

УДК 622.01

DOI: 10.46698/VNC.2026.36.57.001

Оригинальная статья

Геофизический контроль инновационных технологий разработки рудных месторождений Северной Осетии

В.И. Голик 

Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002,
г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: v.i.golik@mail.ru

Статья поступила: 10.03.2026, доработана: 28.05.2026, принята к публикации: 01.06.2026

Резюме: Актуальность проблемы объясняется тем, что рудные месторождения Садонского рудного узла Республики Северная Осетия–Алания не разрабатываются по причине нерентабельности из-за высоких потерь и разубоживания руд при недостаточно управляемых геомеханических процессах разработки. **Методы:** обобщение результатов лабораторных и натурных исследований, систематизация полученных данных, анализ результатов исследований, эксперимент, физическое и математическое моделирование и прогнозирование на инженерном уровне. **Результаты.** Дана справка о системах контроля состояния массива рудовмещающих горных пород при подземной разработке рудных месторождений. Исследованы аспекты утилизации при изготовлении бетонных закладочных смесей отходов добычи и переработки доломита и хвостов переработки руд в рамках единой технологии. Приведены результаты подземного блокового выщелачивания и извлечения металлов из промышленных стоков месторождений Садонского рудного узла. Охарактеризованы основные методы исследования рудовмещающего породного массива при технологическом воздействии на него. Сформирована база данных для создания единой модели взаимодействия природных и технических систем в районах интенсивного и масштабного комплексного освоения недр на примере РСО–Алания. Приведены результаты систематизации экспериментальных данных и анализа динамики геомеханики разрабатываемых рудных запасов, оптимизации механизма управления состоянием разрабатываемого массива с минимизацией потерь и разубоживания руд, а также радикального изменения экологических показателей разработки месторождений технологически вскрываемых руд. Предложена альтернативная традиционной технология выщелачивания металлов, особенность которой состоит в перенесении процессов переработки руд в недра. В качестве основного направления совершенствования добычи металлов рекомендована концепция комплексирования возможностей Садонского свинцово-цинкового комбината и карьера «Доломит», реализация которой может обеспечить функционирование добывающих и перерабатывающих предприятий региона с получением комплексного эколого-экономического и социального эффекта. Материалы исследования представляют интерес для разработки технологически вскрываемых твердых полезных ископаемых и могут быть востребованы при модернизации действующих и строительстве новых предприятий, а также для подготовки специалистов высшей категории.

Ключевые слова: месторождение, рудовмещающий массив, разработка, технология, техногенное воздействие, геомеханика, напряжения, деформации, геофизика.

Благодарности: Работа выполнена по госзаданию Геофизического института ВНЦ РАН, рег. № НИОКТР 125022802998-8.

Для цитирования: Голик В.И. Геофизический контроль инновационных технологий разработки рудных месторождений Северной Осетии. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 45–56. DOI: 10.46698/VNC.2026.36.57.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.36.57.001

Original paper

Geophysical monitoring of innovative technologies for the development of ore deposits in North Ossetia

V.I. Golik 

Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation,
e-mail: v.i.golik@mail.ru

Received: 10.03.2026, revised: 28.05.2026, accepted: 01.06.2026

Abstract: The relevance of this research is explained by the fact that the ore deposits of the Sadon ore cluster in the Republic of North Ossetia–Alania are not being mined due to their unprofitability, which stems from high losses and ore depletion caused by poorly controlled geomechanical processes during mining. **Methods:** generalization of laboratory and field study results, systematization of the obtained data, analysis of research results, experimentation, physical and mathematical modeling, and engineering-level forecasting. **Results.** Information is provided on systems for monitoring the condition of ore-bearing rock masses during underground mining of ore deposits. Aspects of utilizing dolomite mining and processing waste and ore processing tailings in the production of concrete grouting mixtures within a unified technology have been investigated. Results of underground block leaching and metal extraction from industrial effluents of the Sadon ore cluster deposits are presented. The main methods for studying the ore-bearing rock mass under technological impact are characterized. A database has been created to develop a unified model of the interaction between natural and technical systems in areas of intensive and large-scale comprehensive subsoil development, using the Republic of North Ossetia–Alania as an example. This study presents the results of a systematic review of experimental data and an analysis of the geomechanical behavior of mined ore reserves, the optimization of a mechanism for managing the condition of the mined rock mass to minimize losses and ore dilution, and a radical improvement in the environmental performance of mining operations for ores that can be extracted using conventional methods. An alternative technology to the traditional one involving metal leaching is proposed, the distinctive feature of which is the transfer of ore processing operations to the subsoil. As the main direction for improving metal extraction, the concept of integrating the capabilities of the Sadon Lead and Zinc Combine and the “Dolomite” quarry is recommended; its implementation can ensure the operation of the region’s mining and processing enterprises while yielding a comprehensive environmental, economic, and social effect. The research materials are of interest for the development of technologically extractable solid minerals and may be in demand for the modernization of existing enterprises and the construction of new ones, as well as for the training of top-level specialists.

Keywords: deposit, ore-bearing massif, development, technology, anthropogenic impact, geomechanics, stresses, deformations, geophysics.

Acknowledgment: This work was carried out according to the state assignment of the Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, No. 125022802998-8.

For citation: Golik V.I. Geophysical monitoring of innovative technologies for the development of ore deposits in North Ossetia. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 45–56. DOI: 10.46698/VNC.2026.36.57.001

Введение

Геофизические методы исследований составляют основу при прогнозировании состояния массива в процессе разработки месторождений полезных ископаемых [Заалишвили, Голик, 2024; Голик и др., 2015; Голик, 2025а, б; Golik et al., 2015; Adero et al., 2020].

Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых, применяющие методы рудничной геофизики, описаны в теоретических и практических разработках [Рыбак и др., 2022; Адигамов, Юденков, 2021; Ключев и др., 2020; Agelet de Saracibar, 2022; Голик, Бурдзиева, 2024].

Результаты геофизического контроля позволяют обосновать целесообразность направлений совершенствования геотехнологий путем комплексного использования геофизических методов для прогнозирования свойств породных массивов при технологическом воздействии на них [Батугин и др., 2021; Баловцев и др., 2016; Абрамкин и др., 2022; Liu et al., 2022].

Геофизические приборы и оборудование являются неотъемлемой частью процесса добычи минерального сырья для удовлетворения потребностей промышленности [Ma et al., 2024; Хакулов и др., 2018; Месхи и др., 2017; Di et al., 2023] и обеспечения экологических требований [Реутова и др., 2025].

Геофизические методы сопровождения технологических процессов позволяют создать доказательную базу для обоснования возможности и целесообразности приоритетных направлений в горном производстве, подземном строительстве и обогащении руд [Askaripour et al., 2022; Cristelo et al., 2020; Игнатьева и др., 2021; Тюляева и др., 2024].

Целью исследования является установление закономерностей взаимодействия природных и технических систем месторождений Садонского рудного узла в процессе оптимизации технологий добычи руд по критерию полноты и безопасности использования недр.

Методы исследования

Обобщение, систематизация, анализ, эксперимент, моделирование и прогнозирование осуществляются в процессе совершенствования системы геофизического контроля состояния массива горных пород с оптимальным использованием инструментов и приборов геофизического мониторинга.

С использованием общепринятых методик исследуются аспекты утилизации хвостов переработки и местных материалов при изготовлении бетонных закладочных смесей. Результаты подземного блокового выщелачивания и извлечения металлов из промышленных стоков месторождений получены по адаптированным к местным условиям методикам автора.

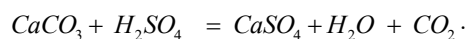
Охарактеризованы основные методы исследования рудовмещающего породного массива при технологическом воздействии на него.

На базе полученных данных создается модель взаимодействия природных и технических систем в районах интенсивного и масштабного комплексного освоения недр на примере РСО–Алания.

Результаты систематизации экспериментальных данных, оптимизации механизма управления состоянием массива и радикального изменения экологических показателей разработки месторождений положены в основу концепции комплексирования возможностей горных предприятий.

Результаты работы

При воздействии кислотными растворами на содержащие CaCO_3 породы образуется гипс:



Условия формирования искусственного массива моделировались на плоском стенде в масштабе 1:200. Верхний слой двухслойной секции образован доломитом, а в нижнем слое уложен инертный к кислоте алевролит с добавкой обожженной извести. Образующиеся кислые растворы фильтруются в нижний слой, где образуется вяжущее для бетона.

Без отвода воды гипс образуется в течение 3–4 месяцев, а если отводить ее в течение 2 недель, бетон набирает прочность 2,5 МПа, а объем его увеличивается на 10–30 %.

На первой стадии в качестве вяжущего исследуются портландцемент и комбинация портландцемента с мокромолотым гранулированным шлаком.

Результаты исследования контрольных кубов в возрасте 28 суток при расходе воды 20 дм³/м³ даны в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

**Составы с цементом и мелкой фракцией хвостов /
Compositions with cement and fine tailings**

Расход портландцемента, кг/м ³ / Consumption of Portland cement, kg/m ³	30	60	80	100	120	180
Прочность мизурских кубов, МПа / The strength of the Mizur cubes, MPa	0,50	0,75	0,81	0,92	1,00	1,30
Прочность тырнаузских кубов, МПа / Strength of Tyrnauz cubes, MPa	0,41	0,53	0,66	0,74	0,87	1,15
Прочность урупских кубов, МПа / Strength of Urup cubes, MPa	0,48	0,69	0,78	0,87	0,92	1,24

Прочность бетонных кубов, в которых заполнитель комбинируется, увеличивается (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Прочность смесей с комбинированным составом, МПа /
Strength of mixtures with combined composition, MPa**

Расход портландцемента, кг/м ³ / Consumption of Portland cement, kg/m ³	30	60	80	100	120	180
Мизурские пробы / The Mizur Trials	0,65	0,82	0,93	0,99	1,27	1,65
Тырнаузские пробы / The Tarnauz trials	0,51	0,63	0,74	0,89	0,99	1,50
Урупские пробы / Urup trials	0,62	0,73	0,88	0,91	1,08	1,55

За счет комбинирования заполнителя по крупности прочность бетона увеличивается. Смеси с доломитом по прочности несколько уступают смесям с портландцементом.

Исследование параметров закладки из отходов обогащения

Эффективность комбинирования вяжущих оценивали оптическим методом с нагружением модели на центрифуге. Образец помещали в термостат и выдерживали при температуре 100–130 °С, при которой разность хода лучей постоянна.

Исследована серия моделей, различающихся состоянием выработанного пространства, с заполнением смесями на цементной и доломитовой основе.

Наиболее безопасны варианты с заполнением пустот бетонной смесью, причем варианты заполнения выработанного пространства закладкой традиционного состава и с доломитом различаются несущественно.

Марка доломитовых вяжущих увеличивается при их активации в дезинтеграторе (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

**Прочность смеси с хвостовой добавкой после дезинтегратора /
Strength of the mixture with the tail additive after the disintegrator**

Расход материалов, кг/м ³ / Consumption of materials, kg/m ³			Осадка конуса, см / Cone draft, cm	Напряжение сдвига, Па / Shear stress, Pa	Прочность, МПа/ Strength, MPa		
Доломит/ Dolomite	Хвосты/ Tails	Вода/ Water			14	28	90
40	1650	350	9,20	140	0,60	0,82	0,97
80	1600	350	9,71	131	0,91	1,19	1,32
120	1550	350	10,01	125	1,19	1,30	1,53
180	1500	350	10,50	145	1,50	1,71	2,05

Погрешность измерений прочности для оценки воспроизводимости результатов составляет $\pm 0,05$ – $0,10$ МПа.

Для оценки активации в шаровой мельнице и в дезинтеграторе исследованы усредненные партии доломитов с тонкостью помола 40 % (табл. 4).

Таблица 4 / Table 4

**Смеси с доломитовым вяжущим после активации /
Mixtures with dolomite binder after activation**

Компоненты смеси, кг/м ³ / Components of the mixture, kg/m ³			Растекаемость, см / Spreading capacity, cm	Напряжение сдвига, Па / Shear stress, Pa	Прочность, МПа / Strength, MPa		
Доломит/ Dolomite	Заполнитель/ Filler	Вода/ Water			Возраст, сутки / Age, days		
					14	28	90
Шаровая мельница / Ball Mill							
40	1620	350	19,6	114	0,26	0,31	0,51
80	1590	350	22,1	119	0,32	0,43	0,65
120	1540	350	23,2	98	0,73	0,87	1,05
180	1480	350	20,1	120	1,20	1,35	1,51
Дезинтегратор / The disintegrator							
40	1600	350	18,4	106	0,30	0,45	0,63
80	1590	350	19,7	122	0,56	0,73	0,82
120	1540	350	18,9	97	0,88	1,02	1,26
180	1480	350	20,1	103	1,33	1,47	1,64

Погрешность измерений прочности для оценки воспроизводимости результатов составляет $\pm 0,05$ – $0,10$ МПа.

Выход активных мелких фракций доломита увеличился, и он может быть увеличен дальнейшей переработкой в дезинтеграторе.

Активация отходов повышает прочность бетона на 15–20 %.

Подземное блоковое выщелачивание

Месторождение «Какадур-Ханикомское» (РСО–Алания) представляло собой рудное тело, залегающее в рассланцованных осадочных породах крепостью 4–6 по М.М. Протодяконову. Выщелачивание руды в блоке длилось 220 суток.

Нарезные работы в блоке включали оформление монтажного и подсечного слоев, проходку выпускной дучки и отрезного восстающего (рис. 1).

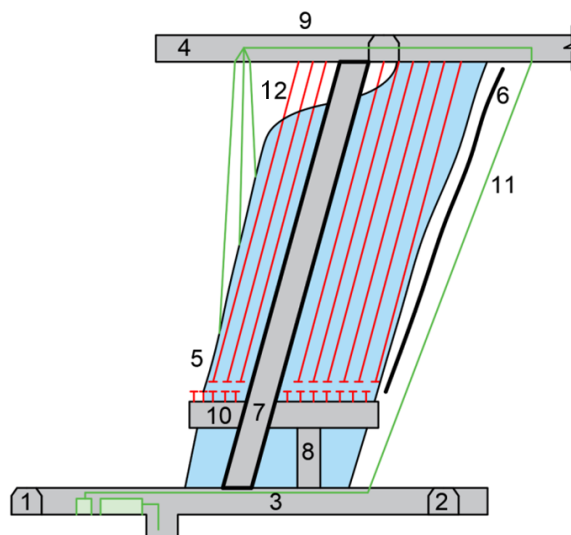


Рис. 1. Подготовка блока: 1,2,3,4 – выработки; 5 – рудное тело; 6 – рудообразующий разлом; 7 – отрезной восстающий; 8 – дучка; 9 – монтажный слой; 10 – подсечной слой; 11 – скважина для подачи растворов; 12 – взрывные скважины /

Fig. 1. Block preparation: 1,2,3,4 – workings; 5 – ore body; 6 – ore-forming fault; 7 – cut-off rising; 8 – duckling; 9 – mounting layer; 10 – cutting layer; 11 – well for solution delivery; 12 – blast wells

На месторождении «Быкогорское» (Северный Кавказ) с рудными телами в гранитопорфирах некондиционные запасы в течение 20 лет отрабатывали с этажной обойкой руды и выщелачиванием (рис. 2).

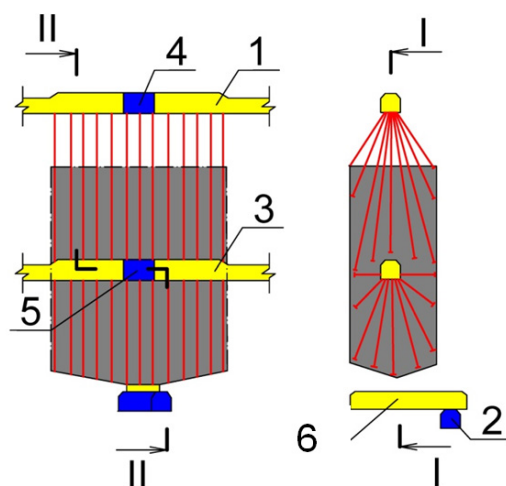


Рис. 2. Подготовка блока к выщелачиванию: 1 – оросительно-буровой штрек; 2 – нижний этажный штрек; 3 – буровой штрек; 4 – верхняя рассечка отрезной щели; 5 – нижняя рассечка отрезной щели; 6 – заходка /

Fig. 2. Preparation of the block for leaching: 1 – irrigation and drilling drift; 2 – lower storey drift; 3 – drilling drift; 4 – upper section of the cut-off slot; 5 – lower section of the cut-off slot; 6 – entry

Скорость выщелачивания металла снижается вследствие уменьшения градиента концентраций между поровым раствором и объемом растворителя. При высоте слоя 10 м и концентрации реагента в растворе 15 г/л за 300 суток было извлечено 59 % металла. В тех же условиях, но с уменьшением крупности в пределах 200–0 мм в верхней части до 100–0 мм в нижней части, те же 59 % металлов были извлечены за 260 суток.

Совершенствование способов подземного выщелачивания скальных технологически вскрываемых руд развивается в направлении сплошной отработки месторождений с минимизацией объемов горных выработок и совмещением их функций на основе оптимизации основных и вспомогательных процессов.

Извлечение металлов из стоков

Металлы осаждали из стоков Садонских месторождений с кислотностью pH 3–5, содержащих 60–250 г/м³ цинка и 5–10 г/м³ свинца. Осаждение проводили кальцинированной содой при pH = 8,5–9 в водосточной канавке штольни № 22 Архонского месторождения. За 31 день получено 52 т металлов в виде геля.

Выщелачивание в дезинтеграторе

Выщелачивание хвостов обогащения осуществляется при комбинированном механическом и химическом воздействии в дезинтеграторе (табл. 5).

Таблица 5 / Table 5

Извлечение металлов в раствор / Extraction of metals into solution

Выщелачивание в агитаторе / Leaching in the agitator				Выщелачивание в дезинтеграторе / Leaching in the disintegrator			
Содержание в хвостах, % The content in the tails, %				Содержание в хвостах, % The content in the tails, %			
Цинк – 0,95 Zinc – 0.95		Свинец – 0,84 Lead – 0.84		Цинк – 0,95 Zinc – 0.95		Свинец – 0,84 Lead – 0.84	
Извлечение за 0,2–1,0 ч, %/ Extraction in 0.2–1.0 hours, %		Извлечение за 0,2–1,0 ч, %/ Extraction in 0.2–1.0 hours, %		Извлечение за 10 с, %/ Extraction in 10 seconds, %		Извлечение за 10 с, %/ Extraction in 10 seconds, %	
Извлечено / Extracted	Остаток / Residue	Извлечено / Extracted	Остаток / Residue	Извлечено / Extracted	Остаток / Residue	Извлечено / Extracted	Остаток / Residue
24	72	16	71	28	69	24	62

Физические методы исследования массивов

Физические методы характеризуются данными таблицы 6.

Таблица 6 / Table 6

Типизация физических методов / Method typing

Метод / Method	Определяющий параметр / Defining parameter	Цель / Aim
Ультразвуковой каротаж / Ultrasonic logging	Электрическое сопротивление / Electrical resistance	Оценка неоднородности массива / Assessment of the heterogeneity of the scale
Электрический каротаж / Electrical logging	Диэлектрическая проницаемость / Dielectric constant	
Магнитный каротаж / Magnetic logging	Магнитная проницаемость / Magnetic permeability	

Полная разгрузка напряжений / Full stress relief	Упругие деформации / Elastic deformations	Оценка напряжений / Stress assessment
Параллельные скважины / Parallel wells		
Регистрация деформаций отверстия в керне / Registration of hole deformations in the core		
Акустическая эмиссия / Acoustic emission	Акустические сигналы в диапазоне частот 10–100 кГц / Acoustic signals in the frequency range of 10–100 kHz	Оценка неоднородности массива / Estimation of the heterogeneity of an array
Сейсмоакустический / Seismoacoustic	Сейсмоакустические сигналы в диапазоне частот 100–1000 Гц / Seismic and acoustic signals in the frequency range of 100–1000 Hz	
Сейсмический / Seismic	Сейсмические волны в диапазоне 30–500 Гц / Seismic waves in the range of 30–500 Hz	
Электрометрический / Electrometric	Электрическое сопротивление пород / Electrical resistance of rocks	Оценка напряжений / Stress assessment

Сейсмология. Пьезоэлектрический метод основан на изучении электромагнитного поля, возникающего вследствие создаваемого сейсмическими волнами пьезоэлектрического эффекта. Бальность динамических явлений определяется скоростью движения пород или их ускорением и смещением.

Гравитация. Методами гравиметрии определяют параметры и конфигурацию главных напряжений в элементах выработок (рис. 3).

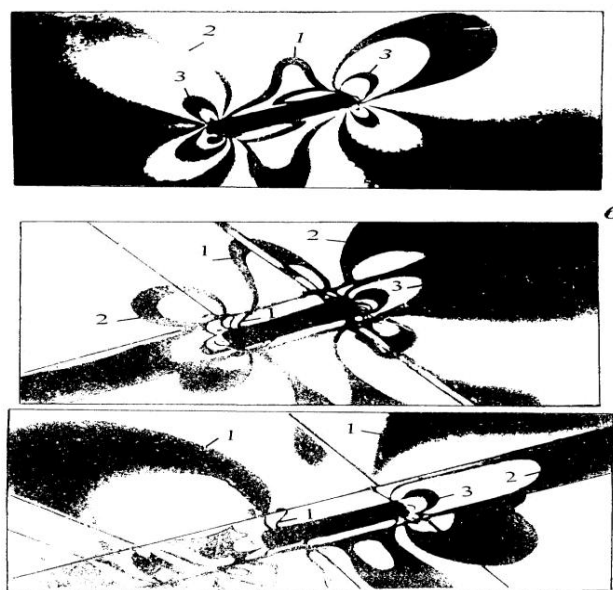


Рис. 3. Напряжения в окрестностях выработки: а – однородная среда; б – в кровле послойная зона, пересеченная разломом; 1-3 – линии изохром /

Fig. 3. Stresses in the vicinity of the mine: a is a homogeneous medium; b is a layered zone in the roof, crossed by a fault; 1-3 are isochrome lines

Магнетизм. По изменению остаточной намагниченности, обусловленной инверсией горных пород, уточняют условия формирования массивов, глубину залегания и мощность залежей руд магнетитового состава.

Оптика. Стенки скважин покрывают цементным раствором, который служит индикатором деформирования пород (рис. 4).

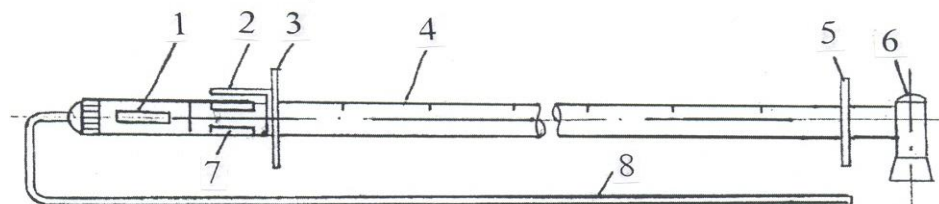


Рис. 4. Конструкция оптического прибора: 1 – источник света; 2 – масштабная линейка; 3 – направляющий диск; 4 и 5 – направляющие диски; 6 – окулярная насадка; 7 – объектив; 8 – провода /

Fig. 4. Optical device design: 1 – light source; 2 – scale ruler; 3 – guide disc; 4 and 5 – guide discs; 6 – eyepiece nozzle; 7 – lens; 8 – wires

Акустика. Возбуждаются упругие колебания, которые улавливают приборами.

Геотермия. По изменению теплового состояния участков земной коры выявляют области возникновения пожаров и опасные по горным ударам.

Геоэлектрика. Метод электрической разведки используется для изучения геолого-структурных условий месторождений.

Сейсмика. Упругие импульсы с преобладающей частотой 70–100 Гц являются основой для прогноза динамических явлений.

Гравитация. На моделях из эпоксимала определяют величину и знак главных напряжений.

Магнетизм. По остаточной намагниченности уточняют условия и параметры формирования массивов.

Выводы

1. Геофизические методы сопровождения технологических процессов позволяют обосновать возможность их совершенствования.

2. Закономерности взаимодействия природных и технических систем месторождений адекватны и могут быть оптимизированы по критериям полноты и безопасности использования недр.

3. Взаимодействие переменных факторов горного производства осуществляется в рамках физических моделей, разрабатываемых на основе опытного освоения технологий.

4. С точки зрения перспектив развития технологии выщелачивания для месторождений Садонского рудного узла наибольшего внимания заслуживают методы измерения фильтрационных параметров и оценки крупности руд.

Литература

1. Абрамкин Н.И., Ефимов В.И., Мансуров П.А. Эмпирические методики оценки состояния массива горных пород // Известия высших учебных заведений Горный журнал. – 2022. – № 2. – С. 68–76. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-2-68-76.

2. Адигамов А.Э., Юденков А.В. Модель напряженно-деформированного состояния нарушенного породного массива с учетом анизотропии и неоднородностей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 8. – С. 93–103. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_93.

3. Баловцев С.В., Воробьева О.В., Монастырев Н.Н., Кривошеева С.И., Копылова А.В., Кравцова Е.А. Безопасность и управление рисками в горном деле // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 2. (специальный выпуск 39). – 36 с.
4. Батугин А.С., Шевчук С.В., Шерматова С.С., Головки И.В., Бямбасурэн З. К вопросу мониторинга геологической опасности при геодинамическом взаимодействии объектов освоения недр // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 10-1. – С. 63–73. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_63.
5. Голик В.И., Комащенко В.И., Качурин Н.М. Концепция комбинирования технологий разработки рудных месторождений // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2015. – № 4. – С. 76–88.
6. Голик В.И., Бурдзиева О.Г. Извлечение металлов из убогого сырья и хвостов переработки руд с активацией процессов путем комбинирования химической и механической энергии // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 1. – С. 152–161. DOI: 10.46698/VNC.2024.82.22.011.
7. Голик В.И. Сейсмобезопасные технологии подземной разработки рудных месторождений // Геология и геофизика Юга России. – 2025а. – Т. 15. № 1. – С. 56–64. DOI: 10.46698/VNC.2025.55.34.005.
8. Голик В.И. Итерационное моделирование технологий разработки месторождений Садонской геологической провинции // Геология и геофизика Юга России. – 2025б. – Т. 15. № 3. – С. 199–210. DOI: 10.46698/VNC.2025.73.38.002.
9. Месхи Б., Плешко М., Булыгин Ю., Алексеенко Л., Молев М. Обеспечение безопасной эксплуатации и оценка состояния подземных сооружений методом акустической резонансной дефектоскопии // Серия конференций ИОР: Наука о Земле и окружающей среде. – 2017. – Вып. 90. № 1. – Art. No. 012217.
10. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Кузиев Д.А., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Бобырь Н.В. Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. – С. 61–70. DOI: 10.31897/PMI.2022.2
11. Тюляева Ю.С., Хайрутдинов А.М., Горелкина Е.И. Классификация георесурсов в парадигме их комплексного освоения // Горная промышленность. – 2024. – № 6. – С. 140–143.
12. Хакулов В.А., Крапивский Е.И., Блаев Б.Х., Шаповалов В.А. Технология формирования качества руд Тырныаузского месторождения с использованием предварительной сортировки и обогащения // Обогащение руд. – 2018. – № 5. – С. 33–40.
13. Реутова Н.В., Реутова Т.В., Дреева Ф.Р. Природное и антропогенное загрязнение микроэлементами верховий бассейна р. Ардон // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 2. – С. 219–230. DOI: 10.46698/VNC.2025.46.62.001.
14. Agelet de Saracibar C. Nonlinear continuum mechanics – An engineering approach. Springer, 2022. – 346 p. DOI: 10.1007/978-3-031-15207-8.
15. Askaripour M., Saeidi A., Rouleau A., Mercier-Langevin P. Rockburst in underground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods // Underground Space. – 2022. – Vol. 7. Issue 4. – pp. 577–607.
16. Cristelo N., Coelho J., Oliveira M., Cesar Consoli N., Palomo A., Fernandez-Jimenez A. Recycling and application of mine tailings in alkali-activated cements and mortars-strength development and environmental assessment // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10. No. 6. – Art. No. 2084. DOI: 10.3390/app10062084.
17. Di Y., Wang E., Li Z., Liu X., Huang T., Yao J. Comprehensive early warning method of microseismic, acoustic emission, and electromagnetic radiation signals of rock burst based on deep learning // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2023. – Vol. 170. – Art. No. 105519. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2023.105519.
18. Golik V.I., Razorenov Y.I., Polukhin O.N. Metal extraction from ore beneficiation codas by means of lixiviation in a disintegrator // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10. No. 17. – pp. 38105–38109.
19. Liu Z., Zhao X., Tan J., Tian H. Model and simulation of engineering safety risk control based on artificial intelligence algorithm // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2022. – Vol. 2022. – DOI: 10.1155/2022/3204317.

20. Ma L., Ghorbani Y., Kongar-Syuryun C.B., Khayrutdinov M.M., Klyuev R.V., Petenko A., Brigida V. Dynamics of backfill compressive strength obtained from enrichment tails for the circular waste management // Resources, Conservation and Recycling Advances. – 2024. – Vol. 23. Art. No. 200224. DOI: 10.1016/j.rcradv.2024.200-214.

References

1. Abramkin N.I., Efimov V.I., Mansurov P.A. Empirical techniques for assessing rock mass condition. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2022. No. 2 pp. 68–76. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-2-68-76. (In Russ.)
2. Adigamov A.E., Yudenkov A.V. Stress-strain behavior model of disturbed rock mass with regard to anisotropy and discontinuities. *Mining information and Analytical Bulletin*. 2021. No. 8. pp. 93–103. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_93. (In Russ.)
3. Balovtsev S.V., Vorobyeva O.V., Monastirev N.N., Krivosheeva S.I., Kopylova A.V., Kravtsova E.A. Safety and risk management in mining. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2017. No. 2. (Special Issue 39). 36 p. (In Russ.)
4. Batugin A.S., Shevchuk S.V., Shermatova S.S., Golovko I.V., Byambasuren Z. Geoecological hazard monitoring in geodynamic interaction of subsoil use objects. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2021. No. 10-1. pp. 63–73. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_63. (In Russ.)
5. Golik V.I., Komashchenko V.I., Kachurin N.M. Concept of combining technologies by mining ore deposits. *Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2015. No. 4. pp. 76–88. (In Russ.)
6. Golik V.I., Burdzieva O.G. Extraction of metals from low-grade raw materials and ore processing tailings with process activation by combining chemical and mechanical energy. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 1. pp. 152–161. DOI: 10.46698/VNC.2024.82.22.011. (In Russ.)
7. Golik V.I. Earthquake safe technologies of underground mining of ore deposits. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 1. pp. 56–64. DOI: 10.46698/VNC.2025.55.34.005. (In Russ.)
8. Golik V.I. Iterative modeling of field development technologies in the Sadon geological province. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15 No. 3. pp. 199–210. DOI: 10.46698/VNC.2025.73.38.002. (In Russ.)
9. Meskhi B., Pleshko M., Bulygin Yu., Alekseenko L., Molev M. Ensuring safe operation and assessment of the condition of underground structures by acoustic resonance flaw detection. In: *IOP conference series: Earth and Environmental Science*. 2017. Issue 90. No. 1. Art. No. 012217. (In Russ.)
10. Rybak J., Khayrutdinov M.M., Kuziev D.A., Kongar-Syuryun C.B., Babyr N.V. Prediction of the geomechanical state of the rock mass when mining salt deposits with stowing. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 253. p. 61–70. DOI: 10.31897/PMI.2022.2. (In Russ.)
11. Tyulyaeva Yu.S., Khairutdinov A.M., Gorelkina E.I. Classification of georesources in the paradigm of their integrated development. *Mining Industry*. 2024. No. 6. pp. 140–143. (In Russ.)
12. Khakulov V.A., Krapivskiy E.I., Blaev B.Kh., Shapovalov V.A. Technology of ore quality formation at the Tyrnyauz deposit using pre-sorting and enrichment. *Ore processing*. 2018. No. 5. pp. 33–40. (In Russ.)
13. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R. Natural and anthropogenic microelement pollution of the upper reaches of the Ardon River basin. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 2. pp. 219–230. DOI: 10.46698/VNC.2025.46.62.001. (In Russ.)
14. Agelet de Saracibar C. *Nonlinear continuum mechanics – An engineering approach*. Springer. 2022. 346 p. DOI: 10.1007/978-3-031-15207-8.
15. Askaripour M., Saeidi A., Rouleau A., Mercier-Langevin P. Rockburst in under-ground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods. *Underground Space*. 2022. Vol. 7. Issue 4. pp. 577–607.
16. Cristelo N., Coelho J., Oliveira M., Cesar Consoli N., Palomo A., Fernandez-Jimenez A. Recycling and application of mine tailings in alkali-activated cements and mortars-strength

development and environmental assessment. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. No. 6. Art. No. 2084. DOI: 10.3390/app10062084.

17. Di Y., Wang E., Li Z., Liu X., Huang T., Yao J. Comprehensive early warning method of microseismic, acoustic emission, and elec-tromagnetic radiation signals of rock burst based on deep learning. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2023. Vol. 170. Art. No. 105519. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2023.105519.

18. Golik V.I., Razorenov Y.I., Polukhin O.N. Metal extraction from ore beneficiation codas by means of lixiviation in a disintegrator. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. Vol. 10. No. 17. pp. 38105–38109.

19. Liu Z., Zhao X., Tan J., Tian H. Model and simulation of engineering safety risk control based on artificial intelligence algorithm. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2022. Vol. 2022. DOI: 10.1155/2022/3204317.

20. Ma L., Ghorbani Y., Kongar-Syuryun C.B., Khayrutdinov M.M., Klyuev R.V., Petenko A., Brigida V. Dynamics of backfill compressive strength acquired from enrichment tails for the circular waste management. *Resources, Conservation and Recycling Advances*. 2024. Vol. 23. Art. No. 200224. DOI: 10.1016/j.rcradv.2024.200-214.