

УДК 504.55.054:622(470.6)

DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014

Оригинальная статья

## Геофизический мониторинг технологии разработки месторождений Садона

**В.И. Голик** <sup>1,2</sup>, **О.Г. Бурдзиева** <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: v.i.golik@mail.ru;

<sup>2</sup>Московский политехнический университет, Россия, 107023, г. Москва, Б. Семеновская, 38

Статья поступила: 11.07.2023, доработана: 17.09.2023, принята в печать: 20.09.2023

**Резюме:** Актуальность статьи объясняется необходимостью поиска еще мало используемых резервов повышения эффективности горного производства в сложных условиях эксплуатации рудных месторождений Садонского рудного узла. **Целью статьи** является детализация зависимости состояния массива от техногенных напряжений при разработке рудных месторождений подземным способом. **Методы работы.** Соответствие технологий разработки месторождений полезных ископаемых принципам природопользования обеспечивается путем исследования динамики изменения параметров рудовмещающих массивов. Защите от наведенных сейсмических колебаний подлежат объекты инфраструктуры горных предприятий и земная поверхность, особенно при производстве добычных работ в уникальных условиях охраняемых территорий. В сфере добычи природных ресурсов Республики Северная Осетия–Алания с такими условиями применен и интерпретирован ряд геофизических исследований. **Результаты работы.** С использованием возможностей математического моделирования методом конечных элементов определен механизм работы сжимающих напряжений в зоне их сопряжения рудного целика с вмещающим массивом. Получены количественные критерии оценки состояния выработанного пространства в зависимости от его заполнения или изоляции. Предложено оценивать опасность разрушения земной поверхности по соотношению максимальных напряжений в модели к пределу прочности материала при растяжении. Приведены результаты моделирования техногенных напряжений на низкомолекулярных материалах. Установлено, что максимальные напряжения в элементах очистной камеры развиваются при максимальном значении коэффициента бокового распора. Показано, что заполнение выработанного пространства камер снижает уровень напряжений в зависимости от прочности заполнителя. Определено, что при варианте с изоляцией выработанного пространства без заполнения концентрация напряжений для данных условий максимальна. Полученные сведения о поведении рудовмещающего массива актуальны для проектирования горных работ при возобновлении горных работ Садонских рудников, а также для месторождений с аналогичными условиями локализации оруденения, как при использовании традиционных технологий, так и при извлечении металлов новыми перспективными технологиями с выщелачиванием на месте локализации оруденения.

**Ключевые слова:** рудовмещающий массив, динамика, сейсмичность, земная поверхность, месторождение, массив, напряжение.

**Для цитирования:** Голик В.И., Бурдзиева О.Г. К концепции разработки месторождений Садонского рудного пояса. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(3): 180–192. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014.

DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014

Original paper

## Geophysical monitoring of Sadon field development technology

V.I. Golik<sup>1,2</sup>, O.G. Burdzieva<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Moscow Polytechnic University,  
38 B. Semenovskaya Str., Moscow 107023, Russian Federation

Received: 11.07.2023, revised: 17.09.2023, accepted: 20.09.2023

**Abstract: Relevance** of the paper is explained by the need to search for still little-used reserves to increase the efficiency of mining production in complicated operating conditions of the ore sites of the Sadon ore node. **Aim** of the article is to detail the dependence of the massif state on anthropogenic stresses during the development of ore deposits by underground method. **Methods.** Compliance of technologies for the development of mineral deposits with the principles of nature management is ensured by studying the dynamics of changes in the parameters of ore-containing massifs. Infrastructure facilities of mining enterprises and the Earth's surface are subject to protection from induced seismic vibrations, especially during mining operations in the unique conditions of protected areas. In the field of extraction of natural resources of the Republic of North Ossetia-Alania with such conditions, a number of geophysical studies have been applied and interpreted. **Results.** Using the possibilities of mathematical modeling by the finite element method, the operation mechanism of compressive stresses in the zone of their interface of the ore whole with the host array is determined. Quantitative criteria for assessing the state of the developed space, depending on its filling or isolation, are obtained. It is proposed to assess the hazard of destruction of the Earth's surface in relation to the maximum stresses in the model to the tensile strength of the material. The results of modeling anthropogenic stresses on low-molecular materials are presented. It is established that the maximum stresses in the elements of the cleaning chamber develop at the maximum value of the lateral expansion coefficient. It is shown that the filling of the developed chamber space reduces the stress level depending on the strength of the filler. It is determined that in the case of the option with isolation of the developed space without filling, the stress concentration for these conditions is maximum. The information obtained on the behavior of the ore-containing massif is relevant for the design of mining operations during the resumption of mining operations of the Sadon mines, as well as for deposits with similar conditions of localization of mineralization, both when using traditional technologies and when extracting metals with new promising technologies with drilling at the site of localization of mineralization.

**Keywords:** ore-containing array, dynamics, seismicity, Earth's surface, deposit, array, stress.

**For citation:** Golik V.I., Burdzieva O.G. Geophysical monitoring of Sadon field development technology. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of RussianSouth*. (in Russ.). 2023.13(3): 180-192. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014.

### Введение

В соответствии с принципами природопользования разработка месторождений полезных ископаемых должна обеспечивать сохранность прилегающей зоны окружающей среды.

Геодинамическая устойчивость геологической среды определяется ее геолого-геофизическими свойствами и уровнем напряжений в среде.

Геодинамическая устойчивость геологической среды оценивается путем определения геолого-геофизических свойств и изучения динамики их изменения в ходе сейсмоэкомониторинга. Физико-геологической основой процесса является высокая чувствительность литосферы к эндогенным и экзогенным воздействиям. Для установления зависимостей оценивают взаимозависимости параметры рудовмещающих массивов используют методы преломленных и отраженных волн.

Определив геолого-тектонические особенности месторождения, ранжируют его на участки по критерию сейсмичности.

Наведенная или техногенная сейсмичность возникает в процессе перераспределения напряжений в геологической среде под действием горного производства. Она служит детонатором для стихийных катастроф, например, сход ледника Колка, возможно, под влиянием крупномасштабного горного удара в недрах Садонских месторождений Северной Осетии – Алании.

В ходе анализа полученных данных устанавливают базовую сейсмичность участка. Ожидаемое сейсмическое воздействие гипотетических землетрясений и их магнитуда оцениваются по данным трех-компонентной акселерограммы.

Параметры воздействия наведенных колебаний на массив и поверхностные объекты зависят от физико-механических и структурных особенностей массива.

Садонское месторождение свинца, цинка, меди и железа локализовано на глубине до 250 м с простиранием 5 км и падением 1,5 км. Протяженность рудных тел до 50 м, амощность изменяется от первых сантиметров до 0,25 м. Геологические блоки протяженностью 80...160 м разобщены безрудными интервалами длиной 200...400 м.

В период разработки месторождения руду добывали системами с естественным управлением массивами. При технологии с открытым выработанным пространством разубоживание руд составляло 15 ... 40 %, а потери достигали 20 %. Потери запасов руд в недрах оцениваются в 2 млн. тонн с содержанием свинца около 2,6 % и цинка более 3%.

К настоящему времени сформулированы геомеханические аспекты технологий разработки месторождений физическими и физико-химическими технологиями [1-3]. Обобщены основные принципы получения и использования информации о параметрах напряженности участков земной коры, вмещающих месторождения [4-6]; согласовано понятие о напряженно-деформированном состоянии массива горных пород и методах его оценки в ходе геофизического мониторинга [7-10]; разработаны методы геофизического контроля и освоены технические средства реализации их при подземной разработке рудных месторождений [11-13]; сформулированы принципы минимизации последствий техногенного вмешательства в недра горными работами для экосистем окружающей среды [14-16]; созданы методики и программное обеспечение их реализации при отработке месторождений [17-18]. Схожие вопросы горного производства стали целью исследований зарубежных специалистов данного направления горной науки [19-20].

Целью статьи является детализация зависимости состояния массива от техногенных напряжений при разработке рудных месторождений подземным способом в условиях сложноструктурных месторождений Садонского рудного узла в рамках системного геофизического мониторинга технологии разработки.

Цель достигается дифференцированной оценкой результатов геофизического мониторинга технологии разработки на этапах разработки месторождений в конкретных условиях локализации руд.

## Материалы и методы исследования

Комплексный подход исследования включает в себя критический анализ результатов осуществленных в аналогичных условиях экспериментов, геолого – маркшейдерских документов и литературных источников.

Сейсмичность пород определяют путём измерений скоростей распространения волн напряжений и регистрации сейсмических явлений. Колебания возбуждают взрыванием зарядов взрывчатого вещества в скважинах, а также вибрационным или ударным импульсом. Сигналы от приемников усиливаются, фильтруются и преобразуются в цифровую форму.

Состояние массива пород оценивается на основе измерения напряжений методами электрометрического, гамма-гамма и акустического каротажа. Смещения и характер разрушения пород оцениваются геофизическими методами, в том числе с использованием датчиков давления.

## Результаты работы и их обсуждение

Защищаемыми от наведенных сейсмических колебаний объектами являются: земная поверхность, шахтные выработки, линии электропередач, закладочные комплексы, шурфы, копры и здания инфраструктуры горных предприятий.

Система Глобального Позиционирования (GPS) нашла применение в сфере добычи природных ресурсов. Так, в 2007 г. в районе с. Мацута (РСО-Алания) была использована базовая станция. На участке протяженностью 15 км в направлении с. Галиат были отсняты 42 реперные точки. С целью повышения устойчивости принимаемого сигнала, как на ровере, так и на базовой станции использованы внешние антенны GPS. В условиях высокогорья важным фактором, влияющим на точность, является отражение навигационного сигнала от горных склонов. Точность определения плановых координат при использовании GPS в 2-4 раза выше, чем высоты. При определении координат точки в 3D пространстве основную роль в итоговой ошибке играет вертикальная составляющая.

**Метод конечных элементов** использовался при определении количественного значения сжимающих напряжений в элементах очистных выработок Садонских рудников. Метод рассматривает континуум данных, как совокупность дискретных элементов, границы которых определяются узловыми точками, а реакция континуума на внешнее воздействие описывается реакцией узловых точек.

Исследованиями установлено, что сжимающие напряжения имеют наибольшую величину в углах камер на контактах рудного целика с породами (рис. 1).

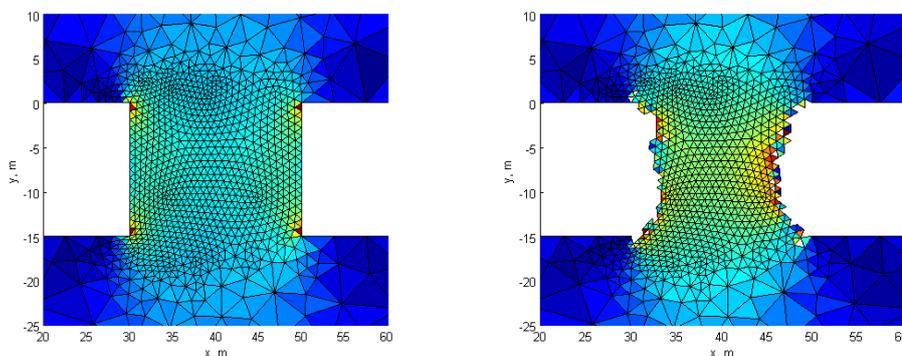


Рис. 1. Поведение рудного целика под влиянием напряжений: исходное и конечное состояние /  
Fig. 1. Behavior of an ore pillar under stress: initial and final state

Математическая модель построена методом конечных элементов для условий Садонского полиметаллического месторождения в гранитах с параметрами:

- плотность, 2650 кг/м<sup>3</sup>;
- модуль Юнга,  $4,64 \times 10^{10}$  Па;
- коэффициент Пуассона, 0,2;
- размер выработанного пространства по горизонтали, м;
- размер щели между элементами выработанного пространства, м.

Параметры  $b$  и  $l$  изменялись с интервалом 1 м в пределах 5...20 м и 10 ...50 м соответственно. Внешнее сейсмическое влияние моделировало воздействие с сейсмической интенсивностью 7, 8 и 9 баллов (табл. 1 – 3).

Таблица 1 / Table 1

**Динамические напряжения при воздействии 7 баллов, Мпа /  
Dynamic stresses under impact of 7 points, МПа**

Параметры $b$ и $l$ , м / Parameters $b$ and $l$ , m	5	10	15	20
10	0,08	0,37	1,28	0,14
15	0,20	1,26	0,38	0,13
20	0,12	0,37	0,20	0,36
25	0,12	1,25	0,17	0,37
30	0,09	0,19	0,13	1,26
35	0,21	0,28	0,27	0,19
40	1,25	0,89	0,19	0,19
45	0,46	0,21	0,86	0,35
50	0,38	1,28	1,27	0,38

Таблица 2 / Table 2

**Динамические напряжения при воздействии 8 баллов, Мпа /  
Dynamic stresses under impact of 8 points, МПа**

Параметры $b$ и $l$ , м / Parameters $b$ and $l$ , m	5	10	15	20
10	0,17	0,73	2,55	0,28
15	0,40	2,53	0,75	0,26
20	0,24	0,75	0,41	0,73
25	0,23	2,50	0,34	0,74
30	0,19	0,39	0,25	2,51
35	0,41	0,56	0,53	0,37
40	2,49	1,78	0,38	0,38
45	0,93	0,42	1,73	0,71
50	0,75	2,57	2,55	0,75

Таблица 3 / Table 3

**Динамические напряжения при воздействии 9 баллов, Мпа /  
Dynamic stresses under impact of 9 points, MPa**

Параметры b и l, м / Parameters b and l, m	5	10	15	20
10	0,25	1,10	3,83	0,43
15	0,59	3,79	1,13	0,39
20	0,36	1,12	0,61	1,09
25	0,35	3,75	0,52	1,10
30	0,28	0,58	0,38	3,77
35	0,62	0,84	0,80	0,56
40	3,74	2,67	0,58	0,57
45	1,39	0,63	2,59	1,06

**Моделирование на эквивалентных материалах** (эпоксидная смола) применялось для определения динамики напряжений рудовмещающего массива в зависимости от состояния выработанного пространства.

Вмещающие породы были представлены эпоксималом – 70% и ангидридом – 30%. Модуль упругости эпоксимала при «замораживании» был 270 кг/см<sup>2</sup>. Коромысло центрифуги вращали со скоростью 25-30 об/мин. Модель нагревали до 130°C 3 часа и охлаждали до комнатной температуры в течение 1,5 часов.

Варианты модели различались состоянием выработанного пространства:

- 1 – не заполнено;
- 2 – заполнено малопрочной породой;
- 3 – заполнено комбинировано породой и твердеющей смесью;
- 4 – заполнено твердеющая смесь.

Каждую модель располагали, как в однородной, так и в дискретной среде.

Садонское месторождение с параметрами: простирание 2500 м, восстание 500 м, мощность 10 м имитировалось моделью размерами 125×25×5 см.

Параметры моделируемой среды имеют следующие значения:

- прочность при растяжении 80 МПа
- коэффициент сцепления 300 кг/см<sup>2</sup>
- угол внутреннего трения 45°
- модуль сдвига 2,510<sup>-5</sup> кг/см<sup>2</sup>
- объемный вес 2,72 г/см<sup>3</sup>
- прочность при сжатии 130 МПа
- влажность 3...5%

Определено, что заполнение выработанного пространства даже малопрочными смесями (до 1 МПа) по сравнению с вариантом без заполнения снизило напряжения в 1,3...1,7 раз. В однородной модели значение напряжений меньше, чем в дискретной модели.

Заполнение прочной твердеющей смесью снижает напряжения. Вариант закладки малопрочными смесями равнозначен изоляции выработанного пространства. Этот вариант модели наиболее близок к фактическому состоянию массива Садонского месторождения.

Напряженное состояние массива зависимости от состояния выработанного пространства в интервале 1,0 ... 9,2 МПа (табл.4).

Таблица 4 / Table 4

**Величина напряжений при отработке моделей, Мпа /  
Stress value during model development, MPa**

Состояние модели / Model condition	Висячий бок / Hanging side		Лежачий бок / Recumbent side	
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_x$	$\sigma_y$
Без заполнения выработанного пространства / Without filling the goaf				
Однородная / Homogeneous	5.4	3.5	5.4	3.8
Дискретная / Discrete	9.3	8.1	6.4	4.8
С заполнением малопрочной смесью / Filled with low-strength mixture				
Однородная / Homogeneous	2.2	1.8	2.3	1.8
Дискретная / Discrete	4.6	3.7	3.4	2.8
С комбинированным заполнением / With combined filling				
Однородная / Homogeneous	1.8	1.7	1.7	1.8
Дискретная / Discrete	3.8	2.7	2.6	1.8
С заполнением прочной смесью / Filled with a strong mixture				
Однородная / Homogeneous	1.8	1.2	1.4	1.1
Дискретная с заполнением прочной смесью / Discrete with filling with a strong mixture	3.2	2.7	2.9	2.2

В качестве критерия геомеханической опасности может быть использовано отношение напряжений в модели к пределу прочности закладочного материала. По этому критерию более безопасны варианты с заполнением выработанного пространства твердеющими смесями (табл.5).

Таблица 5 / Table 5

**Величина геомеханической опасности /  
Magnitude of geomechanical hazard**

Состояние выработанного пространства / State of mined-out space	Вариант / Option	Максимальные напряжения, Мпа / Maximum stress, MPa	Коэффициент опасности / Hazard factor
Не заполнены / Not filled in	1	9.2	1.15
Заполнены породой / Filled with rock	2	4.7	0.58
Заполнены комбинировано / Filled in combination	3	3.7	0.47
Заполнены твердеющей смесью / Filled with hardening mixture	4	3.4	0.42

**Моделирование на низкомолекулярных материалах с фоторегистрацией результатов** было применено для оценки величины напряжений в элементах очистных выработок. Модели изготавливали из оптически активного полиуретана.

Глубина выработки от дневной поверхности 350 м, объемный вес налегающих пород  $3,0 \text{ т/м}^3$ .

Напряжения в модели и в натуре определяются из выражения:

$$G_i = \gamma H G_i / k$$

где  $G_n$  – напряжения в натуре, МПа;

$G_m$  – напряжения в модели, МПа;

$k$  – коэффициент подобия;

$\gamma$  – плотность руды и пород, кг/м<sup>3</sup>;

$H$  – глубина залегания точки от дневной поверхности, м.

Состояние массива исследовали при условиях:

- боковой распор 0,5; 1,0; 1,5;
- угол наклона силового вектора к вертикальной оси  $\alpha = 0$ ;
- модуль твердеющей закладки  $E = 0,1 \text{ МПа}$ ;
- модуль вмещающих пород –  $1,4 \text{ МПа}$ ;
- варианты без закладки и с закладкой камер.

При коэффициенте бокового распора  $\lambda = 0,5$  максимальные напряжения в зонах замков свода и стенках камер равны  $7,6 \times 7,5 = 57 \text{ МПа}$ , а в вершине свода потолочины  $7,6 \times 2 = 15 \text{ МПа}$ . Значения параметров напряжений приведены в виде рисунка, чтобы наглядно указать их положение в пространстве (рис. 2).

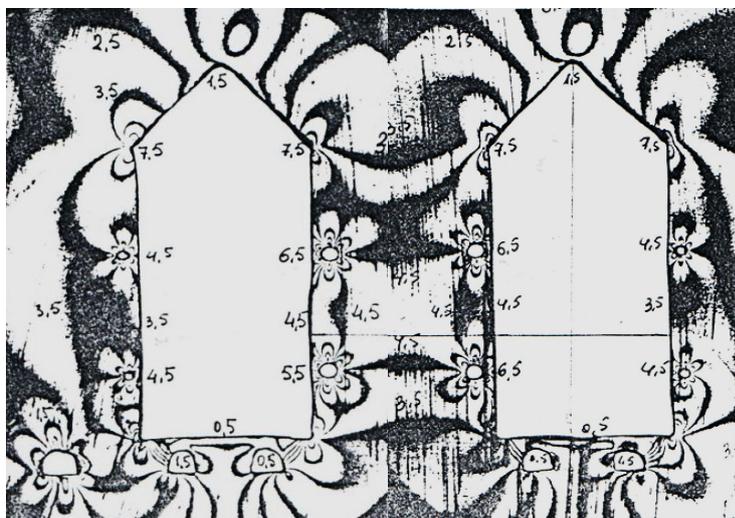


Рис. 2. Поля изохром при коэффициенте бокового распора 0,5: слева – открытая камера; справа – заложенная камера /  
Fig. 2. Fields isochrome with a lateral expansion coefficient of 0.5: on the left – open chamber; on the right is a blocked camera

При коэффициенте бокового распора  $\lambda = 1,0$  в зонах замков свода, потолочине и стенках камеры напряжения составляют:  $7,6 \times 6,5 = 49 \text{ МПа}$ . Такие же напряжения и в своде потолочины камеры.

При коэффициенте бокового распора  $\lambda = 1,5$  в зонах замков свода потолочины и стенки камеры напряжения составляют  $7,6 \times 6,5 = 49 \text{ МПа}$ , а в своде потолочины до  $7,6 \times 8,5 = 64 \text{ МПа}$  против 15 при коэффициенте бокового распоре 0,5).

Напряжения в потолочине составили:

- при коэффициенте бокового распора  $\lambda = 0,5 - 7,6 \times 5,5 = 41$  МПа;
- при коэффициенте бокового распора  $\lambda = 1,0 - 7,6 \times 13,5 = 102$  МПа;
- при коэффициенте бокового распора  $\lambda = 1,5 - 7,6 \times 18,5 = 140$  МПа.

Максимальные напряжения на контурах камеры и в замках потолочины зарегистрированы при коэффициенте бокового распора 1,5 (табл.6).

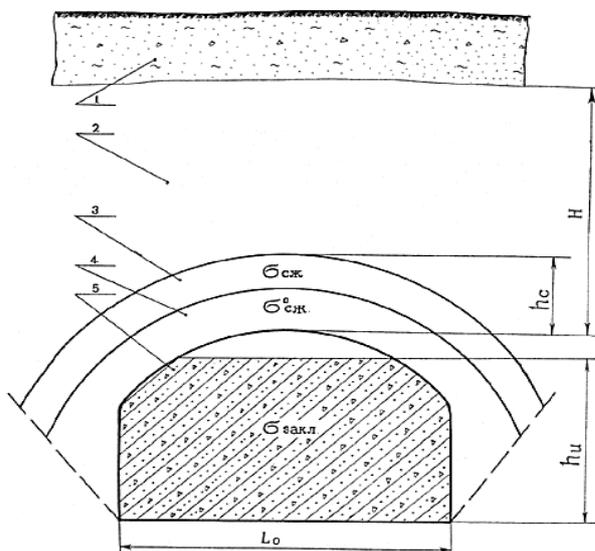
*Таблица 5 / Table 5*

**Напряжения в элементах геомеханической системы, Мпа /  
Stress in elements of the geomechanical system, МПа**

Expansion coefficient	Состояние выработанного пространства / Goaf condition	
	Открытое / Open	Заполненное твердеющей смесью / Filled with hardening mixture
Потолочина / ceiling		
0.5	3	2
1.0	7	5
1.5	13	9
левый замок свода / left vault lock		
0.5	5	6
1.0	4	5
1.5	3	4
правый замок свода / right vault lock		
0.5	5	5
1.0	5.5	6.5
1,5	6	8

Сложные горно-геологические условия разработки месторождений снижают полноту эксплуатации недр, увеличивают затраты на добычу, влияют на экономические, экологические и эргономические условия регионов.

Один из путей совершенствования технологии разработки месторождений – использование свойств горных массивов, прежде всего, действующих природных и техногенных напряжений (рис. 3).



*Рис. 3. Схема напряжений в геомеханической системе «нетронутый массив – нарушенный массив – выработанное пространство»:  
1 – наносы; 2 – горные породы; 3- верхний слой нарушенных пород; 4 – нижний слой нарушенных пород; 5 – искусственный массив из твердеющей смеси; H-глубина работ;  $h_c$  – высота свода нарушенных пород над выработкой;  $h_i$  – высота искусственного массива /*

*Fig. 3. Stress diagram in the geomechanical system “intact massif – disturbed massif – mined-out space”:  
1 – sediments; 2 – rocks; 3- upper layer of disturbed rocks; 4 – lower layers of disturbed rocks;  
5 – artificial mass of hardening mixture; H- depth of work;  $h_c$  – height of the arch of disturbed rocks above the excavation;  $h_i$  – height of the artificial massif*

Безопасность горных объектов и их инфраструктуры обеспечивается до тех пор, пока скорость смещения пород при максимальном воздействии не превысит допустимого для данных условий предела упругости.

Наибольшую опасность для массива горных пород и поверхности представляют взрывные работы, поэтому горные работы развивают так, чтобы волны напряжений распространялись не через нетронутый массив, а через выработанное пространство, где они гасятся.

Оставление выработанного пространства не заполненным увеличивает коэффициент опасности. Варианты заполнения только прочным или комбинированным по прочности материалом различаются незначительно, что открывает возможности снижения нормативной прочности твердеющей закладки при определенных геодинамических условиях.

### Выводы

Поведение рудовмещающих массивов при разработке рудных месторождений подземным способом зависит от величины и знака природных и техногенных напряжений.

Защита объектов инфраструктуры горных предприятий и земной поверхности региона РСО-Алания осуществляется с использованием результатов геофизического мониторинга, в том числе, работы сжимающих напряжений в зоне контакта руд с вмещающим массивом, состояние выработанного пространства при его погашении, а так же механизм развития техногенных напряжений дифференцировано для элементов горной выработки.

Величина напряжений и состояние очистных выработок, как в процессе выемки руд, так и спустя неопределенно длительное время после их погашения регулируются путем регламентации свойств материала – заполнителя выработанного пространства.

Полученные сведения о поведении рудовмещающего массива актуальны для проектирования горных работ при доработке запасов месторождений Садонского рудного узла, а также для месторождений с аналогичными условиями локализации оруденения традиционными и новыми технологиями с выщелачиванием металлов на месте локализации оруденения.

### Литература

1. Валиев Н.Г., Пропп В.Д., Вандышев А.М. Кафедре горного дела УГГУ – 100 лет. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2020. – №8. – С. 130-143. 2018. Том 1. С. 47-62.
2. Войтецкий Л., Коничек П., Мендецкий М.Я., Голда И., Зуберек В.М. Геофизическая оценка эффективности взрывных работ для обрушения кровли при проходке длинномерного угольного пласта. // Чистая и прикладная геофизика. – 2020. – Т. 177. – С. 905-917.
3. Голик В.И. Геомеханические аспекты комбинирования технологий разработки месторождений Садона. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2022. – №2. – С. 222-234.
4. Геомеханические и аэрогазодинамические последствия подработки территорий горных отводов шахт Восточного Донбасса. / Н.М. Качурин, Г.В. Стась, Т.В. Корчагина, М.В. Змеев. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. Вып. 1. – 2017. – С. 170-182.

5. Кочарян Г.Г., Золотухин С.Р., Калинин Э.В., Панасьян Л.Л., Спунгин В.Г. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород Коробковского железорудного месторождения на участке зоны тектонических нарушений. // ФТПРПИ. – 2018. – №1. – С. 16–24.
6. Ляшенко В.И. Развитие геомеханического мониторинга свойств и состояния массива горных пород при подземной разработке месторождений сложной структуры. // Маркшейдерский вестник. – 2016. – №1. – С. 35–43.
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 бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – №11-1. – С. 178-188.
8. Хайрутдинов А. М., Конгар-Сюрюн Ч. Б., Kowalik T., Тюляева Ю. С. Управление напряженно-деформационным состоянием массива горных пород путем формирования разнопрочностной закладки. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – №10. – С. 42–55.
8. Халкечев Р. К., Каширский А. С., Халкечев К. В. Управление технологией разрушения материалов на основе математического моделирования устойчивого и неустойчивого развития трещин. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – №11. – С. 359–366.
9. Aizhong Lu, Ning Zhang, Guisen Zeng. An extension failure criterion for brittle rock. // Deep Rock Behaviour in Engineering Environments. – 2020. – Vol. 2020. – pp. 1–12.
10. Fanzhen Meng, Gui Yuan Wang L., Hui Zhou. Rock brittleness indices and their applications to different fields of rock engineering: A review. // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2021. – Vol. 13. Iss. 1. – pp. 221–247.
11. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Brigida V., Efremenkov E.A., Sorokova S.N., Mengxu Q. Tailings Utilization and Zinc Extraction Based on Mechanochemical Activation. // Materials. – 2023. – Vol. 16. – p. 726.
12. Li C.C. Dynamic rock support in burst-prone rock masses. // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. London: Taylor & Francis Group. – 2018. – Vol. 1. – pp. 47–62.
13. Naithani A.K. Rock Mass Classification and Support Design using the Q-System. // Journal of the Geological Society of India. – 2019. – Vol. 94. – pp. 443.
14. Rybak J., Kongar-Syuryun Ch., Tyulyaeva Y., Khayrutdinov A., Akinshin I. Geomechanical substantiation of parameters of technology for mining salt deposits with a backfill. // Mining Science. – 2021. – Vol. 28. – pp. 19-32.
15. Scholz C.H. The Mechanics of Earthquakes and Faulting. 3<sup>rd</sup> ed. // Cambridge : Cambridge University Press. – 2018. – 519 p.
16. Sepehri M., Apel D. B., Adeeb S., Leveille P., Hall R.A. Evaluation of mining-induced energy and rockburst prediction at a diamond mine in Canada using a full 3D elastoplastic finite element model. // Engineering Geology. – 2020. – Vol. 266. – pp.105–117.
17. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Morozov F.S., Tuaeв G.E. Integrated instrumental monitoring of hazardous geological processes under the Kazbek volcanic center. // International Journal of GEOMATE. – 2018. – Vol. 15(47). – pp. 158-163.
19. Jinglin Wen, Husheng Li, Fuxing Jiang, Zhengxing Yu, Haitao Ma et al. Rock burst risk evaluation based on equivalent surrounding rock strength. // International Journal of Mining Science and Technology. – 2019. – Vol. 29. Iss. 4. – pp. 571–576.
20. Qinghua Lei, KeGao. A numerical study of stress variability in heterogeneous fractured rocks. // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – Vol. 113. – pp. 121–133.

## References

1. Valiev N.G., Propp V.D., Vandyshev A.M. The 100th anniversary of the department of mining engineering of URSMU. News of higher educational institutions. Mining Journal. 2020. No. 8. pp. 130–143. 2018. Vol. 1. pp. 47–62. (In Russ.)
2. Wojtecki, Ł., Konicek, P., Mendecki, M.J. et al. Geophysical Evaluation of Effectiveness of Blasting for Roof Caving During Longwall Mining of Coal Seam. Pure Appl. Geophys. 2020. Vol. 177, pp. 905–917. DOI: 10.1007/s00024-019-02321-1
3. Golik V.I. Geomechanical aspects of combining technologies for developing Sadon deposits. News of Tula State University. Geosciences. 2022. No. 2. pp. 222–234. (In Russ.)
4. Geomechanical and aerogasdynamics consequences of undermining of the territories of mining allotments in the mines of Eastern Donbass. Kachurin N.M., Stas G.V., Korchagina T.V., Zmeev M.V. In: Proceedings of the Tula State University. Geosciences. Vol. 1. 2017. pp. 170–182. (In Russ.)
5. Kocharyan G.G., Spungin V.G., Zolotukhin S.R., Kalinin E.V., Panas'yan L.L. Stress–strain state of rock mass in the zone of tectonic fractures in the korobkov iron ore deposit. Journal of Mining Science. 2018. Vol. 54. No. 1. pp. 13–20. DOI: 10.1134/S1062739118013270.
6. Lyashenko V.I. Development of geomechanical monitoring of properties and the condition of the massif of rocks by underground mining of fields of difficult structure. Mine Surveying Bulletin. 2016. No. 1. pp. 35–43. (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 (Scientific and Technical Journal). 2020. No. 11-1. pp. 178–188. (In Russ.)
8. Khairutdinov A.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Kowalik T., Tyulyaeva Yu.S. Stress-strain behavior control in rock mass using different-strength backfill. Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2020. No. 10. pp. 42–55. (In Russ.)
8. Khalkechev R.K., Kashirsky A.S., Khalkechev K.V. Rupture control in materials based on mathematical modeling of stable and unstable fracture propagation. Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2014. No. 11. pp. 359–366. (In Russ.)
9. Aizhong Lu, Ning Zhang, Guisen Zeng. An extension failure criterion for brittle rock. Deep Rock Behaviour in Engineering Environments. 2020. Vol. 2020. pp. 1–12.
10. Fanzhen Meng, Gui Yuan Wang L., Hui Zhou. Rock brittleness indices and their applications to different fields of rock engineering: A review. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2021. Vol. 13. Iss. 1. pp. 221–247.
11. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Brigida V., Efremenkov E.A., Sorokova S.N., Mengxu Q. Tailings Utilization and Zinc Extraction Based on Mechanochemical Activation. Materials. 2023. Vol. 16. p. 726.
12. Li C.C. Dynamic rock support in burst-prone rock masses. Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. London: Taylor & Francis Group. 2018. Vol. 1. pp. 47–62.
13. Naithani A.K. Rock Mass Classification and Support Design using the Q-System. Journal of the Geological Society of India. 2019. Vol. 94. pp. 443.
14. Rybak J., Kongar-Syuryun Ch., Tyulyaeva Y., Khayrutdinov A., Akinshin I. Geomechanical substantiation of parameters of technology for mining salt deposits with a backfill. Mining Science. 2021. Vol. 28. pp. 19–32.
15. Scholz C.H. The Mechanics of Earthquakes and Faulting. 3<sup>rd</sup> ed. Cambridge: Cambridge University Press. 2018. 519 p.
16. Sepehri M., Apel D. B., Adeb S., Leveille P., Hall R.A. Evaluation of mining-induced energy and rockburst prediction at a diamond mine in Canada using a full 3D elastoplastic finite element model. Engineering Geology. 2020. Vol. 266. pp. 105–117.

17. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Morozov F.S., Tuaeв G.E. Integrated instrumental monitoring of hazardous geological processes under the Kazbek volcanic center. *International Journal of GEOMATE*. 2018. Vol. 15(47). pp. 158-163.

19. Jinglin Wen, Husheng Li, Fuxing Jiang, Zhengxing Yu, Haitao Ma et al. Rock burst risk evaluation based on equivalent surrounding rock strength. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019. Vol. 29. Iss. 4. pp. 571–576.

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