

УДК 622. 273:65.011.12

DOI: 10.46698/VNC.2025.73.38.002

Оригинальная статья

Итерационное моделирование технологий разработки месторождений Садонской геологической провинции

В.И. Голик 

Московский политехнический университет,
Россия, 107023, г. Москва, ул. Б. Семеновская, 38,
e-mail: v.i.golik@mail.ru

Статья поступила: 23.06.2025, доработана: 02.09.2025, принята к публикации: 06.09.2025

Резюме: Рассмотрены вопросы оптимизации экологии РСО–Алания за счет совершенствования технологии утилизации техногенных ресурсов, накопленных в хранилищах хвостов обогащения за годы эксплуатации месторождений Садонской геологической провинции. **Актуальность** исследования определяется необходимостью ослабления вредного влияния горного производства на окружающую среду. **Методы:** обобщение, систематизация, эксперимент, моделирование, технико-экономические расчеты и инженерное прогнозирование. **Результаты.** Приведена справка об истории промышленной разработки рудных месторождений геологической провинции с детализацией сведений о техногенных ресурсах в хранилищах хвостов переработки руд. Показано, что препятствием для утилизации отходов горного производства является неполное извлечение металлов, в связи с чем хвосты представляют собой материальную ценность, являясь генераторами химического загрязнения экосистем окружающей среды. Обобщены сведения о продуктах переработки руд и приведены модели для определения эколого-экономической целесообразности вовлечения в производство омертвленных ресурсов. Рекомендовано оптимизированное по критерию эффективности извлечения металлов оборудование, в основе которого лежит феномен активации вещества приложением энергии. Отмечена возможность повышения эффективности охраны среды уменьшением количества разубоживающих минералов в руде, что обеспечивается закладкой выработанного пространства смесями на основе отходов переработки и хвостами выщелачивания в недрах. Представлены результаты выщелачивания свинца и цинка из сульфидных руд Какадур-Ханикомского месторождения. Определено, что использование новой технологии добычи руд намного экономичнее базового варианта. Представлены результаты расчета эффективности применения отходов для изготовления твердеющих смесей одновременно рудника и доломитового карьера. Моделированием установлено, что комбинированная технология экономичнее базовой технологии.

Ключевые слова: техногенные ресурсы, горное производство, окружающая среда, хвосты переработки, утилизация, выщелачивание, технология.

Для цитирования: Голик В.И. Итерационное моделирование технологий разработки месторождений Садонской геологической провинции. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3): 199-210. DOI: 10.46698/VNC.2025.73.38.002

DOI: 10.46698/VNC.2025.73.38.002

Original paper

Iterative modeling of field development technologies in the Sadon geological province

V.I. Golik 

Moscow Polytechnic University,
38 B. Semenovskaya Str., Moscow 107023, Russian Federation,
e-mail: v.i.golik@mail.ru

Received: 23.06.2025, revised: 02.09.2025, accepted: 06.09.2025

Abstract: The issues of optimizing the ecology of the Republic of North Ossetia–Alania due to the improvement of technology for the utilization of anthropogenic resources accumulated in the enrichment tailings during the years of operation of the deposits of the Sadon geological province are considered. **The relevance** of the study is determined by the need to reduce the harmful effects of mining on the environment. **Methods:** generalization, systematization, experiment, modeling, technical and economic calculations and engineering forecasting. **Results.** A reference on the history of industrial development of ore deposits in the geological province is provided, detailing information on anthropogenic resources in ore processing tailings storages. It is shown that an obstacle to the disposal of mining waste is the incomplete extraction of metals, and therefore tailings are of material value, being generators of chemical pollution of environmental ecosystems. Information on processed products from ores is summarized and models are presented to determine the ecological and economic feasibility of involving dead resources in production. An equipment optimized according to the criterion of metal extraction efficiency is recommended, which is based on the phenomenon of activation of matter by the application of energy. The possibility of increasing the effectiveness of environmental protection by reducing the amount of diluting minerals in the ore is noted, which is ensured by laying the exhausted space with mixtures based on processing waste and leaching tailings in the subsurface. The results of lead and zinc leaching from sulfide ores of the Kakadur-Khanikom deposit are presented. The results of the calculation of the efficiency of waste application for the manufacture of hardening mixtures of a mine and a dolomite quarry at the same time are presented. Modeling has established that the combined technology is more economical than the basic technology.

Keywords: anthropogenic resources, mining, environment, tailings processing, recycling, leaching, technology.

For citation: Golik V.I. Iterative modeling of field development technologies in the Sadon geological province. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 199–210. DOI: 10.46698/VNC.2025.73.38.002

Введение

Республика Северная Осетия–Алания располагает техногенными ресурсами, образованными в результате предыдущей деятельности. В отвалах Электроцинка, Победита и ССЦК скопилось более 10 млн тонн отходов.

Основной причиной накопления хвостов обогащения является то, что возможности современных технологий не позволяют извлекать полезные компоненты полностью [Голик, 2022; Bloodworth, Gunn, 2012; Каменецкий и др., 2012; Pereira et al., 2022].

Актуальность исследований данного направления увеличивается в связи с расположением Садонского геологического узла в системе северного склона Большого Кавказа в сложных геодинамических условиях [Чотчаев и др., 2021; Адигамов, Юденков, 2021; Батугин и др., 2021; Свалова, 2022; Бурдзиева и др., 2023, 2024а, б; Ключев и др., 2024]. Учет этих условий повышает актуальность учета потенциаль-

ных рисков при разработке месторождений, особенно, подземным способом [Ляшенко и др., 2020; Музаев и др., 2022; Голик, Бурдзиева, 2023; Куликова и др., 2023; Валиев и др., 2023; Lei, Gao, 2019].

Решению рассматриваемой проблемы способствует разработка новых технологий, которые в комбинации с традиционными снижают напряженность экологической обстановки в регионе РСО–Алания и др. [Brigida et al., 2023; Ma et al., 2024; Комащенко, 2015; Lakshmanan et al., 2016]. Исследования данного направления горного дела осуществляются с использованием современных методов и способов [Голик и др., 2018; Рыбак и др., 2022; Конгар-Сюрюн, Ковальский, 2023; Голик, Бурдзиева, 2024; Zaalishvili et al., 2016; Фоменко и др., 2025].

Цель статьи – оптимизация экономики и экологии региона за счет совершенствования технологии утилизации техногенных ресурсов.

Методы

Обобщение, систематизация, анализ, математическое и экономическое моделирование, эксперимент и обработка данных с анализом результатов.

Результаты

Эколого-экономическая целесообразность вовлечения в производство хвостов обогащения:

$$\mathcal{E} = P - 3,$$

где $\mathcal{E}$ – экономический эффект, руб.:

P – стоимость полученной товарной продукции, руб.;

3 – затраты, руб.

Результаты вовлечения хвостов обогащения в производство:

$$R = A \Pi,$$

где A – производственная мощность предприятия в t -ом году, ед./год;

Π – ценность произведенного в t -ом году суммарного продукта, руб./ед.

Схема извлечения металлов из жидких хвостов приведена на рисунке 1.

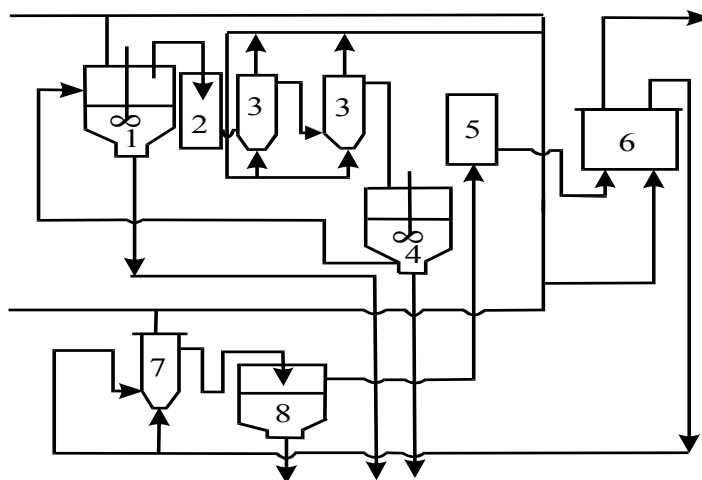


Рис. 1. Извлечение металлов из жидких хвостов: 1 – сгуститель; 2 – накопитель;

3 – электрохимический активатор; 4 – отстойник; 5 – нейтрализатор;

6 – электродиализатор; 7 – электролизер; 8 – отстойник /

Fig. 1. Extraction of metals from liquid tailings: 1 – thickener; 2 – accumulator; 3 – electrochemical activator; 4 – sump; 5 – neutralizer; 6 – electrodialyzer; 7 – electrolyzer; 8 – sump

Схема извлечения металлов в дезинтеграторе с механохимической активацией дана на рисунке 2.

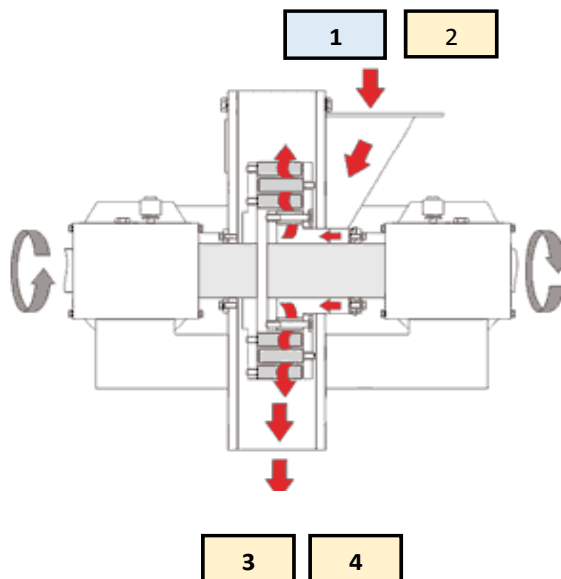


Рис. 2. Схема выщелачивания хвостов в дезинтеграторе:

1 – минералы; 2 – раствор реагентов; 3 – производственный раствор; 4 – вторичные хвосты /

Fig. 2. Schematic diagram of tailings leaching in a disintegrator:

1 – minerals; 2 – reagent solution; 3 – production solution; 4 – secondary tailings

Схема применения деметаллизированных хвостов обогащения для изготовления бетонных смесей приведена на рисунке 3.

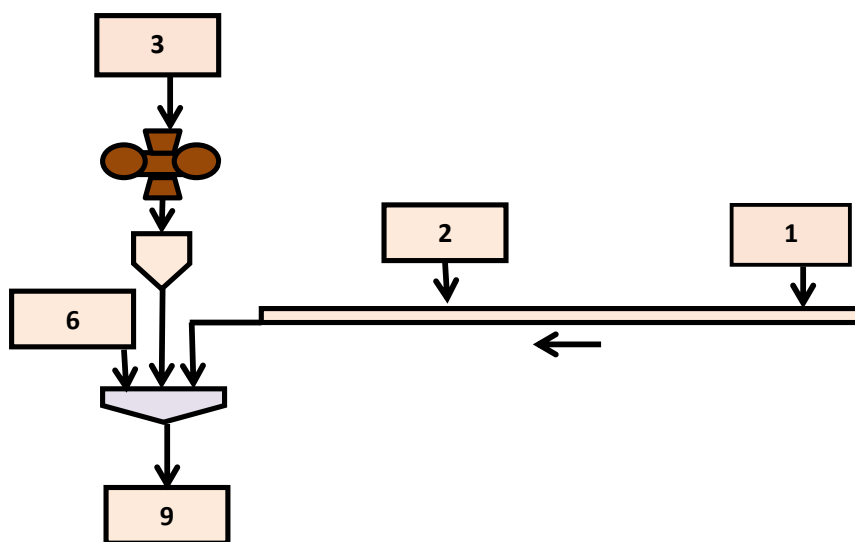


Рис. 3. Схема комплексной активации твердеющих смесей: 1 – бункер цемента;

2 – инертные заполнители; 3 – вяжущие добавки; 4 – дезинтегратор; 5 – вибромельница;

6 – активированная вода; 7 – конвейер; 8 – смеситель; 9 – отправка /

Fig. 3. Schematic diagram of the comprehensive activation of hardening mixtures: 1 – cement silo;

2 – inert fillers; 3 – binding additives; 4 – disintegrator; 5 – vibrating mill;

6 – activated water; 7 – conveyor; 8 – mixer; 9 – dispatch

Показатели альтернативных технологий при отработке сульфидных руд Какадур-Ханикомского месторождения приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

**Сравнительные экономические показатели технологий /
Comparative economic indicators of technologies**

Показатели / Indicators	Значения / Values	Технологии/ Technologies	
		Базовая / Basic	Новая / New
Капитальные затраты, руб. /т / Capital expenditures, rub. /t	17,2	14,1	5,0
Эксплуатационные затраты, руб. /т / Operating costs, , rub. /t	0,69	0,65	0,22
Руды в переработке, тыс. т/год / Ores in processing, thousand t/year	240	240	300
Содержание металлов в руде, % / The content of metals in the ore, %	3,5	5,5	>1
Извлечение металла, % / Metal extraction, %	75*	90	75

Использование новой технологии добычи руд характеризуется лучшими показателями по сравнению с базовым вариантом.

На первом этапе итерационного исследования применяли твердеющие смеси базового состава (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Показатели комбинированной технологии (этап 1) /
Indicators of combined technology (stage 1)**

Показатели / Indicators	Единицы измерения/ Units of measurement	Технологии / Technologies	
		Базовая / Basic	Новая / New
Разубоживание / Dissuading	%	30	10
Потери / Losses	%	20	0
Добыча горными работами / Mining operations	%	100	200
Выпуск концентратов: свинцовых цинковых / Production of concentrates: lead zinc	Т/год / T/year Т/год / T/year	7000 10000	10500 15500
Образовано хвостов / Formed by tails	Тыс. т / Thousand tons	800	-
Получено свинцовых концентратов / Lead concentrates were obtained	Т/год / T/year	-	440
Получено цинковых концентратов / Zinc concentrates were obtained	Т/год / T/year	-	680
Стоимость концентратов / The cost of concentrates	Тыс. руб. / Thousand rubles	-	19608
Стоимость товаров из отходов / The cost of goods from waste	Тыс. руб. / Thousand rubles	-	344
Стоимость прочих металлов / The cost of other metals	Тыс. руб. Thousand rubles	-	688
Стоимость активированной воды / The cost of activated water	Тыс. руб. / Thousand rubles	-	344
Всего попутной продукции / Total associated products	Тыс. руб. / Thousand rubles	-	20984
Результаты применения технологий/ Results of the technology application	Тыс. руб./год / Thousand rubles/year	12900	33884
Экономия на годовой объем / Annual volume savings	Тыс. руб./год / Thousand rubles/year	-	20984
Экономия / Savings	%	-	160

На втором этапе исследований доломиты активировали в шаровой мельнице, а высебки хвостов обогащения использовали как заполнитель (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

**Показатели комбинированной технологии (этап 2) /
Indicators of combined technology (stage 2)**

Показатели / Indicators	Единицы измерения/ Units of measurement	Технологии / Technologies	
		Базовая / Basic	Новая / New
Разубоживание / Dissuading	%	30	10
Потери / Losses	%	20	5
Добыча металлов горными работами / Mining of metals	%	100	115
Выпуск концентратов: свинцовых цинковых / Production of concentrates: lead zinc	Тонн/год Тонн/год Tons/year Tons/year	7000 10000	8500 11500
Стоимость концентратов: свинцовых цинковых / The cost of concentrates: lead zinc	Руб./т Руб./т Rub./t Rub./t	954,6 619,2	954,6 619,2
Дополнительно свинцовых концентратов / Additional lead concentrates	Тонн/год Tons/year	-	300
Дополнительно цинковых концентратов / Additional zinc concentrates	Тонн/год Tons/year	-	600
Стоимость концентратов из хвостов / The cost of concentrates from tailings	Тыс. руб. / Thousand rubles	-	688
Стоимость строительных материалов / Cost of building materials	Тыс. руб. / Thousand rubles	-	1032
Всего стоимость продуктов / Total cost of products	Тыс. руб. / Thousand rubles	-	2377
Результаты применения технологий Technology application results	Тыс. руб. год / Thousand rubles a year	12874,2	15251,2
Экономия на годовой объем / Annual volume savings	Тыс. руб. год / Thousand rubles a year	-	2377
Экономия / Savings	%	-	20

Технология с заполнением выработанного пространства твердеющими смесями оказалась экономичнее базовой технологии на 20 %.

На третьем этапе сравниваются технологии с утилизацией отходов Садонского СЦК и Боснийского доломитового карьера в рамках единой системы (табл. 4).

Таблица 4 / Table 4

**Показатели комбинированной технологии (этап 3) /
Indicators of combined technology (stage 3)**

Показатели / Indicators	Единицы измерения / Units of measurement	Технологии / Technologies	
		Базовая/ Basic	Новая/ New
Разубоживание / Dissuading	%	30	10
Потери / Losses	%	20	5
Добыча металлов / Metal mining	%	100	115

Выпуск концентратов: свинцовых цинковых / Production of concentrates: lead zinc	Тонн/год Тонн/год Tons/year Tons/year	7000 10000	8500 11500
Цена концентратов: свинцовых цинковых / The price of concentrates: of lead zinc	Руб./т Руб./т Rub./t Rub./t	954,6 619,2	954,6 619,2
Производительность по горной массе / Rock mass productivity	Тыс. м³/год / Thousand m³/year	170	170
Объем образуемых пустот в год / The volume of voids formed per year	Тыс. м³/год / Thousand m³/year	220	190
Получено концентратов: свинцовых цинковых / Concentrates obtained: lead zinc	Тонн/год Тонн/год Tons/year Tons/year	- -	300 600
Концентратов из переработки хвостов / Concentrates from tailings processing	Тыс. руб. Thousand rubles	-	688
Стоимость строительных материалов / Cost of building materials	Тыс. руб. / Thousand rubles	-	2832
Всего стоимость продуктов утилизации / Total cost of recycling products	Тыс. руб. / Thousand rubles	-	4177
Результаты использования технологий/ Technology usage results	Тыс. руб. /год / Thousand rubles /year	12874	17051
Экономия на годовой объем / Annual volume savings	Тыс. руб./год / Thousand rubles /year	-	4177
Экономия на 1 тонну концентрата / Savings per 1 ton of concentrate	Тыс. руб. / Thousand rubles	-	208.9
Экономия / Savings	%	-	32

После дезинтегратора отмечается снижение тонкости помола и удельной поверхности фракции менее 0,1 мм.

Эффективность комбинирования возможностей рудника и карьера иллюстрируется в таблице 5.

Таблица 5 / Table 5

**Эффективность координации работы рудника и карьера /
The effectiveness of mine and quarry coordination**

Показатели / Indicators	Единицы измерения/ Units of measurement	Технологии / Technologies	
		Базовая /Basic	Новая /New
Извлекаемая ценность руды / Recoverable value of ore	Тыс. руб./год / Thousand rubles/year	12874,2	17051
Выход металла в концентрат / Metal output to concentrate	Тонн/тонн / Tons/tons	0,168	0,271
Затраты на модернизацию технологии/ Technology upgrade costs	Млн руб. / Million rubles	26,8	142,07
Прибыль на объем добычи / Profit on production volume	Млн руб. / Million rubles	-	4177
Удельная прибыль / Unit profit	Руб./тонн / Rub/ton	-	208.9

Типизация технологий разработки месторождений по признаку использования отходов приведена в таблице 6.

Таблица 6 / Table 6

Типизация технологий / Technology typing

Типы технологий / Types of technologies	Признаки / Signs	Использование / Using	Состояние земли / The state of the earth
С обрушением пород / With the collapse of rocks	Повышенное разубоживание руд / Increased dilution of ores	Увеличение разубоживания и выхода хвостов / Increasing the separation and exit of tails	Деградация земель в зоне влияния горных работ / Land degradation in the mining area
С закладкой выработанного пространства / With a bookmark of the developed space	Снижение разубоживания и выхода хвостов / Reduced tail separation and stroke	Использование отходов в составе закладки / The use of waste products as part of masonry	Снижение темпов деградации / Reducing the rate of degradation
С использованием хвостов выщелачивания / Using leaching needles	Радикальное снижение объема хвостов / Radical reduction of tail volume	Управление состоянием массивов / Array state management	Влияние при нарушении режимов/ The impact of regime violations
Комбинированные / Combined	В зависимости от объемов комбинирования / Depending on the volume of the combination	Использование отходов в зависимости от типа / Using moves depending on the type	Влияние при нарушении режима / Influence in case of regime violation

Выводы

1. Оценка эффективности функционирования горного предприятия должна производиться по сумме результатов деятельности предприятия с учетом производства товарной продукции, использования отходов, высвобождения земель и социально-экологических последствий.

2. Эколого-экономическая эффективность новых технологий зависит от их соответствия критериям эффективности добычи и переработки.

Литература

1. 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.
2. Батугин А.С., Шевчук С.В., Шерматова С.С., Головки И.В., Зундуйжамц Б. К вопросу мониторинга геоэкологической 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.
3. Бурдзиева О.Г., Козырев Е.Н., Кортиев А.Л., Ревазов М.О. Особенности формирования геоэкологических рисков горной территории на основе анализа причинно-следственных связей геодинамических эндогенных и экзогенных процессов. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 10. № 4. – С. 124–134. DOI: 10.46698/VNC.2023.88.99.010.

4. Бурдзиева О.Г., Мельков Д.А., Ревазов М.О., Кортиев А.Л. Активизация оползневых процессов, обусловленная урбанизацией горных территорий. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024б. – Т. 16. № 4. – С. 1646–1658. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1646-1658.

5. Бурдзиева О.Г., Ревазов М.О., Кортиев А.Л., Гогичев Р.Р. Влияние воздействия геодинамических процессов на геоэкологическую нагрузку горного региона. // Геология и геофизика Юга России. – 2024а. – Т. 14. № 4. – С. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014.

6. Валиев Н.Г., Пропп В.Д., Абрамкин Н.И., Камболов Д.А. Практика применения выщелачивания металлов из некондиционного сырья и отходов обогащения руд. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12-1. – С. 17–30. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_17.

7. Голик В.И. Перспективное направление восстановления потенциала Садона (РСО-Алания). // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. № 1. – С. 68–75. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-68-75.

8. 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.

9. Голик В.И., Бурдзиева О.Г. К концепции разработки месторождений Садонского рудного пояса. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. №3. – С. 180–192. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014.

10. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Комащенко В.И., Разоренов Ю.И. Экологические аспекты хранения хвостов обогащения руд в горном регионе. // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22. № 6. – С. 35–39.

11. 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 Фиагдонского хвостохранилища РСО-Алания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. № 3. – С. 349–361. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-349-361.

12. Клюев Р.В., Мартюшев Н.В., Кукарцев В.В., Кукарцев В.А., Бригида В.С. Анализ геологической информации для обеспечения устойчивого функционирования горнотехнических систем. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 5. – С. 144–157. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_144.

13. Комащенко В.И. Эколого-экономическая целесообразность утилизации горнопромышленных отходов с целью их переработки. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2015. – № 4. – С. 23–30.

14. Конгар-Сюрюн Ч.Б., Ковальский Е.Р. Твердеющие закладочные смеси на калийных рудниках: перспективные материалы, регулирующие напряжённо-деформированное состояние массива. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 177–187. DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014.

15. Куликова Е.Ю., Баловцев С.В., Скопинцева О.В. Комплексная оценка геотехнических рисков в шахтном и подземном строительстве. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. № 1. – С. 7–16. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-7-16.

16. 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. – Т. 5. № 2. – С. 104–118.

17. Музаев И.Д., Харебов К.С., Музаев Н.И. Математическое моделирование сдвиговых сейсмических колебаний массива состоящего из рекультивированного материала отложения горно-рудной промышленности (хвосты). // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 2. – С. 19–33. DOI: 10.46698/VNC.2022.34.57.002.

18. 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.

19. Свалова В.Б. Управление геоэкологическим риском и проблемы устойчивого развития горных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 1. – С. 129–147. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010.

20. Фоменко В.А., Маковозова З.Э., Соколов А.А., Аксенова М.А., Ковалев Г.С. Анализ водного режима и эволюции массива грунтов рекультивированного объекта горного производства. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 5. – С. 118–129. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_118.

21. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 1. – С. 81 – 94. DOI: 10.46698/VNC. 2021.15.66.007.

22. Bloodworth A., Gunn G. The future of the global minerals and metals sector: issues and challenges out to 2050. // *Geosciences*. – 2012. – No 15. – pp. 90–97.

23. Brigida V.S., Golik V.I., Klyuev R.V., Sabirova L.B., Mambetalieva A.R., Karlina Yu.I. Efficiency gains when using activated mill tailings in underground mining. // *Metallurgist*. – 2023. – Vol. 67. No. 3-4. – pp. 398–408. DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.

24. Lakshmanan V.I., Roy R., Halim M.A. Innovative process development in metallurgical industry. Switzerland: Springer, 2016. – pp 359–383. DOI: 10.1007/978-3-319-21599-0_18.

25. Lei Q., Gao K. A numerical study of stress variability in heterogeneous fractured rocks. // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2019. – Vol. 113. – pp. 121–133.

26. 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 & Recycling Advances*. – 2024. – Vol. 23. Art. No. 200224. DOI: 10.1016/j.rcradv.2024.200224.

27. Pereira F.C., Lima T., Chaves S.S., Vilca Y.C., Canabrava L.P. Stability analysis of free span in excavations with diameter greater than 10 meters—Study case in the correjo do sitio mine. In: *Proc. of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering “Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure”. Development—Full Papers: Ser. Proceedings in Earth and Geosciences*. Vol. 6. London: CRC Press, – 2020. – pp. 878–883.

28. Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Kanukov A.S., Maysuradze M.V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory. // *International Journal of GEOMATE*. – 2016. – Vol. 10. Issue 1. – pp. 1693–1697.

References

1. Adigamov A.E., Yudenzov 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.)

2. Batugin A.S., Shevchuk S.V., Shermatova S.S., Golovko I.V., Zunduyzhamts B. Geoeological 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_10_1_63. (In Russ.)

3. Burdzieva O.G., Kozyrev E.N., Kortiev A.L., Revazov M.O. Features of formation of geoeological risks in the mountainous territory based on the analysis of cause-and-effect relations of geodynamic endogenous and exogenous processes. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 124–134. DOI: 10.46698/VNC.2023.88.99.010. (In Russ.)

4. Burdzieva O.G., Revazov M.O., Kortiev A.L., Gogichev R.R. Influence of geodynamic processes on the geoeological load of mountain region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014. (In Russ.)

5. Burdzieva O.G., Melkov D.A., Revazov M.O., Kortiev A.L. Activation of landslide processes caused by urbanization of mountainous areas. *Sustainable Development of Mountain*

Territories. 2024, Vol. 16, No. 4. pp. 1646–1658. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1646-1658. (In Russ.)

6. Valiev N.G., Propp V.D., Abramkin N.I., Kambolov D.A. The practice of leaching metals from substandard raw materials and ore dressing waste. Mining Information and Analytical Bulletin. 2023. No. 12–1. pp. 17–30. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_17. (In Russ.)

7. Golik V.I. Promising direction of Sadon's potential recovery (RNO-Alania). Sustainable Development of Mountain Territories. 2022. Vol. 14. No. 1. pp. 68–75. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-68-75. (In Russ.)

8. 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.)

9. Golik V.I., Burdzieva O.G. Geophysical monitoring of Sadon field development technology. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 180–192. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014. (In Russ.)

10. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Komashchenko V.I., Razorenov Yu.I. Ecological aspects of storage of ore dressing tailings in the mountainous region. Ecology and Industry of Russia. 2018. Vol. 22. No. 6. pp. 35–39. (In Russ.)

11. 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 Fiagdon tailings, North Ossetia-Alania. Sustainable Development of Mountain Territories. 2022. Vol. 14. No. 3. pp. 349–361. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-349-361. (In Russ.)

12. Klyuev R.V., Martyushev N.V., Kukartsev V.V., Kukartsev V.A., Brigida V. Analysis of geological information toward sustainable performance of geotechnical systems. Mining Information and Analytical Bulletin. 2024. No. 5. pp. 144–157. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_144. (In Russ.)

13. Komashchenko V.I. Ecological and economic feasibility of utilization of mining waste for the purpose of their processing. News of the Tula State University. Sciences of Earth. 2015. No. 4. pp. 23–30. (In Russ.)

14. Kongar-Syuryun Ch.B., Kovalski E.R. Hardening backfill at potash mines: promising materials regulating stress-strain behavior of rock mass. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 177–187. DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014. (In Russ.)

15. Kulikova E.Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O.V. Complex estimation of geotechnical risks in mine and underground construction. Sustainable Development of Mountain Territories. 2023. Vol. 15. No. 1. pp. 7–16. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-7-16. (In Russ.)

16. 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. Vol. 5. No. 2. pp. 104–118. (In Russ.)

17. Muzaev I.D., Harebov K.S., Muzaev N.I. Mathematical modeling of shear seismic vibrations of an array consisting of recultivated material deposits of the mining industry (tailings). Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 19–33. DOI: 10.46698/VNC.2022.34.57.002. (In Russ.)

18. Rybak J., Khayrutdinov M.M., Kuziev D.A., Kongar-Syuryun Ch.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. pp. 61–70. DOI: 10.31897/PMI.2022.2. (In Russ.)

19. Svalova V.B. Geoecological risk management and problems of sustainable development of mountain territories. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 129–147. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010. (In Russ.)

20. Fomenko V.A., Makovozova Z.E., Sokolov A.A., Aksenova M.A., Kovalev G.S. Analysis of water conditions and evolution of rock mass at a mining industry object after reclamation.

Mining Information and Analytical Bulletin. 2025. No. 5. pp. 118–129. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_118. (In Russ.)

21. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Zoning of high mountainous areas by geoecological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 81–94. DOI: 10.46698/VNC. 2021.15.66.007. (In Russ.)

22. Bloodworth A., Gunn G. The future of the global minerals and metals sector: issues and challenges out to 2050. *Geosciences*. 2012. No 15. pp. 90–97.

23. Brigida V.S., Golik V.I., Klyuev R.V., Sabirova L.B., Mambetalieva A.R., Karlina Yu.I. Efficiency gains when using activated mill tailings in underground mining. *Metallurgist*. 2023. Vol. 67. No. 3-4. pp. 398–408. DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.

24. Lakshmanan V.I., Roy R., Halim M.A. Innovative process development in metallurgical industry. Switzerland. Springer. 2016. pp 359–383. DOI: 10.1007/978-3-319-21599-0_18.

25. Lei Q., Gao K. A numerical study of stress variability in heterogeneous fractured rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019. Vol. 113. pp. 121–133.

26. 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 & Recycling Advances*. 2024. Vol. 23. Art. No. 200224. DOI: 10.1016/j.rcradv.2024.200224.

27. Pereira F.C., Lima T., Chaves S.S., Vilca Y.C., Canabrava L.P. Stability analysis of free span in excavations with diameter greater than 10 meters—Study case in the correço do sítio mine. In: *Proc. of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering “Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure”*. Development—Full Papers: Ser. Proceedings in Earth and Geosciences. Vol. 6. London. CRC Press. 2020. pp. 878–883.

28. Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Kanukov A.S., Maysuradze M.V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory. *International Journal of GEOMATE*. 2016. Vol. 10. Issue 1. pp. 1693–1697.