2020, vol. 1, pp. 1 – 13.
17. Martins W. B. R., Lima M. D. R., Barros U. O., Amorim L. S. V.-B., Oliveira F., Schwartz G. Ecological methods and indicators for recovering and monitoring ecosystems after mining: A global literature review. *Ecological Engineering*. 2020, vol. 145, pp. 1 – 11. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.105707.
18. Mesyats S. P., Ostapenko S. P. A satellite data driven study of the relief impact on the assessment of the vegetable cover created to suppress the wind and water erosion of stored ore processing waste. *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020*, Albena. 2020, pp. 11 – 18. DOI: 10.5593/sgem2020/5.1/s20.002.
19. Mesyats S. P., Ostapenko S. P. Perspective of using satellite observing data to monitor the grass sod state while conserving stockpiled ore processing wastes. *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019*, Albena. 2019, pp. 533 – 540. DOI: 10.5593/sgem2019/5.1/S20.067.
20. Maksimov D. A. Dynamics of deformation and seepage in rockfill hydrotechnical facility by visual monitoring data. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 10, pp. 80 – 89. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_80.
21. Maksimov D. A., Dyakov A. Yu. Monitoring of local permeation abnormalities in mine tailings dams using geophysical and visual observation methods. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 8, pp. 154 – 163. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_154.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Максимов Дмитрий Анатольевич — научный сотрудник,
Горный институт Кольского научного центра РАН,
ORCID ID: 0000-0002-6772-6776.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

D.A. Maksimov, Researcher, Mining Institute,
Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences,
184209, Apatity, Russia, ORCID ID: 0000-0002-6772-6776.

Получена редакцией 13.12.2022; получена после рецензии 12.09.2024; принята к печати 10.06.2025.
Received by the editors 13.12.2022; received after the review 12.09.2024; accepted for printing 10.06.2025.



АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ГОРНО- ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА

Р.В. Ключев

Московский политехнический университет, Москва, Россия,
e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Аннотация: Данное исследование посвящено анализу энергоэффективности Урупского горно-обогатительного комбината – крупного предприятия по добыче и переработке медно-колчеданной руды на Северном Кавказе. Обоснована актуальность работы, связанная с необходимостью оптимизации электропотребления в условиях роста экологических требований и повышения энергоэффективности. Основное внимание уделено ключевым показателям: удельному расходу электроэнергии, 30-минутной активной мощности и уровню потерь в электросетях. Объектом исследования стали технологические процессы рудника и обогатительной фабрики. Цель работы – разработка методики расчета и прогнозирования энергопотребления для повышения эффективности производства. В работе применены вероятностно-статистические методы, включая регрессионно-корреляционный анализ данных за несколько лет. Основные результаты включают: выявление значительного несоответствия между фактическими и расчетными показателями использования оборудования (коэффициенты $k_w = 0,2–0,52$ при норме $0,5–0,8$); разработку методики расчета энергопотребления с использованием статистических выборок; прогнозирование 30-минутной активной мощности различными методами (метод наименьших квадратов, метод коэффициентов темпов роста, метод Холта). Полученные данные свидетельствуют о наличии 4–5-кратного резерва производительности оборудования. Перспективы дальнейших исследований связаны с внедрением систем мониторинга энергопотребления и технологических параметров в режиме реального времени и разработкой цифровых моделей технологических процессов для более точного прогнозирования. Полученные результаты демонстрируют значительный потенциал оптимизации энергопотребления. Реализация предложенных мер позволит не только снизить затраты на электроэнергию, но и повысить общую эффективность производства.

Ключевые слова: горно-обогатительный комбинат, электропотребление, регрессионный анализ, добыча и переработка руды, дробильное отделение, коэффициент использования электроэнергии, электродвигатель.

Для цитирования: Ключев Р. В. Анализ энергоэффективности и оптимальных режимов работы оборудования горно-обогатительного комбината // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 7. – С. 157–169. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_157.

Energy efficiency and optimum performance of mining and processing plants and equipment

R.V. Klyuev

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Abstract: This study analyzes energy efficiency of the Urup Mining and Processing Plant—a large copper pyrite ore producer in the North Caucasus. The relevance of the study is due to the required optimization of energy consumption at the higher ecological standards and improved energy efficiency. Spotlight is on the key indicators: specific energy consumption, 30 min wattage and supply line loss. The subject of research are the production processes in the mine and at the processing factory. The aim of the study is to develop an energy consumption prediction and calculation procedure to enhance production efficiency. The study used the statistical and probabilistic methods, including the correlation and regression analyses of data for a few years. The main results are: a great disagreement between the actual and calculated indexes of equipment utilization (coefficients $kW=0.2-0.52$ at the standard of $0.5-0.8$); the energy consumption procedure using statistical samplings; prediction of 30 min wattage using various methods (least squares, growth rates, Holt's method). The results are reflective of the 4–5-fold idle capacity of equipment. The further research should be connected with the introduction of a monitoring system for energy consumption and process variables in real time, and with the digital model of process flows toward more accurate prediction. The research findings demonstrate a high optimization potential of energy consumption. The implementation of the proposed measures can both help reduce electricity expenses and enhance overall efficiency of production.

Key words: mining and processing plant, energy consumption, regression analysis, ore mining and processing, crushing workshop, energy utilization indexes, electric motor.

For citation: Klyuev R. V. Energy efficiency and optimum performance of mining and processing plants and equipment. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(7):157-169. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_157.

Введение

Современное промышленное производство требует постоянного повышения эффективности использования электроэнергии. Это связано не только с экономическими преимуществами, но и с необходимостью снижения энергопотребления в условиях растущих экологических требований. Ключевыми показателями энергоэффективности для горных предприятий являются: удельный расход электроэнергии на единицу продукции; расчетная 30-минутная активная мощность; уровень потерь электроэнергии в системах электроснабжения пред-

приятия [1, 2]. Для управления этими показателями необходимо внедрение систем краткосрочного прогнозирования. Выбор модели прогнозирования зависит от доступных выборок исходных данных и требуемой точности [3, 4]. Научно обоснованное нормирование потребления энергии, прогнозирование нагрузок и минимизация потерь позволяют не только снизить себестоимость продукции, но и повысить общую производительность предприятия [5, 6].

В условиях роста производства и увеличения энергопотребления вопросы энергоэффективности становятся кри-

тически важными. Снижение энергоемкости и оптимизация использования ресурсов способствуют не только экономии затрат, но и устойчивому развитию промышленности в долгосрочной перспективе.

Повышение энергоэффективности промышленных предприятий — это комплексный процесс, требующий внедрения современных технологий, оптимизации процессов и использования инновационных методов управления [7, 8]. В долгосрочной перспективе эти меры не только снижают затраты, но и способствуют устойчивому развитию промышленного комплекса и минимизации воздействия на окружающую среду.

Объект исследования

Урупский горно-обогатительный комбинат (ГОК) является одним из крупнейших на Северном Кавказе предприятий по добыче и обогащению медно-колчеданной руды, расположенной в КЧР. Основными подразделениями Урупского ГОКа являются рудник подземных горных работ и обогатительная фабрика (ОФ). Объектом исследования являются показатели работы рудника и ОФ Урупского ГОКа.

Краткая характеристика объекта исследования

На руднике ГОКа осуществляется добыча медной и пиритовой руды. Транспортировка руды от рудника до ОФ осуществляется автомобильным транспортом. Технологический процесс добычи руды состоит из операций бурения, взрывания, проветривания, погрузки и доставки руды из очистных забоев, электровозной откатки руды к стволу и выдачи ее на поверхность. Добытая руда поступает в бункер корпуса крупного и среднего дробления, после которого попадает на дробилки мелкого дробления, а затем в главный корпус ОФ, в котором

производится измельчение руды в мельницах типа МШР, МШП, работающих в замкнутом цикле с двухспиральными классификаторами. Обогащение руды происходит во флотационных машинах типа ФНР. После сгущения и фильтрации концентрат подвергается сушке, а затем поступает на склад готовой продукции. На ОФ производится два вида концентрата: медный и пиритный.

Электроснабжение Урупского рудника осуществляется от распределительного устройства (РУ) 35 кВ по двухцепной воздушной ЛЭП. На промышленной площадке рудника располагается главная понизительная подстанция (ГПП) 35/6 кВ, от которой осуществляется электроснабжение всех потребителей рудника.

Для Урупского ГОКа, где процессы добычи и обогащения руды требуют значительных энергетических ресурсов, оптимизация использования электроэнергии может стать ключевым фактором повышения конкурентоспособности.

Методы исследования

Применяются вероятностно-статистические методы исследования с использованием регрессионно-корреляционного анализа [9, 10]. Достоверность исследований обусловлена представительными статистическими выборками за период ряда лет, включающими в себя следующие величины:

- $\{W\}$ — выборка данных суточного (месячного) расхода электроэнергии по руднику и ОФ, кВт·ч;
- $\{Q\}$ — выборка данных суточной (месячной) добычи и переработки руды, т;
- $\{\omega\}$ — выборка удельного расхода электроэнергии, полученная по выборкам $\{W\}$, $\{Q\}$ путем расчета: $\omega_i = W_i / Q_i$, кВт·ч/т;
- $\{P_{60}\}$ — выборка максимальных значений часовой (60-минутной) потреб-

ляемой активной мощности Урупского ГОКа в часы максимума энергосистемы из графиков нагрузки режимных дней, кВт.

Результаты работы включают выводы и рекомендации по расчету и прогнозированию следующих показателей эффективности использования электроэнергии по Урупскому ГОКу:

- удельной нормы расхода электроэнергии по руднику, по ОФ в целом и ее основным технологическим линиям: дробильному отделению, главному корпусу, фильтровально-сушильному отделению (ФСО), хвостовому хозяйству;

- максимальной расчетной (заявляемой) 30-минутной активной мощности по Урупскому ГОКу.

Экономическая эффективность работы определяется снижением удельного расхода электроэнергии по ОФ за счет внедрения рекомендаций по повышению загрузки основного технологического оборудования, снижения величины заявляемой 30-минутной активной мощности за счет использования части электродвигателей в качестве потребителей-регуляторов (ПР) в часы максимума нагрузки энергосистемы.

Методика определения энергетических характеристик технологического оборудования горно-обогатительного комбината

Анализ энергопотребления технологических линий осуществляется на основе оценки рабочих параметров основного оборудования [11, 12]. Ключевыми характеристиками для расчетов являются: паспортные и фактические значения мощности электроприводов (кВт); годовое время использования максимальной нагрузки (T_m) и потерь (τ_m) в часах; коэффициент использования электроэнергии (k_w); коэффициент загрузки оборудования по производительности (k_Q).

Методика предполагает расчет коэффициентов k_w и k_Q .

1. Формула для расчета k_w :

$$k_w = W_{г.ф} / W_{г.р}, \quad (1)$$

где $W_{г.ф}$ и $W_{г.р}$ — фактическое и расчетное годовое электропотребление.

2. Формула для расчета k_Q :

$$k_Q = Q_{м.ф} / Q_{м.р}, \quad (2)$$

где $Q_{м.ф}$ и $Q_{м.р}$ — фактическая и расчетная месячная производительность.

Расчетные значения энергетических характеристик определялись проверочным расчетом с использованием известных выражений и справочных данных, характеризующих режим работы основных потребителей электроэнергии на ОФ [13, 14]. Фактические характеристики рассчитывались по статистическим данным, полученным на ОФ.

Проверочные расчеты показали, что установленные мощности электродвигателей в дробильном и измельчительном отделениях в основном соответствуют проектным значениям. Исключение составляет привод дробилки КМД-2200-00 (номинальная мощность 320 кВт), где выявлен избыток мощности. Для оптимизации рекомендуется установка двигателя 250 кВт.

Рассмотрим методику на примере щековой дробилки с электродвигателем АК-103-8 (100 кВт):

1. Определение доли мощности в общей системе:

$$a = \frac{P_n}{P_{н\Sigma}}, \quad (3)$$

где P_n , $P_{н\Sigma}$ — значения номинальных мощностей для отдельного двигателя и в целом по подразделению, кВт; $P_{н\Sigma} = 1100$ кВт; $a = 100/1100 = 0,091$.

2. Расчет годового электропотребления:

$$W_{г.р} = P_n \cdot T_m, \quad (4)$$

где T_m — время использования максимума нагрузки; $T_m = 3500$ ч; $W_{г.р} = 100 \cdot 3500 = 350\,000$ кВт·ч.

3. Фактическое время использования нагрузки:

$$T_{м.ф} = W_{г.ф} / P_{ф}, \quad (5)$$

где $W_{г.ф}$ — годовое потребление электроэнергии электродвигателями; $P_{ф}$ — фактическая мощность электродвигателя щековой дробилки, кВт; $P_{ф} = 80$ кВт.

$$W_{г.ф} = a \cdot W_{г.ф\Sigma}, \quad (6)$$

где $W_{г.ф\Sigma}$ — суммарное годовое потребление электроэнергии электродвигателями отделения дробления;

$$W_{г.ф\Sigma} = 1\,058\,070 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

$$W_{г.ф} = 103\,691 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

$$T_{м.ф} = 103\,691 / 80 = 1296 \text{ ч}.$$

4. Расчет времени потерь: для $T_{м} = 3500$ ч; $\tau_{м} \approx 2500$ ч; для $T_{м.ф} = 1296$ ч: $\tau_{м.ф} \approx 587$ ч.

5. Коэффициент использования по времени:

$$k_T = T_{м.ф} / T_{м}, \quad (7)$$

$$k_T = 1296 / 3500 = 0,37.$$

6. Коэффициент электроиспользования:

$$k_W = 103\,691 / 350\,000 = 0,297.$$

Низкое значение k_W (при норме 0,6 — 0,7) объясняется неравномерной подачей руды и неполной загрузкой оборудования.

7. Коэффициент загрузки по производительности:

$$Q_{м.ф} = Q_{г.ф} / 12, \quad (8)$$

где $Q_{г.ф}$ — переработанная руда, т/год; $Q_{г.ф} = 476\,783$ т.

Количество переработанной руды в дробильном подразделении, т/мес:

$$Q_{м.р} = Q_{др} \cdot 24 \cdot T_{м}, \quad (9)$$

где $Q_{др}$ — паспортная производительность; $Q_{др} = 234$ т/ч; $T_{м}$ — месячное количество рабочих дней; $T_{м} = 30$ ч.

$$Q_{м.р} = 234 \cdot 24 \cdot 30 = 168\,480 \text{ т/мес}.$$

Откуда:

$$k_Q = 476\,783 / 12 \cdot 168\,480 = 0,24.$$

С учетом коэффициента запаса ($k \approx 0,8$) для оптимальной загрузки требуется следующее значение годового объема переработки:

$$Q_{г.необх} = Q_{г.ф} / k_Q k_z, \quad (10)$$

$$Q_{г.необх} = 2\,484\,000 \text{ т/год}.$$

Аналогичные расчеты выполняются для всего технологического оборудования фабрики. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Фактические значения $T_{м}$, $\tau_{м}$, k_W , k_Q значительно ниже расчетных величин, что указывает на возможность и необходимость интенсификации использования установленного технологического оборудования. Фабрика может выступать как «потребитель-регулятор» с коэффициентом регулирования $k_p = 2 - 5$. Увеличение добычи руды и повышение равномерности поступления руды на ОФ приводит к увеличению $T_{м}$, выравниванию суточного графика нагрузки в целом по ГОКу. Это приводит к улучшению показателей использования электроэнергии. К рекомендациям по оптимизации электропотребления можно отнести:

- технические мероприятия: внедрение системы мониторинга нагрузки оборудования в реальном времени [15]; оптимизация режимов работы дробильного и измельчительного оборудования; модернизация транспортирующих механизмов;

- организационные меры: синхронизация графиков добычи и переработки руды; внедрение тарифного регулирования с учетом коэффициента k_p ; обучение персонала энергоэффективным методам работы;

- экономический эффект: при текущем объеме переработки 476 783 т/год

Таблица 1

Результаты расчета коэффициентов k_w и k_Q
Results of calculation of coefficients k_w and k_Q

№ п/п	Наименование отделения, механизма (группы механизмов)	P_n , кВт	$P_{0,8} P_{0,9} P_{0,95}$, кВт	T_m , ч	$T_{m,ф}$, ч	τ_m , ч	$\tau_{m,ф}$, ч	k_n (по спра- вочным данным)	k_t	k_w	k_Q
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Дробильное отделение											
1	Щековая дробилка	100	80	4000	1296	2776	587	0,6	0,32	0,26	0,24
2	Конусная дробилка КСД 22006	250	200	4000	1291	2776	587	0,6÷0,7	0,32	0,26	0,24
3	Конусная дробилка КСД 2200-600	320	256	5300	1293	3746	507	0,5÷0,6	0,24	0,2	0,24
4	Механизмы непре- рывного транспорта	315	252	5300	1293	3746	507	0,5÷0,6	0,24	0,2	0,24
5	Прочие потребители	39	31,2	5300	1288	3746	507	0,5÷0,7	0,24	0,2	0,24
Главный корпус											
1	Мельницы МШР 3200×3100	1200	960	7000	4587	5956	3259	0,8	0,62	0,52	0,2
2	Мельницы МШЦ 2700×3600	760	608	7000	4603	5956	3260	0,8	0,65	0,52	0,2
3	Флотомшины ФМР-25	178	142	7000	4651	5956	3303	0,9	0,67	0,53	0,2
4	Механизмы непре- рывного транспорта	130	104	7000	4687	5956	3364	0,5÷0,6	0,67	0,54	0,2
5	Насосы	1632	1354	7000	4611	5956	3267	0,7÷0,9	0,66	0,53	0,2
6	Прочие потребители	300	240	7000	4587	5956	3259	0,4÷0,7	0,65	0,52	0,2
Фильтровально-сушильное отделение											
1	Вакуум-насосы, насосы воздуходувки	705	564	5300	2327	3746	1423	0,7÷0,9	0,44	0,35	0,2
2	Сгустители, сушиль- ные барабаны	105	84	5300	2332	3746	1429	0,6÷0,7	0,44	0,35	0,2
3	Механизмы непре- рывного транспорта	196	156	5300	2336	3746	1428	0,5÷0,6	0,44	0,35	0,2
4	Прочие потребители	45	36	5300	2394	3746	1471	0,5÷0,7	0,45	0,36	0,2
Хвостовое хозяйство											
1	Насосы	194	155	5300	2855	3746	1848	0,8÷0,9	0,54	0,43	0,2
2	Прочие потребители	67	54	5300	2880	3746	1857	0,5÷0,7	0,54	0,44	0,2

возможно снижение затрат на электроэнергию до 15–20%; дополнительный эффект может быть получен за счет снижения пиковых нагрузок; оптимизации тарифной политики; улучшения качества руды, использования методов искусственного интеллекта [16, 17], повышения надежности отдельных элементов [18, 19].

Расчет и прогнозирование 30-минутной активной мощности Урупского ГОКа

Актуальная задача сбережения топливно-энергетических ресурсов тесно связана с вопросами расчета и прогнозирования максимальной 30-минутной активной мощности P_{30} промышленных предприятий в часы максимума нагрузки энергосистемы. При этом появляется возможность более точно планировать баланс и необходимый резерв активной мощности в энергосистеме, более обоснованно распределять лимиты мощности энергосистемы между потребителями электроэнергии [20, 21]. В свою очередь, предприятия заинтересованы в заявке научно обоснованной величины P_{30} , поскольку она влияет на себестоимость продукции. Так, завышение P_{30} приводит к постоянной переплате за недоиспользуемый максимум нагрузки, а заниженное значение P_{30} может привести к штрафным санкциям. Разработанная методика расчета оптимальной величины $P_{30\text{опт}}$ для Урупского ГОКа неприменима, так как статистика максимальных нагрузок недостаточно репрезентативна. Она представлена временным рядом часовых нагрузок P_{60} за период 5 лет ($N = 5$) по графикам нагрузки режимных дней.

Максимальные значения P_{60} выбраны в часы утреннего и вечернего максимума нагрузки энергосистемы (зима — лето). В качестве расчетного принимается максимальное значение P_{30} , полу-

ченное из графиков нагрузки P_{60} путем пересчета:

$$P_{30} = \frac{P_{60}}{0,5} = 2 \cdot P_{60}, \text{ кВт.} \quad (11)$$

Методика краткосрочного прогнозирования P_{30} на соответствующий период последующего года предусматривает выполнение ряда операций в определенной последовательности. По методике:

1) проводится проверка гипотезы о наличии тренда во временном ряду P_{30} и предварительная оценка формы кривой тренда по критериям Вальда–Вальфовитца, Стьюдента, Фостера–Стюарта;

2) предварительная обработка временного ряда ведется в два этапа: сглаживание ряда по скользящей кривой и определение средних приростов;

3) прогнозирование проводится с использованием следующих методов:

а) метод коэффициентов темпов роста (МКТР);

б) метод наименьших квадратов (МНК);

в) метод авторегрессии (МАР);

г) метод Лагранжа (МЛ);

д) метод Холта (МХ);

4) проводится ретроспективная проверка и оценка остаточной ошибки модели прогнозирования [22].

Наиболее простым является метод коэффициентов темпа роста. Прогнозное значение $P_{30\text{пр}}$ на соответствующий период предшествующего года определяется по формуле

$$P_{30\text{пр}} = k_{\text{тр}} \cdot P_{30}, \text{ кВт,} \quad (12)$$

где $k_{\text{тр}}$ — коэффициент темпов роста:

$$k_{\text{тр}} = \sqrt{\frac{30(N)}{30(1)}}, \quad (13)$$

где $P_{30(N)}$ и $P_{30(1)}$ — значения P_{30} за последний (N) и первый (1) годы рассматриваемого временного ряда ($N = 5$). Результаты расчета прогнозных значений

Таблица 2

Прогнозные значения P30 по Урупскому горно-обогатительному комбинату
Forecast values of P30 for the Urupsky mining and processing plant

Время P30	Методики расчета прогнозных значений				
	(а)	(б)	(в)	(г)	(д)
Летний утренний P30, кВт	9272	9337	5767	12 464	8681
Летний вечерний P30, кВт	11 041	10 530	12 034	8140	9722
Зимний утренний P30, кВт	11 224	11 049	7457	14 250	10 725
Зимний вечерний P30, кВт	11 007	9670	6689	10 954	10 360

Таблица 3

Расчетные (заявляемые) значения P30
Calculated (declared) values of P30

Квартал	I	II	III	IV
P30, кВт	11 100	10 800	10 600	10 800

$P_{30,пр}$ по методике (а–д) по Урупскому ГОКу приведены в табл. 2.

Ретроспективная проверка показала, что наиболее точными прогнозными значениями P_{30} являются значения, полученные по МНК (б). Достаточно приемлемыми по точности для прогнозирования P_{30} являются МКТР (а) и МХ (д). Прогнозирование P_{30} по АР (в) и МЛ (г) дает существенные отклонения от принятых значений по МНК, что объясняется чрезмерно коротким временным рядом ($N = 5$). В летний период времени вечерний максимум нагрузки превышает утренний, а в зимний период — наоборот. Предварительно в качестве заявляемых поквартальных значений P_{30} могут быть рекомендованы величины, приведенные в табл. 3.

Табл. 3 составлена по данным прогнозных значений P_{30} (табл. 2). Для I и III кварталов приняты максимальные значения P_{30} в зимний и летний периоды. Для II и IV кварталов принято среднее значение за I и III кварталы.

Методика расчета расхода электроэнергии

В качестве исходных данных используются выборки случайных величин

{W}, {Q} за период ряда лет. На рисунке в качестве примера приведены соответствующие помесячные выборки в течение одного года, полученные по ОФ Урупского ГОКа. Объем выборки (N) зависит от располагаемых источников статистических данных. При наличии ежесуточных отчетных данных объем выборки за год составляет: $N = 365$, за квартал: $N = 90 \div 91$; за месяц: $N = 30 \div 31$; только месячных данных: $N = 12$.

С помощью МНК определены линии тренда для представленных на рисунке зависимостей, описываемых полиномами 4 и 6 степени:

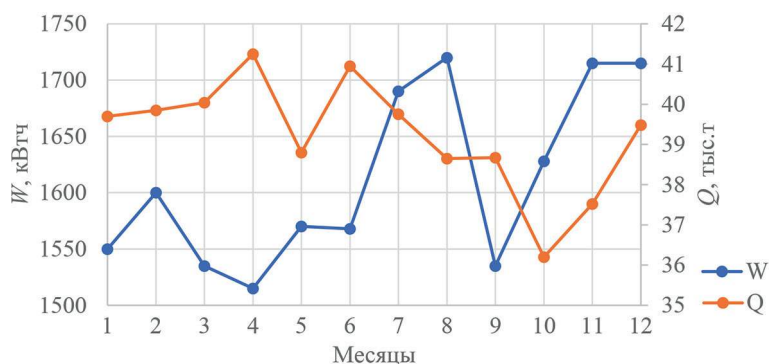
$$Q = 0,0058 \cdot t^4 - 0,1295 \cdot t^3 + 0,877 \cdot t^2 - 1,9709 \cdot t + 41,061;$$

коэффициент достоверности аппроксимации: $R^2 = 0,7203$;

$$W = -0,0532 \cdot t^6 + 2,1347 \cdot t^5 - 33,093 \cdot t^4 + 247,94 \cdot t^3 - 915,95 \cdot t^2 + 1515,6 \cdot t + 729,04;$$

$$R^2 = 0,76.$$

Были определены расчетные значения статистических оценок по суточным реализациям случайных величин {W}, {Q} и удельного расхода электроэнергии {ω} для ОФ, представленные в табл. 4.



Помесячные выборки расхода электроэнергии и добываемой и перерабатываемой руды в течение одного года

Monthly samples of electricity consumption and mined and processed ore for one year

Таблица 4

Статистические оценки случайных величин по обогащательной фабрике
Statistical estimates of random variables for the enrichment plant

Квар- тал	Оценки случай- ной ве- личины	m_i	S_i	A_i	E_i	V_i	$R_{\omega Q}$	R_{wQ}	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I	W	48,96	20,03	-0,316	-0,99	0,409	—	0,792	55,4	$2,96 \cdot 10^{-2}$
	Q	1408	589	0,251	-0,545	0,418	—	—	—	—
	ω	36,61	13,82	1,464	5,076	0,377	-0,301	—	46,6	$-7,1 \cdot 10^{-3}$
II	W	47,57	23,04	0,077	-1,247	0,484	—	0,359	41,6	$5,27 \cdot 10^{-2}$
	Q	14,2	617	0,003	-0,124	0,434	—	—	—	—
	ω	34,36	11,12	0,385	0,247	0,334	-0,115	—	38,6	$-3,35 \cdot 10^{-3}$
III	W	50,33	23,49	-0,239	-1,278	0,467	—	0,583	21,1	$2 \cdot 10^{-2}$
	Q	1607	620	0,142	9,39	0,385	—	—	—	—
	ω	36,71	11,34	0,652	2,423	0,309	-0,075	—	37,6	$-5,23 \cdot 10^{-4}$
IV	W	48,5	20,5	—	—	0,423	—	—	—	—
	Q	1450	—	—	—	—	—	—	—	—
	ω	34,5	7,5	0,191	0,103	0,217	—	—	—	—

В табл. 4 приняты следующие обозначения: m_i — математическое ожидание; S_i — дисперсия; A_i — асимметрия; E_i — эксцесс; V_i — вариация; $R_{\omega Q}$ — коэффициент корреляции между удельным электропотреблением и количеством руды; R_{wQ} — коэффициент корреляции между расходом электроэнергии и ко-

личеством руды; a , b — коэффициенты линейного уравнения регрессии.

Выводы

1. Результаты проверки коэффициента корреляции $R_{\omega Q}$ по критериям t -Стьюдента и F -Фишера показали, что по руднику и ОФ он является незначимым. Это

указывает на некоррелируемость величин ω и Q . Отрицательное значение $R_{\omega Q} < 0$ характеризует общую объективную тенденцию снижения удельного расхода электроэнергии при увеличении добычи (переработки руды).

2. Более высокие значения коэффициента $R_{\omega Q} > 0$ указывают на прямую, хотя и довольно слабую зависимость потребляемой электроэнергии от количества добытой (переработанной) руды. Средние значения $R_{\omega Q} = 0,583$ по ОФ не противоречат полученным ранее выводам о необходимости интенсификации работы технологического оборудования.

3. Зависимость расхода электроэнергии от количества добытой (переработанной) руды $W = f(Q)$ для I квартала по ОФ будет представлена в следующем виде: $W_{\phi} = 55,4 + 2,96 \cdot 10^{-2} \cdot Q$, кВт·ч, где Q — количество добытой (переработанной) руды, т/сутки.

4. Среднегодовая часовая производительность по ОФ составляет $m_Q = 61,3$ т/ч, что хорошо согласуется с ранее полученной фактической производительностью отделения измельчения: $Q_{\phi} = 55,2$ т/ч. Полученный результат подтверждает сделанный вывод о том, что повышение загрузки технологического оборудования позволяет существенно снизить удельный расход электроэнергии и обеспечить значительный экономический эффект.

5. Полученные в результате расчета значения m_i за одноименные кварталы ряда лет образуют временной ряд, позволяющий прогнозировать эти величины за соответствующий квартал будущего года.

6. Анализ энергоэффективности оборудования:

- фактические коэффициенты использования оборудования (k_w) значительно ниже расчетных значений. Например, для дробильного отделения k_w составляет всего 0,2 — 0,26 при расчет-

ных значениях 0,5 — 0,7. Особенно заметна разница в главном корпусе, где мельницы МШР 3200×3100 работают с $k_w = 0,52$ против возможных 0,8;

- коэффициент загрузки по производительности ($k_Q = 0,2 — 0,24$) свидетельствует о 4–5-кратном резерве производственных мощностей;

- установлено, что увеличение загрузки на 1 т/час снижает удельное энергопотребление на 0,12 — 0,52 кВт·ч/т.

7. Методика расчета энергопотребления:

- разработана система расчетов на основе статистических выборок $\{W\}$, $\{Q\}$ и $\{\omega\}$;

- выявлена слабая корреляция ($R_{\omega Q}$) между удельным энергопотреблением и количеством переработанной руды;

- в качестве расчетного среднегодового удельного расхода электроэнергии могут быть использованы следующие значения по обогатительной фабрике: $m_{\omega\phi} = 35,55$ кВт·ч/т.

8. Прогнозирование электрических нагрузок:

- сравнение пяти методов прогнозирования 30-минутной активной мощности показало преимущество МНК;

- выявлены сезонные различия: летний вечерний максимум превышает утренний, зимой отмечается обратная ситуация;

- рекомендованы поквартальные значения P_{30} :

11 100 кВт (I кв.),
10 800 кВт (II кв.),
10 600 кВт (III кв.),
10 800 кВт (IV кв.).

9. Рекомендации по оптимизации:

- технические: модернизация транспортирующих механизмов, установка двигателя 250 кВт для дробилки КМД-2200-00;

- организационные: синхронизация графиков добычи и переработки, внедрение тарифного регулирования;

- экономические: прогнозируемое снижение затрат на электроэнергию на 15–20%.

10. Перспективные направления:

- внедрение систем автоматизированного управления нагрузкой;
- разработка цифровых двойников технологических линий;

- расширение статистической базы для повышения точности прогнозов;

- дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку комплексной системы управления энергопотреблением с элементами искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуковский Ю. Л., Сусликов П. К. Оценка потенциального эффекта применения технологии управления спросом на горных предприятиях // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 895–908. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908.
2. Петров В. Л., Кузнецов Н. М., Морозов И. Н. Моделирование электропотребления обогатительной фабрики // Горный журнал. — 2022. — № 2. — С. 72–76. DOI: 10.17580/gzh.2022.02.11.
3. Капанский А. А. Методы решения задач оценки и прогнозирования энергетической эффективности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. — 2019. — Т. 11. — № 2(42). — С. 103–115.
4. Wang Y., Zhang N., Chen X. A short-term residential load forecasting model based on lstm recurrent neural network considering weather features // Energies. 2021, vol. 14, article 2737. DOI: 10.3390/en14102737.
5. Zhukovskiy Y., Batueva D., Buldysko A., Shabalov M. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform // Journal of Physics: Conference Series. 2019, vol. 1333, no. 6, article 062033. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062033.
6. Sokolov A. A., Fomenko O. A., Ignatev I. V. Development of algorithms for control and control of electric power parameters based on information-measuring system data // Journal of Physics: Conference Series. 2022, vol. 217, no. 1, article 012076. DOI: 10.1088/1742-6596/2176/1/012076.
7. Соколов А. А., Орлова Л. Г., Башмур К. А., Кузьмич Р. И., Кукарцев В. В. Моделирование различных режимов работы трансформаторов, применяемых на подстанциях горнодобывающей промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 11-1. — С. 278–291. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_278.
8. Ключев Р. В. Системный анализ методов расчета систем электроснабжения карьеров // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 302–310. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-302-310.
9. Shishkin P. V., Malozyomov B. V., Martyushev N. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Valuev D. V., Qi M. Mathematical logic model for analysing the controllability of mining equipment // Mathematics. 2024, vol. 12, no. 11, article 1660. DOI: 10.3390/math12111660.
10. Malozyomov B. V., Martyushev N. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Valuev D. V., Qi M. Analysis of a predictive mathematical model of weather changes based on neural networks // Mathematics. 2024, vol. 12, no. 3, article 480. DOI: 10.3390/math12030480.
11. Ключев Р. В. Анализ технологических и энергетических параметров шаровых мельниц // Горная промышленность. — 2024. — № 6. — С. 107–110. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-6-107-110.
12. Ключев Р. В. Анализ надежности элементов системы электроснабжения карьеров // Горные науки и технологии. — 2024. — № 9(2). — С. 183–194. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-03-254.
13. Oprea S. V., Bara A., Ifrim G. Flattening the electricity consumption peak and reducing the electricity payment for residential consumers in the context of smart grid by means of shifting optimization algorithm // Computers & Industrial Engineering. 2018, vol. 122, pp. 125–139. DOI: 10.1016/j.cie.2018.05.053.
14. Patil P. D., Patil R., Ahire P., Bharati R., Dongre Y. An adaptive methodology based on predictive deep learning and context aware clustering for electricity power usage mining and optimization at different granularity levels // e-Prime — Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy. 2024, vol. 8, article 100628. DOI: 10.1016/j.prime.2024.100628.

15. Abramovich B., Sychev Y., Prokhorova V. The application of modern information technologies for power monitoring and control in conditions of distributed generation / Conference of Open Innovation Association, FRUCT 2014. 2014, pp. 3–8, article 7000938. DOI: 10.1109/FRUCT.2014.7000938.

16. Вялкова С. А., Моргоева А. Д., Гаврина О. А. Разработка гибридной модели прогнозирования потребления электрической энергии для горно-металлургического предприятия // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 486–493. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-486-493.

17. Albuquerque P. C., Cajueiro D. O., Rossi M. D. C. Machine learning models for forecasting power electricity consumption using a high dimensional dataset // Expert Systems with Applications. 2022, vol. 187, article 115917. DOI: 10.1016/J.ESWA.2021.115917.

18. Назарычев А. Н., Дяченко Г. В., Сычев Ю. А. Исследование надежности тягового электропривода карьерных самосвалов на основе анализа отказов его функциональных узлов // Записки Горного института. — 2023. — Т. 261. — С. 363–373.

19. Баловцев С. В., Меркулова А. М. Комплексная оценка надежности зданий, сооружений и технических устройств горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 3. — С. 170–181. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_170.

20. Бурянина Н. С., Королюк Ю. Ф., Малеева Е. И., Лесных Е. В. Линии электропередач с уменьшенным количеством проводов в горных территориях // Устойчивое развитие горных территорий. — 2018. — № 3. — С. 404–410. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10-3-404-410.

21. Abramovich B. N., Kuznetsov P. A., Sychev Yu. A. Protective controller against cascade outages with selective harmonic compensation function // Journal of Physics: Conference Series. 2018, vol. 1015, no. 2, article 022001. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/2/022001

22. Ji Q., Zhang S., Duan Q., Gong Y., Li Y., Xie X., Bai J., Huang C., Zhao X. Short- and medium-term power demand forecasting with multiple factors based on multi-model fusion // Mathematics. 2022, vol. 10, article 2148. DOI: 10.3390/math10122148. **МИАБ**

REFERENCES

1. Zhukovskiy Yu. L., Suslikov P. K. Assessment of the potential effect of applying demand management technology at mining enterprises. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 3, pp. 895–908. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908.

2. Petrov V. L., Kuznetsov N. M., Morozov I. N. Modeling power use at processing plant. *Gorniy Zhurnal*. 2022, no. 2, pp. 72–76. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2022.02.11.

3. Kapansky A. A. Methods for solving the problems of evaluation and forecasting energy efficiency. *Kazan state power engineering university bulletin*. 2019, vol. 11, no. 2(42), pp. 103–115. [In Russ].

4. Wang Y., Zhang N., Chen X. A short-term residential load forecasting model based on lstm recurrent neural network considering weather features. *Energies*. 2021, vol. 14, article 2737. DOI: 10.3390/en14102737.

5. Zhukovskiy Y., Batueva D., Buldysko A., Shabalov M. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1333, no. 6, article 062033. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062033.

6. Sokolov A. A., Fomenko O. A., Ignatev I. V. Development of algorithms for control and control of electric power parameters based on information-measuring system data. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022, vol. 217, no. 1, article 012076. DOI: 10.1088/1742-6596/2176/1/012076.

7. Sokolov A. A., Orlova L. G., Bashmur K. A., Kuzmich R. I., Kukartsev V. V. Ensuring uninterrupted power supply to mining enterprises by developing virtual models of different operation modes of transformer substations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 11-1, pp. 278–291. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_278.

8. Klyuev R. V. System analysis of calculation methods for power supply systems in quarry points. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 1, pp. 302–310. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-302-310.

9. Shishkin P. V., Malozyomov B. V., Martyushev N. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Valuev D. V., Qi M. Mathematical logic model for analysing the controllability of mining equipment. *Mathematics*. 2024, vol. 12, no. 11, article 1660. DOI: 10.3390/math12111660.

10. Malozyomov B. V., Martyushev N. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Valuev D. V., Qi M. Analysis of a predictive mathematical model of weather changes based on neural networks. *Mathematics*. 2024, vol. 12, no. 3, article 480. DOI: 10.3390/math12030480.
11. Klyuev R. V. Analysis of technological and energy parameters of ball mills. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 6, pp. 107 – 110. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-6-107-110.
12. Klyuev R. V. Reliability analysis of open-pit power supply system components. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024, no. 9(2), pp. 183 – 194. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-03-254.
13. Oprea S. V., Bara A., Ifrim G. Flattening the electricity consumption peak and reducing the electricity payment for residential consumers in the context of smart grid by means of shifting optimization algorithm. *Computers & Industrial Engineering*. 2018, vol. 122, pp. 125 – 139. DOI: 10.1016/j.cie.2018.05.053.
14. Patil P. D., Patil R., Ahire P., Bharati R., Dongre Y. An adaptive methodology based on predictive deep learning and context aware clustering for electricity power usage mining and optimization at different granularity levels. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2024, vol. 8, article 100628. DOI: 10.1016/j.prime.2024.100628.
15. Abramovich B., Sychev Y., Prokhorova V. The application of modern information technologies for power monitoring and control in conditions of distributed generation. *Conference of Open Innovation Association, FRUCT 2014*. 2014, pp. 3 – 8, article 7000938. DOI: 10.1109/FRUCT.2014.7000938.
16. Vyalkova S. A., Morgoeva A. D., Gavrina O. A. Development of a hybrid model for predicting the consumption of electrical energy for a mining and metallurgical enterprise. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 3, pp. 486 – 493. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-486-493.
17. Albuquerque P. C., Cajueiro D. O., Rossi M. D. C. Machine learning models for forecasting power electricity consumption using a high dimensional dataset. *Expert Systems with Applications*. 2022, vol. 187, article 115917. DOI: 10.1016/J.ESWA.2021.115917.
18. Nazarychev A. N., Dyachenok G. V., Sychev YU. A. A reliability study of the traction drive system in haul trucks based on failure analysis of their functional parts. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 261, pp. 363 – 373. [In Russ].
19. Balovtsev S. V., Merkulova A. M. Comprehensive assessment of buildings, structures and technical devices reliability of mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 3, pp. 170 – 181. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_170.
20. Buryanina N. S., Korolyuk Yu. F., Maleeva E. I., Lesnykh E. V. Power transmission lines with a reduced number of wires in mountain territories. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2018, no. 3, pp. 404 – 410. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10-3-404-410.
21. Abramovich B. N., Kuznetsov P. A., Sychev Yu. A. Protective controller against cascade outages with selective harmonic compensation function. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1015, no. 2, article 022001. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/2/022001
22. Ji Q., Zhang S., Duan Q., Gong Y., Li Y., Xie X., Bai J., Huang C., Zhao X. Short- and medium-term power demand forecasting with multiple factors based on multi-model fusion. *Mathematics*. 2022, vol. 10, article 2148. DOI: 10.3390/math10122148.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Клюев Роман Владимирович — д-р техн. наук, доцент, профессор, Московский политехнический университет, e-mail: kluev-roman@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0003-3777-7203.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

R. V. Klyuev, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Professor, Moscow Polytechnic University, 107023, Moscow, Russia, e-mail: kluev-roman@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0003-3777-7203.

Получена редакцией 20.03.2025; получена после рецензии 22.04.2025; принята к печати 10.06.2025.
Received by the editors 20.03.2025; received after the review 22.04.2025; accepted for printing 10.06.2025.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АКТИВНОГО ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНОГО ФИЛЬТРА НА АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМАХ

В.А. Сериков¹, Ю.А. Сычев¹, В.Н. Костин², Хайдар Самет³

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Serikov.va@bk.ru

² Группа компаний «Городской центр экспертиз – Энергетика», Санкт-Петербург, Россия

³ Ширазский университет, Шираз, Иран

Аннотация: В современных системах электроснабжения горных предприятий неизменно расчет число элементов с нелинейными вольтамперными характеристиками, одним из которых является частотно-регулируемый преобразователь электропривода технологических установок. Следствием их работы является искажение кривых тока и напряжения, т.е. во внутренних электрических сетях предприятия появляются гармонические искажения. Эти искажения оказывают негативный эффект на работу другого электрооборудования, которое работает совместно с нелинейными потребителями, в виде сокращения срока его службы, ухудшения рабочих и энергетических характеристик. Наибольшее негативное влияние высшие гармоники оказывают на конденсаторные установки компенсации реактивной мощности из-за возможности образования резонансного контура с питающей сетью. Известны технические решения, такие как фильтрокомпенсирующие устройства, которые позволяют снизить гармонические искажения напряжения в сети до допустимых значений. Однако совместная работа активного фильтра с конденсаторными установками при наличии резонансных режимов снижает его компенсационные характеристики. Поэтому авторами статьи рассматривается влияние активного индуктивно-емкостного фильтра, устанавливаемого на выходе активного фильтра, на амплитудно-частотные характеристики сопротивления промышленной системы электроснабжения с целью устранения резонансного режима и улучшения его компенсационных характеристик. В результате проведенного исследования было установлено, что параметры пассивно-активного индуктивно-емкостного фильтра должны отстраиваться от частоты исходного резонанса, однако в области усиления амплитуд амплитудно-частотной характеристики на смежных к исходному резонансу гармониках необходимо ступенчато регулировать параметры индуктивности и активного сопротивления фильтра, что усложняет процесс смещения резонансной частоты. Алгоритм работы пассивно-активного индуктивно-емкостного фильтра позволяет осуществлять плавное ступенчатое регулирование реактивной мощности в соответствии с потребностями узла нагрузки.

Ключевые слова: несинусоидальное напряжение, нелинейная нагрузка, высшие гармоники, амплитудно-частотная характеристика импеданса сети, резонанс, пассивный фильтр, активный фильтр, система электроснабжения, компенсация реактивной мощности.

Для цитирования: Сериков В. А., Сычев Ю. А., Костин В. Н., Хайдар Самет Оценка влияния активного индуктивно-емкостного фильтра на амплитудно-частотные характеристики промышленных систем электроснабжения при резонансных режимах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 7. – С. 159–183. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_170.

Influence of active inductor–capacitor filter on amplitude–frequency characteristic of resonant mode power supply in industry

V.A. Serikov¹, Yu.A. Sychev¹, V.N. Kostin², Haidar Samet³

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
Saint-Petersburg, Russia, e-mail: Serikov.va@bk.ru

² SC «City Center for Expertise», Saint-Petersburg, Russia

³ School of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

Abstract: The modern systems of power supply in the mining industry get equipped with the increasingly more members with the nonlinear voltage–current characteristics. One of such members is a variable frequency drive. Its operation distorts the current–voltage curves, i.e. the power grids of mines experience harmonic distortions. These distortions adversely affect other electric equipment which operates concurrently with nonlinear consumers in the form of reduction of life of the equipment, and degradation of its operational data and energy performance. Higher harmonics have the worst impact on capacitor units for reactive power compensation because of potentiality of resonance in power network. There are known engineering solutions to reduce harmonic voltage distortions in networks down to admissible values, such as compensating filters. However, joint operation of active filters and capacitors in case of resonant modes worsens compensation capacity of the filters. For this reason, the authors of the article examine the influence exerted by an inductor–capacitor filter, set at the outlet of an active filter, on the amplitude–frequency characteristic of an industrial power supply system with a view to eliminating resonance and improving compensation capacity of the filter. The implemented research finds out that parameters of the passive–active inductor–capacitor filter should be tuned out of the initial resonance frequency, but in the range of higher amplitudes of the amplitude–frequency characteristic, and the harmonics adjoining the initial resonance, it is necessary to undertake stepwise adjustment of the inductance and active resistance of the filter, which complicates shifting of the resonance frequency. The operation algorithm of the passive–active inductor–capacitor filter enables smoother adjustment of the reactive power in conformity with the requirement of the load center.

Key words: non-sinusoidal voltage, nonlinear load, higher harmonics, amplitude–frequency characteristic of electrical impedance, passive filter, active filter, power supply system, reactive power compensation.

For citation: Serikov V. A., Sychev Yu. A., Kostin V. N., Haidar Samet Influence of active inductor–capacitor filter on amplitude–frequency characteristic of resonant mode power supply in industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(7):170–183. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_170.

Введение

Наиболее распространенная нелинейная нагрузка систем электроснабжения

горных предприятий возникает от частотно-регулируемых электроприводов технологических установок и комплек-

сов как среднего, так и низкого напряжения, которые, являясь источниками высших гармоник, искажают сетевые токи и напряжения и формируют несинусоидальный режим работы [1–3].

Несинусоидальное напряжение сети, уровень которого характеризуется величиной суммарного коэффициента гармонических искажений напряжения THD_U (%), оказывает негативный эффект на работу другого электрооборудования, которое работает совместно с нелинейными потребителями, в виде сокращения срока его службы, ухудшения рабочих и энергетических характеристик [4–6]. Наибольший негативный эффект оно оказывает на работу конденсаторных установок компенсации реактивной мощности, которые чувствительны к гармоническим искажениям, особенно при возникновении резонансного режима работы системы электроснабжения между параметрами конденсаторов и питающей сети [7–9].

В резонансном режиме на одной из частот характерных гармоник увеличивается искажение сетевого напряжения и тока, что усиливает негативный эффект на работу электрооборудования [10–12]. При этом конденсаторные установки имеют наибольшую токовую перегрузку, что приводит к выходу их из строя или аварийному отключению средствами токовой защиты [13–15].

Таким образом, для нивелирования негативных эффектов от гармонического искажения сетевого тока и напряжения, а также во избежание усиления высших гармоник в резонансных контурах в промышленных системах электроснабжения горных предприятий необходимо применять известные технические решения и/или устройства для их компенсации [16–18]. К техническим решениям относят: электрическое разделение нелинейной и линейной нагрузок на разные секции шин, повышение пульс-

ности преобразователей и т.д. [19–21]. Техническими устройствами являются: пассивные, активные и гибридные фильтры, а также антирезонансные дроссели, реакторы и др. [22–24].

Антирезонансный дроссель представляет собой защитное устройство для снижения токовой перегрузки конденсаторных установок от опасного уровня гармонического искажения сети, который может возникать при параллельном резонансе. Однако антирезонансный дроссель не компенсирует гармонические искажения напряжения, а значит, и не позволяет обеспечить нормируемый уровень показателей качества электроэнергии в узле подключения нелинейной нагрузки [25–27]. В то же время включение антирезонансного дросселя на каждую ступень конденсаторов компенсации реактивной мощности, особенно для конденсаторов 6–10 кВ, значительно увеличивает конечную стоимость конденсаторной установки [28–30]. Поэтому такое техническое решение, с точки зрения технико-экономического обоснования, не находит широкого применения на практике [31].

Фильтрокомпенсирующие устройства, в частности, все больше применяемые на практике активные фильтры, показывают высокие компенсационные характеристики и значительно снижают гармонические искажения тока и напряжения в системах электроснабжения горных предприятий.

Однако, как показали исследования [5, 12, 13], при несинусоидальных и резонансных режимах работы системы электроснабжения горного предприятия активные фильтры гармоник имеют ограниченную эффективность и, тем самым, не способны обеспечить в полной мере допустимый уровень искажений напряжений THD_U . Получается, что совместная работа конденсаторов компенсации реактивной мощности и актив-

ных фильтров гармоник влияет на качество реализации функций этих двух устройств [10, 21], что должно быть учтено при решении технической задачи обеспечения качества электроэнергии, в частности, это касается допустимой величины коэффициента искажения сетевого напряжения THD_U .

Научная проблема и цель исследования

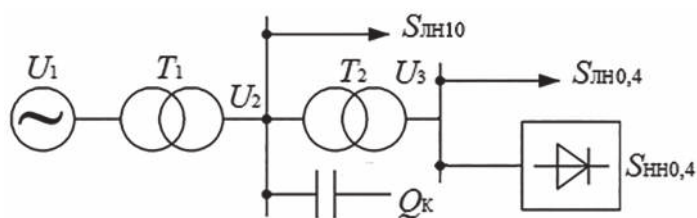
Для обеспечения компенсационных характеристик ПАФ при его совместной работе с конденсаторными установками в исследованиях [1, 5] рассматривается подключение к нему пассивного RC-фильтра. Главная задача пассивного RC-фильтра — сместить частоту исходного резонанса с канонической гармоники в область частот, в которой резонансный режим на характерных гармониках возникать не будет [12, 13]. Соответственно, нивелирование возможности возникновения резонансного режима в сети на характерных гармониках приведет и к улучшению функциональных возможностей ПАФ, которые были им ограничены [14, 15]. Однако работа гибридного фильтра на основе активного и пассивного RC-фильтра в месте его подключения к сети приводит к увеличению потребляемого тока узлом нагрузки и к падению напряжения на фильтре. Эти негативные эффекты пассивного RC-фильтра наиболее выражены при отстройке его параметров от резонансных режимов на частотах 5-й, 7-й гармоник и существенно снижаются начиная с 11-й гармоники и т.д. [1, 5]. Поэтому для таких резонансных режимов работы сети в исследовании [5] рекомендуется применять гибридный фильтр, работающий совместно с параллельными узкополосными фильтрами на 5-й и 7-й гармониках, что усложняет его конструкцию. Также RC-фильтры не способны плавно регули-

ровать реактивную мощность в узле нагрузки, поскольку их возможности по смещению частоты исходного резонанса определяются минимальной величиной емкости (источника реактивной мощности), ниже которой фильтр не способен полностью нивелировать возможность возникновения резонансного режима. Эта особенность RC-фильтра снижает его функциональные возможности по плавности регулирования реактивной мощности и, теоретически, может привести к режиму ее перекомпенсации в узле питания нагрузки [6, 7].

Исходя из изложенного, авторами статьи предлагается рассмотреть работу гибридного фильтра на основе активного и пассивного RLC-фильтра, который предлагается установить вместо пассивного RC-фильтра с целью снижения или нивелирования негативных эффектов, вносимых RC-фильтром, при сохранении функциональных возможностей по смещению частоты исходного резонанса с целью недопущения усиления амплитуд канонических гармоник [28, 31]. Для оценки функциональных возможностей RLC-фильтра по смещению частоты исходного резонанса необходимо определить степень влияния его параметров на амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) сопротивления системы электроснабжения при совместной работе гибридного фильтрокомпенсирующего устройства и конденсаторных установок в условиях не-синусоидального и резонансного режимов работы сети [22, 23].

Имитационная модель системы электроснабжения

В исследовании рассматривается типовая конфигурация системы электроснабжения горного предприятия, приведенная на рис. 1, с тремя уровнями напряжений — U_1 , U_2 и U_3 , которые соответствуют высокому, среднему и низ-



U_1 – высокое напряжение, U_2 – среднее напряжение, U_3 – низкое напряжение,
 $S_{ЛН}$ – мощность линейной нагрузки, $S_{НН}$ – мощность нелинейной нагрузки,
 Q_k – мощность конденсаторной установки

Рис. 1. Схема системы электроснабжения горного предприятия [Создано авторами]

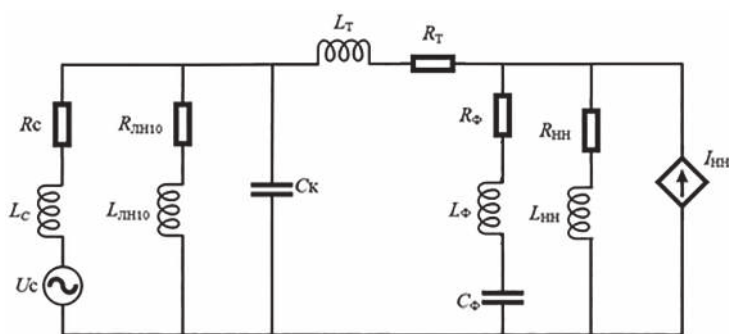
Fig. 1. Scheme of the mining company's power supply system [Created by the authors]

кому напряжению. В исследовании принималось, что $U_1 = 110$ кВ, $U_2 = 10$ кВ, $U_3 = 0,4$ кВ. Однако для целей моделирования могут рассматриваться и другие значения напряжений, соответствующие анализируемым классам U_1 , U_2 и U_3 .

На рис. 1 изображена схема системы электроснабжения, которая включает в себя двухобмоточный трансформатор T_1 (напряжением 110/10 кВ и мощностью 16 МВА), питающий линейную нагрузку $S_{ЛН10}$ (напряжением 10 кВ и мощностью 10 МВА, $\cos\varphi = 0,8$), регулирующую конденсаторную установку Q_k (напряжением 10 кВ и мощностью 2 Мвар) и трансформатор T_2 (напряжением 10/

0,4 кВ и мощностью 2,5 МВА), который питает узел линейной $S_{ЛН0,4}$ и нелинейной $S_{НН0,4}$ нагрузок (напряжением 0,4 кВ и мощностью 2 МВА). Нелинейная нагрузка представлена как диодным, так и тиристорным выпрямителем, угол управления которого не превышал $\alpha = 30^\circ$.

Рассматривается наихудший режим работы системы электроснабжения – резонанс на частоте одной из канонических гармоник, который определяется емкостью конденсаторной установки 10 кВ и эквивалентной индуктивностью сети, формируемой между трансформаторами T_1 и T_2 при гармоническом искажении тока и напряжения на шинах



RLC-фильтр – последовательное соединение активного сопротивления, индуктивности и емкости R_ϕ , L_ϕ , C_ϕ

Рис. 2. Схема замещения системы электроснабжения при включении пассивно-активного индуктивно-емкостного фильтра [Создано авторами]

Fig. 2. Scheme of substitution of the power supply system c when a passive active inductive-capacitive filter is turned on [Created by the authors]

10 кВ со стороны нелинейной нагрузки 0,4 кВ.

Для определения параметров системы электроснабжения, при которых будут возникать резонансные явления на характерных гармониках [27, 31], была разработана однофазная схема замещения сети, приведенная на рис. 2. На основе схемы замещения сети была разработана ее имитационная модель в Simulink Matlab. Все параметры схемы замещения приведены к базовой ступени 10 кВ.

В предыдущих работах авторского коллектива было показано, что для исследуемой конфигурации системы электроснабжения горного предприятия наилучший резонансный режим работы будет возникать на частоте 7 гармоники, что для параметров рассматриваемой сети будет иметь место при емкости конденсаторной установки $C_K = 67$ мкФ ($Q_K = 2,1$ Мвар) [5].

По имитационной модели схемы замещения сети, приведенной на рис. 2, рассмотрим влияние параметров пассивного RLC-фильтра на полное сопротивление сети (АЧХ) относительно амплитудных значений гармоник тока со стороны нелинейной нагрузки 0,4 кВ. Для оценки результата воздействия параметров RLC-фильтра на уровень искажений тока и напряжения на сторонах 0,4 и 10 кВ все результаты моделирования приводятся при отключенном активном фильтре.

Результаты имитационного моделирования и их обсуждение

Отстройка выходного RLC-фильтра осуществляется как от резонансной частоты сети, так и от величины реактивной мощности потребителей 0,4 кВ. Подобный принцип позволит осуществить плавное регулирование компенсации реактивной мощности в узле нагрузки [3, 4] и в то же время улучшить компенсационные характеристики активного фильтра.

RLC-фильтр представляет собой узкополосный фильтр гармоник, параметры которого выбираются таким образом, чтобы импеданс сети на резонансной частоте имел минимальное значение. Поэтому в исследовании был рассчитан блок параметров RLC-фильтра, при которых этот фильтр имел наименьшее значения на канонических гармониках ($n = 5, 7, 11, 13, 17, 19$) на одной ступени регулируемой емкости конденсаторов фильтра C_Φ . Максимальная величина емкости определяется потребностями узла нагрузки в реактивной мощности. Для рассматриваемой на рис. 1 системы электроснабжения, при работе мостового тиристорного выпрямителя с углом управления $\alpha < 30^\circ$ и мощностью $S = 2000$ кВА максимальная реактивная мощность $Q_\Phi = 1000$ квар, для которой $C_\Phi = 32$ мкФ. Для упрощения расчета примем, что конденсаторы RLC-фильтра имеют 10 ступеней по $C_\Phi = 3,2$ мкФ каждая.

Таблица 1

Величины индуктивностей RLC-фильтра для одной ступени конденсаторной установки $C_\Phi = 3,2$ мкФ для рассматриваемых канонических гармоник [Создано авторами]

Inductance values of the RLC-filter for one stage of the capacitor unit $C_F = 3.2$ μ F for the considered canonical harmonics. [Created by the authors]

n	5	7	11	13	17	19
f_r , Гц	250	350	550	650	850	950
L_Φ , мГн	126,8	64,7	26,2	18,8	11	8,8

Индуктивность L_Φ рассчитывается по следующему выражению с учетом резонансной частоты f_r настройки узкополосного фильтра (1):

$$L_\Phi = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_r^2 \cdot C_\Phi} . \quad (1)$$

Для одной ступени конденсаторов $C_\Phi = 3,2$ мкФ индуктивности L_Φ для канонических гармоник $n = 5, 7, 11, 13, 17, 19$ сведены в табл. 1.

При включении N количества ступеней эквивалентная емкость фильтра увеличивается пропорционально N , а эквивалентная индуктивность фильтра уменьшается пропорционально N , при этом резонансная частота самого фильтра не меняется [1, 2].

Рассмотрим резонансный режим работы сети на 7-й гармонике ($C_K = 67$ мкФ). Результаты анализа влияния параметров RLC-фильтра на АЧХ сети при неизменном $C_K = 67$ мкФ и ступенчатом регулировании C_Φ и L_Φ , настроенных на частоту 7-й гармоники, были сведены

в табл. 2 (принято, что сопротивление $R_\Phi = 0$). Значения сопротивлений АЧХ на 5-й, 7-й гармониках (Z_5 и Z_7) приведены в относительных единицах (о.е.), за базис приняты частота исходного резонанса $f_{\text{рез.исх.}} = 350$ Гц и соответствующее ему сопротивление $Z_{\text{рез.исх.}} = 88,9$ Ом.

Результаты моделирования, приведенные в табл. 2, показывают, что увеличение C_Φ относительно C_K при неизменной резонансной частоте RLC-фильтра ($n = 7$) снижает частоту исходного резонанса. Однако по мере снижения частоты исходного резонанса в сторону 5-й гармоники увеличивается амплитуда АЧХ на 5-й гармонике (при $C_\Phi = 3,2 \dots 12,8$ мкФ величина $Z_5 = 0,31 \dots 1,02$ о.е.), что негативно скажется на эффективности компенсации гармоник активным фильтром.

Дальнейшее увеличение C_Φ относительно C_K смещает исходный резонанс в область 205 Гц, что приводит к снижению сопротивления АЧХ на 5-й гармонике (при $C_\Phi = 12,8 \dots 32$ мкФ величина

Таблица 2

Результаты моделирования влияния параметров фильтра на АЧХ сопротивления сети на частоте 5-й и 7-й гармоник [Создано авторами]
Results of modeling the effect of filter parameters on the frequency response of network resistance at frequencies of 5th and 7th harmonics [Created by the authors]

C_Φ , мкФ	L_Φ , мГн	Z_5 , о.е.	Z_7 , о.е.	$f_{\text{рез.}}$, Гц	L'_Φ , мГн	Z'_5 , о.е.	Z'_7 , о.е.	$f'_{\text{рез.}}$, Гц	L''_Φ , мГн	Z''_5 , о.е.	Z''_7 , о.е.	$f''_{\text{рез.}}$, Гц
—	—	0,25	1	350	—	—	—	—	—	—	—	—
3,2	64,7	0,31	~ 0	304	—	—	—	—	—	—	—	—
6,4	32,3	0,42	~ 0	282	13,1	0,33	0,44	316	63,4	~ 0	0,6	228
9,6	21,6	0,63	~ 0	267	8,7	0,4	0,31	304	42,3	~ 0	0,45	218
12,8	16,2	1,02	~ 0	254	6,6	0,5	0,23	290	31,7	~ 0	0,36	212
16	13	0,96	~ 0	242	5,2	0,65	0,19	274	25,4	~ 0	0,29	204
19,2	10,8	0,59	~ 0	232	4,4	0,89	0,16	264	21,1	~ 0	0,25	200
22,4	9,2	0,41	~ 0	226	3,7	1,1	0,14	250	18,1	~ 0	0,22	194
25,6	8,1	0,3	~ 0	218	—	—	—	—	—	—	—	—
28,8	7,2	0,24	~ 0	212	—	—	—	—	—	—	—	—
32	6,5	0,19	~ 0	206	—	—	—	—	—	—	—	—

$Z_5 = 1,02 \dots 0,19$ о.е.). Выявлено, что при работе RLC-фильтра появляется дополнительный резонансный пик, который начинается с частоты $f_{\text{доп}} = 380$ Гц и амплитуды $Z_{\text{доп}} = 0,65$ о.е. и при $C_{\Phi}/C_K \rightarrow 1$ увеличивается до граничного значения частоты $f_{\text{доп}} = 410$ Гц и уменьшается до амплитуды $Z_{\text{доп}} \rightarrow 0$. Установлено, что при исходном резонансе на 7-й гармонике удастся сместить резонансную частоту в область, где не происходит усиление АЧХ на 5-й и 7-й гармониках при $C_{\Phi}/C_K > 0,35$.

При соотношении $0,1 < C_{\Phi}/C_K < 0,3$ RLC-фильтр, настроенный на подавление 7-й гармоники, усиливает амплитуду АЧХ на 5-й гармонике. Для снижения амплитуды АЧХ на 5-й гармонике при рассматриваемом соотношении C_{Φ}/C_K необходимо отстроить работу RLC-фильтра на резонанс на смежной гармонике ($n = 5$ или $n = 11$). В табл. 2 параметр индуктивности RLC-фильтра на 11-й гармонике обозначался L'_{Φ} , мГн, а на 5-й гармонике — L''_{Φ} , мГн. Сопротивление АЧХ сети на 5-й и 7-й гармониках при индуктивности $L'_{\Phi} - Z''_5$ и Z'_7 , а для индуктивности $L''_{\Phi} - Z''_5$

и Z''_7 . Установлено, что при L'_{Φ} увеличивается $f'_{\text{рез.}}$ по отношению к $f_{\text{рез.исх}}$ при L_{Φ} . Это увеличение резонансной частоты исходного резонанса и приводит к снижению АЧХ сопротивления на 5-й гармонике, при некотором увеличении АЧХ сопротивления на 7-й гармонике. В случае же работы фильтра с L''_{Φ} частота исходного резонанса $f''_{\text{рез.исх}}$ отстраивается от резонансной частоты 5-й гармоники $f_{\text{рез.}} = 250$ Гц, однако на амплитуду АЧХ сети на 7-й гармонике оказывает влияние дополнительный резонансный пик $f''_{\text{рез.доп.}}$.

Таким образом, если параметры фильтра смещают частоту исходного резонанса в область до 5 гармоник, то для снижения амплитуд АЧХ на 5 и 7 гармониках нужно уменьшить резонансную частоту RLC-фильтра до 5 гармоник (выбрать параметр L''_{Φ} , мГн). Если частота исходного резонанса смещается в область выше 5-й гармоники, необходимо увеличить резонансную частоту RLC-фильтра до 11-й гармоники (выбрать параметр L'_{Φ} , мГн).

На рис. 3 схематично показан обобщенный характер влияния параметров

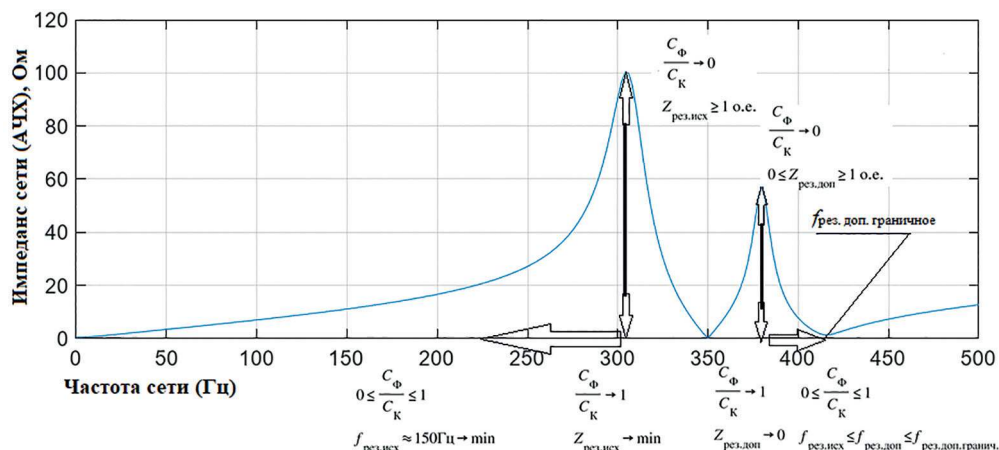


Рис. 3. Характер влияния параметров активного индуктивно-емкостного фильтра на АЧХ сопротивления сети [Создано авторами]

Fig. 3. The nature of the influence of the parameters of the active inductive-capacitive filter on the frequency response of the network resistance [Created by the authors]

Таблица 3

Результаты моделирования влияния параметров фильтра на АЧХ сопротивления сети на частоте 5-й и 7-й гармоник при наличии активного сопротивления R_ϕ [Создано авторами]

Results of modeling the effect of filter parameters on the frequency response of network resistance at frequencies of 5 and 7 harmonics in the presence of active resistance R_ϕ [Created by the authors]

C_ϕ , мкФ	L'_ϕ , мГн	R'_ϕ , Ом	$Z'_{5'}$, о.е.	$Z'_{7'}$, о.е.	$f'_{\text{рез. иск.}}$, Гц	L''_ϕ , мГн	R''_ϕ , Ом	$Z''_{5'}$, о.е.	$Z''_{7'}$, о.е.	$f'_{\text{рез. доп.}}$, Гц
6,4	13,1	50	0,27	0,46	330	63,4	50	0,18	0,54	360
9,6	8,7	30	0,31	0,34	315	42,3	30	0,17	0,42	370
12,8	6,6	15	0,37	0,25	290	31,7	15	0,12	0,34	375

RLC-фильтра, настроенного на частоту исходного резонанса, на АЧХ исходного и дополнительного резонанса сети при неизменной емкости конденсаторной установки.

Однако при определенных значениях C_ϕ не удастся в полной мере минимизировать АЧХ сопротивления амплитуд на 5 и 7 гармониках. Из табл. 2 видно, что при $C_\phi = 6,4, 9,6$ и $12,8$ мкФ ($C_\phi/C_k < 0,15$) после корректной отстройки параметра индуктивности RLC-фильтра, АЧХ амплитуд 5-й и 7-й гармоник $Z'_5 > 0,25$ и $Z'_7 > 0,25$ (больше сопротивления $Z'_5 = 0,25$ о.е. при частоте исходного резонанса и отсутствии RLC-фильтра). Тогда необходимо дополнить RLC-фильтр активным сопротивлением R_ϕ , которое выбирается таким образом, чтобы потери активной мощности в фильтре не превышали 1% от мощности питающего трансформатора.

Результаты моделирования работы RLC-фильтра при наличии R_ϕ сведены в табл. 3.

Установлено, что при настройке фильтра на резонансную частоту 11-й гармоники при исходном резонансе на 7-й гармонике R_ϕ незначительно смещает исходный резонанс сети в сторону больших частот и увеличивает ширину пропускания АЧХ сети, при этом в 2 раза снижается амплитуда АЧХ на резонансной частоте и отсутствует до-

полнительный резонанс. При настройке RLC-фильтра на 5-ю гармонику при исходном резонансе на 7-й гармонике происходили аналогичные процессы, за исключением того, что R_ϕ устранило исходный резонанс, изменило амплитуду, ширину пропускания и частоту дополнительного резонанса.

Таким образом, результаты моделирования показывают эффективность работы RLC-фильтра по снижению амплитуд сопротивлений сети на частотах канонических гармоник. Для повышения эффективности работы RLC-фильтра необходимо настраивать его параметры в соответствии с выявленными закономерностями путем регулирования индуктивности L_ϕ и добавления активного сопротивления R_ϕ при неизменной емкости C_ϕ , которая выбирается исходя из потребности узла нагрузки в реактивной мощности [10, 11].

Полученные выводы будут справедливы для случая, в котором рассматривается совместная работа активного фильтра гармоник и RLC-фильтра с целью компенсации гармонического искажения в сети. Такое гибридное устройство обеспечит высокую эффективность компенсации высших гармоник активным фильтром [11, 13], параметры которого выбираются исходя из текущего уровня гармонического искажения тока и напряжения сети, которое не будет

усилено из-за сдвига частоты резонансных контуров с частот канонических гармоник при правильной настройке параметров RLC-фильтра.

Заключение

По результатам исследований сделаны следующие выводы:

- пассивный RLC-фильтр, устанавливаемый на входе активного фильтра, позволяет устранить резонансные режимы на 5-й и 7-й гармониках, при работе на которых альтернативный RC-фильтр имеет наибольшие негативные эффекты, описанные в данной статье. Выявленные закономерности позволяют выполнить наиболее рациональную настройку параметров RLC-фильтра;
- в отличие от RC-фильтра, RLC-фильтр позволяет осуществлять плавное ступенчатое регулирование реактивной мощности в соответствии с потребностями узла нагрузки;

- параметры пассивного RLC-фильтра должны отстраиваться от частоты исходного резонанса, однако в области усиления амплитуд АЧХ на смежных к исходному резонансу гармониках необходимо ступенчато регулировать параметры L_ϕ и R_ϕ , что усложняет процесс смещения резонансной частоты. Сильнее этот процесс будет проявляться при настройке параметров RLC-фильтра от резонансных режимов на гармониках более высокой частоты.

Предметом будущих исследований по рассматриваемой теме является анализ влияния параметров различных топологий пассивных фильтров, являющихся частью гибридных фильтрокомпенсирующих устройств, работающих совместно с конденсаторными установками, на АЧХ сопротивлений сети при наличии несинусоидального и резонансного режимов работы системы электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пляцанский Л. А., Решетняк С. Н., Решетняк М. Ю. Повышение качества электрической энергии в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт // Горные науки и технологии. — 2022. — Т. 7. — № 1. — С. 66–77. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-1-66-77.
2. Пляцанский Л. А., Решетняк М. Ю. Анализ гармонического состава в электрических сетях понизительных подстанций угольных шахт // Горный журнал. — 2020. — № 5. — С. 63–67. DOI: 10.17580/gzh.2020.05.11.
3. Zhukovskiy Y. L., Suslikov P. K., Arapova E. G., Alieva L. Z. Digital platform as a means of process optimization of integrating electric vehicles into electric power networks // Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1661, no. 1, article 012162. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012162.
4. Жуковский Ю. Л., Сусликов П. К. Оценка потенциального эффекта применения технологии управления спросом на горных предприятиях // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 895–908. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908.
5. Сычев Ю. А., Сериков В. А., Костин В. Н., Коржев А. А. Оценка влияния активно-емкостного фильтра на амплитудно-частотные характеристики промышленной системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками при резонансных явлениях // Промышленная энергетика. — 2024. — № 1. — С. 46–55. DOI: 10.34831/EP.2024.37.84.006.
6. Ключев Р. В. Разработки методики расчета качаний в электрической системе // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 1205–1213. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1205-1213.
7. Ключев Р. В. Разработка методики планирования эксперимента для исследования параметров мельниц горно-обогатительного комбината // Горная промышленность. — 2024. — № 55. — С. 105–109. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-55-105-109.
8. Ustinov A. D., Abou R. A. Using artificial neural network methods to increase the sensitivity of distance protection // International Journal of Engineering. 2024, vol. 37, no. 11, pp. 2192–2199. DOI: 10.5829/ije.2024.37.11b.06.

9. Petrochenkov A. B., Mishurinskikh S. V. Development of a method for optimizing power consumption of an electric driven centrifugal pump // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2021, vol. 2021, pp. 1520–1524. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396730.

10. Petrochenkov A. B., Romodin A. V. Energy-optimizer complex // Russian Electrical Engineering. 2010, vol. 81, no. 6, pp. 323–327. DOI: 10.3103/S106837121006009X.

11. Кубрин С. С., Загоршменный И. М., Решетняк С. Н., Максименко Ю. М. Повышение эффективности функционирования горных машин угольных шахт // Уголь. — 2024. — № 4. — С. 83–87. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-4-83-87.

12. Lyakhomskii A., Petrochenkov A., Romodin A., Perfil'eva E., Mishurinskikh S., Kokorev A., Kokorev A., Zuev S. Assessment of the harmonics influence on the power consumption of an electric submersible pump installation // Energies. 2022, vol. 15, no. 7, article 2409. DOI: 10.3390/en15072409.

13. Yanchenko S., Kulikov A., Tsyruk S. Modeling harmonic amplification effects of modern household devices // Electric Power Systems Research. 2018, vol. 163, pp. 28–37.

14. Шевырев Ю. В., Шевырева Н. Ю. Улучшение формы напряжения в системах электропитания предприятий минерально-сырьевого комплекса с активным выпрямителем // Горный журнал. — 2019. — № 1. — С. 66–69. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.14.

15. Шевырева Н. Ю. Влияние активного выпрямителя напряжения с релейным контуром тока на искажение формы напряжения сети // Горный журнал. — 2022. — № 12. — С. 49–54. DOI: 10.17580/gzh.2022.12.09.

16. Мякотных А. А., Иванова П. В., Иванов С. Л. Критерии и технологические требования создания мостовой платформы добычи торфяного сырья для климатически нейтральной геотехнологии // Горная промышленность. — 2024. — № 4. — С. 116–120. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-4-116-120.

17. Абрамович Б. Н., Богданов И. А. Повышение эффективности автономных электротехнических комплексов нефтегазовых предприятий // Записки Горного института. — 2021. — Т. 249. — С. 408–416. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.10.

18. Morenov V., Leusheva E., Buslaev G., Gudmestad O. System of comprehensive energy-efficient utilization of associated petroleum gas with reduced carbon footprint in the field conditions // Energies. 2020, vol. 13, no. 18, article 4921. DOI: 10.3390/en13184921.

19. Корогодин А. С., Иванов С. Л. Оценка технического состояния опорных подшипников скольжения барабанной мельницы при эксплуатации в составе арктического комплекса горного оборудования // Горная промышленность. — 2024. — № 6. — С. 144–151. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-6-144-151.

20. Shpenst V. A., Orel E. A., Babyr K. V. Reliability improvement of DC-DC power converters by means of feedback signals reserve / Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus-2022. 2022, pp. 1270–1275.

21. Ilyushin Y. V., Nosova V. A., Krauze A. Application of systems analysis methods to construct a virtual model of the field // Energies. 2025, no. 18, pp. 1–35.

22. Avdeev B. A., Vyngra A. V., Chernyi S. G., Zhilenkov A. A., Degtyarev A., Mamunts D., Kustov A. Parametric correction in the control system of the electric propulsion of autonomous underwater vehicles affected by random inputs // Discover Applied Sciences. 2024, vol. 6, no. 10, article 510.

23. Avdeev B., Vyngra A., Chernyi S. Improving the electricity quality by means of a single-phase solid-state transformer // Designs. 2020, vol. 4, no. 3, article 35. DOI: 10.3390/designs4030035.

24. Muratbakeev E. H., Kozhubaev Y. N., Yao Y., Shehzad U. Symmetrical modeling of physical properties of flexible structure of silicone materials for control of pneumatic soft actuators // Symmetry. 2024, vol. 16, no. 750. DOI: 10.3390/sym16060750.

25. Raupov I., Rogachev M., Sytnik J. Overview of modern methods and technologies for the well production of high- and extra-high-viscous oil // Energies. 2025, vol. 18, article 1498. DOI: 10.3390/en18061498.

26. Михайлов А. В., Казаков Ю. А., Соловьев И. В. Анализ элементов блочной технологии поверхностной выемки органогенного сырья // Горная промышленность. — 2025. — № 1. — С. 129–136. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1-129-136.

27. Ключев Р. В., Моргоева А. Д., Гаврина О. А., Босиков И. И., Моргоев И. Д. Прогнозирование планового потребления электроэнергии для объединенной энергосистемы с помощью машинного обучения // Записки Горного института. — 2023. — Т. 261. — С. 392–402.

28. Бажин В. Ю., Устинова Я. В., Федоров С. Н., Шалаби М. Э. Х. Повышение энергетической эффективности руднотермических печей при плавке алюмокремниевого сырья // Записки Горного института. — 2023. — Т. 261. — С. 384–391.

29. Устинов Д. А., Айсар А. Р. Анализ влияния объектов распределенной генерации на системы защиты и режим напряжения: обзор // Безопасность труда в промышленности. — 2023. — № 2. — С. 15–20. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-2-15-20.

30. Yanchenko S. A., Costa F. B., Strunz K. Simulation tool for accurate and fast assessment of harmonic propagation in modern residential grids // IEEE Transactions on Power Delivery. 2021, vol. 36, no. 4, pp. 2118–2128. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3020754.

31. Baburin S. V., Turysheva A. V., Kovalchuk M. S. Algorithm for the choice of power supply system rational structure of gas pumping stations // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012009. **PLAB**

REFERENCES

1. Plashchansky L. A., Reshetnyak S. N., Reshetnyak M. Y. Improvement of electric energy quality in underground electric networks of highly productive coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022, vol. 7, no. 1, pp. 66–77. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-1-66-77.

2. Plashchanskiy L. A., Reshetnyak M. Yu. Analysis of harmonic composition in electrical networks of step-down substations in coal mines. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 5, pp. 63–67. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.05.11.

3. Zhukovskiy Y. L., Suslikov P. K., Arapova E. G., Alieva L. Z. Digital platform as a means of process optimization of integrating electric vehicles into electric power networks. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1661, no. 1, article 012162. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012162.

4. Zhukovskiy Yu. L., Suslikov P. K. Assessment of the potential effect of applying demand management technology at mining enterprises. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 3, pp. 895–908. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908.

5. Sychev Yu. A., Serikov V. A., Kostin V. N., Korzhev A. A. Evaluation of the effect of an active-capacitive passive filter on the amplitude-frequency characteristics of an industrial power supply system with a nonlinear load and capacitor units in conditions of resonant phenomena. *Promyshlennaya Energetika*. 2024, no. 1, pp. 46–55. [In Russ]. DOI: 10.34831/EP.2024.37.84.006.

6. Klyuev R. V. System analysis of rocking calculation methods for power supply systems in quarry points. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 3, pp. 1205–1213. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1205-1213.

7. Klyuev R. V. Development of a methodology for planning an experiment to study the parameters of mills at a mining and processing plant. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 55, pp. 105–109. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-55-105-109.

8. Ustinov A. D., Abou R. A. Using artificial neural network methods to increase the sensitivity of distance protection. *International Journal of Engineering*. 2024, vol. 37, no. 11, pp. 2192–2199. DOI: 10.5829/ije.2024.37.11b.06.

9. Petrochenkov A. B., Mishurinskikh S. V. Development of a method for optimizing power consumption of an electric driven centrifugal pump. *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2021, vol. 2021, pp. 1520–1524. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396730.

10. Petrochenkov A. B., Romodin A. V. Energy-optimizer complex. *Russian Electrical Engineering*. 2010, vol. 81, no. 6, pp. 323–327. DOI: 10.3103/S106837121006009X.

11. Kubrin S. S., Zakorshmenniy I. M., Reshetnyak S. N., Maksimenko Yu. M. Increasing operational efficiency of mining machines in coal mines. *Ugol'*. 2024, no. 4, pp. 83–87. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-4-83-87.

12. Lyakhomskii A., Petrochenkov A., Romodin A., Perfil'eva E., Mishurinskikh S., Kokorev A., Kokorev A., Zuev S. Assessment of the harmonics influence on the power consumption of an electric submersible pump installation. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 7, article 2409. DOI: 10.3390/en15072409.

13. Yanchenko S., Kulikov A., Tsyruk S. Modeling harmonic amplification effects of modern household devices. *Electric Power Systems Research*. 2018, vol. 163, pp. 28–37.

14. Shevyrev Yu. V., Shevyreva N. Yu. Improvement of voltage waveform in power supply systems with dynamic rectifier in mineral mining and processing industry. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 1, pp. 66–69. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.14.

15. Shevyreva N. Yu. Influence of active rectifier with relay current circuit on supply voltage distortion. *Gornyi Zhurnal*. 2022, no. 12, pp. 49 – 54. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2022.12.09.
16. Myakotnykh A. A., Ivanova P. V., Ivanov S. L. Criteria and technological requirements for creation of a bridge platform to extract peat raw materials for climate-neutral geotechnology. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 4, pp. 116 – 120. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-4-116-120.
17. Abramovich B. N., Bogdanov I. A. Improving the efficiency of autonomous electrical complexes of oil and gas enterprises. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 249, pp. 408 – 416. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.10.
18. Morenov V., Leusheva E., Buslaev G., Gudmestad O. System of comprehensive energy-efficient utilization of associated petroleum gas with reduced carbon footprint in the field conditions. *Energies*. 2020, vol. 13, no. 18, article 4921. DOI: 10.3390/en13184921.
19. Korogodin A. S., Ivanov S. L. Assessment of the technical condition of drum mill supporting sliding bearings during operation as part of an arctic mining equipment complex. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 6, pp. 144 – 151. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-6-144-151.
20. Shpenst V. A., Orel E. A., Babyr K. V. Reliability improvement of DC-DC power converters by means of feedback signals reserve. *Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus-2022*. 2022, pp. 1270 – 1275.
21. Ilyushin Y. V., Nosova V. A., Krauze A. Application of systems analysis methods to construct a virtual model of the field. *Energies*. 2025, no. 18, pp. 1 – 35.
22. Avdeev B. A., Vyngra A. V., Chernyi S. G., Zhilenkov A. A., Degtyarev A., Mamunts D., Kustov A. Parametric correction in the control system of the electric propulsion of autonomous underwater vehicles affected by random inputs. *Discover Applied Sciences*. 2024, vol. 6, no. 10, article 510.
23. Avdeev B., Vyngra A., Chernyi S. Improving the electricity quality by means of a single-phase solid-state transformer. *Designs*. 2020, vol. 4, no. 3, article 35. DOI: 10.3390/designs4030035.
24. Muratbakeev E. H., Kozhubaev Y. N., Yao Y., Shehzad U. Symmetrical modeling of physical properties of flexible structure of silicone materials for control of pneumatic soft actuators. *Symmetry*. 2024, vol. 16, no. 750. DOI: 10.3390/sym16060750.
25. Raupov I., Rogachev M., Sytnik J. Overview of modern methods and technologies for the well production of high- and extra-high-viscous oil. *Energies*. 2025, vol. 18, article 1498. DOI: 10.3390/en18061498.
26. Mikhailov A. V., Kazakov Y. A., Soloviev I. V. Analysis of block technology elements for surface excavation of organogenic material. *Russian Mining Industry Journal*. 2025, no. 1, pp. 129 – 136. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1-129-136.
27. Klyuev R. V., Morgoeva A. D., Gavrina O. A., Bosikov I. I., Morgoev I. D. Forecasting planned electricity consumption for the united power system using machine learning. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 261, pp. 392 – 402. [In Russ].
28. Bazhin V. Y., Ustinova Y. V., Fedorov S. N., Shalabi M. E. K. Improvement of energy efficiency of ore-thermal furnaces in smelting of aluminosilic raw materials. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 261, pp. 384 – 391. [In Russ].
29. Ustinov D. A., Aysar A. R. Analysis of the impact of the distributed generation facilities on protection systems and voltage mode: Review. *Occupational Safety in Industry*. 2023, no. 2, pp. 15 – 20. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-2-15-20.
30. Yanchenko S. A., Costa F. B., Strunz K. Simulation tool for accurate and fast assessment of harmonic propagation in modern residential grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021, vol. 36, no. 4, pp. 2118 – 2128. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3020754.
31. Baburin S. V., Turyшева A. V., Kovalchuk M. S. Algorithm for the choice of power supply system rational structure of gas pumping stations. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сериков Владимир Александрович¹ — канд. техн. наук, ассистент кафедры, e-mail: Serikov.va@bk.ru, ORCID ID: 0000-0002-2863-000X,

Костин Владимир Николаевич — канд. техн. наук,
доцент, ведущий специалист проектов,
Группа компаний «Городской центр экспертиз —
Энергетика» (ГЦЭ-Энерго),
e-mail: kostin_vn@mail.ru,

*Сычев Юрий Анатольевич*¹ — д-р техн. наук,
доцент, e-mail: ya_sychev@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0119-505X,

Самет Хайдар — д-р техн. наук, профессор,
Ширазский университет, Шираз, Иран,
e-mail: hsamet@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-1367-3872,

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.

Для контактов: Сериков В.А., e-mail: Serikov.va@bk.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.A. Serikov*¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant of Chair, e-mail: Serikov.va@bk.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2863-000X,

V.N. Kostin, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, Leading Specialist,
SC «City Center for Expertise»,
192102, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: kostin_vn@mail.ru,

*Yu.A. Sychev*¹, Dr. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, e-mail: ya_sychev@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0119-505X,

Haidar Samet, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
School of Electrical and Computer Engineering,
Shiraz University, Shiraz, Iran,
e-mail: hsamet@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-1367-3872,

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: V.A. Serikov, e-mail: Serikov.va@bk.ru.

Получена редакцией 12.02.2025; получена после рецензии 25.03.2025; принята к печати 10.06.2025.

Received by the editors 12.02.2025; received after the review 25.03.2025; accepted for printing 10.06.2025.



ПРОБЛЕМАТИКА ПРАВОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ РОССЫПНОГО ЗОЛОТА ИЗ ТЕХНОГЕННО- МИНЕРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В.Е. Черняков

АЗДК «Золото Якутии», Москва, Россия, e-mail: info.yazoloto@bk.ru

Аннотация: Рассмотрена проблема правового регулирования извлечения россыпного золота из техногенно-минеральных образований (отвалов) в Российской Федерации. Актуальность темы обусловлена растущим интересом к переработке отходов горной промышленности и необходимости оптимизации законодательства в данной области. Проанализирована существующая нормативно-правовая база, выявлены пробелы и противоречия в правовом регулировании. Также анализируются позиции профессионального и научного сообщества. Дополнительно внимание уделяется вопросам лицензирования, охраны окружающей среды и правам местных сообществ. Предлагаются рекомендации по совершенствованию правового и управленческого механизма, направленного на устойчивое и эффективное использование техногенно-минеральных ресурсов, что может способствовать не только экономическому развитию, но и улучшению экологической ситуации в регионах, в том числе в золотоносных районах Республики Саха (Якутия).

Ключевые слова: техногенно-минеральное образование (ТМО), твердые полезные ископаемые, россыпное золото, законодательное регулирование недропользования, вторичная добыча, участок горного отвода, экономическая мотивация недропользователей.

Для цитирования: Черняков В. Е. Проблематика правового регулирования промышленного извлечения россыпного золота из техногенно-минеральных образований в Российской Федерации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 7. – С. 184–193. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_184.

Problems of legal regulation of industrial extraction of alluvial gold from man-made mineral formations in the Russian Federation

V.E. Chernyakov

AZDK «Gold of Yakutia», Moscow, Russia, e-mail: info.yazoloto@bk.ru

Abstract: The article considers the problem of legal regulation of extraction of alluvial gold from technogenic mineral formations (dumps) in the Russian Federation. The relevance of the topic is due to the growing interest in the processing of mining waste and the need to optimize legislation in this area. The work analyzes the existing regulatory framework, and identifies gaps and contradictions in legal regulation. The positions of the professional and scientific community are also analyzed. Additional attention is paid to licensing, environmental protec-

tion and the rights of local communities. In conclusion, recommendations are offered for improving the legal and management mechanism aimed at sustainable and efficient use of technogenic mineral resources, which can contribute not only to economic development, but also to improving the environmental situation in the regions, including in the gold-bearing areas of the Republic of Sakha (Yakutia).

Key words: technogenic mineral formation (TMF), solid minerals, placer gold, legislative regulation of subsoil use, secondary mining, mining allotment area, economic motivation of subsoil users.

For citation: Chernyakov V. E. Problems of legal regulation of industrial extraction of alluvial gold from man-made mineral formations in the Russian Federation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(7):184-193. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_184.

Введение

Проблемы добычи россыпного золота в Российской Федерации становятся особенно актуальными в свете последних изменений в законодательстве, касающихся регулирования освоения техногенно-минеральных образований. Принятый 29 декабря 2022 г. Федеральный закон № 598-ФЗ «О внесении изменений в Закон Российской Федерации “О недрах” и статью 2 Федерального закона “Об отходах производства и потребления”» затрагивает ключевые аспекты, влияющие на неопределенный в законодательстве объем понятия, правовой статус техногенно-минеральных образований и порядок их использования для извлечения полезных ископаемых, в том числе россыпного золота, представляющего коммерческий интерес для добывающих предприятий объединения АЗДК «Золото Якутии».

Именно поэтому в данном исследовании мы рассмотрим основные правовые аспекты и коллизии, связанные с процессом извлечения золота из техногенно-минеральных отвалов в Республике Саха (Якутия) и других золотоносных регионах Российской Федерации [1, 2].

Стоит отметить важность промышленной разработки техногенно-минеральных образований (ТМО) для золотопромышленной отрасли в целом. Академик

Н.А. Шило подчеркивал [3] перспективность ТМО как источника вторичных ресурсов и важного элемента в обеспечении устойчивого развития горной отрасли. По его мнению, ТМО представляют собой значительный потенциал для восполнения дефицита природных полезных ископаемых и снижения экологического воздействия традиционной добычи. Н.А. Шило считал, что рациональное использование ТМО может способствовать не только экономическому росту, но и улучшению экологической ситуации за счет переработки отходов и уменьшения нагрузки на природные ресурсы. Академик акцентирует внимание на необходимости развития научных исследований и технологических инноваций в этой области, что позволит оптимизировать процессы извлечения и переработки ресурсов, а также повысить экономическую эффективность проектов, связанных с ТМО [3].

Основные изменения, введенные законом 598-ФЗ, касаются отнесения к регулированию правовых норм в Законе РФ «О недрах» предоставления права на пользование такими природными ресурсами без проведения конкурсов и аукционов. Однако право пользования такими недрами дается только на один год, что создает множество правовых и практических проблем.

Председатель Союза старателей России В.И. Таракановский от имени золотопромышленного сообщества высказывает серьезную критику действующего законодательства о техногенно-минеральных образованиях в стране. Он подчеркивает, что отсутствие четкой правовой базы и легального определения ТМО создает массу проблем для горной отрасли. В.И. Таракановский отмечает, что действующие нормы не обеспечивают ясности в вопросах лицензирования, эксплуатации и переработки техногенных ресурсов, что, в свою очередь, затрудняет инвестирование и развитие этого сегмента экономики [4].

По его мнению, текущие законы не способствуют рациональному использованию ТМО и создают преграды для их эффективного управления. Ограничение по срокам пользования техногенно-минеральными образованиями, установленное на один год без проведения конкурсов и аукционов, является особенно проблематичным, поскольку это делает проекты по воспроизводству ресурсов экономически нецелесообразными. В.И. Таракановский говорит о необходимости пересмотра законодательства и внедрения новых подходов, которые позволят более эффективно использовать техногенные ресурсы, а также будут способствовать развитию экологически чистых технологий для их переработки и реабилитации техногенно измененных территорий. Он призывает к разработке комплексной стратегии, которая бы учитывала специфику и потенциал ТМО в России, способствовала улучшению инвестиционного климата и обеспечивала устойчивое развитие отрасли.

На основании вышеизложенной аргументации можно выделить три объединенных проблемных пункта:

1. Отсутствие легального определения техногенно-минерального образова-

ния [5, 6]. Одной из ключевых проблем в реализации нового законодательства является отсутствие юридически четкого определения техногенно-минерального образования. Это приводит к правовым неясностям и затрудняет регулирование порядка добычи.

2. Ограниченный срок пользования объектами ТМО [4–6]. Установление ограниченного срока (1 год) для пользования техногенно-минеральными образованиями без аукционов и конкурсов создает неопределенность и риск недостаточных инвестиций со стороны компаний, что может негативно сказаться на эффективности извлечения и переработки золота. В частности, с этим столкнулись и наши специалисты. Финансовый директор объединения «Золото Якутии» С.В. Положевец отметил повышение инвестиционных рисков при разработке ТМО в северных золотоносных районах Республики Саха (Якутия), где из-за особенностей климатических условий извлечение россыпного золота из ТМО представляется крайне затруднительным в 12-месячный срок.

3. Экологические и социальные риски [3, 7]. Интенсивная добыча золота из техногенно-минеральных образований может привести к экологическим последствиям, включая загрязнение водоемов и почвы, ухудшение качества жизни местного населения. Необходим строгий экологический контроль и общественное обсуждение проектов добычи.

Также можно сделать акцент на проблемах с капитализацией горных предприятий и учетом техногенного минерального сырья в качестве актива, повышающего инвестиционную привлекательность компании [8].

Анализ проблем и возможных решений

Для решения указанных проблем необходимы следующие мероприятия.

- Разработка четкого и рабочего определения техногенно-минерального образования, которое упростит правоприменение. Необходимо привлечь экспертов из области юриспруденции и геологии для создания универсальной модели определения и классификации. Мы убеждены, что в данной ситуации необходимо руководствоваться научным понятием, предложенным профессором Пермского университета В.А. Наумовым. Термин «техногенно-минеральные образования» (ТМО) применительно к отвалам отработки месторождений твердых полезных ископаемых более предпочтителен, чем термин «техногенные образования». Он является более широким и не только включает в себя техногенные образования (продукты изменения вещественного состава природных образований), но и соотносит их с основным содержанием — минеральной составляющей. Современные трактовки и использование термина «техногенно-минеральное образование» имеют устойчивый характер, что отражено во многих публикациях, касающихся техногенных отвалов как продуктов отработки природных месторождений.

ТМО — принципиально новый результат взаимодействия природной среды и технической деятельности человека, представляющий собой часть и проявление нового геологического процесса, связанного с деятельностью человека. ТМО образуется из природных минеральных объектов в результате переработки вещественного состава осадков и пород, приводящей к незначительным изменениям петрографического, минерального и химического состава природных отложений. По своей сути, более 90—99% ТМО не претерпевают изменения вещественного состава и, соответственно, могут рассматриваться как видоизмененные природные минеральные образования в процессе обогаще-

ния и переработки первичного вещества. Следовательно, их нельзя идентифицировать в качестве отходов производства, а следует рассматривать как частично измененные и перемещенные природные минеральные образования, которые не исчерпали своего минерального потенциала и могут быть успешно использованы для ведения хозяйственной деятельности, о чем свидетельствует зарубежный опыт Канады, Италии и Казахстана [5, 9]. Вместе с тем, вывод на поверхность ТМО в зону интенсивного воздействия факторов (вода, воздух, биота и др.) приводит к интенсивному гипергенному преобразованию их минерального и химического состава, включая первичные свойства минерального вещества и характеристики окружающей среды. При преобразовании вещества ТМО происходит высвобождение, диспергация частиц полезных компонентов (например, нано-, микрочастиц золота), перевод их в коллоидное состояние, а также укрупнение, управление микро- и макрочастицами, добавками к самородкам (доказано экспериментально на основе Алданских россыпей) [5].

- Продление сроков пользования техногенно-минеральными образованиями как лицензионными объектами недропользования с целью стимулирования инвестиций и реализации долгосрочных проектов добычи. Это позволит компаниям более эффективно планировать свои ресурсы и наращивать объемы добычи. Продление сроков пользования техногенно-минеральными образованиями (ТМО) является важным шагом к стимуляции инвестиций и реализации долгосрочных проектов по добыче и переработке ресурсов, образованных в результате горной деятельности. В условиях, когда традиционные источники полезных ископаемых истощаются и растет интерес к вторичным ресурсам, таким

как ТМО, вопрос продления сроков их использования становится особенно актуальным. Одной из главных проблем, с которой сталкиваются компании, занимающиеся добычей из ТМО, является ограничение по срокам лицензирования, часто установленное на 1 год. Это создает значительные трудности для планирования и осуществления долгосрочных проектов, так как краткосрочные сроки не позволяют инвесторам обеспечить достаточную финансовую отдачу. Для успешной реализации таких проектов необходимо привлекать значительные капитальные вложения, что требует уверенности в долгосрочной стабильности условий эксплуатации. Продление сроков пользования ТМО может способствовать созданию более предсказуемого и стабильного законодательного поля, что, в свою очередь, будет привлекать инвестиции в эту сферу. Долгосрочные лицензии позволят компаниям разрабатывать стратегические планы по добыче и переработке, направленные на долгосрочную и устойчивую эксплуатацию ресурсов, а также реализацию проектов безопасности и экологической реабилитации. Кроме того, увеличение сроков пользования ТМО позволит горнодобывающим компаниям более эффективно планировать свои операции, а для многих предприятий и продлить срок их эксплуатации. Это может помочь улучшить методы переработки, внедрять новые технологии и реализовывать экологически чистые подходы к использованию техногенных ресурсов, в том числе с учетом комплексной переработки попутных компонентов, не ограничиваясь золотом. Специализированные научные исследования золотоносных фаз, направленные на изучение благоприятных условий для управления свойствами среды с целью укрупнения частиц золота в техногенных осадках, необходимо обосновать и отдать пред-

почтение перспективным участкам недр для такого «выращивания золота». С точки зрения экологии, это также даст возможность проводить качественное восстановление затронутых территорий и биосистем и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду. В итоге продление сроков пользования техногенно-минеральными образованиями может стать ключевым фактором для активизации инвестиций в сектор, повысить привлекательность проектов, способствовать устойчивому социально-экономическому развитию территорий и развитию отрасли в целом [1, 5, 8, 10].

- Формирование экологических норм и стандартов для добычи золота из техногенно-минеральных образований. Включение общества в процесс принятия решений через общественные слушания и консалтинговые группы поможет сбалансировать интересы бизнеса и местных жителей [11].

Будущие направления развития

С точки зрения дальнейших направлений можно выделить следующие приоритеты:

- проведение комплексных исследований, направленных на оценку и переоценку ресурсов техногенно-минеральных образований (с учетом их комплексной глубокой переработки с рентабельным извлечением всех доступных попутных компонентов) и их воздействия на окружающую среду [5];
- изучение благоприятных условий управления свойствами среды для укрупнения частиц золота в техногенных осадках [5];
- разработка стратегий по экоремедиации и восстановлению территорий, затронутых добычей [3];
- создание информационных баз данных по техногенно-минеральным образованиям, что позволит существенно улучшить как легальное регулирование,

так и доступ к информации для заинтересованных сторон [10].

Также стоит доктринально закрепить следующие положения:

1. ТМО — не отходы производства, а частично измененные и перемещенные природные минеральные образования, природный минеральный потенциал которых использован не в полной мере, потенциальные хозяйственные объекты, имеющие потребительскую стоимость [5].

2. Определение потребительской стоимости ТМО и направления их дальнейшего использования — задача и обязанность субъектов хозяйственной деятельности, перерабатывающих природные минеральные образования. Потенциальные направления использования ТМО должны быть реализуемы на стадии геологического изучения недр и отражены в проектах освоения и использования техногенных минеральных образований. Основной путь реализации — разработка технологии переработки, технических условий, управления составом, создание новых характеристик минеральных образований и направлений их дальнейшего использования.

3. Предприятия, реализующие материалы техногенно-минеральных образований, после специальной оценки техногенно-минеральных ресурсов должны иметь налоговые и иные преференции при ведении хозяйственной деятельности [8].

Таким образом, правовое регулирование извлечения россыпного золота из техногенно-минеральных образований в

России требует всестороннего анализа и пересмотра для учета современных вызовов и обеспечения устойчивого развития сектора.

Заключение

Данное направление остается на стыке экономики, горного дела, геологии, права и экологии, что требует комплексного подхода и интеграции различных точек зрения и экспертиз. Безусловно, дальнейшие изменения законодательства должны быть направлены на создание сбалансированной системы, способствующей как обеспечению выгоды для бизнеса, так и охране интересов общества и окружающей среды.

Мы предлагаем выработать мотивированное предложение для внесения поправок в Федеральное законодательство совместными усилиями руководителей добывающих и обогащательных предприятий, ученых, а также общественных организаций при участии депутата и члена Комитета по законодательству и госстроительству Государственной думы ФС РФ А.Е. Глазковой, профессора кафедры поисков и разведки полезных ископаемых Пермского университета и руководителя исследовательской группы д.г.-м.н. В.А. Наумова, Председателя совета Союза старателей России В.И. Таракановского, Председателя Союза золотопромышленников Якутии М.Л. Брука, Исполнительного директора Ассоциации «Горнопромышленники России» и члена бюро Высшего горного совета А.Ю. Никитина и других заинтересованных лиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Игнатьев Д. А.* Правовой режим обращения с отходами, образующимися при пользовании недрами // Пробелы в российском законодательстве. Юридический журнал. — 2020. — Т. 13. — № 3. — С. 96–106.
2. *Годовой* технический отчет группы компании АЗДК «Золото Якутии».
3. *Шило Н. А.* Основы учений о россыпях. — М.: Наука, 1985. — 400 с.

4. Таракановский В. И. Резолюция Совета Союза старателей России по ФЗ-598 от 2024 г. / Золото и технологии–2024. URL: [https://zolteh.ru/news/opublikovan_otchetnyy_doklad_soyuza_starateley_rossii/].

5. Наумов В. А., Лунев Б. С., Наумова О. Б. Техногенные месторождения — резерв минеральной базы России // Вестник Пермского университета. Геология. — 2011.

6. Сидоркин А. И., Сидоркина Н. А. Техногенные месторождения в Российской Федерации: проблемы законодательного регулирования и судебной практики / Аграрное и земельное право. — М., 2016.

7. Россман Г. И., Пикалова В. С., Королева Н. Л. Проблема эколого-экономической оценки ущерба здоровью населения при составлении ТЭО кондиций и проектов освоения месторождений минерального сырья // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 11. — С. 52—58.

8. Черняков В. Е. Перспективы модернизации и восстановления добычи россыпного золота на Куларском месторождении АЗДК «Золото Якутии» // Недропользование XXI век. — 2024. — № 5-6 (105). — С. 115—118.

9. Наумов В. А., Фиоруччи А., Голдырев В. В., Брюхов В. Н., Фетисов В. В. Научные основы управления геологическими процессами в техногенно-минеральных образованиях // Международный научно-исследовательский журнал. — 2018. — № 9 (75). DOI: 10.23670/IRJ.2018.75.9.016.

10. Лобов Н. М., Лебедева О. Ю., Маринина О. А., Васильев Ю. Н., Медведев В. А., Невская М. А., Николайчук Л. А., Дмитриева Д. М., Синьков Л. С., Лебедева О. Ю. Актуальные вопросы развития минерально-сырьевого комплекса России: состояние рынков, энергетическая безопасность, рациональное недропользование, нормативно-правовое обеспечение, методы оценки рисков, системы управления // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № S8. — 80 с.

11. Комарова С. Г., Иванова Ю. Н. Нормативная база экологической стандартизации // Успехи в химии и химической технологии. — 2015. — Т. 29. — № 2. — С. 23—24. **МИАБ**

REFERENCES

1. Ignatiev D. A. Legal regime for waste management formed during the use of subsoil. *Gaps in Russian legislation. Legal journal*. 2020, vol. 13, no. 3, pp. 96—106. [In Russ].

2. Godovoy tekhnicheskiiy otchet gruppy kompanii AZDK «Zoloto Yakutii» [Annual technical report of the AZDK «Gold of Yakutia» group of companies]. [In Russ].

3. Shilo N. A. *Osnovy ucheniy o rossypanyakh* [Fundamentals of the doctrine of placers], Moscow, Nauka, 1985, 400 p.

4. Tarakanovsky V. I. Resolution of the Council of the Union of Prospectors of Russia under Federal Law 598 of 2024. *Zoloto i tekhnologii–2024* [Gold and Technology–2024]. [In Russ]. available at: https://zolteh.ru/news/opublikovan_otchetnyy_doklad_soyuza_starateley_rossii/.

5. Naumov V. A., Lunev B. S., Naumova O. B. Technogenic deposits — reserve of mineral base of Russia. *Bulletin of Perm University. Geology*. 2011. [In Russ].

6. Sidorkin A. I., Sidorkina N. A. Man-made deposits in the Russian Federation: problems of legislative regulation and judicial practice. *Agrarnoe i zemel'noe pravo* [Agrarian and land law], Moscow, 2016.

7. Rossman G. I., Pikalova V. S., Koroleva N. L. The problem of ecological and economic assessment of the impact on public health when drawing up T30 conditions and developing mineral deposit projects. *Prospect and protection of mineral resources*. 2015, no. 11, pp. 52—58. [In Russ].

8. Chernyakov V. E. Prospects for growth and restoration of placer gold mining at the Kularskoye deposit of the AZDK «Gold of Yakutia». *Nedropolzovanie XXI vek*. 2024, no. 5-6 (105), pp. 115—118. [In Russ].

9. Naumov V. A., Fiorucci A., Goldyrev V. V., Bryukhov V. N., Fetisov V. V. Scientific foundations of managing geological processes in technogenic-mineral formations. *International Research Journal*. 2018, no. 9 (75). [In Russ]. DOI: 10.23670/IRJ.2018.75.9.016.

10. Lobov N. M., Lebedeva O. Yu., Marinina O. A., Vasiliev Yu. N., Medvedev V. A., Nevskaya M. A., Nikolaychuk L. A., Dmitrieva D. M., Sinkov L. S., Lebedeva O. Yu. Current issues of development of the mineral resource complex of Russia: state of markets, energy security, rational subsoil use, legal framework, risk assessment methods, management systems. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2015, no. S8, 80 p. [In Russ].

11. Komarova S. G., Ivanova Yu. N. Regulatory basis of other standardization. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*. 2015, vol. 29, no. 2, pp. 23–24. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Черняков Валентин Евгеньевич — исследователь, генеральный директор объединения АЗДК «Золото Якутии», соавтор научного доклада на Международном научном симпозиуме «Неделя горняка МИСИС» 2025 г., e-mail: info.yazoloto@bk.ru, ORCID ID: 0009-0000-6074-0156, Research ID: JVO-9017-2024.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

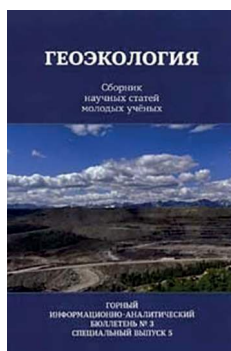
V.E. Chernyakov, Researcher, General Director, Association AZDK «Gold of Yakutia», 129515, Moscow, Russia; co-author of the scientific report at the International Scientific Symposium «Miner's Week MISIS» 2025, e-mail: info.yazoloto@bk.ru, ORCID ID: 0009-0000-6074-0156, Research ID: JVO-9017-2024.

Получена редакцией 19.03.2025; принята к печати 10.06.2025.

Received by the editors 19.03.2025; accepted for printing 10.06.2025.



НОВИНКИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»



Коллектив авторов

Геоэкология. Сборник научных статей молодых учёных:

Горный информационно-аналитический бюллетень

(научно-технический журнал). — 2025. — № 3 (специальный выпуск 5)

Страниц: 100

Тематика посвящена широкому кругу актуальных проблем в области управления отходами добычи минерального сырья и его переработки, оценки безопасности добываемых углей в части содержания в них потенциально-опасных элементов и рисков самовозгорания, разработки метрологического обеспечения для контроля измерений показателей безопасности углей и отходов, а также перспективным технологиям улавливания парниковых газов.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ СПИРАЛЬНО-
КОНИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПРИВОДОВ ГОРНЫХ МАШИН НА СТАНКАХ С ЧПУ

(2025, № 5, СБ 6, 20 с.)

Фам Куок Хоанг¹ — канд. техн. наук, e-mail: phqhoang@gmail.vn,

Динь Хоанг Тьюй¹ — аспирант,

Мнацаканян Виктория Умедовна — докт. техн. наук, профессор, НИТУ МИСИС, e-mail: artvik@bk.ru,

¹ Технический университет имени Ле Куи Дона, Ханой, Вьетнам.

Представлены результаты исследования влияния параметров обработки на погрешность формы, шероховатость поверхности и время обработки при формообразовании спиральных конических зубчатых колес Gleason на станке с ЧПУ модели Klingelnberg C27. Для решения задач оптимизации параметров обработки использовалась матрица планирования экспериментов Бокса-Бенкена, программное обеспечение Minitab, при помощи которых были получены адекватные квадратичные уравнения регрессии, определяющие количественную связь между качеством и производительностью обработки колеса и технологическими параметрами обработки — глубиной чернового резания (ST1), скоростью чистового резания (VT2) и глубиной чистового резания (ST2). Результаты исследования показывают, что параметр VT2 является доминирующим фактором, который оказывает существенное влияние на изменение погрешности формы (VT2 — 76,83%) и шероховатости поверхности (VT2 — 71,73%). При оптимальных параметрах (ST1 = 0,079 мм, VT2 = 307 м/мин, ST2 = 0,026 мм) погрешность формообразования составила 7,933 мкм (класс 6, DIN 3965), шероховатость поверхности — 0,6243 мкм (класс 8), а время обработки составило 196 с, т.е. уменьшилось на 28,73%. Выполненные эксперименты подтвердили высокую точность полученных регрессионных моделей, что обеспечивает надежную основу для прогнозирования качества и эффективности производства спирально-конических зубчатых колес.

Ключевые слова: спиральная коническая передача, станок с ЧПУ, параметры обработки, погрешность формы, шероховатость поверхности, уравнения регрессии, оптимизация, план Бокса-Бенкена.

IMPROVING THE QUALITY AND PRODUCTIVITY OF MACHINING SPIRAL BEVEL GEARS
OF MINING MACHINERY DRIVES ON CNC MACHINES

Pham Quoc Hoang¹, Cand. Sci. (Eng.), e-mail: phqhoang@gmail.vn,

Dinh Hoang Thuy¹, Graduate Student,

V.U. Mnatsakanyan, Dr. Sci. (Eng.), Professor, NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia, e-mail: artvik@bk.ru,

¹ Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam.

This study investigates the effects of machining parameters on form error, surface roughness, and machining time during the production of Gleason spiral bevel gears on a Klingelnberg C27 CNC generating machine. To solve the problems of optimizing processing parameters, the Box-Behnken experiment planning matrix and Minitab software were used, which were used to obtain adequate quadratic regression equations that quantify the relationship between the quality and productivity of wheel machining and the processing parameters - rough cutting depth (ST1), finishing speed (VT2) and finishing depth (ST2). Results indicate that VT2 is the dominant factor, contributing 76.83% to form error and 71.73% to surface roughness. Optimal parameters (ST1 = 0.079 mm, VT2 = 307 m/min, ST2 = 0.026 mm) achieved a form error of 7.933 μm (Grade 6, DIN 3965), surface roughness of 0.6243 μm (Grade 8), and a machining time of 196 seconds, reducing machining time by 28.73%. The experiments performed have confirmed the high accuracy of the regression models obtained, which provides a reliable basis for predicting the quality and efficiency of production of spiral bevel gears.

Key words: Spiral bevel gear, CNC generating machine, machining parameters, form error, surface roughness, regression models, optimization, Box-Behnken design.



**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ВОДОПРОВОДИМОСТИ ТРЕЩИН В МАССИВЕ СКАЛЬНЫХ ПОРОД
НА ОСНОВЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

(2025, № 5, СВ 7, 20 с.)

Чумаков Андрей Александрович — аспирант, НИТУ МИСИС, e-mail: chumakov.4n@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0006-3697-3527.

Приведены результаты исследований по определению типа водопроводимости трещин в массиве скальных пород на основе ультразвуковых измерений. Изготовлена лабораторная установка, позволяющая фиксировать образец керна горной породы с возможностью изменять раскрытие трещины и проводить ультразвуковое прозвучивание. Результаты показали, что границей раскрытия капиллярных трещин является раскрытие равное 150 мкм. Подобраны параметры аппроксимирующей спектр ультразвуковой волны, пройденной через водозаполненную трещину капиллярного раскрытия, функции нижних частот Баттерворта для возможности выделения таких трещин в горной породе и определения их раскрытия. Результаты показали, что наиболее чувствительным параметром является порядок функции. При прохождении через водозаполненную трещину он падает более чем в два раза по сравнению с прохождением через ненарушенный образец. Установлена линейная связь между раскрытием трещины и порядком функции. Результаты компьютерного моделирования ультразвукового каротажа показали возможность выделения таких трещин в массиве горных пород по падению амплитуд частот при прохождении через водозаполненные трещины.

Ключевые слова: ультразвук, контроль, трещиноватость, массив горных пород, раскрытие трещины, функция Баттерворта, капиллярное раскрытие, спектр ультразвуковой волны.

**DETERMINATION OF FRACTURE PERMEABILITY TYPE IN ROCK MASS
BASED ON ULTRASONIC MEASUREMENTS**

A. A. Chumakov, Graduate Student, NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia, e-mail: chumakov.4n@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0006-3697-3527.

The paper presents research results on determining the type of fracture permeability in rock mass based on ultrasonic measurements. A laboratory setup has been developed, enabling the fixation of a rock core sample with the capability to vary fracture aperture and perform ultrasonic testing. The findings indicate that the threshold aperture for capillary fractures is 150 micrometers. Parameters of the Butterworth low-pass filter function have been selected to approximate the spectrum of ultrasonic waves transmitted through water-filled capillary fractures, allowing for the identification of such fractures in rock and determination of their aperture. The results demonstrate that the most sensitive parameter is the order of the function, which decreases by more than two times when passing through a water-filled fracture compared to an intact sample. A linear relationship has been established between fracture aperture and the order of the function. Computer modeling of ultrasonic logging has shown the possibility of identifying such fractures in rock mass by the amplitude reduction of frequencies during transmission through water-filled fractures.

Key words: Ultrasonic, monitoring, fracturing, rock mass, fracture opening, Butterworth function, capillary opening, ultrasonic wave spectrum.



СОДЕРЖАНИЕ

Геомеханика, разрушение горных пород

Чуприн К. Э., Мансуров В. А., Бабкин Е. А., Еременко В. А., Косырева М. А. Исследование влияния взрывов скважинных и шпуровых зарядов взрывчатых веществ на целики и вмещающий массив выработок в условиях комбинированной открыто-подземной разработки месторождения Джеруй	5
Белов О. Д. Оценка энергии поглощения предохранительных противокампаных валов с учетом их конструкционных и геотехнических параметров.....	24
Наход В. А., Малов А. И., Данилов К. Б., Горелик Г. Д. Оценка воздействия взрывных работ на карстовый рельеф заказника (Архангельская область)	38
Нгуен Тай Тиен, Карасев М. А., До Нгок Ань Влияние стыков на поведение сегментной обделки тоннеля квази-прямоугольного очертания.....	55

Геотехнология

Оборин А. В., Батугин А. С., Диваков В. И., Хотченков Е. В., Степанова А. Д. Исследование геодинамического состояния массива в районе расположения ПХГ методом газовой томографии (на примере волгоградского ПХГ)	73
--	----

Геоэкология

Фоменко В. А., Соколов А. А., Лолаев А. Б., Башмашников И. И., Турметова Г. Ж. Оценка эволюции деформационных процессов в техногенном массиве рекультивированного объекта горного производства.....	90
--	----

Горные машины

Джураев Р. У., Меркулов М. В., Хатамова Д. Н., Асанов А. Т. Разработка технических решений по предотвращению образования шламового режима на забое скважины	102
--	-----

Геоинформатика

Зайцева Е. В., Кочнева А. А., Катунцов Е. В. Оптимизация технологического процесса повышения контрастности на изображениях, полученных в шахтах	115
--	-----

Техносферная безопасность в горной промышленности

Виноградов Ю. И., Сергиенко Н. Н., Васильев Т. В., Песьяков А. В. Перспективы применения патронированных газогенераторов на основе хлората натрия в горном деле и строительстве.....	131
Максимов Д. А. Аномальный характер растительности как индикатор локальных фильтрационных нарушений в теле насыпных гидротехнических сооружений	146

Энергетика и энергоэффективность горной промышленности

Клюев Р. В. Анализ энергоэффективности и оптимальных режимов работы оборудования горно-обогатительного комбината	157
Сериков В. А., Сычев Ю. А., Костин В. Н., Хайдар Самет Оценка влияния активного индуктивно-емкостного фильтра на амплитудно-частотные характеристики промышленных систем электроснабжения при резонансных режимах	170

Горное дело: научно-техническая и аналитическая информация, история, публицистика

Черняков В. Е. Проблематика правового регулирования промышленного извлечения россыпного золота из техногенно-минеральных образований в Российской Федерации.....	184
---	-----

CONTENT

Geomechanics, Rock failure

Chuprin K. E., Mansurov V. A., Babkin E. A., Eremenko V. A., Kosyreva M. A. Impact of blasthole blasting on pillars and enclosing rock mass during hybrid opencast/underground mining at the Jerui deposit.....	5
Belov O. D. Evaluation of energy absorption capacity of anti rockfall barriers with regard to their design parameters and geotechnical properties.....	24
Nakhod V. A., Malov A. I., Danilov K. B., Gorelik G. D. Impact of blasting on karst relief of a nature reserve in the Arkhangelsk Region.....	38
Nguyen Tai Tien, Karasev M. A., Do Ngoc Anh Effect of joints on the behavior of a segmental sub-rectangular tunnel lining.....	55

Geotechnology

Oborin A. V., Batugin A. S., Divakov V. I., Khotchenkov E. V., Stepanova A. D. Gas tomography-based study of geodynamics in location area of underground gas storage: A case-study of the Volgograd UGS.....	73
---	----

Geoecology

Fomenko V. A., Sokolov A. A., Lolaev A. B., Bashmashnikov I. I., Turmetova G. Z. Evolution of deformations inside reclaimed man-made object of mining practice	90
---	----

Mining machinery

Djuraev R. U., Merkulov M. V., Khatamova D. N., Asanov A. T. Engineering solutions for sludging prevention at bottomhole	102
---	-----

Geoinformatics

Zaitseva E. V., Kochneva A. A., Katuntsov E. V. Optimization of contrast enhancement in images obtained in mines.....	115
--	-----

Technosphere safety in mining industry

Vingradov Yu. I., Sergienko N. N., Vasilyev T. V., Pesyakov A. V. Application prospects of cartridge-type sodium chlorate gas generators in mining and construction	131
Maksimov D. A. Abnormal vegetation as an indicator of local permeation troubles in bodies of earthfill dams.....	146

Energetics and energy efficiency of mining industry

Klyuev R. V. Energy efficiency and optimum performance of mining and processing plants and equipment.....	157
Serikov V. A., Sychev Yu. A., Kostin V. N., Haidar Samet Influence of active inductor-capacitor filter on amplitude-frequency characteristic of resonant mode power supply in industry	170

Mining: scientific-and-technical information, theoretical findings, history, publications

Chernyakov V. E. Problems of legal regulation of industrial extraction of alluvial gold from man-made mineral formations in the Russian Federation.....	184
--	-----

Секретариат ГИАБ

Н.А. Голубцов, О.Н. Киреева

Рабочая группа:

Руководитель *Н.А. Голубцов*

Подготовка макета *Л.В. Гречнева*

Дизайн оформления *В.Ю. Котов, Е.Б. Капралова*

Инвестиционные проекты *Н.А. Голубцов, О.Н. Киреева*

Государственное свидетельство

о регистрации ГИАБ в Роскомнадзоре

ПИ № ФС77-70578 от 15.08.2017

Решением Президиума ВАК журнал включен
в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов
и изданий, в которых могут быть опубликованы
основные научные результаты диссертаций
на соискание ученой степени кандидата и доктора наук

Все статьи ГИАБ рецензируются.

Редакция принимает решение о публикации
по результатам рецензирования и имеет право
отклонить статью без объяснения причин

Статьи публикуются в авторской редакции

При перепечатке ссылка на ГИАБ обязательна

Использованы ресурсы с www.freepik.com

Электронная версия ГИАБ на сайтах:

www.GIAB-online.ru, www.e-library.ru,

www.cyberleninka.ru, www.ebsco.com

Метаданные статей (DOI) представлены на сайте

агентства цифровой стандартизации www.crossref.org

Индексируется в международной базе данных Scopus

Подписной индекс издания

в каталоге АО «Почта России» – **ПП837**

в каталоге «Агентство «Книга-Сервис»» – **46466, E46466**

Подписано в печать 10.06.2025.

Формат 70×100/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,925. Тираж 500 экз.

Изд № 3679-2025.

119049, Москва, Ленинский проспект, 6,

издательство «Горная книга»

тел. (499) 236-15-01; (495) 737-32-64



**ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ГОРНАЯ КНИГА»**

ISSN 0236-1493



9 770236 149002



12

**№ 7
2025**