

УДК 504.55.054:622(470.6)

DOI: 10.46698/t6803-6487-0430-d

Оригинальная статья

## Геофизическое обеспечение горного производства

**В.Б. Заалишвили** <sup>1</sup>, **В.И. Голик** <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: vzaal@mail.ru;

<sup>2</sup> Московский политехнический университет, Россия, 107023, г. Москва, Б. Семеновская, 38, e-mail: v.i.golik@mail.ru

Статья поступила: 21.05.2024, доработана: 05.08.2024, принята к публикации: 06.08.2024

**Резюме:** Актуальность темы исследования объясняется необходимостью совершенствования методов обеспечения горного производства, для повышения качества добываемого минерального сырья при минимизации ущерба окружающей среде. Обобщены сведения о наиболее часто используемых методах геофизического обеспечения добычных работ. **Методика** достижения поставленной цели базируется на комплексном использовании геофизических методов исследования пород и слагаемых ими массивов для прогнозирования их свойств при технологическом воздействии на недра. **Результаты.** Дана справка об истории и состоянии теории и практики геофизического сопровождения горного производства при разработке рудных месторождений подземным способом. Показано, что эффективность управления массивами зависит от сбалансированности напряженно-деформированных породных сред, которая корректируется в ходе добычных работ. Дана характеристика основных геофизических методов определения свойств пород в натурных и лабораторных условиях. Приведены количественные показатели прочности основных типов пород, получаемые при модернизации технологий добычи руд и обобщенные в условиях месторождения скальных руд. Детализованы сведения о прогнозировании состояния земной поверхности, как разделительной среды зон опасности и селитебной. Состояние исследуемого массива характеризуется распределением в нем разломов и крупных трещин, которые служат средой перераспределения напряжений и деформаций в массиве и земной коре. Определено, что скальные массивы представляют собой совокупность структурных отдельных с неопределенным и независимым характером взаимодействия, что объясняет опасность эксплуатации горных объектов. Предложена типизация методов исследования.

**Ключевые слова:** геофизическое обеспечение, добыча руд, подземный способ, свойства пород.

**Для цитирования:** Заалишвили В.Б., Голик В.И. Геофизическое обеспечение горного производства. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 85-98. DOI: 10.46698/t6803-6487-0430-d

DOI: 10.46698/t6803-6487-0430-d

Original paper

# Geophysical support of mining production

V.B. Zaalishvili<sup>1</sup>, V.I. Golik<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: vzaal@mail.ru;

<sup>2</sup> Moscow Polytechnic University, 38 B. Semyonovskaya Str., Moscow 107023, Russian Federation, e-mail: v.i.golik@mail.ru

Received: 21.05.2024, revised: 05.08.2024, accepted: 06.08.2024

**Abstract:** The relevance of the research topic is explained by the need to improve the methods of ensuring mining production, to improve the quality of extracted minerals while minimizing environmental damage. The data on the most frequently used methods of geophysical support of mining operations are generalized. **The methodology** of achieving the goal is based on the complex use of geophysical methods of research of rocks and ground composed by them for prediction of their properties at technological impact on the subsoil. **Results.** The reference on the history and state of theory and practice of geophysical support of mining production at development of ore deposits by underground method is given. It is shown that the efficiency of ground control depends on the balance of stress-strain rock media, which is corrected in the course of mining operations. The main geophysical methods of determining the properties of rocks in full-scale and laboratory conditions are characterized. Quantitative indicators of the strength of the main rock types obtained during modernization of ore mining technologies and generalized in the conditions of the rock ore deposit are given. Information on forecasting the state of the earth surface as a separating medium of danger zones and settlement zones is detailed. The condition of the studied massif is characterized by the distribution of faults and large cracks in it, which serve as a medium for redistribution of stresses and deformations in the ground and the earth crust. It is determined that rock massifs are a set of structural separations with uncertain and independent character of interaction, which explains the danger of exploitation of mining objects. Typization of research methods is proposed.

**Keywords:** geophysical support, ore mining, underground method, rock properties.

**For citation:** Zaalishvili V.B., Golik V.I. Geophysical support of mining production. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 85-98. DOI: 10.46698/t6803-6487-0430-d

## Введение

Напряженно-деформированное состояние (НДС) массива исследовали В.Д. Слесарев (1948), В.И. Борщ – Компанейца, С.В. Ветров (1975), Г.Н. Кузнецов, Н.П. Влох и др.

Гипотезы управления состоянием массивов сводятся к тому, что эффективность управления массивами зависит от сбалансированности напряженно-деформированных сред, которая обеспечивается повышением несущей способности пород путем заполнения выработанного пространства по завершению добычных работ.

Геофизические методы исследования широко применяются при комплексном анализе генетических особенностей минерального вещества и технологических свойств полезных компонентов [Клюев и др., 2019; Яконовская и др., 2020].

Они составляют основу формирования геоинформационных технологий при решении геоэкологических задач и использовании систем искусственного интеллекта в процедурах аудита современного горного производства [Яицкая, Бригида, 2022; Валиев и др., 2017], при прогнозировании геомеханического состояния массива при отработке месторождений полезных ископаемых и решении пространственно-временных задач геоэкологии [Рыбак и др., 2022; Бригида и др., 2020; Zemskov et al., 2021].

Методы геофизического сопровождения процессов горного и обогатительного переделов применяют для обоснования целесообразности применения новых технологий [Валиев и др., 2023; Kongar-Syuryun et al., 2024; Golik et al., 2023].

Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых с использованием возможностей рудничной геофизики предложены в трудах [Дзапаров и др., 2020; Doifode, Matani, 2015; Рыбак и др., 2021; Golik et al., 2023].

Вопросы обеспечения экологической безопасности при внедрении ресурсо-возобновляемых технологий и регламентации процессов производственного характера рассмотрены в трудах [Хайрутдинов и др., 2022; Петров и др., 2020; Löw et al., 2019].

Целью работы является рассмотрение и анализ геофизических методов исследования пород и слагаемых ими массивов для совершенствования их возможностей при добыче руд подземным способом.

Разнообразие геофизических методов сопровождения технологических процессов горного производства позволяет обосновать направления совершенствования и модернизации применяемых технологий при комплексном использовании геофизических методов исследования пород и слагаемых ими массивов для прогнозирования их свойств при технологическом воздействии на недра [Клюев и др., 2020; Рыбак и др., 2022; Lovchikov, 2020].

Геофизическая аппаратура и оборудование обеспечивают получение, передачу и хранение информации о параметрах техногенного цикла горно-металлургического цикла и являются неотъемлемой частью динамически развивающегося производства минерального сырья для удовлетворения потребностей промышленности.

## Методика

Разработка месторождений полезных ископаемых осуществляется с использованием геофизических средств контроля технологических процессов на всех этапах производства.

Структурную неоднородность массива определяют с использованием ультразвукового, электрического и магнитного каротажа. Напряжения в массиве измеряют методами полной разгрузки, параллельных скважин, регистрации деформаций отверстия в керне и низкочастотных модификаций сейсмического и электрометрического методов.

При подземной разработке рудных месторождений применяют методы акустической эмиссии, сейсмоакустический, сейсмический и электрометрический.

## Результаты

Свойства пород в массиве по выходу керна при бурении скважин оценивают методом Ханзаги И. На рис. 1. приведен принцип оценки прочности пород по выходу керна, отобранного в зоне влияния выработки с дифференциацией по толщине дисков.

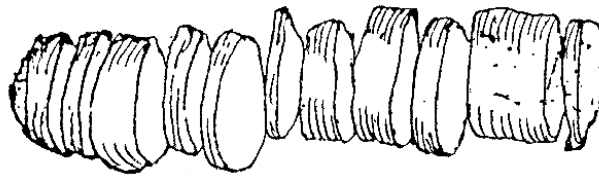


Рис. 1. Оценка прочности пород по выходу керна /

Fig. 1. Estimation of rock strength from core yields

По результатам исследования керна из скважин рассчитывается коэффициент ослабления пород в массиве ( $K_o$ ) (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Коэффициент ослабления некоторых пород / Weakening factor of some rocks**

Типы пород / Rock types	Сильно Нарушенные / Heavily disturbed	Средне Нарушенные / Average disturbed
Базальтовые порфириды / Basaltic porphyrites	0,086-0,127	0,314-0,328
Габбро-диориты / Gabbro-diorites	0,190	0,230
Диориты измененные / Altered diorites	0,142	0,298
Диоритовые порфириды массивные / Dioritic porphyrites massive	0,120	0,274-0,359
Граниты с ксенолитами оруденелые / Granites with xenoliths are mineralized	0,120	0,280
Плагипорфиры (дайки) / Plagioporphyries (dikes)	0,255	0,300-0,311
Известняки / Limestones	0,095-0,240	0,230-0,480
Прослаивание известняков и сланцев / Limestone and shale saturation	0,131	0,181
Песчаники с прослоями сланцев и известняков / Sandstones with interlayers of shale and limestone	0,100-0,165	0,210-0,282
Алевролиты, алевропесчаники / Siltstones, silty sandstones	0,111-0,220	0,228-0,378
Алевролиты, алевропесчаники оруденелые / Ore-bearing siltstones, silt-sandstones	0,145	0,250-0,303
Аргиллиты кремнистые / Siliceous argillites	0,170	0,230
Сланцы глинистые, углисто-глинистые / Clay shale, clayey-coal shale	0,082	0,144

Для выявления неоднородностей использован метод межскважинного акустического прозвучивания по схеме (рис. 2).

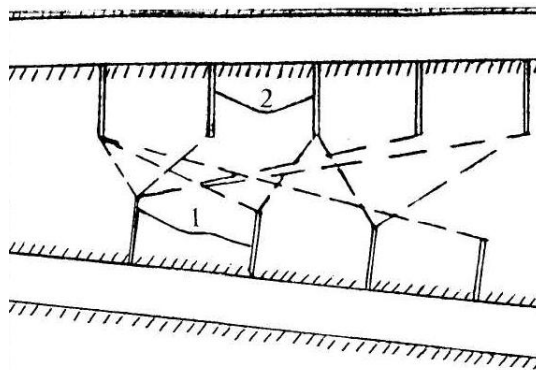


Рис. 2. Схема исследования массива: 1 и 2 – скважины /

Fig. 2. Scheme of massif research: 1 and 2 – boreholes

Излучатель помещали в скважинах, пробуренных с одной стороны массива (1), а звукоприёмник – в скважинах, пробуренных с другой стороны (2). Расстояние между скважинами – 5 м. Глубина скважин – 2,5 м. Скважины заполняли водой.

Для прошедшего из точки излучения сигнала в точку его приема луча коэффициент кажущегося звукопоглощения  $\alpha_i$ :

$$\alpha_i = \frac{L_o - L_n - 20 \lg r_i}{8,68 r_i},$$

где  $L_o$  - начальный уровень сигнала в точке излучения, дБ;

$L_n$  - наблюдательный уровень сигнала, дБ;

$r_i$  - расстояние от точки излучения до точки приема, м.

В зависимости от состояния массива, фиксировали процессы, предшествующие обрушению и определяли количественное значение устойчивости рудовмещающих массивов (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Характеристика устойчивости горных массивов /  
Characterization of stability of rock massifs**

Регион / Region	Породы / Rocks	Число импульсов в минуту, имп. / мин <sup>-1</sup> / Number of pulses per minute, imp. / min <sup>-1</sup>		
		Категория устойчивости / Sustainability category		
		Устойчивая / Sustainable	Переходная / Transient	Неустойчивая / Non-sustainable
Урал / Ural	Порфириты / Porphyrites	0-25	25-40	40
	Магнетиты / Magnetites	0-30	30-40	40
	Скарны / Skarns	0-40	40-60	60
Криворожье / Krivorozhye	Слабые руды / Weak ores	0-5	5-10	10
	Средние руды / Medium ores	0-10	10-25	25
	Крепкие руды / Strong ores	0-20	20-40	40
Горная Шория / Gornaya Shoria	Диориты / Diorites	0-15	15-30	30
	Известняки / Limestones	0-30	30-60	60
	Скарны / Skarns	0-40	40-60	60
Хакассия / Khakassia	Роговики / Hornblende	0-15	15-30	30
	Сланцы, туфы / Shales, tuffs	0-30	30-60	60
Хайдаркан / Khaidarkan	Известняки / Limestones	0-10	10-20	20
Джезказган / Dzhezkazgan	Алевриты / Siltstones	0-10	10-25	25
Миргалимсай / Mirgalimsay	Доломиты / Dolomites	0-16	16-25	25
СУБР / SUBR	Сланцы / Shales	0-10	10-20	20

На основе результатов натуральных испытаний построены зависимости частоты звуков разрушения от величины напряжений  $\sigma$ :

$$\sigma = a \cdot N_H^b,$$

где  $N_H$  – количество импульсов в минуту;

$a$  – коэффициент, характеризующий структуру горного массива;

$b$  – коэффициент, характеризующий прочность горного массива.

Сдвигения массива пород и руд при подземной разработке определяются результатами наблюдений на земной поверхности, в горных выработках и скважинах с применением глубинных реперов по профильным линиям по простиранию и вкрест простирания рудных тел (рис. 3).

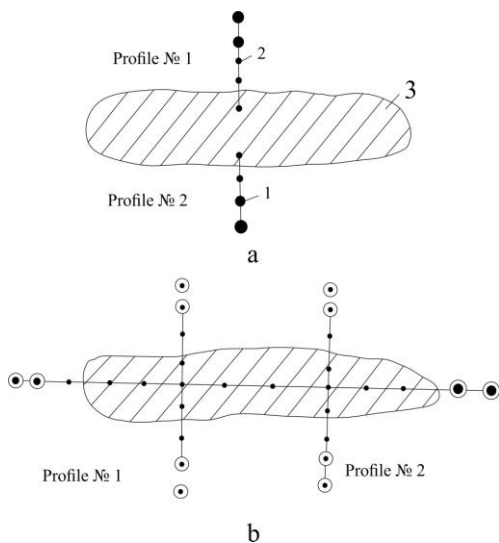


Рис. 3. Профили наблюдательной станции:  
а – односторонний; б – двухсторонний;  
1 – опорные реперы; 2 – рабочие реперы; 3 – рудное тело /  
Fig. 3. Profiles of the observation station:  
а – one-sided; б – two-sided; 1 – reference repers;  
2 – working repers; 3 – ore body

Для контроля нарушенности массива электрические цепи из параллельно подключенных сопротивлений размещают в скважинах (рис. 4). При обрушении пород цементированная с породой часть скважины с сопротивлениями обрушается, сигнализируя о деформировании.

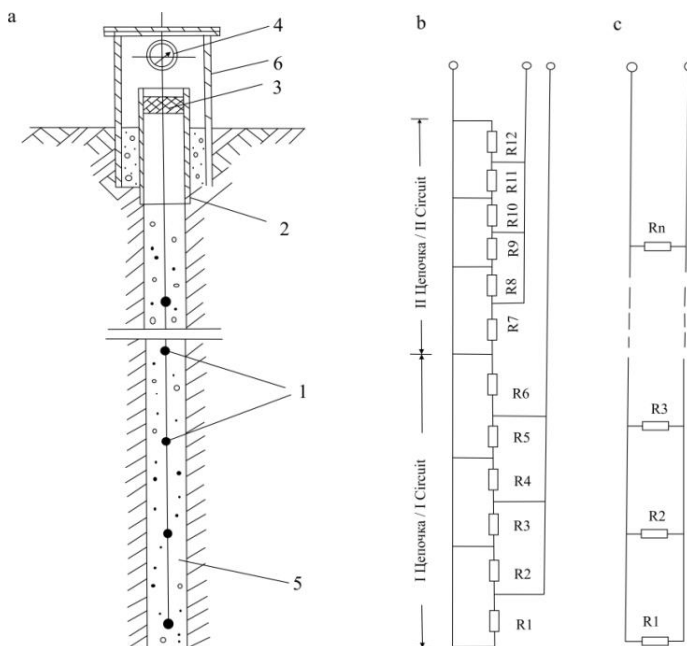


Рис. 4. Наблюдательная станция:  
а – общий вид: 1 – сопротивление электрической цепи; 2 – обсадная труба; 3 – резиновая пробка; 4 – измерительный прибор; 5 – цементный раствор; 6 – защитный колпак; б – схема измерения сопротивлений в цепи; в – схема по измерению силы тока в цепи /  
Fig. 4. Observation station: а – general view: 1 – electrical circuit resistance; 2 – casing pipe; 3 – rubber plug; 4 – measuring device; 5 – cement mortar; 6 – protective cap; б – scheme for measuring resistance in the circuit; в – scheme for measuring current in the circuit



При изучении устойчивости кровли используются модели из эквивалентных материалов, а в качестве регистрирующей аппаратуры датчики и осциллографы.

Подбор эквивалентных материалов производится по условию:

$$s_n = a_e (g_n / g_m) s_m,$$

где  $S_n$  – предел прочности пород природы, МПа;

$S_m$  – предел прочности пород модели, МПа;

$g_n$  – плотность пород природы, г/см<sup>3</sup>;

$g_m$  – плотность пород модели, г/см<sup>3</sup>;

$a_e$  – масштаб модели.

Для определения влияния нарушенности пород на устойчивость выработок отработывают модели, различающиеся плотностью трещин (рис. 5).

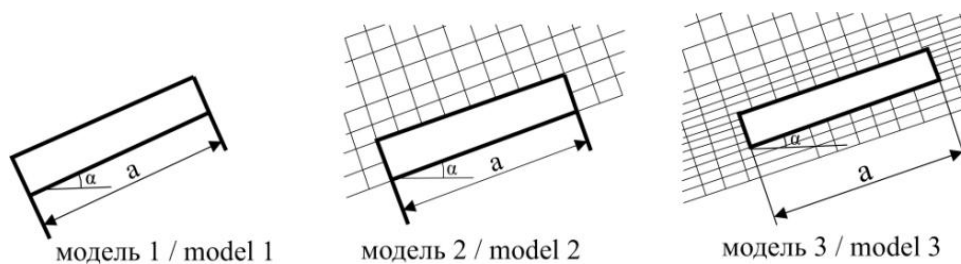


Рис. 5. Модель 1 – нетронутый массив; модель 2 – массив нарушен тремя системами трещин, образующими блоки размерами 1x2x2 м; модель 3 – массив нарушен послойной зоной из трех слоев общей мощностью 6 м /

Fig. 5. Model 1 – intact massif; model 2 – massif disturbed by three fracture systems forming 1x2x2 m blocks; model 3 – massif disturbed by a layer-by-layer zone of three layers with a total thickness of 6 m

Условие подобия:  $g_m = E_m H g_n / h_1 E_n$ ,

где  $E_n$  – модуль упругости пород;

$E_m$  – модуль упругости модели;

$H$  – размер пород;

$h_1$  – размер модели.

Нагруженные модели исследуют в поляризованном свете. Напряжение  $t_{max}$  определяют по картинам полос, а разность главных нормальных напряжений из выражения:

$$d_1 - d_2 = 2 t_{max},$$

где  $d_1$  – главные горизонтальные напряжения, МПа;

$d_2$  – главные вертикальные напряжения, МПа.

Главные нормальные напряжения в отдельных точках модели определяют измерением поперечных деформаций:

$$d_1 + d_2 = (t_0 - t_1) E_m^t / t_0 m,$$

где  $t_0$  – толщина модели до нагружения, мм;

$t_1$  – толщина модели после нагружения, мм;

$E_m^t$  – модуль упругости материала модели при температуре замораживания;

$m$  – коэффициент Пуассона материала модели.

Напряжения  $t_{\max}$  определяют по окраске материала модели в зависимости от касательных напряжений:

$$d_n = d_m E_n / E_m$$

Для решения задачи изготовлено 5 моделей шириной 15 м, высотой 2, 4, 6, 8 и 10 м и углом падения  $20^\circ$  в сплошной зоне и 5 моделей аналогичных размеров в слоистой среде. Глубина работ 200 м. Модуль упругости пород  $E_n = 5,2 \times 10^5$  кг/см<sup>2</sup>, модуль упругости послойной зоны  $E_{з.п.} = 2,08 \times 10^5$  кг/см<sup>2</sup>. Плотность пород 2,8 т/м<sup>3</sup>. Вмещающие породы моделировались эпоксималом с модулем упругости  $E_{з.п.} = 270$  кг/см<sup>2</sup> при температуре «замораживания» напряжений, а послойная рудная зона  $E_{п.з.} = 110$  кг/см<sup>2</sup>.

При отсутствии сцепления между основной и непосредственной кровлей в кровле выработок возникают растягивающие напряжения, величина которых возрастает при увеличении неоднородности материала (рис. 6).

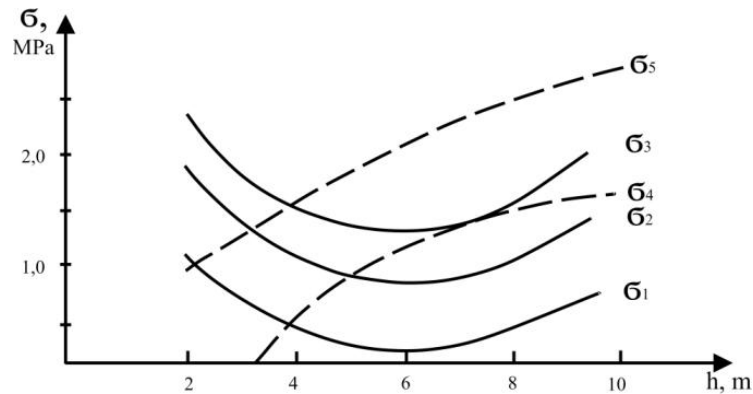


Рис. 6. Изменение напряжений в кровле:  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – послойная зона;  $\sigma_4, \sigma_5$  – однородная зона /  
Fig. 6. Change of stresses in the roof:  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – layer-by-layer zone;  $\sigma_4, \sigma_5$  – homogeneous zone

Разломы увеличивают и перераспределяют напряжения (рис. 7).

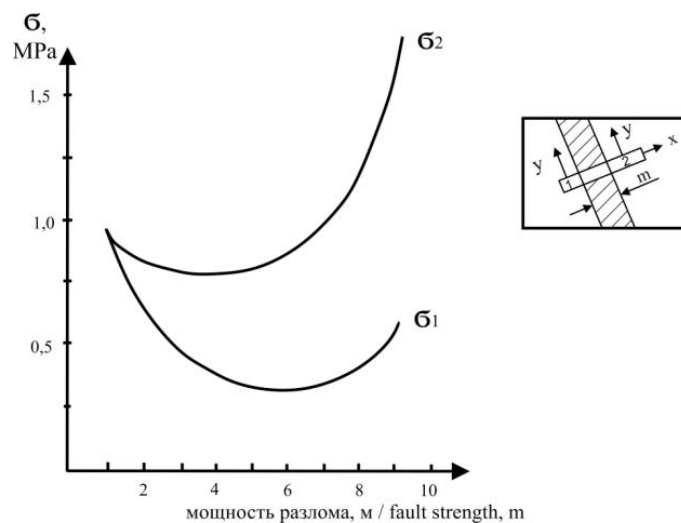


Рис. 7. Влияние мощности разломов на величину напряжений /  
Fig. 7. Effect of fault power on the magnitude of stresses



Оценка состояния напряженно-деформированного массива пород и прогнозирование его поведения осуществляется комплексным методом, включающим физическое и математическое моделирование, а также ретро- и перспективный прогноз состояния. Наложением измеренных элементов на геолого-структурную карту устанавливают систему нарушенности.

После математического анализа результатов исследований формируют инженерно-геологическую модель массива, определяют расстояния между макротрещинами, строят геолого-структурные проекции, оценивают роль трещин и вычисляют коэффициент структурного ослабления как функцию нарушенности массива.

Установлено, что наличие разноориентированных трещин искажает геомеханическую ситуацию в массиве за счет разгрузки пород в зонах разлома. Висячем боку тектонических трещин преобладают послынные трещины, увеличивающие деформации пород под влиянием напряжений.

Среди макротрещин выделяют трещины по-разному ориентированные к разлому: трещины расщепления в висячем крыле разлома мощностью до 1–2 м и расстоянием между макротрещинами около 0,5 м, трещины сгущения мощностью до 15–20 м и расстоянием около 2 м, и трещины слабого нарушения массива со средним расстоянием более 5 м.

Применяемые в горном деле методы исследований можно подразделить по основным признакам (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3



При решении геомеханических задач разработки месторождений полезных ископаемых используются методы с применением геофизики (табл. 4).

Таблица 4 / Table 4

**Геофизические методы обеспечения горных работ /  
Geophysical methods to support mining operations**

Вид / Type	Параметр / Parameter	Принцип / Principle	Оборудование / Equipment
Дискование керна / Core disking	Прочность пород / Rock strength	Выход керна при бурении скважин / Core yield during well drilling	Буровой станок / Drilling machine
Межскважин- ное акустиче- ское прозвучи- вание / Interwell acous- tic sounding	Однородность массива / Massif homogeneity	Параметры упругих колебаний / Elastic vibration parameters	Излучатель, звукорецепник, анализатор спектра / Transmitter, receiver, spectrum analyzer
Ультразвуковой каротаж / Ultrasonic logging	Структурная неоднородность / Structural heterogeneity	Электрическое сопротивление / Electrical resistivity	Излучатель, приемник, анализатор спектра / Transmitter, receiver, spectrum analyzer
Электрический каротаж / Electrical logging	Структурная неоднородность / Structural heterogeneity	Диэлектрическая проницаемость / Dielectric permittivity	Излучатель, приемник, анализатор спектра / Transmitter, receiver, spectrum analyzer
Магнитный каротаж / Magnetic logging	Структурная неоднородность / Structural heterogeneity	Магнитная проницаемость / Magnetic permeability	Излучатель, приемник, анализатор спектра / Transmitter, receiver, spectrum analyzer
Полная разгрузка / Full unloading	Напряженность / Tension	Упругие деформации / Elastic deformations	Буровой станок, датчики, приемник, анализатор спектра / Drilling machine, transducers, receiver, spectrum analyzer
Акустическая эмиссия / Acoustic emission	Структурная неоднородность / Structural heterogeneity	Акустическая проницаемость / Acoustic permeability	Излучатель частот 10–100 кГц, приемник, анализатор спектра / Frequency transmitter 10-100 kHz, receiver, spectrum analyzer
Сейсмоакусти- ческий / Seismoacoustic	Структурная неоднородность / Structural heterogeneity	Акустическая проницаемость / Acoustic permeability	Излучатель частот 30–500 кГц, приемник, анализатор спектра / Frequency transmitter 30-500 kHz, receiver, spectrum analyzer
Электрометри- ческий / Electrometric	Напряженность / Voltage	Электрическое сопротивление / Electrical resistance	Излучатель тока, приемник, анализатор спектра / Current transmitter, receiver, spectrum analyzer
Вдавливание пуансонов / Punch indentation	Напряженность / Tension	Сопротивление внедрению жесткого штампа / Resistance to rigid die insertion	Буровой станок, гидравлический прибор БП18 / Drilling machine, hydraulic device BP18

Деформация скважин / Well deformation	Деформированность / Deformation	Изменение диаметра скважин / Change of well diameter	Буровой станок, деформометры / Drilling machine, deformometers
Геомагнитный / Geomagnetic	Напряженность / Tension	Импульсно-электромагнитное излучение / Pulse-electromagnetic radiation	Излучатель сигнала, приемник, анализатор спектра / Signal transmitter, receiver, spectrum analyzer
Глубинные реперы / Depth gauges	Деформированность / Deformability	Размеры трещин / Fracture sizes	Системы связи (проволока или штанги), реперы / Communication systems (wire or rods), gauges
Электрические цепи в скважинах / Electrical circuits in boreholes	Деформированность / Deformation	Сопротивление цепи / Circuit resistance	Датчики, анализатор спектра / Sensors, spectrum analyzer
Моделирование на эквивалентных материалах / Modeling on equivalent materials	Деформированность / Deformation	Напряженность / Tension	Форма, материалы, датчики, анализатор / Shape, materials, sensors, analyzer
Моделирование на оптически активных материалах / Modeling on optically active materials	Деформированность / Deformation	Напряженность / Tension	Форма, материалы, датчики, анализатор / Shape, materials, sensors, analyzer
Математическое моделирование / Mathematical modeling	Деформированность / Deformation	Напряженность / Tension	Закономерности, средства математического анализа / Regularities, tools of mathematical analysis

### Выводы

Использование геофизических методов сопровождения процессов подземной разработки месторождений повышает безопасность горных работ и улучшает качество добываемого минерального сырья при минимизации ущерба окружающей среде.

Эффективность управления рудовмещающими массивами зависит от сбалансированности напряженно-деформированных породных сред, путем оперативной корректировки на основании данных геофизического сопровождения.

Состояние природных и естественных массивов характеризуется путем реализации на практике данных геофизического сопровождения.

## Литература

1. Бригада В.С., Кожиев Х.Х., Сарян А.А., Джиоева А.К. Пространственно-временные задачи геоэкологии – междисциплинарный подход. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 4. – С. 20–32.
2. 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 мульти-агентных систем). // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № S23. – С. 134–139.
3. Валиев Н.Г., Пропп В.Д., Абрамкин Н.И., Камболов Д.А. Практика применения выщелачивания металлов из некондиционного сырья и отходов обогащения руд. // Горный информационный аналитический бюллетень. – 2023. – № 12-1. – С. 17–30.
4. Дзапаров В.Х., Харебов Г.З., Стась В.П., Стась П.П. Исследование сухих строительных смесей на основе отходов производства для подземного строительства. // Сухие строительные смеси. – 2020. – № 1. – С. 35–38.
5. Клюев Р.В., Босиков И.И., Майер А. В., Гаврина О.А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2020. – № 2. – С. 283–290.
6. Клюев Р.В., Босиков И.И., Майер А.В. Комплексный анализ генетических особенностей минерального вещества и технологических свойств полезных компонентов Джеб-казганского месторождения. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2019. – № 3. – С. 321–330.
7. Петров Ю.С., Хадзарагова Е.А., Соколов А.А., Шарипзянова Г.Х., Таскин А.В. Основные принципы получения, передачи и хранения информации о параметрах техногенного цикла горно-металлургического предприятия. // Горный информационно-аналитический. – 2020. – № 11-1. – С. 178–188.
8. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – Т. 13. № 3(49). – С. 406–415.
9. 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.
10. Хайрутдинов М.М., Каунг П.А., Чжо З.Я., Тюляева Ю.С. Обеспечение экологической безопасности при внедрении ресурсо-возобновляемых технологий. // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 5. – С. 57–62.
11. Яицкая Н.А., Бригада В.С. Геоинформационные технологии при решении трехмерных геоэкологических задач: пространственная интерполяция данных. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 1. – С. 162–173.
12. Яконовская Т.Б., Жигульская А.И., Яконовский П.А. Оценка использования геофизического метода VLF для определения мощности торфяного месторождения. – Горные науки и технологии. – 2020. – Т. 5. № 3. – С. 224–234.
13. Doifode S.K., Matani A.G. Effective Industrial Waste Utilization Technologies towards Cleaner Environment. // International Journal of Chemical and Physical Sciences. – 2015. – Vol. 4. Special Issue. NCSC. – pp. 536–540.
14. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. Technology for nonwaste recovery of tailings of the mizur mining and processing plant. // Metallurgist. – 2023. – Vol. 66. Nos. 11-12. – pp. 1476–1480.
15. Golik V.I., Mitsik M.F., Aleksakhina Y.V., Alenina E.E., Ruban-Lazareva N.V., Kruzhkova G.V., Kondratyeva O.A., Trushina E.V., Skryabin O.O., Khayrutdinov M.M. Comprehensive Recovery of Metals in Tailings Utilization with Mechanochemical Activation. // Resources. – 2023. – Vol. 12. Issue 113. DOI: 10.3390/resources12100113.

16. Kongar-Syuryun, C., Klyuev R.V., Golik V.I., Oganesyanyan A., Solovykh D., Khayrutdinov M., Adigamov D. Principles of Sustainable Development of Georesources as a Way to Reduce Urban Vulnerability. // *Urban Science*. – 2024. – Vol. 8. Issue 44. DOI: 10.3390/urbansci8020044.

17. Löow J., Abrahamsson L., Johansson J. Mining 4.0 – the Impact of New Technology from a Work Place Perspective. // *Mining, Metallurgy & Exploration*. – 2019. – Vol. 36. Issue 4. – pp. 701–707.

18. Lovchikov A.V. A New Concept of the Mechanism of Rock-Tectonic Bursts and Other Dynamic Phenomena in Conditions of Ore Deposits. // *Mining Science and Technology*. – 2020. – Vol. 5. No. 1. – pp. 30–38.

19. Zemskov A.N., Liskova M.Yu., Sharipzyanova G.Kh. Regularities of changes in the gas-dynamic and geomechanical situation at potash mines. // *Sustainable development of mountain territories*. – 2021. – Vol. 13. No. 3. – pp. 426–432.

## References

1. Brigida V.S., Kozhiev Kh.Kh., Saryan A.A., Dzhioeva A.K. Spatiotemporal problems in geocology: an inter-disciplinary approach. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020. No. 4. pp. 20–32. (In Russ.)

2. Valiyev N.G., Golovyryn S.S., Makarov V.V. To a question of use of systems of artificial intelligence in procedures of audit of modern mining (a perspective of the solution of tasks of modern mining with use the multiagentny of systems). *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017. No. S23. pp. 134–139. (In Russ.)

3. 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 Informational and Analytical Bulletin*. 2023. No. 12-1. pp. 17–30. (In Russ.)

4. Dzaparov B.Kh., Kharebov G.Z., Stas V.P., Stas P.P. Research of drymixtures based on production waste for underground construction. *Dry construction mixtures*. 2020. No. 1. pp. 35–38. (In Russ.)

5. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V., Gavrina O.A. Comprehensive analysis of the effective technologies application to increase sustainable development of the natural-technical system. *Sustainable development of mountain territories*. 2020. No. 2. pp. 283–290. (In Russ.)

6. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V. Complex analysis of genetic features of mineral substance and technological properties of useful components of Dzhezkazgan deposit. *Sustainable development of mountain territories*. 2019. No. 3. pp. 321–330. (In Russ.)

7. Petrov Yu.S., Khadzharagova E.A., Sokolov A.A., Sharipzyanova G.Kh., Taskin A.V. Acquisition, transmission and storage of information on production-induced cycle in mining and metallurgy. *Mining informational and Analytical Bulletin*. 2020. No. 11-1. pp. 178–188. (In Russ.)

8. Rybak Ya., Khayrutdinov M.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Tyulyayeva Yu.S. Resource-saving technologies for development of mineral deposits. *Sustainable development of mountain territories*. 2021. Vol. 13. No. 3. Issue 49. pp. 406–415. (In Russ.)

9. Rybak Ya., 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. (In Russ.)

10. Khayrutdinov M.M., Kaung P.A., Chzho Z.Ya., Tyulyaeva Yu.S. Ensuring environmental safety in the implementation of the resource-renewable technologies. *Occupational safety in industry*. 2022. No. 5. pp. 57–62. (In Russ.)

11. Yaitskaya N.A., Brigida V.S. Geoinformation technologies in solving three-dimensional geocological problems. spatial data interpolation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 162–173. (In Russ.)

12. Yakonovskaya T.B., Zhigul'skaya A.I., Yakonovsky P.A. Assessment of applying VLF geophysical method to determine the peat deposit thickness. *Mining science and Technology*. 2020. – Vol. 5. No. 3. pp. 224–234. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-224-234. (In Russ.)

13. Doifode S.K., Matani A.G. Effective Industrial Waste Utilization Technologies towards Cleaner Environment. *International Journal of Chemical and Physical Sciences*. 2015. Vol. 4. Special Issue. NCSC. pp. 536–540.
14. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyshev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. Technology for nonwaste recovery of tailings of the mizur mining and processing plant. *Metallurgist*. 2023. Vol. 66. Nos. 11-12. pp. 1476–1480.
15. Golik V.I., Mitsik M.F., Aleksakhina Y.V., Alenina E.E., Ruban-Lazareva N.V., Kruzhkova G.V., Kondratyeva O.A., Trushina E.V., Skryabin O.O., Khayrutdinov M.M. Comprehensive Recovery of Metals in Tailings Utilization with Mechanochemical Activation. *Resources*. 2023. Vol. 12. Issue 113. DOI: 10.3390/resources12100113.
16. Kongar-Syuryun, C., Klyuev R.V., Golik V.I., Oganessian A., Solovykh D., Khayrutdinov M., Adigamov D. Principles of Sustainable Development of Georesources as a Way to Reduce Urban Vulnerability. *Urban Science*. 2024. Vol. 8. Issue 44. DOI: 10.3390/urbansci8020044.
17. Lööw J., Abrahamsson L., Johansson J. Mining 4.0 – the Impact of New Technology from a Work Place Perspective. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2019. Vol. 36. Issue 4. pp. 701–707.
18. Lovchikov A.V. A New Concept of the Mechanism of Rock-Tectonic Bursts and Other Dynamic Phenomena in Conditions of Ore Deposits. *Mining Science and Technology*. 2020. Vol. 5. No. 1. pp. 30–38. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-30-38.
19. Zemskov A.N., Liskova M.Yu., Sharipzyanova G.Kh. Regularities of changes in the gas-dynamic and geomechanical situation at potash mines. Sustainable development of mountain territories. 2021. Vol. 13. No. 3. pp. 426–432.