

## Значимость независимых факторов для извлечения металлов в раствор выщелачивания

В. И. Голик<sup>1✉</sup>, С. Г. Страданченко<sup>2</sup>, Ю. В. Дмитрак<sup>3</sup>,  
В. А. Масленников<sup>4</sup>, Б. В. Дзеранов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М. И. Платова»,  
г. Новочеркасск, Российская Федерация

<sup>3</sup>ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова» Российской  
академии наук, г. Москва, Российская Федерация

<sup>4</sup>Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ, г. Шахты, Российская Федерация  
✉ [v.i.golik@vail.ru](mailto:v.i.golik@vail.ru)

**Аннотация:** Проблема утилизации некондиционных руд и хвостов их обогащения становится актуальнее с увеличением потребности промышленности в металле. Ключ к ее решению – новые технологии, позволяющие управлять свойствами утилизируемых минералов путем воздействия на технологические процессы. Приведены сведения о механизме фазового превращения металлов в раствор и взаимодействии с нерудными компонентами пород. Детализировано влияние на извлечение металлов из сырья пирита и арсенопирита, атомарного хлора, кислорода и трехвалентного железа. Охарактеризовано влияние на физико-химические процессы переменных факторов: анодной плотности тока, температуры и других факторов. Определены уровни и интервалы варьирования независимых переменных факторов в экспериментах по плану Бокса – Бенкена. Реализация методики исследований позволяет оптимизировать параметры выщелачивания металлов, снизить затраты на их добычу и увеличить диапазон применения ресурсо- и природосберегающей технологии. Результаты исследования могут быть востребованы при оптимизации производства на действующих предприятиях и повышении качества проектов освоения новых месторождений, а также в процессе подготовки кадров высшей квалификации горной и обогащающей специальности.

**Ключевые слова:** выщелачивание, руда, исследование, варианты, переменные факторы, извлечение металлов

**Для цитирования:** Голик В.И., Страданченко С.Г., Дмитрак Ю.В., Масленников В.А., Дзеранов Б.В. Значимость независимых факторов для извлечения металлов в раствор выщелачивания. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(5):10-14. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-10-14>.

## The importance of independent factors for extraction metals in the leaching solution

V. I. Golik<sup>1✉</sup>, S. G. Stradanchenko<sup>2</sup>, Yu. V. Dmitrak<sup>3</sup>,  
V. A. Maslennikov<sup>4</sup>, B. V. Dzeranov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz,  
Russian Federation

<sup>2</sup>South Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russian Federation

<sup>3</sup>Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow,  
Russian Federation

<sup>4</sup>Institute of Service and Entrepreneurship (branch), DSTU, Shakhty, Russian Federation  
✉ [v.i.golik@vail.ru](mailto:v.i.golik@vail.ru)

**Abstract:** The problem of disposal of substandard ores and their enrichment tailings is becoming more urgent with the increasing demand of the industry for metal. The key to solving this problem is new technologies that make it possible to control the properties of recyclable minerals by influencing technological processes. Information is provided on the mechanism of phase transformation of metals into solution and interaction with non-metallic rock components. The effect of atomic chlorine, oxygen, and trivalent iron on

the extraction of metals from pyrite and arsenopyrite raw materials is detailed. The influence of variable factors on physico-chemical processes is characterized: anode current density, temperature, and other factors. The levels and intervals of variation of independent variables of factors in experiments according to the Box-Behnken plan are determined. The implementation of the research methodology makes it possible to optimize the parameters of metal leaching, reduce the cost of their extraction and increase the range of applications of resource- and nature-saving technology. The research results may be in demand when optimizing production at existing enterprises and improving the quality of projects for the development of new fields, as well as in the process of training highly qualified personnel in mining and processing specialties.

**Keywords:** leaching, ore, research, variants, variable factors, metal, extraction

**For citation:** Golik V.I., Stradanchenko S.G., Dmitrak Yu.V., Maslennikov V.A., Dzeranov B.V. The importance of independent factors for extraction metals in the leaching solution. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(5):10-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-10-14>.

## Введение

**В**ыщелачивание – процесс избирательного извлечения компонентов, в ходе которого металлы из металлосодержащего сырья извлекаются путем их перевода в растворимую фазу. Скорость процесса этого перевода определяется скоростью движения выщелачивающего раствора через выщелачиваемый материал, который снижает наличие мелких рудных фракции [1–3].

Сравнительно короткая история развития технологий выщелачивания, связанная с добычей урана, золота и свинца, приведена в работах [4–6].

До настоящего времени процесс выщелачивания применяется там, где традиционные технологии разработки или неосуществимы, или высокочатотны [7–9]. Кислотное выщелачивание применяется при обогащении сульфидных хвостов обогащения с низким содержанием металлов и характеризуется большей производительностью и меньшей продолжительностью выщелачивания металлов. Скорость извлечения металлов адекватно изменяется в зависимости от параметров технологических процессов [10–12].

Исследуемое направление совершенствования технологий разработки рудных месторождений находится в числе приоритетных в России и за рубежом [13–15].

Прогресс технологии выщелачивания металлов вызвал к жизни появление новых решений в области их совершенствования [16–18], что актуализирует продолжение исследований и затронутую тему [19–21].

Скорость движения растворов определяется величиной разрыхления горной массы (рис. 1).

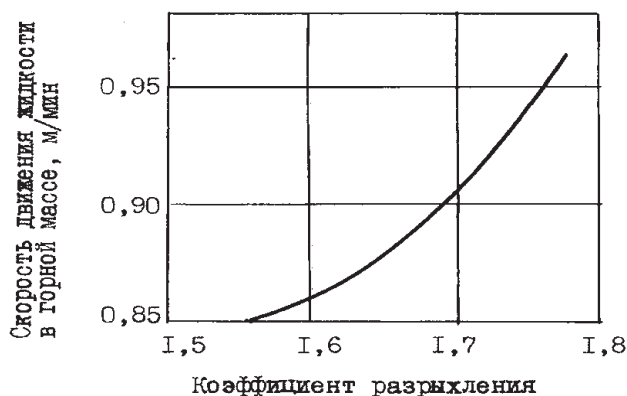


Рис. 1. Зависимость скорости движения растворов от разрыхления материала /

Fig. 1. Dependence of the velocity of movement of solutions on the loosening of the material

Проницаемость растворов снижается при наличии в руде глины (рис. 2).

Для повышения извлечения металлов из минерального сырья пульпу перемешивают с достаточной интенсивностью для исключения застойных зон или активируют в дезинтеграторах, мельницах и т. п. Эти воздействия целесообразны при извлечении металлов из уже измельченных руд и хвостов их обогащения.

**Цель исследований:** обоснование методики эффективности применения технологии с выщелачиванием в рамках системы разработки рудных месторождений с избирательным извлечением минеральных компонентов путем перевода их в растворимую фазу.

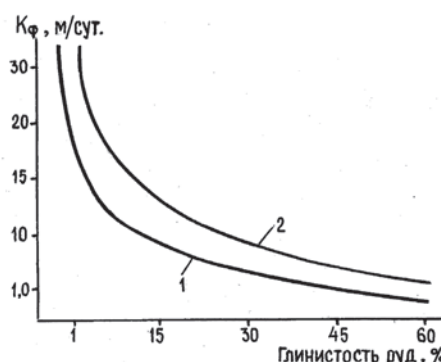


Рис. 2. Зависимость проницаемости руд от наличия глины pH: 1 – pH = 2; 2 – pH = 3 /

Fig. 2. Dependence of ore permeability on the presence of clay pH: 1 – pH = 2; 2 – pH = 3

## Методы исследований

Применялись следующие методы: обобщение опыта, анализ результатов, производственный эксперимент и технико-экономические расчеты.

Основной метод исследования – экспериментальное сравнение режимов переработки. В том числе проводилось агитационное выщелачивание активированных руд и хвостов, а также выщелачивание растворами реагентов в дезинтеграторе.

Переменными факторами выщелачивания металлов являлись: состав минерального сырья, соотношение количества выщелачивающего раствора и руд, продолжительность выщелачивания и параметры активаторов.

Рациональные значения факторов определялись экспериментально, причем пределы варьирования принимались по технологическим соображениям равномерного извлечения металлов из выщелачиваемого материала и предотвращения перехода в раствор веществ, усложняющих извлечение металлов из растворов и т. п.

## Результаты исследований

## Агитационное выщелачивание

Регламент эксперимента:

- приготовление 50 г высушенного материала;
- подготовка раствора в количестве, достаточном для эксперимента при отношении Ж:Т;
- смешивание материала с раствором и собственно выщелачивание;
- фильтрация раствора и анализ содержания в нем металлов.

Уровни и интервалы варьирования независимых факторов в экспериментах приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Пределы изменения независимых факторов /  
Limits of change of independent factors

| Уровень и интервал варьирования | Независимый фактор                       |                                          |                                           |                  |
|---------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------|
|                                 | Концентрация серной кислоты, $X_1$ , г/л | Концентрация хлорида натрия, $X_2$ , г/л | Отношение жидкого к твердому, $X_3$ , ед. | Время, $X_4$ , ч |
| Нулевой уровень, $X_i = 0$      | 5,5                                      | 85                                       | 7                                         | 0,630            |
| Интервал варьирования           | 4,5                                      | 74                                       | 3                                         | 0,390            |
| Верхний уровень, $X_i = -1$     | 10,4                                     | 150                                      | 10                                        | 1,050            |
| Нижний уровень, $X_i = 1$       | 2,3                                      | 25                                       | 4                                         | 0,255            |

## Агитационное выщелачивание после активации

Пределы изменения независимых факторов представлены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Пределы изменения независимых факторов /  
Limits of change of independent factors

| Уровень и интервал варьирования | Независимый фактор                       |                                          |                                |                              |
|---------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
|                                 | Концентрация серной кислоты, $X_1$ , г/л | Концентрация хлорида натрия, $X_2$ , г/л | Продолжительность, $X_3$ , час | Скорость роторов, $X_4$ , Гц |
| Нулевой уровень, $X_i = 0$      | 6,2                                      | 93                                       | 0,620                          | 127                          |
| Интервал варьирования           | 4,5                                      | 75                                       | 0,380                          | 77                           |
| Верхний уровень, $X_i = -1$     | 10,2                                     | 162                                      | 1,100                          | 220                          |
| Нижний уровень, $X_i = 1$       | 2,5                                      | 25                                       | 0,254                          | 52                           |

Регламент эксперимента:

- приготовление 60...70 г высушенного материала с компенсацией уноса материала при активации;
- активация с заданной частотой вращения роторов;
- приготовление раствора с заданным отношением Ж:Т;
- смешивание материала с раствором и собственно выщелачивание;
- фильтрация раствора и анализ содержания металлов.

## Выщелачивание в дезинтеграторе

Уровни и интервалы варьирования независимых факторов в экспериментах приведены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Пределы изменения независимых факторов /  
Limits of change of independent factors

| Уровень и интервал варьирования | Независимый фактор                       |                                          |                                           |                              |
|---------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|
|                                 | Концентрация серной кислоты, $X_1$ , г/л | Концентрация хлорида натрия, $X_2$ , г/л | Отношение жидкого к твердому, $X_3$ , ед. | Скорость роторов, $X_4$ , Гц |
| Нулевой уровень, $X_i = 0$      | 6,2                                      | 95                                       | 7,2                                       | 135                          |
| Интервал варьирования           | 4,3                                      | 73                                       | 3,2                                       | 80                           |
| Верхний уровень, $X_i = -1$     | 10,1                                     | 162                                      | 11,0                                      | 205                          |
| Нижний уровень, $X_i = 1$       | 2,0                                      | 20                                       | 4,5                                       | 53                           |

Регламент эксперимента:

- приготовление 50 г высушенного материала;
- подготовка раствора заданного состава при заданном соотношении Ж:Т;
- приготовление пульпы;
- собственно выщелачивание с заданной скоростью;
- фильтрация раствора и анализ содержания в нем металлов.

Сравнивая значения извлечения металлов при рациональных параметрах различных режимов выщелачивания, а также учитывая показатели затрат энергии на осуществление процесса и износ оборудования, определяют лучший вариант выщелачивания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Голик В.И. Извлечение металлов из хвостов обогащения комбинированными методами активации. *Обогащение руд*. 2010; 5: 38-40. Golik V.I. Extraction of metals from tailings of enrichment by combined activation methods. *Ore enrichment*. 2010; 5: 38-40. (In Russ.).
- Minagawa M., Hisatomi S., Kato T., et al. Enhancement of copper dissolution by mechanochemical activation of copper ores: Correlation between leaching experiments and DEM simulations. *Advanced Powder Technology*. 2018; 29 (3): 471-478. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.11.03>.
- Аренс В.Ж., Гридин О.М., Дербунович Н.Н. и др. Опыт подземного выщелачивания желваковых фосфоритов. *Горный журнал*. 2016; 6: 56-63. Arens V.Zh., Gridin O.M., Derbunovich N.N., et al. Experience of underground leaching of nodular phosphorites. *Mining Journal*. 2016; 6: 56-63. (In Russ.).
- Ляшенко В.И., Хоменко О.Е., Голик В.И. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергонарушенных массивах. *Горные науки и технологии*. 2020; 5 (2): 104-118.

- Lyashenko V.I., Khomenko O.E., Golik V.I. Development of environmental protection and resource-saving technologies of underground ore mining in energy-damaged massifs. *Mining Sciences and Technologies*. 2020; 5 (2): 104-118. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-104-118>.
5. Дмитрак Ю.В., Цидаев Б.С., Дзапаров В.Х. и др. Минерально-сырьевая база цветной металлургии России. *Вектор Гео Наук*. 2019; 1: 9-18. Dmitrak Yu.V., Tsidaev B.S., Dzaparov V.Kh., Kharebov G.H. Mineral resource base of non-ferrous metallurgy of Russia. *Vector of Geo Sciences*. 2019; 1: 9-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2619-0761-2019-10002>.
  6. Bloodworth A., Gunn G. The future of the global minerals and metals sector: issues and challenges out to 2050. *Geosciences*. 2012; 15: 90-97.
  7. Авдеев П.Б., Овешников Ю.М. Опыт применения кучного выщелачивания на рудных карьерах Забайкалья. *Горный информационно-аналитический бюллетень* (научно-технический журнал). 2014; 4: 15-25. Avdeev P.B., Oveshnikov Yu.M. The experience of using heap leaching in the ore pits of Transbaikalia. *Mining information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2014; 4: 15-25. (In Russ.).
  8. Морозов А.А., Смагин А.П., Безносков Г.Ф. и др. Техничко-экономическая оценка эффективности блочного подземного выщелачивания урана из бедных руд Стрельцовского рудного поля. *Горный журнал*. 2013; 8-2: 134-140. Morozov A.A., Smagin A.P., Beznosov G.F., et al. Technical and economic assessment of the effectiveness of block underground leaching of uranium from poor ores of the Streltsovsky ore field. *Mining Journal*. 2013; 8-2: 134-140. (In Russ.).
  9. Hulelidze K.K., Kondratyev Yu.I., Betzov Z.S., et al. Evaluation of original and technogenic deposits of the republic of north Ossetia-Alania as possible objects of application of underground and heap leaching technology. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2016; 8 (1): 46-51.
  10. Ключев Р.В., Босиков И.И., Майер А.В. и др. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2020; 12 (2 (44)): 283-290. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V., et al. A comprehensive analysis of the use of effective technologies to enhance the sustainable development of the natural and technical system. *Sustainable development of mountainous territories*. 2020; 12 (2 (44)): 283-290. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290>.
  11. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б. и др. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021; 13 (3 (49)): 405-415. Rybak Ya., Khairutdinov M.M., Kongar-Suryun Ch.B., et al. Resource-saving technologies for the development of mineral deposits. *Sustainable development of mountainous territories*. 2021; 13 (3 (49)): 405-415. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415>.
  12. Nayak A., Ashrit S., Jena M.S., et al. Mineralogical characterization for selection of possible beneficiation route for low-grade lead-zinc ore of Rampura Agucha, India. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2020; 73(3): 775-784. <https://doi.org/10.1007/s12666-020-01887-y>.
  13. Валиев Н.Г., Головырин С.С., Макаров В.В. К вопросу об использовании систем искусственного интеллекта в процедурах аудита современного горного производства (проблематика решения задач современного горного производства с использованием мультиагентных систем). *Горный информационно-аналитический бюллетень* (научно-технический журнал). 2017; 23: 134-139. Valiev N.G., Golovyryn S.S., Makarov V.V. On the issue of using artificial intelligence systems in audit procedures of modern mining production (problems of solving problems of modern mining production using multi-agent systems). *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; 23: 134-139. (In Russ.).
  14. Parameswaran K. Sustainability considerations in innovative process development. *Innovative Process Development in Metallurgical Industry*. 2016; 7 (44): 257-280. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-21599-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-21599-0_13).
  15. Adero N.J., Drebenstedt C., Prokofeva E.N., et al. Spatial data and technologies for geomonitoring of land use under aspect of mineral resource sector development. *Eurasian Mining*. 2020; 1: 69-74. <https://doi.org/10.17580/em.2020.01.14>.
  16. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Комащенко В.И. и др. Геофизические методы контроля руд при выщелачивании. *Геофизика*. 2018; 1: 85-91. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Komashchenko V.I., et al. Geophysical methods of ore control during leaching. *Geophysics*. 2018; 1: 85-91. (In Russ.).
  17. Бунин И.Ж., Рязанцева М.В., Самусев А.Л. и др. Теория и практика применения комбинированных физико-химических и энергетических воздействий на геоматериалы и водные суспензии. *Горный журнал*. 2017; 11: 123-128. Bunin I.Zh., Ryazantseva M.V., Samusev A.L., et al. Theory and practice of applying combined physico-chemical and energy effects on geomaterials and aqueous suspensions. *Mining Journal*. 2017; 11: 123-128. (In Russ.).
  18. Рассказова А.В., Секисов А.Г., Бурдонов А.Е. Активационное выщелачивание упорных первичных руд Малмыжского месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; (1): 130-141. Rasskazova A.V., Sekisov A.G., Burdonov A.E. Activation leaching of persistent primary ores of the Malmyzhskoye deposit. *Mining information and analytical bulletin*. 2023. (1): 130-141. (In Russ.). [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_1\\_0\\_130](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_1_0_130).
  19. Kamariah N., Kalebic D., Xanthopoulos P., et al. Conventional versus microwave-assisted roasting of sulfidic tailings: mineralogical transformation and metal leaching behavior. *Minerals Engineering*. 2022; 183: 107587. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107587>.
  20. Моргоева А.Д., Манджиева С.С., Киричков М.В. и др. Исследование моделей машинного обучения для оценки влияния угольных горно-энергетических предприятий на экосистемы. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2024; 16 (3): 1130-1143. Morgoeva A.D., Mandzhieva S.S., Kirichkov M.V., et al. Machine learning models study for assessing the effect of coal mining and energy enterprises on ecosystems. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024; 16 (3): 1130-1143. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-1130-1143>.
  21. Khayrutdinov A., Kongar-Syuryun Ch., Kowalik T., et al. Improvement of the backfilling characteristics by activation of halite enrichment waste for non-waste geotechnology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 867 (1): 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/867/1/012018>.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Владимир Иванович Голик** –  
д-р техн. наук, профессор, Геофизический институт  
Владикавказского научного центра РАН, 362002, PCO-  
Алания, г. Владикавказ, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>; e-mail: [v.i.golik@vail.ru](mailto:v.i.golik@vail.ru)

## ABOUT THE AUTHORS

**Vladimir I. Golik** –  
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Geophysical Institute of the  
Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of  
Sciences, 362002, North Ossetia-Alania, Vladikavkaz; Russian  
Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>;  
e-mail: [v.i.golik@vail.ru](mailto:v.i.golik@vail.ru)

**Сергей Георгиевич Страданченко –**

д-р техн. наук, профессор, ректор Южно-Российского государственного политехнического университета, 346428, г. Новочеркасск, Ростовская обл., Российская Федерация; e-mail: ssg72@mail.ru

**Юрий Витальевич Дмитрак –**

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, начальник отдела моделирования и управления горнотехническими системами, ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук, 111020, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-1278-4845>; e-mail: dmitrak@yandex.ru

**Станислав Александрович Масленников –**

канд. техн. наук, заведующий кафедрой строительства и техносферной безопасности Института сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ, 346500, г. Шахты, Ростовская обл., Российская Федерация; e-mail: mail@sssu.ru

**Борис Витальевич Дзеранов –**

канд. геол.-мин. наук, главный научный сотрудник Геофизического института Владикавказского научного центра РАН, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, Российская Федерация; e-mail: dzboris@gmail.com

**Критерии авторства:**

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей.

**Конфликт интересов:**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 20.08.2025

Поступила после рецензирования: 03.10.2025

Принята к публикации: 08.10.2025

**Sergey G. Stradanchenko –**

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of the South Russian State Polytechnic University, 346428, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation; e-mail: ssg72@mail.ru

**Yuri V. Dmitrak –**

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Head of the Department of Modeling and Management of Mining Systems, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-1278-4845>; e-mail: dmitrak@yandex.ru

**Stanislav A. Maslennikov –**

Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Construction and Technosphere Safety, Institute of Service and Entrepreneurship (branch), DSTU, 346500, Shakhty, Rostov region, Russian Federation; e-mail: mail@sssu.ru

**Boris V. Dzeranov –**

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Chief Researcher at the Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 362002, North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, Russian Federation; e-mail: dzboris@gmail.com

**Contribution:**

The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

**Conflict of interest:**

The authors declare no conflict of interest.

**Article info**

Received: 20.08.2025

Revised: 03.10.2025

Accepted: 08.10.2025