

ISSN 2686-9853 (Online)

ISSN 0536-1028 (Print)

Учредитель и издатель  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Уральский государственный горный университет»

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ**  
**ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ**

Научно-технический журнал

**MINERALS AND MINING**  
**ENGINEERING**

Scientific and technical journal

ВЫПУСК 5  
ISSUE 5

**2023**

Уральский государственный горный университет  
Ural State Mining University

Известия высших учебных заведений. Горный журнал. № 5, 2023  
Minerals and Mining Engineering. No. 5, 2023

eLIBRARY.RU



Электронно-библиотечная  
система



ULRICHSWEB™  
GLOBAL SERIALS DIRECTORY



ИВИС  
ИНФОРМАЦИОННЫЕ УСЛУГИ

EBSCO

Information Services

Журнал выходит 6 раз в год

**Известия высших учебных заведений. Горный журнал** – рецензируемый научно-технический журнал, публикующий статьи в области горной науки, горного образования, добычи и переработки полезных ископаемых.

К публикации принимаются статьи на русском и английском языках. Полнотекстовая версия журнала публикуется в свободном доступе на сайте <https://mining-science.ru>, а также на платформе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). Более полная информация и правила оформления статей размещены на сайте журнала

The journal is issued 6 times a year

**Minerals and Mining Engineering** is a peer-reviewed scientific and technical journal that publishes scientific articles on mining, mining education, mineral extraction and processing. The journal accepts articles in Russian and English for publication. Full-text articles are freely available on the website of the journal <http://mining-science.ru> and in the database of Russian Science Citation Index (RISC). Please visit the journal's website for details and article submission guidelines

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» (в соответствии с распоряжением Минобрнауки России от 28 декабря 2018 г. № 90-р)

Журнал распространяется по подписке агентством «Урал-Пресс»

**Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-76015 от 19.06.2019** выдано **Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций**

# ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

Научно-технический журнал. Издаётся с 1958 года

Выходит 6 раз в год

№ 5, 2023

Учредитель и издатель

УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Главный редактор

Н. Г. ВАЛИЕВ, Уральский государственный горный университет,  
г. Екатеринбург

Заместитель главного редактора

Ю. И. ЛЕЛЬ, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Аленичев В. М. *Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург*  
Апакашев Р. А. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*  
Афанасьев А. И. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*  
Бабенко А. Г. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*  
Битимбаев М. Ж. *Корпорация Казахмыс, г. Караганда, Республика Казахстан*  
Блинков О. Г. *Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург*  
Боярских Г. А. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*  
Галиев С. Ж. *Национальная академия наук Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан*  
Гордеев В. А. *Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар*  
Давыдов С. Я. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*  
Демин В. Ф. *Карагандинский технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан*  
Дондов Д. *Монгольский государственный университет науки и технологий, г. Улан-Батор, Монголия*  
Дребенштедт К. *Фрайбергская горная академия, г. Фрайберг, Федеративная Республика Германия*  
Душин А. В. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*  
Жабко А. В. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*  
Зелинская Е. В. *Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск*  
Зобнин Б. Б. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*  
Зырянов И. В. *Северо-Восточный федеральный университет, г. Мирный*  
Игнатьева М. Н. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*  
Калмыков В. Н. *Магнитогорский государственный технический университет, г. Магнитогорск*

# ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

Научно-технический журнал. Издаётся с 1958 года

Выходит 6 раз в год

№ 5, 2023

---

---

**Картозия Б. А.** *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва*

**Кашников Ю. А.** *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь*

**Козин В. З.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*

**Комиссаров А. П.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*

**Косарев Н. П.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*

**Косолапов А. И.** *Сибирский федеральный университет, г. Красноярск*

**Кравчук И. Л.** *Институт горного дела УрО РАН, г. Челябинск*

**Лагунова Ю. А.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*

**Лапин С. Э.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*

**Лапин Э. С.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*

**Литвиненко В. С.** *Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербурга*

**Макаров В. Н.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*

**Мочалова Л. А.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*

**Носырев М. Б.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*

**Панкратенко А. Н.** *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва*

**Петров В. Л.** *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва*

**Пивняк Г. Г.** *Национальный технический университет «Днепроовская политехника», г. Днепр, Украина*

**Придвижкин С. В.** *Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург*

**Расулов С. Р.** *Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика*

**Рыльникова М. В.** *Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва*

**Семин А. Н.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*

**Симисинов Д. И.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*

**Стровский В. Е.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*

**Топалов С. Й.** *Университет горного дела и геологии Св. Иоанна Рыльского, г. София, Республика Болгария*

**Трыбальский К.** *Научно-технический университет им. С. Сташица, г. Краков, Республика Польша*

**Цыпин Е. Ф.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*

**Филатов В. В.** *Владимирский государственный университет, г. Владимир*

**Яковлев В. Л.** *Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург*

# MINERALS AND MINING ENGINEERING

Scientific and technical journal. First published in 1958

6 issues a year

No. 5, 2023

---

---

Founder and publisher

URAL STATE MINING UNIVERSITY

Editor-in-chief

N. G. VALIEV, Ural State Mining University, Ekaterinburg

Deputy editor-in-chief

Iu. I. LEL, Ural State Mining University, Ekaterinburg

## EDITORIAL BOARD

**Alenichev V. M.** *Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg*

**Apakashev R. A.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*

**Afanasiev A. I.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*

**Babenko A. G.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*

**Bitimbaev M. Zh.** *Kazakhmys Corporation, Karaganda, Republic of Kazakhstan*

**Blinkov O. G.** *Ural Federal University, Ekaterinburg*

**Boiarskikh G. A.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*

**Galiev S. Zh.** *National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Almaty,  
Republic of Kazakhstan*

**Gordeev V. A.** *Kuban State Technological University, Krasnodar*

**Davydov S. Ia.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*

**Demin V. F.** *Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan*

**Dondov D.** *The Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia*

**Drebenstedt C.** *Freiberg Mining Academy, Freiberg, Federal Republic of Germany*

**Dushin A. V.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*

**Zhabko A. V.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*

**Zelinskaia E. V.** *Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk*

**Zobnin B. B.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*

**Zyrianov I. V.** *North-Eastern Federal University, Mirny*

**Ignatieva M. N.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*

# MINERALS AND MINING ENGINEERING

Scientific and technical journal. First published in 1958

6 issues a year

No. 5, 2023

---

**Kalmykov V. N.** *Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk*  
**Kartozia B. A.** *National University of Science and Technology "MISIS", Moscow*  
**Kashnikov Iu. A.** *Perm National Research Polytechnic University, Perm*  
**Kozin V. Z.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*  
**Komissarov A. P.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*  
**Kosarev N. P.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*  
**Kosolapov A. I.** *Siberian Federal University, Krasnoyarsk*  
**Kravchuk I. L.** *Institute of Mining UB RAS, Chelyabinsk*  
**Lagunova Iu. A.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*  
**Lapin S. E.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*  
**Lapin E. S.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*  
**Litvinenko V. S.** *Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg*  
**Makarov V. N.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*  
**Mochalova L. A.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*  
**Nosyrev M. B.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*  
**Pankratenko A. N.** *National University of Science and Technology "MISIS", Moscow*  
**Petrov V. L.** *National University of Science and Technology "MISIS", Moscow*  
**Pivniak G. G.** *Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine*  
**Pridvzhkin S. V.** *Ural Federal University, Ekaterinburg*  
**Rasulov S. R.** *Azerbaijan State Oil Industry University, Baku, Republic of Azerbaijan*  
**Rylnikova M. V.** *Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources (IPKON) RAS, Moscow*  
**Semin A. N.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*  
**Simisinov D. I.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*  
**Strovskii V. E.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*  
**Topalov S. I.** *Sofia University of Mining and Geology, Sofia, Republic of Bulgaria*  
**Trybalskii K.** *AGH University of Science and Technology, Krakow, Republic of Poland*  
**Tsyypin E. F.** *Ural State Mining University, Ekaterinburg*  
**Filatov V. V.** *Vladimir State University, Vladimir*  
**Iakovlev V. L.** *Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg*

---

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### ГЕОМЕХАНИКА. РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

- Русских А. П., Корнилков С. В., Авдеев А. Н., Харисов Т. Ф.* Исследование физико-механических свойств пород для экспресс-оценки параметров дробимости в условиях массива хризотил-асбеста (In English) ..... 9
- Храмцов Б. А., Лепетюха Д. С., Бабушкин К. С.* Определение современного поля напряжений при разработке рудных месторождений (In English)..... 20
- Голик В. И., Валиев Н. Г., Шарипзянова Г. Х., Келехсаев В. Б.* Управление состоянием напряженно-деформированных массивов разгрузкой от напряжений..... 29
- Горинов С. А., Тагиев С. М.* Изменение температуры продуктов детонации скважинного заряда эмульсионного взрывчатого вещества..... 38

### ГЕОТЕХНОЛОГИЯ. ГОРНЫЕ МАШИНЫ

- Дорош Е. А., Тальгамер Б. Л.* Оценка трудоемкости разработки запасов по плану россыпи..... 49
- Шабает О. Е., Нечепалев В. Г., Бридун И. И., Зинченко П. П.* Математическая модель формирования потоков горной массы комбайнами со шнековыми исполнительными органами малого диаметра ..... 60
- Фомин С. И., Говоров А. С.* Обоснование сценарного подхода к определению границ карьеров с учетом стохастического характера исходных данных ..... 70

### МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО. ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ

- Ратушняк А. Н.* Моделирование рассеяния электромагнитного поля на 3D-объектах в непроводящей среде..... 79

### ОХРАНА ТРУДА

- Амосов П. В.* Исследование влияния параметра фоновой стратификации на время естественного проветривания карьера на базе численного моделирования..... 90

### ИСТОРИЯ. ИНФОРМАЦИЯ. РЕЦЕНЗИИ

- Глебов И. А., Кутуев В. А.* Итоги XVII Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» ..... 102

---

---

## CONTENTS

### GEOMECHANICS. ROCK BREAKING

- Russkikh A. P., Kornilkov S. V., Avdeev A. N., Kharisov T. F.* Studying physical and mechanical properties of rocks to carry out an express assessment of crushability parameters in the conditions of chrysotile asbestos rock mass..... 9
- Khramtsov B. A., Lepetiukha D. S., Babushkin K. S.* Determining modern stress field when mining ore deposits ..... 20
- Golik V. I., Valiev N. G., Sharipzianova G. Kh., Kelekhsaev V. B.* Controlling the state of the stressed and strained rock masses by means of de-stressing ..... 29
- Gorinov S. A., Tagiev S. M.* Temperature change of detonation products of emulsion explosive blasthole charge..... 38

### GEOTECHNOLOGY. MINING MACHINERY

- Dorosh E. A., Talgamer B. L.* Evaluating the labour intensity of development according to the placer plan..... 49
- Shabaev O. E., Nechepaev V. G., Bridun I. I., Zinchenko P. P.* Mathematical model of mined bulk flows formation by small-diameter auger executive tools ..... 60
- Fomin S. I., Govorov A. S.* Justifying the scenario approach to pit limits determination taking into account the stochastic nature of the input data ..... 70

### MINE SURVEYING. MINING GEOLOGY

- Ratushniak A. N.* Modelling the electromagnetic field scattering on 3D objects in a non-conducting medium..... 79

### OCCUPATIONAL SAFETY

- Amosov P. V.* Studying the effect of background stratification on the open-pit natural ventilation time based on the numerical modelling ..... 90

### HISTORY. DATA. REVIEWS

- Glebov I. A., Kutuev V. A.* The results of the 17th All-Russian youth scientific and practical conference Problems of Subsoil Use ..... 102



## ГЕОМЕХАНИКА. РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-9-19

### Studying physical and mechanical properties of rocks to carry out an express assessment of crushability parameters in the conditions of chrysotile asbestos rock mass

Aleksandr P. Russkikh<sup>1</sup>, Sergei V. Kornilkov<sup>2</sup>,  
Arkadii N. Avdeev<sup>2</sup>, Timur F. Kharisov<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> PJSC Uralasbest, Asbest city, Russia

<sup>2</sup> Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia

\*e-mail: timur-ne@mail.ru

#### Abstract

**Introduction.** The solution of certain problems of geomechanics and geotechnology is increasingly demanding indirect express methods for rock mechanical properties assessment, including the methods using the Schmidt hammer. Schmidt hammer application does not require a specialized set of testing equipment and highly qualified personnel to maintain this equipment. Tests are carried out directly in the field.

**Research objective** is to estimate the possibility of using indirect express methods to determine the crushability indices and the path of least resistance.

**Methods of research.** The indicators estimation by indirect express methods is demonstrated through the serpentinite rocks of the Jitikara chrysotile-asbestos deposit which were submitted to the related field and laboratory tests. In local areas of the exposed rock, in the field environment, measurements were made with a Schmidt hammer according to the ASTM method. Rock samples were additionally tested for compressive strength in laboratory conditions using specialized press machines.

**Results.** Empirical dependences of the serpentinite rock crushability on the ultimate uniaxial compressive strength and the Schmidt hammer face rebound value were established. A comparative analysis was carried out with empirical dependencies established by other authors. A method for calculating the optimal path of least resistance for a blasting pattern is proposed based on the established dependencies.

**Conclusions.** Based on the results, it was found that the express method for assessing the crushability indices and the size of the path of least resistance using a Schmidt hammer is quite efficient and can be successfully applied for express assessment of physical and mechanical properties variability at Russian mining enterprises. However, it should be taken into account that Schmidt hammers cannot be used in certain mining and geological conditions without laboratory calibration of all devices planned for use.

**Keywords:** Schmidt hammer; ultimate compressive strength; rebound value; crushability; path of least resistance; serpentinite.

**Introduction.** At all stages of field development, knowledge about the strength and deformation properties of rock building up the mine field is crucial since these particular indicators determine the technological solutions for successful mineral extraction.

Hard rock preparation by separating it from the main mass is usually carried out by drilling and blasting. The quality of rock mass preparation is determined by a number of

indicators: boulder frequency, granulometric composition and the nature of rock mass disintegration after blast. The main quality coefficient is the output of oversized fractions in the blasted rock mass, i.e. the quality of rock mass crushing.

Crushing is widely used in minerals preparation for processing, their beneficiation, and in the production of building materials. Therefore, the characteristics of rock crushability are important in order to calculate the parameters of rock mass preparation by blasting, as well as to clarify the strength characteristics of rocks whose properties change with mining depth growth.

Crushability is rock resistance to crushing on exposure to a dynamic load. Crushability is determined by the energy estimation of the failure of rock which is in the state of a combined stress. There are six classes of crushability (Table 1).

**Table 1. Classes of rock crushability**  
**Таблица 1. Классы дробимости горных пород**

Class	Rock characteristic	Crushability $V_{\max}$ , cm <sup>3</sup>
I	Extremely hard to crush	Less than 1.8
II	Very hard to crush	1.8–2.7
III	Hard to crush	2.7–4.0
IV	Medium crushability	4.0–6.0
V	Fragile	6.0–9.0
VI	Very fragile	More than 9.0

**Methods of research.** At A. A. Skochinsky Institute of Mining, L. I. Baron, V. M. Kurbatov and R. V. Orlov developed a method for determining rock crushability through rock relative resistance to crushing under shock loading [1, 2]. Crushability is determined by the granulometric composition of the products of a 50–70 g sample destruction after a one-time drop of a 16 kg load on it from a height of 0.5 m. The crushability index (cm<sup>3</sup>) is numerically equal to the volume of the fraction that passed through a screen with the holes of  $d_{\max} = 7$  mm, and is determined by the formula:  $V_{\max} = m_7/\rho$  where  $m_7$  is the mass of the –7 mm fraction, g;  $\rho$  is the volumetric mass of rock, g/cm<sup>3</sup>.

This approach is quite convenient in the field. However, one of the authors notes that data for one fraction are unreliable. A complete analysis of crushed rock granulometric composition increases the labor intensity of the research. A specific distribution of lumps of different sizes is a statistical realization of only one possible test result, which negatively affects the accuracy of the data obtained [3].

There are also methods for determining crushability, in which the pieces are subjected to pounding, abrasion, and crushing in closed vessels. Such tests are carried out in laboratory conditions using expensive press, measuring, and auxiliary equipment, therefore being rather labor and time intensive. The development of reasonable, effortless and efficient express methods for determining crushability directly in the field will increase the speed of obtaining and processing the data necessary to make and correct process decisions at a production site in time.

The solution of certain problems of geomechanics and geotechnology is increasingly demanding indirect express methods for rock mechanical properties assessment, including the methods using the Schmidt hammer. Schmidt hammer application does not require a specialized set of testing equipment and highly qualified personnel to maintain this equipment. Tests are carried out directly in the field. Due to its wide usage in rock

mechanics, a non-destructive method for assessing marginal rock strength properties with a Schmidt hammer has been adopted by the International Society for Rock Mechanics (ISRM) and American Society for Testing and Materials (ASTM).

Unlike laboratory methods, the measurement result of the express method of rock mechanical characteristics determination is the Schmidt hammer face rebound value. To move from the rebound value  $Hr$  to mechanical characteristics, it is required to determine dependences between the determined properties and the  $Hr$  value in laboratory conditions with further calibration of the instrument (Schmidt hammer).

One of the main mechanical properties of rocks is the ultimate uniaxial compressive strength  $\sigma_{\text{compr}}$ , MPa [4–8]. The calibration of Schmidt hammers is traditionally performed for this characteristic specifically. Numerous empirical formulas described by linear, power, and exponential dependences are found in a number of national and foreign scientific works [9–24].

**Table 2. Empirical dependencies of the ultimate strength in a sample and crushability on the Schmidt hammer face rebound value**

**Таблица 2. Эмпирические зависимости предела прочности в образце и дробимости от величины отскока молотка Шмидта**

Author (year)	Type of rocks	Ultimate uniaxial compressive strength $\sigma_{\text{compr}}$ , MPa	Crushability $V_{\text{max}}$ , cm <sup>3</sup>
Xu et al. (1990) [7]	Prasinities	$2,99\exp(0,06Hr)$	$\frac{435}{2,99\exp(0,06Hr) + 9}$
	Serpentinities	$2,98\exp(0,063Hr)$	$\frac{435}{2,98\exp(0,063Hr) + 9}$
	Gabbro	$3,78\exp(0,05Hr)$	$\frac{435}{3,78\exp(0,05Hr) + 9}$
Karaman et al. (2015) [12]	Igneous rock	$0,097Hr^{1,88}$	$\frac{435}{0,097Hr^{1,88} + 9}$
IM UB RAS, Kharisov T. F. et al. (2020) [18]	Serpentinities	$0,0017\exp(0,14Hr) + 0,3Hr + 9 - 0,0017$	$\frac{435}{0,0017\exp(0,14Hr) + 0,3Hr + 9}$

It is known that the rock lumps resistance to disrupting and crushing is determined by the tensile and compressive strength. O. G. Latyshev established the following empirical relationship between crushability and hardness of effusive rocks, which is expressed by the formula [25]:

$$V_{\text{max}} = \frac{10^3}{(23f + 21)}, \tag{1}$$

where  $f$  is the hardness coefficient according to M. M. Protodyakonov.

The correlation ratio  $\eta = 0.76$  obtained for formula (1) indicates the statistical significance of the dependence.

It is also known that the hardness coefficient can be approximately calculated by the formula:

$$f = 0,1\sigma_{\text{compr}}. \tag{2}$$

**Table 3. The results of determining the ultimate uniaxial compressive strength and the Schmidt hammer face rebound value in the serpentinites of the Jitkara chrysotile-asbestos deposit**  
**Таблица 3. Результаты определения пределов прочности при сжатии и величины отскока молотка Шмидта в серпентинитах Джезгыгаринского месторождения хризотил-асбеста**

Parameter	Type of rock												Mean value	Coefficient of variation, %
<i>Hr</i>	<i>Apperidotite serpentinite</i>												66,45	5,65
	67,0	62,0	70,0	71,5	68,0	66,5	59,0	67,0	69,0	64,5	69,0	33,0		
$\sigma_{\text{compr}}$	27,8	53,0	48,4	33,2	38,2	40,9	39,6	30,8	33,0	40,9	33,0	40,9	38,58	20,32
	<i>Hr</i>	<i>Appodunite chrysotile-lizardite serpentinite</i>												62,05
68,0		56,5	70,5	58,0	63,0	62,0	66,5	59,0	55,5	61,5	55,5	28,7	26,50	
$\sigma_{\text{compr}}$	20,2	30,7	29,5	22,0	29,9	22,8	24,5	29,1	27,6	28,7	27,6	28,7	26,50	14,27
	<i>Hr</i>	<i>Apperidotitis-lizardite serpentinite</i>												67,75
67,0		69,5	70,5	64,0	67,5	72,0	66,0	65,5	69,0	66,5	69,0	47,80	52,66	
$\sigma_{\text{compr}}$	45,70	44,10	59,40	46,10	64,50	52,30	50,00	54,80	61,90	47,80	61,90	47,80	52,66	13,74
	<i>Hr</i>	<i>Appodunite lizardite serpentinite</i>												50,45
49,0		52,5	53,0	62,5	51,0	39,0	42,0	42,0	58,5	55,0	58,5	20,0	19,08	
$\sigma_{\text{compr}}$	20,6	5,9	24,0	21,0	21,7	15,9	20,9	22,7	18,1	20,0	18,1	20,0	19,08	27,01
	<i>Hr</i>	<i>Lizardite asbestos-bearing serpentinite</i>												57,35
50,0		53,0	62,5	56,0	63,0	61,5	56,0	54,0	58,5	59,0	58,5	26,2	23,18	
$\sigma_{\text{compr}}$	18,5	24,4	14,7	29,9	23,6	24,0	27,1	18,9	24,5	26,2	24,5	26,2	23,18	19,6
	<i>Hr</i>	<i>Lizardite serpentinite</i>												66,25
56,00		63,00	63,50	71,50	65,00	70,50	65,00	61,00	73,50	73,50	73,50	39,30	50,21	
$\sigma_{\text{compr}}$	52,30	45,80	48,70	74,60	52,80	48,00	55,60	45,90	39,10	39,30	39,10	39,30	50,21	20,17
	<i>Hr</i>	<i>Lizardite talcose serpentinite</i>												65,10
64,0		67,5	75,5	60,5	63,5	68,0	70,0	59,0	62,5	60,5	62,5	30,6	32,41	
$\sigma_{\text{compr}}$	24,4	33,2	32,4	39,1	36,0	33,8	32,1	32,6	29,9	30,6	29,9	30,6	32,41	11,91
	<i>Hr</i>	<i>Apperidotite chrysotile-lizardite serpentinite</i>												76,70
76,5		73,0	81,5	77,0	76,5	81,0	81,0	81,5	73,5	65,5	73,5	110,1	120,41	
$\sigma_{\text{compr}}$	137,2	106,0	95,5	145,2	166,2	68,2	125,8	129,8	120,1	110,1	120,1	110,1	120,41	22,78

Thus, by combining formulae (1) and (2), it is possible to obtain the ultimate uniaxial compressive strength from the crushability index:

$$\sigma_{\text{compr}} = \frac{435}{V_{\text{max}}} - 9. \tag{3}$$

In 2020 [18], when studying the strength properties of serpentinites, a relationship was established between the compressive strength and Schmidt hammer rebound, expressed by the formula:

$$\sigma_{\text{compr}} = 0,0017\exp(0,14Hr) + 0,3Hr + 9 - 0,0017, \tag{4}$$

where  $Hr$  is the Schmidt hammer face rebound value.

So, by simultaneous solution of formulae (3) and (4), it is possible to obtain crushability for serpentinite rocks:

$$V_{\text{max}} = \frac{435}{0,0017\exp(0,14Hr) + 0,3Hr + 9}. \tag{5}$$

Meanwhile, there is a large number of established empirical relationships between the effusive rocks strength and the Schmidt hammer face rebound value [10–18]. By successively substituting formula (3) into the analyzed dependences of different authors, it is possible to express the crushability value  $V_{\text{max}}$  through the rebound value  $Hr$  (Table 2).

As applied to open pit mining, based on the obtained dependences (Table 2), it seems possible to calculate the optimal path of least resistance (PLR) for a blasting pattern through the Schmidt hammer face rebound value.

After analyzing the experience of blasting in open pits in different mining and geological conditions, it was found that the specific consumption of explosives  $q$ , which provides a given quality of crushing, correlates with sufficient reliability with the crushability index, which is expressed by the empirical formula [1]:

$$\sigma_{\text{compr}} = 0,678\exp(-0,065V_{\text{max}}). \tag{6}$$

The coefficient of variation in this case is 11.8%.

The specific consumption of explosives can be calculated using the following formula:

$$q = \frac{M}{V}, \tag{7}$$

where  $M$  is the mass of the explosive charge in the borehole, kg;  $V$  is the volume of blasted rocks,  $\text{m}^3$ .

The mass of the explosive charge is calculated based on the known expression:

$$M = \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) l_{\text{charge}} \rho_{\text{explosive}}, \tag{8}$$

where  $d$  is the explosive charge diameter, m;  $l_{\text{charge}}$  is the length of the explosive charge, m;  $\rho_{\text{explosive}}$  is the density of the explosive,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $V$  is the volume of blasted rocks,  $\text{m}^3$ .  $V$  is calculated by the formula:

$$V = mW_0^2L_{\text{eff}}, \quad (9)$$

where  $m$  is the burden-to-spacing ratio;  $W_0$  is the PLR size,  $m$ ;  $L_{\text{eff}}$  is the effective length of the borehole; in open-pit mining,  $L_{\text{eff}}$  corresponds to the height of the bench,  $m$ .

By simultaneous solution of formulae (5)–(9), the dependence is obtained between the PLR size and the Schmidt hammer face rebound value for serpentinites of the Jitikara deposit:

$$W_0 = \sqrt{\frac{M}{0,678 \exp\left(\frac{28,275}{0,0017 \exp(0,14Hr) + 0,3Hr + 9}\right) mL_{\text{eff}}}}. \quad (9)$$

It is obvious that if other empirical dependences (Table 2) are used instead of formula (5), PLR value can also be obtained for other lithotypes as well.

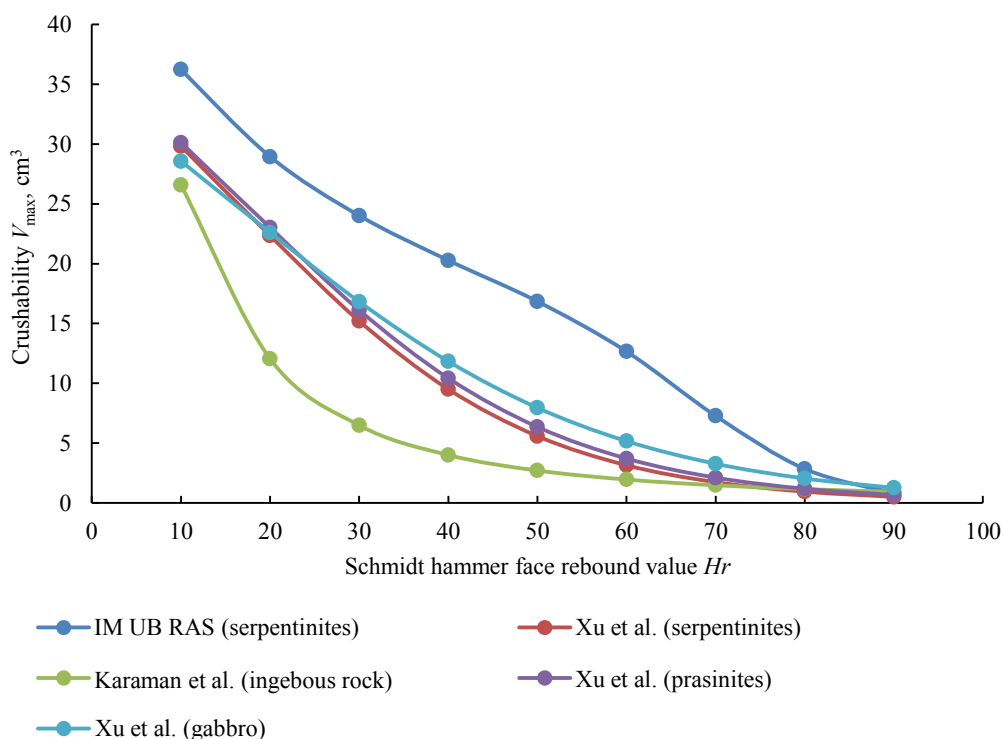


Figure 1. Dependences of rock crushability on the Schmidt hammer face rebound value  
Рисунок 1. Зависимость дробимости пород от величины отскока бойка молотка Шмидта

**Results.** The possibility of the dependences practical application is considered on the example of serpentinite rocks of the Jitikara deposit.

At the deposit, in local areas of the exposed rock, in the field environment, measurements were made with a Schmidt hammer according to the ASTM method. Rock samples were additionally tested for compressive strength in laboratory conditions using specialized press machines (Table 3).

Based on the formulae given in Table 2, the dependences of rock crushability and PLR sizes on the Schmidt hammer face rebound value are plotted (Figures 1 and 2).

Comparative analysis of the dependencies makes it possible to make the following conclusions.

It follows from the graphs that both rock crushability and the PLR sizes vary in a fairly wide range even for the same lithotype (serpentinites, dependencies of IM UB RAS and Xu) when formulae obtained in this research and formulae obtained by other researchers are used in calculations (Table 2). These discrepancies are obviously determined both by the difference in the physical and mechanical properties of particular lithotypes in different deposits, and by different characteristics of the applied Schmidt hammers, which can be of two types: L and N.

However, the general trend in the dependences of crushability and PLR size on  $Hr$  remains for various lithotypes: gabbro, prasinites, igneous rocks, and serpentinites. With an increase in the the Schmidt hammer face rebound, the values of both  $V_{max}$  and  $W_0$  decrease logarithmically and non-linearly.

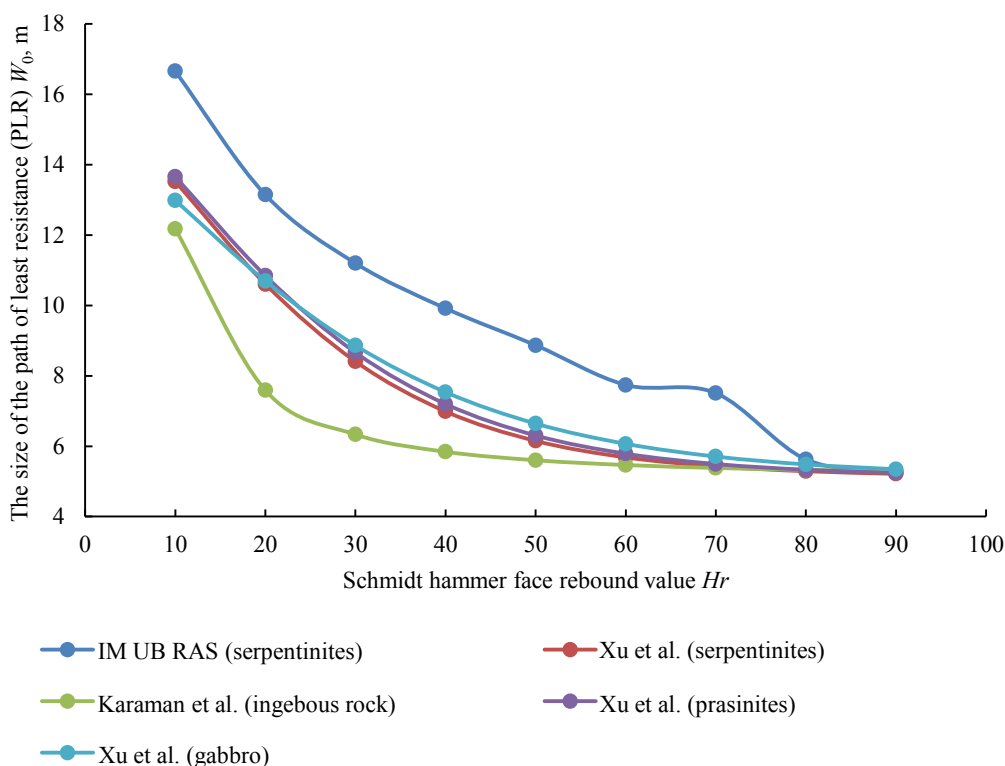


Figure 2. Dependence on the PLR size and the Schmidt hammer face rebound value  
Рисунок 2. Зависимость величины линии наименьшего сопротивления от величины отскока бойка молотка Шмидта

So, with an increase in the rebound value from 10 to 40 (4 times), the crushability of serpentinites changes (according to the IM UB RAS formula) from 37 to 4 cm<sup>3</sup>, i.e., more than 9 times. A further increase in rebound does not lead to such a significant increase in crushability. As  $Hr$  increases from 40 to 90,  $V_{max}$  smoothly decreases from 4 to 1 cm<sup>3</sup>.

When using an indirect assessment of rock crushability, an increased control of accuracy at low values of the Schmidt hammer face rebound (up to 40–60) can be recommended. With rebounds of 60 and more, field measurement errors will have a minor effect on the result of crushability and PLR determination.

It is therefore important to calibrate specific models of the Schmidt hammer in laboratory conditions for the rocks and lithotypes of the deposit where they are planned to be used.

**Conclusions.** Based on the research results, it can be concluded that the express method for assessing crushability indices and PLR size using a Schmidt hammer is quite effective and can be successfully used for express assessment of physical and mechanical properties variability at Russian mining enterprises.

However, it should be taken into account that Schmidt hammers cannot be used in certain mining and geological conditions without laboratory calibration of all devices planned for use. The accuracy of field measurements at small rebound values of the Schmidt hammer should also be considered, which is easily achieved by standard methods, i.e. increasing the number of measurements and carrying out their statistical processing.

#### REFERENCES

1. Baron L. I., Veselov G. M., Koniashin Iu. G. *Experimental study of rock breaking by impact*. Moscow: AS USSR Publishing; 1962. (In Russ.)
2. Baron L. I., Koniashin Iu. G., Kuznetsov A. V., Kurbatov V. M. The effect of the impactor shape on the impulses of voltage and efficiency of rock breaking. *Shakhtnoe stroitelstvo = Mine Construction*. 1969; 8: 8–10. (In Russ.)
3. Latyshev O. G. *Rock breaking*. Moscow: Teplotekhnika Publishing; 2007. (In Russ.)
4. Laubscher D. H. Geomechanics classification of jointed rock masses – mining applications. *Transactions of Institute of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry*. 1977; 86: A1–A8.
5. Aksoy C. O. Review of rock mass rating classification: Historical developments, applications, and restrictions. *Journal of Mining Science*. 2008; 44(51): 51–63.
6. Laubscher D. H., Jakubec J. The MRMR rock mass classification for jointed rock masses. In: Hustrulid W. A. and Bullock R. L. (eds.) *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. Littleton, Colorado: Society of Mining Metallurgy and Exploration, SME; 2001.
7. Panzhin A. A., Kharisov T. F., Kharisova O. D. Complex geomechanical substantiation of the open pit highwall slope angles. *Izvestiia Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle = Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2019; 3: 295–306. (In Russ.)
8. Deer D. U., Miller R. Engineering classification and index properties for intact rock. *Deformation Curve AFNL-TR*. Urbana-Champaign: University of Illinois, 1966. P. 65–116.
9. Wang M., Wan W. A new empirical formula for evaluating uniaxial compressive strength using the Schmidt hammer test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019; 123: 1–11.
10. Xu S., Grasso P., Mahtab A. Use of Schmidt hammer for estimating mechanical properties of weak rock. In: *6th International IAEG Congress*. Rotterdam: Balkema, 1990. P. 511–519.
11. Singh R., Hassani F., Elkington P. The application of strength and deformation index testing to the stability assessment of coal measures excavations. In: *The 24th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association, 1983. P. 63–67.
12. Armaghani D. J., Mohamad E. T., Momeni E., Monjezi M., Narayanasamy M. S. Prediction of the strength and elasticity modulus of granite through an expert artificial neural network. *Arabian Journal of Geosciences*. 2016; 9: 48.
13. Liang M., Mohamad E. T., Faradonbeh R. S., Armaghani D. J., Ghoraba S. Rock strength assessment based on regression tree technique. *Engineering with Computers*. 2016; 32: 343–354.
14. Hebib R., Belhai D., Alloul B. Estimation of uniaxial compressive strength of North Algeria sedimentary rocks using density, porosity, and Schmidt hardness. *Arabian Journal of Geosciences*. 2017; 10: 383.
15. Karaman K., Kesimal A. A comparative study of Schmidt hammer test methods for estimating the uniaxial compressive strength of rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2015; 74: 507–520.
16. Yagiz S. Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2009; 68(1): 55–63.
17. Yasar E., Erdogan Y. Estimation of rock physico-mechanical properties using hardness methods. *Engineering Geology*. 2004; 71(3): 281–288.
18. Kharisov T. F. Assessing serpentinite compressive strength using regression analysis. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 1: 45–53. (In Russ.)



19. Gergart Iu. A. Overview of the methods of diagnosing strength properties of rocks during transportation tunnels driving. *Nauchnoe obozrenie = Science Review*. 2013; 11: 65–68. (In Russ.)

20. Prokopov A. Iu., Gergart Iu. A. Approbation and accuracy evaluation of non-destructive express-method of determination of natural rock structural behavior in conditions of the Roki tunnel. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2015; 4: 101–107. (In Russ.)

21. Korneev V. V., Gareev A. F., Vasiutin S. V., Raikh V. V. *Databases. Intelligent information processing*. Moscow: Knowledge Publishing; 2001. (In Russ.)

22. Candida F. Genetic representation and genetic neutrality in gene expression programming. *Advances in complex systems*. 2002; 5(4): 389–408.

23. Behniaa D., Behniab M., Shahriar K., Goshtasbid K. A new predictive model for rock strength parameters utilizing GEP method. *Procedia Engineering*. 2017; 191: 591–599.

24. Ozbek A., Unsal M., Dikec A. Estimating uniaxial compressive strength of rocks using genetic expression programming. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2013; 5: 325–329.

25. Latsyshev O. G., Zhilin A. S., Osipov I. S. Regarding the rationale for the methods of determining the characteristics of rock crushability by impact and blast. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2005; 1: 102–106. (In Russ.)

Received 3 October 2022

#### Information about the authors:

**Aleksandr P. Russkikh** – Director of the mining administration, PJSC Uralasbest. E-mail: office@uralasbest.ru; <https://orcid.org/0009-0006-2930-7171>

**Sergei V. Kornilkov** – DSc (Engineering), professor, chief researcher, Institute of Mining UB RAS. E-mail: [kornilkov@igduran.ru](mailto:kornilkov@igduran.ru); <https://orcid.org/0000-0002-3432-1449>

**Arkadii N. Avdeev** – PhD (Engineering), senior researcher, Laboratory of Geodynamics and Formation Pressure, Institute of Mining UB RAS. E-mail: [avdeev0706@mail.ru](mailto:avdeev0706@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-1023-7645>

**Timur F. Kharisov** – PhD (Engineering), senior researcher, Laboratory of Geomechanics of Underground Structures, Institute of Mining UB RAS, E-mail: [timur-ne@mail.ru](mailto:timur-ne@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-4668-081X>

УДК 620.173.2

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-9-19

### Исследование физико-механических свойств пород для экспресс-оценки параметров дробимости в условиях массива хризотил-асбеста

Русских А. П.<sup>1</sup>, Корнилков С. В.<sup>2</sup>, Авдеев А. Н.<sup>2</sup>, Харисов Т. Ф.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ПАО «Ураласбест», г. Асбест, Россия.

<sup>2</sup> Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

#### Реферат

**Введение.** При решении ряда задач геомеханики и геотехнологии все более актуальными и востребованными становятся не прямые (косвенные) экспресс-методы оценки механических свойств пород, в том числе с применением молотка Шмидта. При использовании молотка Шмидта не требуется специализированного комплекса испытательного оборудования и высококвалифицированного персонала по обслуживанию этого оборудования. Испытания проводятся непосредственно в полевых условиях.

**Цель работы.** В настоящей работе оценена возможность применения косвенных экспресс-методов при определении показателей дробимости и линии наименьшего сопротивления.

**Методология.** Оценка показателей косвенными экспресс-методами показана на примере серпентинитовых пород Джетыгаринского месторождения хризотил-асбеста, для которых были проведены соответствующие полевые и лабораторные испытания. На локальных участках обнаженного массива в полевых условиях производились измерения молотком Шмидта по методике ASTM. Дополнительно проводились испытания образцов горных пород на предел прочности при сжатии в лабораторных условиях с применением специализированного прессового оборудования.

**Результаты.** Установлены эмпирические зависимости дробимости серпентинитовых пород от предела прочности на одноосное сжатие и величины отскока бойка молотка Шмидта. Проведен сравнительный анализ с эмпирическими зависимостями,

установленными другими авторами. Предложена методика расчета оптимальной линии наименьшего сопротивления для паспорта буровзрывных работ на базе установленных зависимостей.

**Выводы.** На основании результатов установлено, что экспресс-метод оценки показателей дробимости и величины линии наименьшего сопротивления с применением молотка Шмидта является достаточно эффективным и может быть с успехом использован для экспресс-оценки изменчивости физико-механических свойств на российских горнодобывающих предприятиях. Однако следует учитывать, что нельзя использовать молоток Шмидта в конкретных горно-геологических условиях без лабораторной тарировки всех планируемых к использованию приборов.

**Ключевые слова:** молоток Шмидта; предел прочности на сжатие; величина отскока; дробимость; линия наименьшего сопротивления; серпентинит.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барон Л. И., Веселов Г. М., Коняшин Ю. Г. Экспериментальные исследования процессов разрушения горных пород ударом. М.: АН СССР, 1962. 219 с.
2. Барон Л. И., Коняшин Ю. Г., Кузнецов А. В., Курбатов В. М. Влияние формы ударника на импульсы напряжений и эффективность разрушения горной породы // Шахтное строительство. 1969. № 8. С. 8–10.
3. Латышев О. Г. Разрушение горных пород. М.: Теплотехник, 2007. 672 с.
4. Laubscher D. H. Geomechanics classification of jointed rock masses – mining applications // Transactions of Institute of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry. 1977. Vol. 86. P. A1–A8.
5. Aksoy C. O. Review of rock mass rating classification: Historical developments, applications, and restrictions // Journal of Mining Science. 2008. Vol. 44. No. 51. P. 51–63.
6. Laubscher D. H., Jakubec J. The MRMR rock mass classification for jointed rock masses // Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies (eds. W. A. Hustrulid and R. L. Bullock). Littleton, Colorado: Society of Mining Metallurgy and Exploration, SME, 2001. P. 475–481.
7. Панжин А. А., Харисов Т. Ф., Харисова О. Д. Комплексное геомеханическое обоснование углов заоткоски бортов карьера // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 3. С. 295–306.
8. Deer D. U., Miller R. Engineering classification and index properties for intact rock // Deformation Curve AFNL-TR. Urbana-Champaign: University of Illinois, 1966. P. 65–116.
9. Wang M., Wan W. A new empirical formula for evaluating uniaxial compressive strength using the Schmidt hammer test // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019. Vol. 123. P. 1–11.
10. Xu S., Grasso P., Mahtab A. Use of Schmidt hammer for estimating mechanical properties of weak rock // 6th International IAEG Congress. Rotterdam: Balkema, 1990. P. 511–519.
11. Singh R., Hassani F., Elkington P. The application of strength and deformation index testing to the stability assessment of coal measures excavations // The 24th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association, 1983. P. 63–67.
12. Armaghani D. J., Mohamad E. T., Momeni E., Monjezi M., Narayanasamy M. S. Prediction of the strength and elasticity modulus of granite through an expert artificial neural network // Arabian Journal of Geosciences. 2016. No. 9. P. 48.
13. Liang M., Mohamad E. T., Faradonbeh R. S., Armaghani D. J., Ghoraba S. Rock strength assessment based on regression tree technique // Engineering with Computers. 2016. No. 32. P. 343–354.
14. Hebib R., Belhai D., Alloul B. Estimation of uniaxial compressive strength of North Algeria sedimentary rocks using density, porosity, and Schmidt hardness // Arabian Journal of Geosciences. 2017. No. 10. P. 383.
15. Karaman K., Kesimal A. A comparative study of Schmidt hammer test methods for estimating the uniaxial compressive strength of rocks // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2015. No. 74. P. 507–520.
16. Yagiz S. Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2009. No. 68(1). P. 55–63.
17. Yasar E., Erdogan Y. Estimation of rock physicomaterial properties using hardness methods // Engineering Geology. 2004. No. 71(3). P. 281–288.
18. Харисов Т. Ф. Оценка предела прочности серпентинитов на сжатие с использованием регрессионного анализа // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 1. С. 45–53.
19. Гергарт Ю. А. Обзор методов диагностики прочностных свойств горных пород при проходке транспортных тоннелей // Научное обозрение. 2013. № 11. С. 65–68.

20. Прокопов А. Ю., Гергарт Ю. А. Аprobация и оценка точности неразрушающего экспресс-метода определения прочностных свойств породного массива в условиях реконструкции Рокского тоннеля // Известия вузов. Горный журнал. 2015. № 4. С. 101–107.
21. Корнеев В. В., Гареев А. Ф., Васютин С. В., Райх В. В. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации. М.: Нолидж, 2001. 496 с.
22. Candida F. Genetic representation and genetic neutrality in gene expression programming // Advances in complex systems. 2002. Vol. 5, No. 4, P. 389–408.
23. Behniaa D., Behniab M., Shahriar K., Goshtasbid K. A new predictive model for rock strength parameters utilizing GEP method // Procedia Engineering. 2017. Vol. 191. P. 591–599.
24. Ozbek A., Unsal M., Dikec A. Estimating uniaxial compressive strength of rocks using genetic expression programming // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2013. No. 5. P. 325–329.
25. Латышев О. Г., Жилин А. С., Осипов И. С. К обоснованию методики определения характеристик дробимости горных пород ударом и взрывом // Известия вузов. Горный журнал. 2005. № 1. С. 102–106.

Поступила в редакцию 3 октября 2022 года

### Сведения об авторах:

**Русских Александр Петрович** – директор рудоуправления ПАО «Ураласбест». E-mail: office@uralasbest.ru; <https://orcid.org/0009-0006-2930-7171>

**Корнилков Сергей Викторович** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института горного дела УрО РАН. E-mail: kornilkov@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3432-1449>

**Авдеев Аркадий Николаевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН. E-mail: avdeev0706@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1023-7645>

**Харисов Тимур Фаритович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геомеханики подземных сооружений, Института горного дела УрО РАН. E-mail: timur-ne@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4668-081X>

**Для цитирования:** Русских А. П., Корнилков С. В., Авдеев А. Н., Харисов Т. Ф. Исследование физико-механических свойств пород для экспресс-оценки параметров дробимости в условиях массива хризотил-асбеста // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 5. С. 9–19 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-9-19

**For citation:** Russkikh A. P., Kornilkov S. V., Avdeev A. N., Kharisov T. F. Studying physical and mechanical properties of rocks to carry out an express assessment of crushability parameters in the conditions of chrysotile asbestos rock mass. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 5: 9–19. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-9-19

## Determining modern stress field when mining ore deposits

Boris A. Khramtsov<sup>1</sup>, Dmitrii S. Lepetiukha<sup>1\*</sup>, Kirill S. Babushkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

\*e-mail: 940719@bsu.edu.ru

### Abstract

**Introduction.** The article describes a method of modern stress field determination in a rock mass when ore deposits are mined and a circular hole opens up on the earth's surface. This method makes it possible to determine the values of the principal normal stresses in the upper part of the rock mass using modern high-precision electron-optical devices and global positioning systems for observing horizontal shifts of surveying reference network points laid on the earth's surface in the smooth shear zone.

**Formulation of the problem.** When mining ore deposits by the underground method, safe condition of underground mine workings, buildings and structures on the earth's surface is a major issue. To solve this geomechanical problem, modern stress state of the rock mass should be determined. It is suggested that the planned shifts of surveying reference network points and state geodetic network (SGN) points located in the smooth shear zone when a circular hole opens up on the earth's surface should be used to determine the value and direction of principal normal tectonic stresses acting in the horizontal plane.

**Research aim** is to develop a mathematical framework determining modern principal stresses acting in the horizontal plane when caved area outcrops.

**Research objective** is to justify the possibility of using planned shifts of surveying reference network points and SGN points, measured with modern electron-optical devices and global positioning systems (GLONASS and GPS) in the calculations of the rock mass stress state.

**Methods of research.** When determining modern principal tectonic stresses acting in a horizontal plane, the solution of the plane elasticity problem is used to develop a mathematical framework.

**Scope of results.** This method is useful when determining the stress state of a rock mass at large bases when mining ore deposits.

**Results.** The obtained analytic expressions allow determining modern tectonic stresses and their direction in the horizontal plane when a circular hole opens up on the earth's surface. Horizontal shifts of surveying reference network points and SGN points are used to determine the stresses.

**Keywords:** principal normal stresses; smooth shear zone; caving zone; horizontal deformations; stress-strain state; rock mass; hole; horizontal shifts; hole radius; radius vector.

**Introduction.** According to the Russian Federation Federal Law "On the Industrial Safety of Hazardous Production Facilities", mining enterprises that develop mineral deposits by the underground method are hazardous production facilities where special requirements must be met in relation to occupational health and safety connected with the stability of underground workings in the course of mining and the protection of surface buildings and structures.

Ore deposits mining method with roof strata caving is accompanied by the caved area outcrop, and the shape of the area can be reasonably well approximated by a circle or an ellipse (plan dimensions are hundreds of meters, both along the strike and down the dip of the ore bodies) [1].

When elaborating actions on buildings, structures and natural features protection from underground mining, it is important to know the values of the horizontal shifts of

the earth's surface, which depend on the stress state of the rock mass, and be able to calculate them. The caved zone size growth in the course of mining activates rock mass shear resulting in the development of horizontal deformations on the earth's surface. The direction and values of horizontal deformations in the smooth shear zone depend on the caved area shape and size, rock mass physical and mechanical properties, and the stress-strain state (SSS) [1–6].

Papers [3–6] use the results of instrumental mine surveying observations along profile lines laid on the earth's surface before the caved area outcrop to determine the principal normal stresses acting in a rock mass in the course of iron ore deposit development. To determine the value and direction of horizontal tectonic principal normal stresses, horizontal deformations of 20–100 m profile line intervals were used. Survey observations of the earth's surface shear were carried out in accordance with the instruction for rock and earth's surface shear monitoring in the course of underground mining of ore deposits. Absolute horizontal deformations of intervals were measured with a tape measure with an accuracy of 1 : 20,000. Measurement of horizontal deformations with an accuracy recommended by the instruction for rock and earth's surface shear monitoring in the course of underground mining of ore deposits introduces a significant error in rock mass SSS determination.

As of today, it is established that at intervals with a period of 10 years, geotectonic processes in the Earth's crust result in stress state redistribution [7–9].

The objective connected with the determination of the modern stress field acting in a rock mass in the course of ore deposits mining at different stages remains crucial. The solution will allow more objective elaboration of actions on safe operation of buildings and structures and their protection from underground mining, calculate the earth's surface deformation in the smooth shear zone, and evaluate the stability of underground mine workings.

**Formulation of the problem.** Currently, mine surveying at mining enterprises is carried out using modern electronic total stations and navigation positioning systems (GLONASS and GPS) [9, 10], which determine the coordinates of surveying reference network points and the state geodetic network (SGN) points in plan to a precision of 1 to 5 mm. The surveying reference network and the state geodetic network are created before the start of the mineral deposit development, and obviously before the caved area outcrop. Therefore, to determine the tectonic field of principal normal stresses acting in a rock mass, it is possible to use the shifts of surveying reference network points and SGN points, caused by rock and the earth's surface shear at the caved area outcrop.

Long-term experience of instrumental observations of surveying reference network points shifts at the caved area outcrop in the course of iron ore deposits development shows that the absolute horizontal deformations of the points varied from 1 to 10 cm [1, 12, 13].

The use of modern electronic total stations and global positioning systems will significantly improve the accuracy of absolute horizontal shifts determination and, consequently, stresses determination.

**Methods of research and scope of results.** To determine the vectors of horizontal shifts of surveying reference network points and SGN points located on the earth's surface, as well as the horizontal shifts of the upper layers of rocks, with scarcely any pressure on the walls of the outcrop from the caved rock, it is possible to use the solution of the plane elasticity problem. A scheme is proposed for determining the absolute horizontal shifts of surveying reference network points and the SGN points and calculating the tectonic horizontal stresses acting in the rock mass, for a circular hole (Figure 1).

The full vectors of surveying reference network points and the SGN points shifts on the earth’s surface are determined from the expression:

$$\varepsilon = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}, \tag{1}$$

where  $\varepsilon$  – the full vector of reference network point shifts, m;  $\Delta x, \Delta y$  – the projection of the full vector of reference network point shifts onto the  $x$  and  $y$  coordinate axes, m.

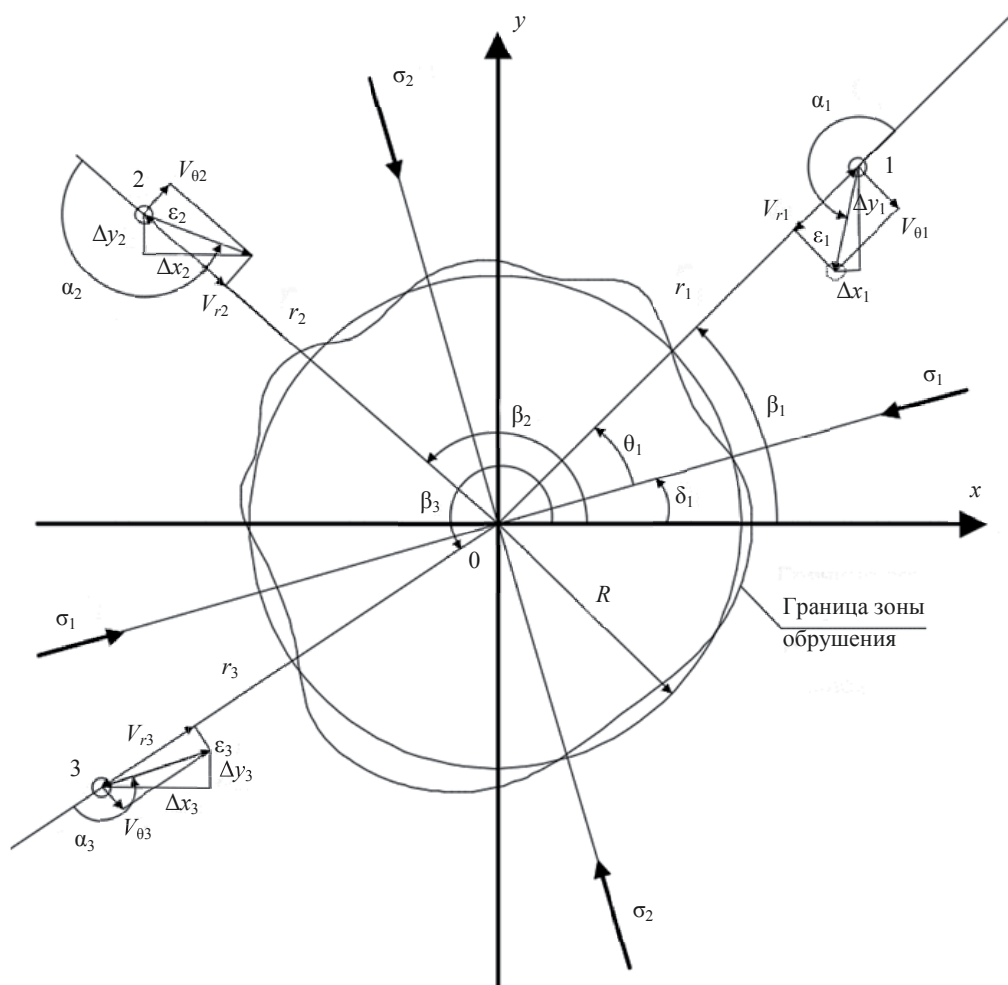


Figure 1. Scheme for the selection of horizontal shifts of the points of the reference surveying network and GGS on the earth's surface and the calculation of horizontal tectonic displacements

Рисунок 1. Схема к определению горизонтальных сдвижений пунктов опорной маркшейдерской сети и ГГС на земной поверхности и расчету горизонтальных тектонических напряжений

Russian [14–18] and foreign literature [19–23] analysis shows that the analytical approach to determining stresses near cavities involves solving and optimizing systems of equations.

The solution of the plane elasticity problem [18] allowed to deduce the horizontal shifts in the following form:

$$\varepsilon = V_r \cos\alpha + V_\theta \sin\alpha; \tag{2}$$

$$\begin{cases} V_r = -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} \left[ \frac{R^4}{r^3} - \frac{R^2}{r} (x + 1) \right] \cos 2\theta + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{4G} \frac{R^2}{r}; \\ V_\theta = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} \left[ \frac{R^4}{r^3} + \frac{R^2}{r} (x - 1) \right] \sin 2\theta, \end{cases} \quad (3)$$

where  $V_r, V_\theta$  are radial and tangential shifts;  $\alpha$  is the angle between the radius vector of the point and the direction of the full vector of the shear;  $\sigma_1$  and  $\sigma_2$  are principal normal stresses;  $R$  is the hole radius;  $r$  is radius vector of the point;  $G = E/(2(1 - \mu))$  is the shear modulus,  $E$  is the deformation modulus;  $\mu$  is the Poisson's ratio;  $x = (3 - \mu)/(1 + \mu)$  is the coefficient of G. V. Kolosov;  $\theta$  is the angular coordinate of the point, measured counterclockwise from  $\sigma_1$  to the radius vector of the point.

**Research results.** Formulae (1)–(3) make it possible to deduce the following system of equations to determine horizontal tectonic stresses and their direction:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \left( -\left[ \frac{R^4}{r_1^3} - \frac{R^2}{r_1} (x + 1) \right] \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} \cos 2\theta_1 + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{4G} \frac{R^2}{r_1} \right) \cos \alpha_1 + \\ + \left( \left[ \frac{R^4}{r_1^3} + \frac{R^2}{r_1} (x - 1) \right] \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} \sin 2\theta_1 + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{4G} \frac{R^2}{r_1} \right) \sin \alpha_1; \\ \varepsilon_2 = \left( -\left[ \frac{R^4}{r_2^3} - \frac{R^2}{r_2} (x + 1) \right] \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} \cos 2\theta_2 + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{4G} \frac{R^2}{r_2} \right) \cos \alpha_2 + \\ + \left( \left[ \frac{R^4}{r_2^3} + \frac{R^2}{r_2} (x - 1) \right] \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} \sin 2\theta_2 + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{4G} \frac{R^2}{r_2} \right) \sin \alpha_2; \\ \varepsilon_3 = \left( -\left[ \frac{R^4}{r_3^3} - \frac{R^2}{r_3} (x + 1) \right] \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} \cos 2\theta_3 + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{4G} \frac{R^2}{r_3} \right) \cos \alpha_3 + \\ + \left( \left[ \frac{R^4}{r_3^3} + \frac{R^2}{r_3} (x - 1) \right] \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} \sin 2\theta_3 + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{4G} \frac{R^2}{r_3} \right) \sin \alpha_3. \end{cases} \quad (4)$$

The angular coordinate of the  $i$ -th point is determined by the following formula:

$$\theta_i = \theta_1 + (\beta_i - \beta_1),$$

where  $\theta_1$  is the angle between  $\sigma_1$  and the radius vector of the first point;  $\beta_1, \beta_i$  – the angle between the  $x$ -axis and the radius vector of the first point and the  $i$ -th point respectively.

The transformation of the system of equations (4) made it possible to write it as:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 = b_1; \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 = b_2; \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 = b_3, \end{cases} \quad (5)$$

where  $a_{11}, \dots, a_{33}$  are the coefficients of the equations;  $b_1, b_2, b_3$  are the absolute terms of equations.

The coefficients of the equations are:

$$\begin{cases} a_{11} = K_1^1 = -\left[\frac{R^4}{r_1^3} - \frac{R^2}{r_1}(x+1)\right] \cos\alpha_1; \\ a_{12} = K_2^1 = \left[\frac{R^4}{r_1^3} - \frac{R^2}{r_1}(x-1)\right] \sin\alpha_1; \\ a_{13} = K_3^1 = \frac{R^2}{r_1} \cos\alpha_1, \\ \\ a_{21} = K_1^2 \cos 2(\beta_2 - \beta_1) - K_2^2 \sin 2(\beta_2 - \beta_1); \\ a_{22} = K_1^2 \sin 2(\beta_2 - \beta_1) + K_2^2 \cos 2(\beta_2 - \beta_1); \\ a_{23} = K_3^2 = (R^2/r_2) \cos\alpha_2, \\ \\ a_{31} = K_1^3 \cos 2(\beta_3 - \beta_1) - K_2^3 \sin 2(\beta_3 - \beta_1); \\ a_{32} = K_1^3 \sin 2(\beta_3 - \beta_1) + K_2^3 \cos 2(\beta_3 - \beta_1); \\ a_{33} = K_3^3 = (R^2/r_3) \cos\alpha_3, \\ \\ K_1^i = -\left[\frac{R^4}{r_i^3} - \frac{R^2}{r_i}(x+1)\right] \cos\alpha_i; \\ K_2^i = \left[\frac{R^4}{r_i^3} + \frac{R^2}{r_i}(x-1)\right] \sin\alpha_i; \\ K_3^i = \frac{R^2}{r_i} \cos\alpha_i, \end{cases}$$

where  $K_1^i, K_2^i, K_3^i$  are the coefficients of the  $i$ -th point;

$$\begin{aligned} x_1 &= (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta_1; & x_2 &= (\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\theta_1; & x_3 &= \sigma_1 + \sigma_2; \\ b_1 &= \varepsilon_1 4G; & b_2 &= \varepsilon_2 4G; & b_3 &= \varepsilon_3 4G. \end{aligned}$$

The solution of the system of equations (5) makes it possible to calculate the value of the principal stresses  $\sigma_1$  and  $\sigma_2$  and angle  $\theta$  using the formulas:

$$\begin{aligned} \sigma_{1,2} &= \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta_2}{\Delta} \pm \frac{\Delta_1}{\Delta} \sqrt{1 + \left( \frac{\Delta_2}{\Delta_1} \right)^2} \right]; \\ 2\theta_1 &= \operatorname{arctg} \frac{\Delta_2}{\Delta_1}, \end{aligned}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}; \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} b_1 & a_{12} & a_{13} \\ b_2 & a_{22} & a_{23} \\ b_3 & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix};$$



$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_{11} & b_1 & a_{13} \\ a_{21} & b_2 & a_{23} \\ a_{31} & b_3 & a_{33} \end{vmatrix}; \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & b_3 \end{vmatrix},$$

where  $\Delta, \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$  are the equation determinants.

The value of the angle  $2\theta_1$  is not uniquely defined. To determine the quadrant in which it is counted, the signs of ratios  $\Delta_2/\Delta$  and  $\Delta_1/\Delta$  are used.

The direction of the principal normal tectonic stresses acting in the horizontal plane is determined by angle  $\delta_1$ , which is plotted counterclockwise from the  $x$ -axis and determined using the following expression:

$$\delta_1 = \beta_1 - \theta_1.$$

**Conclusions.** The article describes a method for modern stress field determination when mining ore deposits. The method is based on the shifts of the SGN points and surveying reference network points of the mining enterprises that develop mineral deposits by the underground method with roof strata caving and a circular hole opening up on the earth's surface. To monitor the shifts of the SGN points and surveying reference network points, modern electro-optical total stations and global positioning systems GLONASS and GPS are used. This method makes it possible to determine the values and direction of the principal normal stresses acting in the horizontal plane.

#### REFERENCES

1. Sashurin A. D. *Rock mass deformation in the mines of ferrous metallurgy*. Ekaterinburg: IM UB RAS Publishing; 1999. (In Russ.)
2. Khramtsov B. A. Determination of rock mass deformations during underground mining of ore fields. In: *Questions of rationalization of the mine surveying service at mining enterprises*. Sverdlovsk: SMI Publishing; 1983. (In Russ.)
3. Sashurin A. D. Measurement of the stress state of hard rock mass on large bases. In: *Measuring stresses in a rock massif. Part I*. Novosibirsk: IM SB AS USSR Publishing; 1976. (In Russ.)
4. Sashurin A. D., Khramtsov B. A., Sain V. A. Stressed state of the rock mass at some ore fields of the Ural-Kazakhstan region. In: *Stressed state of rock masses*. Novosibirsk: IM SB AS USSR Publishing; 1978. (In Russ.)
5. Khramtsov B. A. *Rock mass shear under the influence of underground mining of ore deposits at the caving zone outcrop: diss. PhD in Eng*. Sverdlovsk: SMI Publishing; 1981. (In Russ.)
6. Sashurin A. D., Khramtsov B. A. Experimental-analytical method for measuring stresses in large areas of a rock mass. In: *Underground mining of ore ferrous metals*. Krivoy Rog: NIGRI Publishing; 1978. (In Russ.)
7. Zubkov A. V. *Geomechanics and geotechnology*. Ekaterinburg: IM UB RAS Publishing; 2001. (In Russ.)
8. Zubkov A. V., Feklistov Iu. G., Lipin Ia. I., Khudiakov S. V., Krinitsyn R. V. The deformational methods of determining the rocks' stressed state at objects of mineral exploitation. *Problemy nedropolzovaniia = Problems of Subsoil Use*. 2016; 4: 41–49. (In Russ.)
9. Zheng L., Zhu L., Wang W., Guo L., Chen B. Land subsidence related to coal mining in China revealed by L-band in SAR analysis. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020; 17(4): 1170. Available from: <https://doi.org/10.3390/ijerph17041170>
10. Grishko S. V., Bukin V. G. Joint use of the results of satellite definitions and high-precision leveling in geodynamic monitoring. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2017; 7: 50–56. Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2017-7-50-56
11. Gordeev V. A., Raeva O. S. Preliminary estimation of the accuracy of GPS-schemes project. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2017; 7: 57–62. Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2017-7-57-62
12. Vlokh N. P., Sashurin A. D., Zubkov A. V. Stress state of rocks of ore deposits in the Urals. In: *Stress state of the earth's crust (according to measurements in rock masses)*. Moscow: Nauka Publishing; 1973. (In Russ.)

13. Sashurin A. D., Berkutov V. A., Khramtsov B. A., Bessolnikov P. N. On measures to protect the central shafts of the Severopeschanskaya mine from undermining. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 1979; 5: 34–36. (In Russ.)
14. Vlokh N. P., Zubkov A. V., Feklistov Iu. G. Method of partial unloading on a large base. In: *Diagnostics of the rock mass stress state: proceedings*. Novosibirsk: IM SB RAS USSR Publishing; 1983. (In Russ.)
15. Vlokh N. P., Sashurin A. D., Ushkov S. M., Zubkov A. V., Bolikov V. E., Lipin Ia. I. *Method for controlling the stress state of construction sites and rocks*. Patent RF no. 464778, 1975. (In Russ.)
16. Vlokh N. P. *Management of rock pressure in underground mines*. Moscow: Nedra Publishing; 1994. (In Russ.)
17. Vlokh N. P., Zubkov A. V., Feklistov Iu. G. *Improving the method of gap relief. Diagnosing the state of rock masses: proceedings*. Novosibirsk: IM SB AS USSR Publishing; 1980. (In Russ.)
18. Vlokh N. P., Sashurin A. D. *Measuring strain in a hard rock mass*. Moscow: Nedra Publishing; 1970. (In Russ.)
19. Tuna M., Trovalusci P. Stress distribution around an elliptic hole in a plate with implicit and explicit non-local models. *Composite Structures*. 2021; 256: 113003. Available from: doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113003
20. Ma Y., Lu A., Cai H. Analytical method for determining the elastoplastic interface of a circular hole subjected to biaxial tension-compression loads. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2022; 50(9): 3206–3223. Available from: doi: 10.1080/15397734.2020.1801461
21. Tan L., Ren T., Dou L., Yang X., Wang G., Peng H. Analytical stress solution and numerical mechanical behavior of rock mass containing an opening under different confining stress conditions. *Mathematics*. 2021; 9(19): 2462. Available from: doi: <https://doi.org/10.3390/math9192462>
22. Alexandrov S., Rynkovskaya M., Tsai S. N. Application of the generalized method of moving coordinates to calculating stress fields near an elliptical hole. *Materials (Basel)*. 2022; 9; 15(18): 6266. Available from: doi: 10.3390/ma15186266
23. Wang W., Yuan H., Li X., Shi P. Stress concentration and damage factor due to central elliptical hole in functionally graded panels subjected to uniform tensile traction. *Materials (Basel)*. 2019; Jan. 30; 12(3): 422. Available from: doi: 10.3390/ma12030422

Received 5 May 2023

#### Information about the authors:

**Boris A. Khramtsov** – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Applied Geology and Mining, Belgorod State National Research University. E-mail: [khramtsov@bsu.edu.ru](mailto:khramtsov@bsu.edu.ru); <https://orcid.org/0009-0006-7314-412X>

**Dmitrii S. Lepetiukha** – PhD student, Department of Applied Geology and Mining, Belgorod State National Research University. E-mail: [940719@bsu.edu.ru](mailto:940719@bsu.edu.ru); <https://orcid.org/0009-0005-1320-0559>

**Kirill S. Babushkin** – Master’s Degree student, Department of Geography, Geoecology and Life Safety, Belgorod State National Research University. E-mail: [1325096@bsu.edu.ru](mailto:1325096@bsu.edu.ru); <https://orcid.org/0009-0003-8263-0021>

УДК 622.831.3

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-20-28

### Определение современного поля напряжений при разработке рудных месторождений

Храмцов Б. А.<sup>1</sup>, Лепетюха Д. С.<sup>1</sup>, Бабушкин К. С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия.

#### Реферат

**Введение.** В статье дано описание метода определения современного поля напряжений в массиве горных пород при разработке рудных месторождений, когда на земной поверхности образуется провал в виде окружности. Данный метод позволяет определить значения главных нормальных напряжений в верхней части массива горных пород с использованием современных высокоточных электронно-оптических инструментов и систем глобального позиционирования для наблюдений за горизонтальными смещениями пунктов маркшейдерской опорной сети, заложенных на земной поверхности в зоне плавных сдвижений.

**Постановка задачи.** При подземной разработке рудных месторождений подземным способом одним из основных вопросов является обеспечение безопасного состояния подземных горных выработок, зданий и сооружений на земной поверхности. Решение

данной геомеханической проблемы требует определения современного напряженного состояния массива горных пород. В работе предлагается для определения величины и направления главных нормальных тектонических напряжений, действующих в горизонтальной плоскости, использовать плановые смещения пунктов опорной маркишейдерской сети и пунктов государственной геодезической сети (ГГС), находящихся в зоне плавных сдвижений при образовании на земной поверхности провала, близкого по форме к окружности.

**Цель исследования** – разработать математический аппарат, позволяющий определять современные главные напряжения, действующие в горизонтальной плоскости при выходе зоны обрушения на земную поверхность.

**Основной задачей** исследования является обоснование возможности использования при расчетах напряженного состояния массива горных пород плановых смещений опорных пунктов маркишейдерской сети и пунктов ГГС, измеряемых с помощью современных электронно-оптических приборов и систем глобального позиционирования (ГЛОНАСС и GPS).

**Методы исследования.** Для разработки математического аппарата при определении современных главных тектонических напряжений, действующих в горизонтальной плоскости, используется решение плоской задачи теории упругости.

**Область применения.** Данный метод рекомендуется использовать для определения напряженного состояния массива горных пород на больших базах при разработке рудных месторождений.

**Результаты.** Получены аналитические выражения, позволяющие определять современные тектонические напряжения и направление их действия в горизонтальной плоскости при образовании на земной поверхности провала, имеющего форму окружности. Для определения напряжений используются горизонтальные смещения пунктов опорной маркишейдерской сети и ГГС.

**Ключевые слова:** главные нормальные напряжения; зона плавных сдвижений; зона обрушения; горизонтальные деформации; напряженно-деформированное состояние; массив горных пород; провал; горизонтальные смещения; радиус провала; радиус-вектор.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сашурин А. Д. Сдвигение горных пород на рудниках черной металлургии. Екатеринбург: ИГД УроРАН, 1999. 268 с.
2. Храмов Б. А. Определение деформаций массива горных пород при подземной разработке рудных месторождений // Вопросы рационализации маркишейдерской службы на горных предприятиях: межвуз. науч. темат. сб. Свердловск: СГИ, 1983. С. 3–6.
3. Сашурин А. Д. Измерение напряженного состояния массива крепких горных пород на больших базах // Измерение напряжений в массиве горных пород. Ч. I. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1976. С. 106–111.
4. Сашурин А. Д., Храмов Б. А., Саин В. А. Напряженное состояние массива горных пород некоторых рудных месторождений Урало-Казахстанского региона // Напряженное состояние породных массивов. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1978. С. 71–75.
5. Храмов Б. А. Сдвигение горных пород под влиянием подземных разработок рудных месторождений при выходе зоны обрушения на земную поверхность: дисс. ... канд. техн. наук. Свердловск: СГИ, 1981. 176 с.
6. Сашурин А. Д., Храмов Б. А. Экспериментально-аналитический метод измерения напряжений больших участков горного массива // Подземная добыча руд черных металлов. Кривой Рог: НИГРИ, 1978. С. 40–44.
7. Зубков А. В. Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург: ИГД Уро РАН, 2001. 335 с.
8. Зубков А. В., Феклистов Ю. Г., Липин Я. И., Худяков С. В., Криницын Р. В. Деформационные методы определения напряженного состояния пород на объектах недропользования // Проблемы недропользования. 2016. № 4. С. 41–49.
9. Zheng L., Zhu L., Wang W., Guo L., Chen B. Land subsidence related to coal mining in China revealed by L-band in SAR analysis // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020. No. 17(4). P. 1170. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph17041170>
10. Гришко С. В., Букин В. Г. Совместное использование результатов спутниковых определений и высокоточного нивелирования в геодинимическом мониторинге // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 7. С. 50–56. DOI: 10.21440/0536-1028-2017-7-50-56
11. Гордеев В. А., Раева О. С. Предварительная оценка точности проекта GPS-построений // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 7. С. 57–62. DOI: 10.21440/0536-1028-2017-7-57-62

12. Влох Н. П., Сашурин А. Д., Зубков А. В. Напряженное состояние горных пород рудных месторождений Урала // Напряженное состояние земной коры (по измерениям в массивах горных пород). М.: Наука, 1973. С. 87–106.

13. Сашурин А. Д., Беркутов В. А., Храмцов Б. А., Бессольников П. Н. О мерах по охране центральных стволов шахты Северопечанская от подработки // Горный журнал. 1979. № 5. С. 34–36.

14. Влох Н. П., Зубков А. В., Феклистов Ю. Г. Метод частичной разгрузки на большой базе // Диагностика напряженного состояния пород массивов: сб. научн. тр. Новосибирск: ИГД СО РАН СССР, 1983. С. 37–42.

15. Способ контроля напряженного состояния строительных объектов и горных пород: пат. 464778 Рос. Федерация. № 1966469/29-33; заявл. 16.10.73; опубл. 25.03.75. Бюл. № 11. С. 105–106.

16. Влох Н. П. Управление горным давлением на подземных рудниках. М.: Недра, 1994. 208 с.

17. Влох Н. П., Зубков А. В., Феклистов Ю. Г. Совершенствование метода щелевой разгрузки // Диагностика состояния породных массивов: Сборник трудов. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1980. С. 30–35.

18. Влох Н. П., Сашурин А. Д. Измерение напряжений в массиве крепких горных пород. М.: Недра, 1970. 124 с.

19. Tuna M., Trovalusci P. Stress distribution around an elliptic hole in a plate with implicit and explicit non-local models // Composite Structures. 2021. Vol. 256. Art. 113003. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113003

20. Ma Y., Lu A., Cai H. Analytical method for determining the elastoplastic interface of a circular hole subjected to biaxial tension-compression loads // Mechanics Based Design of Structures and Machines. 2022. Vol. 50. No. 9. P. 3206–3223. DOI: 10.1080/15397734.2020.1801461

21. Tan L., Ren T., Dou L., Yang X., Wang G., Peng H. Analytical stress solution and numerical mechanical behavior of rock mass containing an opening under different confining stress conditions // Mathematics. 2021. No. 9(19). Art. 2462. DOI: <https://doi.org/10.3390/math9192462>

22. Alexandrov S., Rynkovskaya M., Tsai S. N. Application of the generalized method of moving coordinates to calculating stress fields near an elliptical hole // Materials (Basel). 2022. Sep. 9. No. 15(18). Art. 6266. DOI: 10.3390/ma15186266

23. Wang W., Yuan H., Li X., Shi P. Stress concentration and damage factor due to central elliptical hole in functionally graded panels subjected to uniform tensile traction // Materials (Basel). 2019. Jan. 30. No. 12(3). Art. 422. DOI: 10.3390/ma12030422

Поступила в редакцию 5 мая 2023 года

#### Сведения об авторах:

**Храмцов Борис Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной геологии и горного дела Белгородского государственного национального исследовательского университета. E-mail: [khramtsov@bsu.edu.ru](mailto:khramtsov@bsu.edu.ru); <https://orcid.org/0009-0006-7314-412X>

**Лепетюха Дмитрий Сергеевич** – аспирант кафедры прикладной геологии и горного дела Белгородского государственного национального исследовательского университета. E-mail: [940719@bsu.edu.ru](mailto:940719@bsu.edu.ru); <https://orcid.org/0009-0005-1320-0559>

**Бабушкин Кирилл Сергеевич** – магистрант кафедры географии, геоэкологии и безопасной жизнедеятельности Белгородского государственного национального исследовательского университета. E-mail: [1325096@bsu.edu.ru](mailto:1325096@bsu.edu.ru); <https://orcid.org/0009-0003-8263-0021>

**Для цитирования:** Храмцов Б. А., Лепетюха Д. С., Бабушкин К. С. Определение современного поля напряжений при разработке рудных месторождений // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 5. С. 20–28 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-20-28

**For citation:** Khramtsov B. A., Lepetiukha D. S., Babushkin K. S. Determining modern stress field when mining ore deposits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 5: 20–28. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-20-28

## Управление состоянием напряженно-деформированных массивов разгрузкой от напряжений

Голик В. И.<sup>1\*</sup>, Валиев Н. Г.<sup>2</sup>, Шарипзянова Г. Х.<sup>3</sup>, Келехсаев В. Б.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Северо-Кавказский государственный технологический университет, г. Владикавказ, Россия

<sup>2</sup> Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup> Московский политехнический университет, г. Москва, Россия

<sup>4</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет, г. Новочеркасск, Россия

\*e-mail: v.i.golik@mail.ru

### Реферат

**Предмет и цель работы.** Представлены результаты исследований поведения напряженно-деформированных массивов и условий их геомеханической сбалансированности при техногенном вмешательстве во время подземной разработки месторождений. Актуальность исследования объясняется возросшей потребностью в металлах и неспособностью традиционных технологий удовлетворить ее.

**Новизна статьи** состоит в совместном рассмотрении конкурирующих технологических приемов разгрузки напряжений в равных условиях единой модели, что повышает корректность данных исследования.

**Методология работы** включает комплекс исследований: анализ литературных источников, теоретические и натурные изыскания, моделирование процессов и эксперименты. Сформулированы закономерности поведения массивов, разработаны условия их сбалансированности и оптимизированы параметры управления ими, а также рассмотрены предложения по оптимизации технологий управления.

**Результаты работы.** Показано, что средством перераспределения напряжений в массиве является закладка выработанного пространства твердеющими смесями. Обосновано, что перспективным способом управления состоянием массива является разгрузка пород от напряжений опережающей выемкой слоев по почве или по кровле рудных залежей. Приведены результаты моделирования состояния напряженно-деформированного массива при сплошном и двухстадийном порядке выемки руд с надработкой и подработкой массивов. Установлено, что минимальные сдвигения зафиксированы при одностадийной выемке с разгрузкой массива по почве. Определены преимущества сплошного порядка отработки камер: снижение напряжений, плавная передача давления и возможность снижения нормативной прочности смесей.

**Область применения результатов.** Технология может быть востребована при разработке подземным способом сложноструктурных месторождений преимущественно ценных руд.

**Выводы.** Уровень действующих в массивах напряжений снижается при сплошной выемке рудных тел с опережающей отработкой разгрузочных слоев по почве или по кровле.

**Ключевые слова:** геомеханика; подземная разработка; добыча руд; напряжения; разгрузка; опережающая выемка; порядок отработки камер.

**Введение.** Перспективы развития ресурсной базы являются задачей каждого развитого государства [1, 2]. Поэтому особым вниманием пользуются исследования, направленные на изыскание резервов оптимизации производственных процессов горного производства [3, 4].

При разработке месторождений полезных ископаемых геомеханические процессы представлены совокупностью действующих одновременно факторов, в том числе напряжений и деформаций пород и технологических возможностей управления ими.

Темпы разработки, усложнение геомеханической ситуации с понижением работ и удорожание добычи руд формируют проблему управления состоянием массива при использовании высокопроизводительных камерных технологий разработки [5, 6]. С решением задач управления вовлеченными в разработки массивами связано сохранение окружающей среды в районах горных выработок [7, 8].

Для решения проблем горного производства осуществляют комплекс исследований, в том числе: анализ литературных источников, теоретические и натурные изыскания, моделирование процессов и эксперименты [9, 10].

По результатам исследований формулируют закономерности поведения напряженно-деформированных массивов, разрабатывают условия их геомеханической сбалансированности при техногенном вмешательстве и оптимизируют параметры управления их состоянием [11, 12].

На основе анализа условий применения технологий и результатов исследований разрабатывают критерии оценки влияния технологий добычи руд на массив и предложения по оптимизации технологий управления массивом.

В заключительной части исследования ставится задача разработки участков непостоянной мощности с ускоренным переводом массивов в условия объемного сжатия и регулированием состояния массива путем разгрузки пород от напряжений. Результатирующим продуктом исследований является модель эколого-экономической оценки технологий разработки месторождений рассматриваемого типа.

Исследованиями определяются структурные элементы и нарушенность пород района Норильско-Хараелахского глубинного разлома с опережающими сбросами. Структура массивов оценивается с точки зрения распределения напряжений и деформаций. Медистые руды представляют собой тонкие и мелкие вкрапленники, перемежающиеся ослабляющими массив тонкими слоями. В основании медистых руд расположены полевошпатовые роговики мелкозернистой структуры массивной текстуры, нарушенные трещинами без заполнения. Измерениями вывалов устанавливается закономерность в их приуроченности к тектоническим нарушениям.

В результате анализа геолого-структурной ситуации обосновывается, что варианты разгрузки напряжений должны различаться по величине упругой деформации. С точки зрения плавного опускания налегающей толщи предпочтительнее нижняя подработка: верхний контакт играет роль дополнительной подушки, усиливая эффект разгрузки.

В сложных условиях локализации руд единственно возможным средством перераспределения напряжений в массиве является закладка выработанного пространства твердеющими смесями.

Сложноструктурные месторождения генетически отличаются неблагоприятными условиями разработки. Развитие горных работ еще более ослабляет устойчивость массивов с достижением максимальных значений напряженности в заключительной стадии разработки. Перспективным способом управления состоянием массива является разгрузка пород от напряжений опережающей выемкой слоев по почве или по кровле рудных залежей.

Для рудников Талнаха важно обеспечение управляемости массивом при сплошной выемке соседствующих участков месторождения различной мощности. Нуждаются в детализации вопросы: управление состоянием массивов с использованием

несущих и поддерживающих функций извлеченных руд, сохранение участков сопряжения залежей различной мощности, предотвращение негативного влияния разработки нижних горизонтов месторождения на верхние. Последнее обстоятельство имеет особую актуальность, поскольку значительная часть обрабатываемых запасов заключена в верхней части месторождения и локализована в пределах участков залежей переменной мощности.

**Целью работы** является детализация концепции управления состоянием напряженно-деформированных массивов разгрузкой от напряжений.

**Порядок проведения исследования.** Сопоставлением результатов измерений и геологических условий участков отбора кернов произведено районирование массивов. По результатам исследований массивы представляют собой дискретную среду с изменяющимися свойствами, поведение которой при нарушении геодинамического баланса сопровождается перераспределением энергии. Наиболее опасные явления в динамической форме происходят при выемке руд на участках, сложенных прочными, но разрушенными и ослабленными породами (табл. 1).

**Таблица 1. Свойства пород месторождения**  
**Table 1. Rock properties at the deposit**

Плотность пород, т/м <sup>3</sup>	Скорость волны, м/с	Прочность на сжатие, МПа	Удароопасность, %
2,78	5351	92,7	77,3
2,79	5765	111,3	89,6
2,80	5030	140,7	72,0
2,79	5000	121,4	94,2
2,75	5131	128,2	95,0
2,78	6200	116,5	94,1
2,78	4941	114,7	93,0

Результаты исследований в скважинах подтверждают наличие корреляции между природными и технологическими условиями разработки. Наличие тектонических структур объясняет динамику изменения свойств массива под влиянием налегающей толщи.

**Целью моделирования** состояния напряженно-деформированного массива является его оценка при сплошном и двухстадийном порядке выемки хрупких медистых руд с разгрузкой массивов (рис. 1).

Моделирование выполнено на стенде размерами: длина – 4 м, ширина – 0,5 м, высота – 2,5 м. Масштаб моделирования 1 : 200 с пригрузкой массива высотой в модели 1,5 м.

Породы и руды имитированы песчано-цементной смесью однородного состава в соотношении 15 : 1 при водоцементном отношении 1,7 и расходе компонентов: песок – 170 кг, цемент марки 400 – 12 кг, вода – 20 л на одну порцию, имитирующую 1 м<sup>3</sup> смеси.

В основании стенда установлены деформометры, регистрирующие величину и порядок перераспределения напряжений в процессе выемки руд и закладки. Деформометры установлены на расстояниях 3, 4, 6 см.

Количественное значение величины горного давления оценивали по прогибу пластин деформометра. Для пересчета имитируемой прочности материала использована формула Г. Н. Кузнецова.

Выполнено 6 моделей, различающихся порядком выемки панелей и способом разгрузки массива от напряжений:

- модель 1 – двухстадийная выемка (камера–целик) без разгрузки;
- модель 2 – двухстадийная выемка с разгрузкой в кровле;
- модель 3 – двухстадийная выемка с разгрузкой в почве;
- модель 4 – одностадийная выемка (сплошная) без разгрузки;
- модель 5 – одностадийная выемка с разгрузкой в кровле;
- модель 6 – одностадийная выемка с разгрузкой в почве.

Количественные значения смещения реперов сведены в табл. 2. Минимальные сдвигения зафиксированы при одностадийной выемке с разгрузкой массива по почве. Коэффициент концентрации давления в днищах моделей определен дифференцированно для первых и последних камер (табл. 3). Графики концентрации давления согласуются с показаниями реперов.

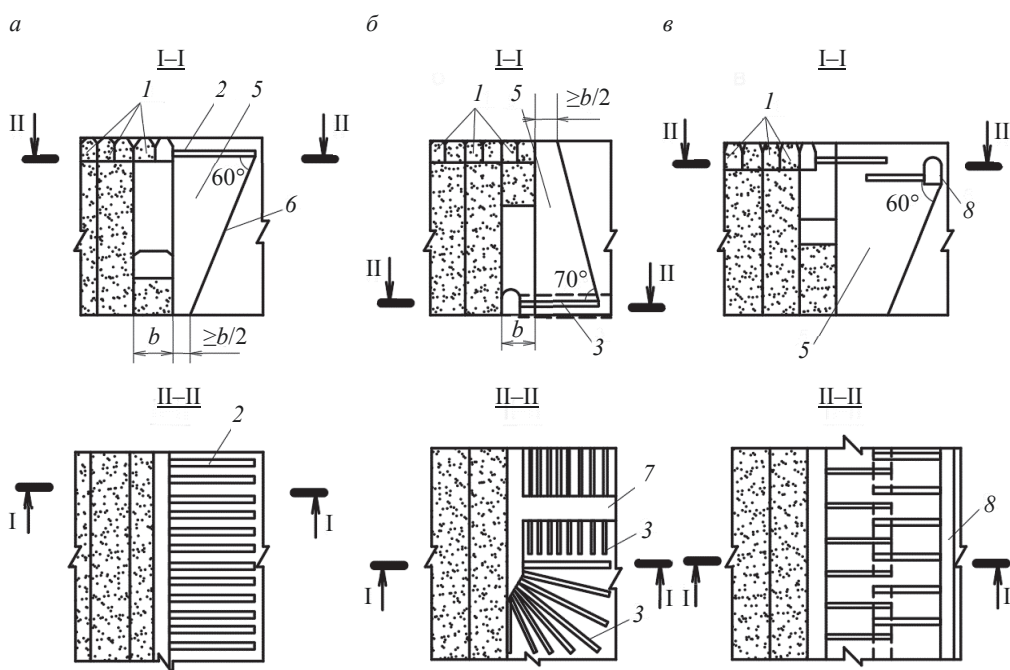


Рисунок 1. Разгрузка массива от напряжений: а – в кровле; б – в почве; в – в теле массива; 1 – выработки защитного слоя; 2, 3 – скважины; 4 – веерные скважины; 5 – защищенная зона; 6 – граница защищенной зоны; 7 – слоевой орт; 8 – транспортная выработка; l – ширина ленты  
 Figure 1. Rock mass de-stressing: a – in the roof; б – in the soil; в – in the rock mass body; 1 – workings of the protective layer; 2, 3 – wells; 4 – fan wells; 5 – protected zone; 6 – border of the protected zone; 7 – layered ort; 8 – transport working; b – tape width

**По результатам моделирования сделаны выводы:**

– при выемке руд камерами с закладкой пустот твердеющими смесями без разгрузки напряжений максимальное оседание кровли над камерами составило 0,5 мм в моделях или 105 мм в пересчете на натуру, что согласуется с данными отработки месторождения;

– наименьшие значения напряжений и пригрузки отмечены при одностадийном порядке отработки блоков с разгрузкой массива опережающей выемкой слоя по почве залежи;



– варианты с разгрузкой массива по кровле и почве различаются на 20–30 %, что находится в пределах точности для исследований горного давления ввиду сложности проведения имитационных процессов;

– разгрузка по почве предпочтительнее, так как разгружается большая высота массива.

Геомеханические преимущества сплошного порядка отработки камер заключаются в следующем:

- равномерная загрузка массива снижает напряжения;
- обеспечивается плавная передача давления налегающей толщи пород на закладку;
- нормативная прочность твердеющей смеси снижается.

**Таблица 2. Количественные значения смещения реперов, мм**  
**Table 2. Benchmark shift values, mm**

Модель	Репер									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	51	58	66	69	75	79	84	89	93	96
2	40	46	49	53	55	57	57	59	62	64
3	31	34	37	39	41	45	47	51	54	58
4	42	45	49	53	56	61	66	69	70	74
5	21	26	29	34	39	44	47	49	52	54
6	15	17	19	24	29	35	37	39	43	46

**Таблица 3. Значения коэффициента концентрации давления в днищах модели**  
**Table 3. Values of the pressure concentration coefficient at the bottoms of the model**

Блок	Камера	Модель					
		1	2	3	4	5	6
1	№ 1	0,20	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14
	№ 2	0,23	0,19	0,17	0,18	0,16	0,15
	№ 3	0,20	0,22	0,20	0,21	0,19	0,17
	№ 4	0,28	0,25	0,21	0,21	0,20	0,17
2	№ 5	0,34	0,29	0,24	0,23	0,21	0,19
	№ 6	0,39	0,33	0,27	0,25	0,21	0,22
	№ 7	0,41	0,36	0,31	0,27	0,23	0,24
	№ 8	0,47	0,39	0,34	0,30	0,25	0,20
3	№ 9	0,55	0,45	0,37	0,32	0,27	0,22
	№ 10	0,64	0,49	0,40	0,34	0,33	0,26
	№ 11	0,69	0,53	0,45	0,37	0,37	0,35
	№ 12	0,75	0,56	0,51	0,45	0,44	0,41
4	№ 13	0,88	0,61	0,55	0,48	0,47	0,44
	№ 14	0,94	0,73	0,67	0,58	0,52	0,44
	№ 15	1,01	0,81	0,74	0,65	0,57	0,47
	№ 16	1,10	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50

Сплошной порядок выемки обеспечивает отработку в более спокойном режиме, а вариант с предварительной защитой массивов позволяет реализовать резервы твердеющей закладки за счет ускорения введения в режим объемного сжатия.

Одно лишь применение сплошного порядка отработки камер не гарантирует устойчивости природных и искусственных массивов. Решающую роль в управлении массивом играет скорость создания условий объемного сжатия (табл. 4).

В заключительной части отработана модель с целью оценки связи между скоростью продвижения фронта очистных работ и темпами сдвижения налегающей толщи. Сдвижение породного массива при разных скоростях подработки по показаниям датчиков в днищах последних камер блоков приведено в табл. 5. Для этого вариант сплошной выемки с разгрузкой по почве дополнен вариантами, различающимися скоростью отработки камер. Ускорение выемки запасов на 30 % сопровождается увеличением темпов сдвижения, что можно объяснить снижением релаксационных способностей геоматериалов, которые не успевают разгрузаться от растягивающих напряжений.

**Таблица 4. Результаты моделирования порядка отработки камер**  
**Table 4. Results of modeling the order of chamber stoping sequence**

Параметр	Модель					
	1	2	3	4	5	6
	<i>Сдвижение</i>					
Высота 15 см	96	64	58	74	54	46
Высота 60 см	76	55	49	61	41	38
	<i>Напряжения</i>					
В закладке	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
В породах	2,7	2,1	1,9	1,9	1,6	1,4

**Таблица 5. Сдвижение породного массива, мм, при разных скоростях подработки**  
**Table 5. Rock mass shift, mm, at different undermining speeds**

Вариант	Камера			
	№ 4	№ 8	№ 12	№ 16
Базовый	0,19	0,20	0,44	0,50
Ускорение 15 %	0,24	0,31	0,48	0,55
Ускорение 30 %	0,28	0,41	0,51	0,62

Результаты моделирования свидетельствуют, что варианты одно- и двухстадийной выемки различаются развитием геодинамических явлений.

Эффективность предложенных мероприятий по разгрузке массива от напряжений может быть оценена по нескольким критериям: снижение разубоживания руд породами, повышение извлечения при сохранении безопасных условий выемки руд, снижение травматизма отслаивающимися кусками пород, снижение потерь при сортировке и обогащении в хвостах переработки, улучшение экологии при сокращении объема хранилищ хвостов и др.

Аспекты данного направления горного дела рассмотрены в трудах зарубежных специалистов [13–17].

**Заключение.** Участки переменной мощности медистых руд Талнахских месторождений отличаются повышенными значениями тектонической нарушенности, хрупкости и склонности к удароопасности.

Максимальные напряжения развиваются при двухстадийной отработке залежей в местах временных и постоянных целиков и на участках изменения мощности рудных тел, где напряжения превышают средние значения в 2–3 раза.

Уровень напряжений снижается при сплошной выемке рудных тел с опережающей отработкой разгрузочных слоев по почве или по кровле, которые по эффективности управления массивом сравнимы при некотором преимуществе подработки по почве.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голик В. И., Кожиев Х. Х., Качурин Н. М., Шамрин М. Ю. История и перспективы развития ресурсной базы // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 3. С. 121–132.
2. Валиев Н. Г., Пропп В. Д., Вандышев А. М. Кафедре горного дела УГГУ – 100 лет // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 8. С. 130–143.
3. Ловчиков А. В. Новая концепция механизма горно-тектонических ударов и других динамических явлений для условий рудных месторождений // Горные науки и технологии. 2020. № 5(1). С. 30–38.
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. Голик В. И., Баяр А. А. Технологии разработки участков переменной мощности месторождений Талнахского рудного района // Цветная металлургия. 2000. № 4. С. 17–20.
6. Габараев О. З., Зассеев И. А., Майстров Ю. А., Габараева А. О. Исследование процесса деформирования массива горных пород в предохранительном целике // Труды СКГМИ (ГТУ). 2021. № 28. С. 5–9.
7. Протосеня А. Г., Куранов А. Д. Методика прогнозирования напряженно-деформированного состояния горного массива при комбинированной разработке Коашвинского месторождения // Горный журнал. 2015. № 1. С. 17–20.
8. Белодедов А. А., Должиков П. Н., Легостаев С. О. Анализ механизма образования деформаций земной поверхности над горными выработками закрытых шахт // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2017. № 1. С. 160–169.
9. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Dzeranov B. V., Morozov F. S., Tuaeov G. E. Integrated instrumental monitoring of hazardous geological processes under the Kazbek volcanic center // International Journal of GEOMATE. 2018. No. 15(47). P. 158–163.
10. Баяр А. А., Голик В. И. Исследование напряженно-деформированного состояния массивов Талнахского рудного района // Цветная металлургия 2000. № 5-6. С. 7–10.
11. Габараев О. З., Абдулхалимов А. Г., Келексаев В. Б., Дзапаров В. Х. Методика расчета нагрузки на вновь возводимую крепь при реконструкции горных выработок // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2020. № 7. С. 54–58.
12. Качурин Н. М., Стась Г. В., Корчагина Т. В., Змеев М. В. Геомеханические и аэрогазодинамические последствия подработки территорий горных отводов шахт Восточного Донбасса // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2017. Вып. 1. С. 170–182.
13. Naithani A. K. Rock mass classification and support design using the Q-system // Journal of the Geological Society of India. 2019. Vol. 94. P. 443. DOI: 10.1007/s12594-019-1336-0
14. 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. P. 221–247. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.06.008
15. 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. P. 105–117. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105457
16. 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. P. 47–62.
17. Huang P., Zhang J., Spearing A. J. S., Li M., Yan X., Liu S. Deformation response of roof in solid backfilling coal mining based on viscoelastic properties of waste gangue // International Journal of Mining Science and Technology. 2021. Vol. 31. No. 2. P. 279–289. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.01.004

Поступила в редакцию 20 февраля 2023 года

#### Сведения об авторах:

**Голик Владимир Иванович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горного дела Северо-Кавказского государственного технологического университета. E-mail: v.i.golik@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>

**Валиев Нияз Гадым оглы** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой горного дела Уральского государственного горного университета, главный редактор издания «Известия вузов. Горный журнал». E-mail: [gft.gd@m.ursmu.ru](mailto:gft.gd@m.ursmu.ru); <https://orcid.org/0000-0002-5556-2217>

**Шарипзянова Гюзель Харрясовна** – кандидат технических наук, доцент, проректор по учебной работе Московского политехнического университета. E-mail: guzel@mtw.ru; <https://orcid.org/1560-3644-2023-2-00-00>

**Келексаев Валерий Борисович** – кандидат технических наук, начальник строительной лаборатории Южно-Российского государственного политехнического университета. E-mail: kelias2022@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6908-9418>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-29-37

## Controlling the state of stressed and strained rock masses by means of de-stressing

Vladimir I. Golik<sup>1</sup>, Niiaz G. Valiev<sup>2</sup>, Giuzel Kh. Sharipzianova<sup>3</sup>, Valerii B. Kelekhsaev<sup>4</sup>

<sup>1</sup> North Caucasian State Technological University, Vladikavkaz, Russia.

<sup>2</sup> Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

<sup>3</sup> Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia.

<sup>4</sup> Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia.

### Abstract

**Research subject and objective.** The behaviour of stressed and strained rock masses was studied as well as the conditions of their geomechanical balance under technogenic intervention in the course of underground mining. The research results are presented. The research relevance is explained by high demand in metals and the inability of traditional technologies to meet the demand.

**Research novelty** is viewed as the concurrent examination of competing processes of de-stressing under equal conditions of a single model, which increases the research data accuracy.

**Methods of research** involve the literary sources analysis, theoretical and natural research, process modeling, and experiments. The patterns of rock masses behavior are formulated, their balance conditions are developed and control parameters optimized. Suggestions on the control technology optimization are considered.

**Research results.** It is shown that goaf backfilling with hardening mixtures is the means of redistributing stresses in the rock mass. It is justified that de-stressing by means of advanced cutting of layers along the soil or roof of ore deposits is a promising way of rock mass state control. The paper presents the results of modeling the state of stressed and strained rock mass in the course of continuous mining and two-stage extraction of ore with rock mass overworking and underworking. Minimum displacements were recorded during a single-stage excavation with de-stressing along the soil. The advantages of a continuous sequence of chamber stoping are determined, such as stress reduction, smooth pressure transfer and the possibility of reducing the normative strength of mixtures.

**Scope of the results.** The technology can be relevant for complex structure deposits development, mainly valuable ores, by underground method.

**Conclusions.** The level of stresses acting in rock masses decreases with ore bodies continuous mining advanced cutting of relief layers along the soil or over the roof.

**Keywords:** geomechanics; underground mining; ore mining; stresses; de-stressing; advanced cutting; sequence of chamber stoping.

### REFERENCES

1. Golik V. I., Kozhiev Kh. Kh., Kachurin N. M., Shamrin M. Iu. History and prospects of resource base development. *Izvestia Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle = Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences.* 2022; 3: 121–132. (In Russ.)

2. Valiev N. G., Propp V. D., Vandyshv A. M. The 100th anniversary of the department of mining engineering of UrSMU. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2020; 8: 130–143. (In Russ.)

3. Lovchikov A. V. A new concept of the mechanism of rock-tectonic bursts and other dynamic phenomena in conditions of ore deposits. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia).* 2020; 5(1): 30–38. (In Russ.)

4. Dzaparov V. Kh., Kharebov G. Z., Stas V. P., Stas P. P. Research of drymixtures based on production waste for underground construction. *Sukhie stroitelnye smesi = Dry Building Mixes.* 2020; 1: 35–38. (In Russ.)

5. Golik V. I., Baiar A. A. Reservoir management plans for the zones of variable thickness of the Talnakh ore district deposits. *Tsvetnaia metallurgiya = Non-Ferrous Metallurgy.* 2000; 4: 17–20. (In Russ.)

6. Gabaraev O. Z., Zasseev I. A., Maistrov Iu. A., Gabaraeva A. O. Study of the process of rock mass deformation in the stope. *Trudy SKGMI (GTU) = Proceedings of the North Caucasian Mining Metallurgical Institute (State Technological University)*. 2021; 28: 5–9. (In Russ.)
7. Protosenia A. G., Kuranov A. D. Procedure of rock mass stress-strain state forecasting in hybrid mining of the Koashvin deposit. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2015; 1: 17–20. (In Russ.)
8. Belodedov A. A., Dolzhikov P. N., Legostaev S. O. Analyzing mechanism of forming earth surface deformations over liquidated mines mining workings. *Izvestiia Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle = Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2017; 1: 160–169. (In Russ.)
9. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Dzeranov B. V., Morozov F. S., Tuaeov G. E. Integrated instrumental monitoring of hazardous geological processes under the Kazbek volcanic center. *International Journal of GEOMATE*. 2018; 15(47): 158–163.
10. Baiar A. A., Golik V. I. Studying the stress-strain state of the Talnakh ore district rock masses. *Tsvetnaya metallurgiya = Non-Ferrous Metallurgy*. 2000; 5-6: 7–10.
11. Gabaraev O. Z., Abdulkhalimov A. G., Kelekhsaev V. B., Dzaparov V. Kh. Procedure for calculation of load on newly erected support during reconstruction of mine workings. *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo = Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production*. 2020; 7: 54–58. (In Russ.)
12. Kachurin N. M., Stas G. V., Korchagina T. V., Zmeev M. V. Geomechanical and aerogasdynamic consequences of underworking mining leases territories of Eastern Donets basin mines. *Izvestiia Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle = Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2017; 1: 170–182. (In Russ.)
13. Naithani A. K. Rock mass classification and support design using the Q-system. *Journal of the Geological Society of India*. 2019; 94: 443. Available from: doi: 10.1007/s12594-019-1336-0
14. 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; 13(1): 221–247. Available from: doi: 10.1016/j.jrmge.2020.06.008
15. Sepehri M., Apel D. B., Adee 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; 266: 105–117. Available from: doi: 10.1016/j.enggeo.2019.105457
16. Li C. C. Dynamic rock support in burst-prone rock masses. In: *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium*. 2018; 1: 47–62.
17. Huang P., Zhang J., Spearing A. J. S., Li M., Yan X., Liu S. Deformation response of roof in solid backfilling coal mining based on viscoelastic properties of waste gangue. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2021; 31(2): 279–289. Available from: doi: 10.1016/j.ijmst.2021.01.004

Received 19 February 2023

#### Information about the authors:

**Vladimir I. Golik** – DSc (Engineering), Professor, professor of the Department of Mining, North Caucasian State Technological University. E-mail: v.i.golik@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>

**Niiaz G. Valiev** – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Mining, Ural State Mining University, Editor in Chief of Minerals and Mining Engineering. E-mail: [gfg.gd@m.ursmu.ru](mailto:gfg.gd@m.ursmu.ru); <https://orcid.org/0000-0002-5556-2217>

**Giuzel Kh. Sharipzianova** – PhD (Engineering), Associate Professor, vice-rector for education, Moscow Polytechnic University. E-mail: [guzel@mtw.ru](mailto:guzel@mtw.ru); <https://orcid.org/1560-3644-2023-2-00-00>

**Valerii B. Kelekhsaev** – PhD (Engineering), Head of the Construction Technology Laboratory, Platov South-Russian State Polytechnic University. E-mail: [keliia2022@mail.ru](mailto:keliia2022@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0004-6908-9418>

**Для цитирования:** Голик В. И., Валиев Н. Г., Шарипзянова Г. Х., Келекхсаев В. Б. Управление состоянием напряженно-деформированных массивов разгрузкой от напряжений // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 5. С. 29–37. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-29-37

**For citation:** Golik V. I., Valiev N. G., Sharipzianova G. Kh., Kelekhsaev V. B. Controlling the state of the stressed and strained rock masses by means of de-stressing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 5: 29–37 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-29-37

## Изменение температуры продуктов детонации скважинного заряда эмульсионного взрывчатого вещества

Горинов С. А.<sup>1\*</sup>, Тагиев С. М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Глобал Майнинг Эксплозив-Раша», г. Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО «КРУ-Взрывпром», г. Кемерово, Россия

\*e-mail: akaz2006@yandex.ru

### Реферат

**Введение.** Рассмотрены вопросы, связанные с изучением изменения температуры продуктов детонации (ПД), образующихся при взрыве скважинного заряда эмульсионного взрывчатого вещества (ЭВВ), в период их расширения в скважине в зависимости от времени, что позволяет оценить возможность воспламенения угольной пыли при контакте с ПД в период формирования взрывной полости.

**Цель работы.** Для повышения безопасности взрывных работ при добыче угля с использованием ЭВВ разработать методику определения температуры ПД, образующихся при взрыве скважинных зарядов ЭВВ, в период их расширения в скважине в зависимости от времени.

**Методология.** В основу методики расчета температуры ПД, образующихся при взрыве скважинного заряда ЭВВ, в период их расширения в скважине в зависимости от времени положены аналитические исследования, основанные на закономерностях как расширения ПД при взрыве ЭВВ, так и расширения скважины, базирующиеся на зонной теории действия взрыва заряда в твердой среде. В качестве модели, описывающей закономерности расширения ПД, принята модель политропического газа с показателем, представленным непрерывной функцией от текущей плотности ПД.

**Результаты.** Представлена методика определения температуры ПД, образующихся при взрыве скважинных зарядов ЭВВ, в период их расширения в скважине в зависимости от времени. Показано, что при нижнем иницировании зарядов влияние расстояния от места иницирования на скорость снижения температуры ПД сказывается на удалении менее 5 м и только в начальный период расширения ПД (в течении первых 50–100 мкс). С возрастанием времени с момента прихода детонационной волны в любое сечение заряда скорость снижения температуры ПД со временем становится независимой от места расположения сечения по длине заряда. Выявлено сильное влияние температуры взрыва ЭВВ на размеры частиц, способных к воспламенению при контакте с ПД на начальной стадии расширения последних, поэтому для снижения опасности возгорания малообводненных угольных пластов рекомендовано применять ЭВВ с температурой взрыва не выше 1800 К.

**Выводы.** Полученные в статье закономерности позволяют повысить безопасность взрывных работ при добыче угля с использованием ЭВВ.

**Ключевые слова:** эмульсионное взрывчатое вещество; продукты детонации; температура продуктов детонации; воспламенение угольной пыли; взрывчатое разложение.

**Введение.** Эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ) благодаря своей водостойкости, относительной безопасности, экономичности и хорошим взрывным способностям нашли широкое распространение при добыче твердых полезных ископаемых [1].

Для рационального применения данных взрывчатых веществ (ВВ) требуется знание их термодинамических характеристик, каковыми обычно являются теплота

взрыва и(или) начальное детонационное давление. Поэтому оценка данных параметров наряду со скоростью детонации является наиболее востребованной при разработке эффективных технологических методов применения ЭВВ [2].

Однако при добыче угля с использованием взрывных технологий возникает опасность возгорания угля (угольной пыли) и горючих газов [3], для детального анализа условий воспламенения которых необходимо знание закономерностей изменения температуры продуктов детонации (ПД) после взрыва заряда ВВ. Аналитическое описание данных изменений определяется термохимическими характеристиками процесса и уравнением состояния взрывных газов [4].

Известны два метода определения детонационных параметров ВВ: Ландау–Станюковича, основанный на теоретически обоснованной политропической зависимости давления детонации от удельного объема ПД [5], и метод Камлета, являющийся эмпирическим обобщением опытных данных [6]. Однако эти методы направлены преимущественно на определение скорости детонации и детонационного давления.

**Теоретическая оценка температуры ПД ВВ** обычно осуществляется с использованием следующих методов:

– JWL-метод (Джонса–Вилкенса–Ли), основанный на полуэмпирическом уравнении состояния ПД с последующей подгонкой коэффициентов в данном уравнении к эмпирическим данным [4];

– ВКВ-метод (Беккера–Кистяковского–Вильсона), в основе которого также лежит полуэмпирическое уравнение состояния ПД, характеристические параметры которого определяются на основе экспериментальных данных (*Mader C. Detonation performance calculations using the Kistiakowsky-Wilson equation of state. Report No. LA-2613 of Los Alamos Scientific Laboratory, 1961.*);

– метод Кешаварца, основанный на подборе простых зависимостей между параметрами ВВ и взрывных газов, при которых наблюдаются относительно малые отклонения экспериментальных и расчетных значений [7];

– метод Нобла–Абеля, в котором используется модифицированное для высоких давлений и плотностей уравнение Ван-дер-Ваальса для реальных газов [8].

Анализ практики применения **JWL-метода** для расчета термодинамических параметров ПД ВВ показывает, что его корректность обеспечивается подбором значений подгоночных параметров в уравнениях состояния для соответствия экспериментальным данным, полученным в опытах «тест-цилиндра». Последнее осуществимо лишь для зарядов ВВ, имеющих малый диаметр. Данное обстоятельство обуславливает преимущественное применение JWL-метода для описания детонации индивидуальных ВВ. При этом необходимо отметить, что в работе [9] описано определение JWL-параметров для аммонита 6 ЖВ с проведением опыта «тест-цилиндр» для заряда диаметром 60 мм. Эксперименты «тест-цилиндр» для зарядов ЭВВ 100 мм, выполненные на уникальном оборудовании, были направлены на оценку работоспособности ЭВВ путем измерения энергии Гарнея и для оценки JWL-параметров не использовались [10].

В работе [11] показано, что применение **ВКВ-метода** для описания детонации ЭВВ дает значительные расхождения с экспериментальными данными. Данное обстоятельство авторы [11] связывают с сильным влиянием структуры ЭВВ на детонационные процессы, что не отражено в ВКВ методе. Однако в работе [12] при изучении детонации ЭВВ, сенсibilизированного стеклянными микросферами, использовали ВКВ-метод. Для этого в параметры уравнения состояния вносились коррективы, отражающие результаты выполненных опытов «тест-цилиндр».

Опыты «тест-цилиндр» удалось реализовать вследствие малого критического диаметра рассматриваемых ЭВВ, при использовании наливных ЭВВ, имеющих значительный критический диаметр, это практически неосуществимо.

**Метод Кешаварца** [7], основанный на подборе простых зависимостей между параметрами ВВ и взрывных газов, направлен на упрощение расчетов термодинамических параметров индивидуальных ВВ, термодинамические характеристики которых хорошо известны, поэтому для определения параметров детонации ЭВВ непригоден.

Применение **метода Нобла–Абеля** [8] допускается когда не требуется высокая точность в определении параметров детонации ВВ, особенно для относительно низкоплотных ВВ, каковыми являются ЭВВ. Однако в этом случае большое значение приобретает правильная оценка величины коволюма ПД [13], так как расчеты при грубом определении химического состава ПД и их коволюма [14] приводят к получению значений температуры продуктов взрыва ЭВВ, значительно отличающихся от экспериментальных данных [15].

**Актуальность.** Отсутствие общепринятой методики определения закономерностей изменения температуры ПД после взрыва скважинного заряда ЭВВ делает актуальными и важными для детализации мер безопасности при взрывании угольных массивов с использованием ЭВВ оценочные расчеты данных изменений температуры, представленные в настоящей работе.

**Результаты исследований.** Положим, что при детонации цилиндрического заряда ЭВВ массой  $M$ , имеющего диаметр больше предельного, происходит химическая реакция согласно уравнению (состояние ПД в точке Чемпена–Жуге):

$$\sum a_m A_m = \sum b_i X_i + \sum f_j Y_j,$$

где  $a_m, b_i, f_j$  – мольные коэффициенты;  $A_m$  – начальные вещества;  $X_i$  – газообразные продукты взрыва;  $Y_j$  – твердотельные продукты взрыва.

Тогда, пренебрегая потерями тепла в процессе непосредственного детонационного разложения ВВ, на основании уравнения теплового баланса имеем следующее равенство:

$$(T_B - T_0)R \left[ \sum b_i \bar{c}_V^{(X_i)}(T_B) + \sum f_j \xi_j \right] = M Q_V, \quad (1)$$

где  $T_0, T_B$  – начальная температура ВВ и температура взрыва ВВ (температура, которую приобретают ПД при мгновенном выравнивании давления);  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $\bar{c}_V^{(X_i)}$  – относительная мольная теплоемкость,  $\bar{c}_V^{(X_i)} = C_V^{(X_i)} / R$ ,  $C_V^{(X_i)}$  – мольная теплоемкость  $X_i$ -газа при температуре  $T_B$ , определяемая на основании соотношений Эйнштейна–Дебая [5];  $\xi_j$  – количество атомов в твердотельном  $Y_j$ -веществе;  $Q_V$  – удельная теплота взрыва.

Разрешая (1) методом итераций, определяем  $T_B$  [16].

Неидеальность детонации ЭВВ, обусловленная влиянием внутренней структуры данных ВВ на протекание детонационного процесса, относительно невысокие плотности ЭВВ и величины детонационного давления (практически значимая область плотностей ЭВВ находится в пределах 0,9–1,3 г/см<sup>3</sup>, а начальное детонационное давление обычно имеет значение 7–10 ГПа [1, 16]) позволяют при оценке изменений температуры продуктов детонации в ходе их расширения полагать,



что внутренняя энергия ЭВВ определяется преимущественно ее тепловой составляющей. Тогда зависимость температуры ПД ЭВВ от их удельного объема можно записать в виде [4, 5]:

$$T = T_{\text{н}} (\rho/\rho_{\text{н}})^{g(\rho)}, \quad (2)$$

где  $T_{\text{н}}$ ,  $T$  – начальная температура ПД и их текущая температура, соответственно;  $\rho_{\text{н}}$ ,  $\rho$  – начальная плотность продуктов взрыва и их текущая плотность, соответственно;  $g(\rho)$  – аналог коэффициента Грюнайзена ПД [4],  $g(\rho) = G(\rho) - 1$ ,  $G(\rho)$  – показатель изэнтропы, функционально зависящий от плотности ПД.

Согласно [4, 5]  $G(\rho)$  должно удовлетворять следующим граничным условиям:

$$G(\rho \rightarrow \rho_{\text{н}}) = k \text{ и } G(\rho \rightarrow 0) = \gamma, \quad (3)$$

где  $k$  и  $\gamma$  – коэффициенты политропы при плотностях ПД, близких к  $\rho_{\text{н}}$ , и адиабаты при малых значениях плотности ПД, соответственно [17].

При оценке изменения температуры ПД ЭВВ в качестве показателя изэнтропы принимаем удовлетворяющую условиям (3) функцию  $G(\rho)$ :

$$G(\rho) = \gamma + (k - \gamma)\rho/\rho_{\text{н}}. \quad (4)$$

Согласно [5],  $T_{\text{н}} = 2kT_{\text{в}}/(k + 1)$  и  $\rho_{\text{н}} = (k + 1)\rho_0/k$ , где  $\rho_0$  – начальная плотность ВВ. Тогда на основании (2), (4) получаем следующую зависимость температуры ПД от их плотности (удельного объема):

$$T/T_{\text{в}} = 2(\rho_0/\rho)[k\rho/(k + 1)\rho_0]^G = 2(V/V_0)[kV_0/(k + 1)V]^G, \quad (5)$$

где  $G = k(k - \gamma)\rho/(k + 1)\rho_0 + \gamma$ ;  $V_0$ ,  $V$  – начальный удельный объем ЭВВ и текущий удельный объем ПВ.

На рис. 1 представлены зависимости отношения  $T/T_{\text{в}}$  от относительного удельного объема ПД ( $V/V_0$ ), полученные на основании (5), при различных значениях  $k$ . Показатель адиабаты  $\gamma = 1,25$ . Для сравнения на этом же рисунке приведена аналогичная зависимость, полученная на основании JWL-метода при  $k = 2,5$  и величине коэффициента Грюнайзена, равной 0,35.

При ведении взрывных работ на открытой разработке угольных пластов широкое распространение получила скважинная отбойка с использованием ЭВВ и нижним способом инициирования зарядов.

Рассмотрим изменение температуры ПД с течением времени по длине скважинного заряда. Введем линейную систему координат  $Ox$  с осью  $x$ , направленной вдоль оси нисходящего скважинного заряда в направлении к устью скважины. Начало координат совместим с местом инициирования заряда.

При взрыве скважинного заряда ВВ ПД участвуют в сложном движении, обусловленном как их движением вслед за фронтом детонации, так и их радиальным расширением вследствие увеличения диаметра скважины под действием давления ПД. Для изучения характера изменения температуры ПД воспользуемся уравнением (5).

Первоначально рассмотрим падение плотности ПД, обусловленное только их аксиальным движением вслед за фронтом детонационной волны.

При нижнем инициировании скважинного заряда детонационная волна распространяется вверх по заряду, при этом движение ПД вслед за фронтом детонационной волны описывается следующими уравнениями [5].

I. На участке  $0 \leq x \leq Dt / 2$ :

$$u = 0; \quad c = D / 2. \tag{6}$$

II. На участке  $Dt / 2 \leq x \leq Dt$ :

$$\begin{cases} x = (c + u)t; \\ 2c / (k + 1) - u = D / (k - 1), \end{cases} \tag{7}$$

где  $x$  – расстояние от начала координат до рассматриваемого сечения;  $D$  – скорость детонации;  $t$  – текущее время (начало отсчета – момент инициирования заряда);  $u$  – массовая скорость ПД в данном сечении;  $c$  – скорость распространения звука в ПД в данном сечении.

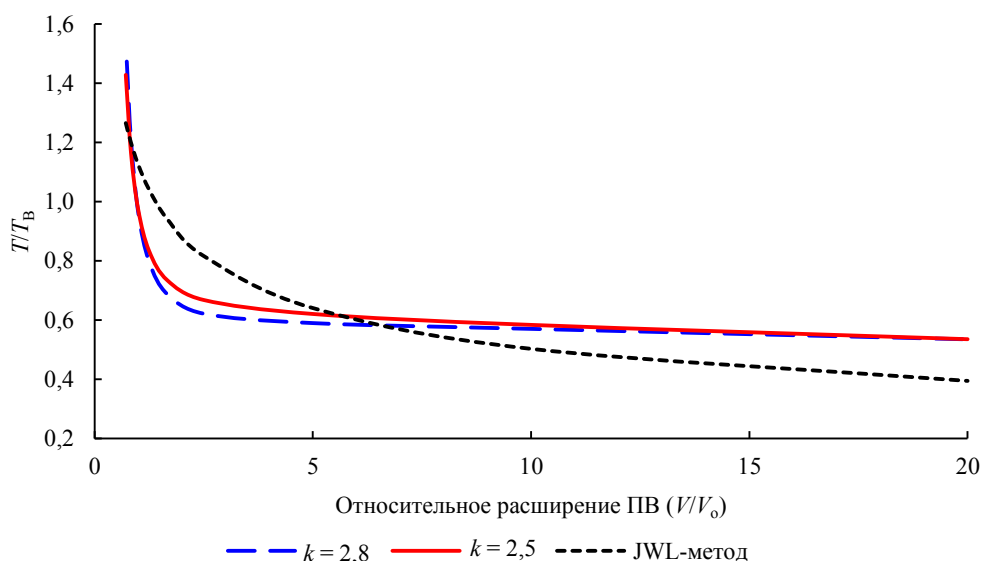


Рисунок 1. Зависимости  $T/T_B$  от относительного расширения ПД при разных значениях  $k$  (показатель  $\gamma = 1,25$ )

Figure 1. Dependences of  $T/T_B$  on detonation products relative expansion under different values of  $k$  (index  $\gamma = 1.25$ )

Согласно [5], для ПД выполняется равенство

$$\rho / \rho_n = (c / c_n)^{\frac{2}{k-1}}, \tag{8}$$

где  $c_n$  – скорость звука в ПД, имеющих плотность  $\rho_n$ ,  $c_n = kD / (k + 1)$ .

На основании (5)–(8), учитывая, что массовая скорость за фронтом детонационной волны  $u_n = D / (k + 1)$ , определяем плотности ПД, изменение которых обусловлено аксиальным движением ПД вслед детонационной волне.

I. На участке  $0 \leq x \leq Dt / 2$ , представляющем область стационарного состояния ПД до прихода аксиальной волны разряжения, возникающей в ПД после детонации всего заряда:

$$\rho_1 = 2\rho_0 \left[ (k + 1) / 2k \right]^{\frac{k+1}{k-1}}. \tag{9}$$

II. На участке  $Dt / 2 < x \leq Dt$ :

$$\rho_{II} = [(k+1)\rho_0 / k] \left[ (1/k) + (k-1)x / (kDt) \right]^{2/k-1}. \quad (10)$$

Однако падение плотности ПД в скважине происходит также вследствие их радиального расширения. Определим на основании газодинамических решений для скользящей детонационной волны, представленных в работе [16], начальную скорость стенок скважины  $w_0$  в перпендикулярном к оси заряда направлении:

$$w_0 = \left( 2k / (k^2 - 1) \right) \left\{ 1 - \left[ (k+1)(A + Bw_0)\rho_{cp}w_0 / (\rho_0 D^2) \right]^{2k/k-1} \right\}, \quad (11)$$

где  $\rho_{cp}$ ,  $A$ ,  $B$  – плотность и параметры ударной адиабаты среды, окружающей заряд, соответственно.

Радиус расширяющейся скважины  $r$ :

$$r = r_0 + \bar{w}t, \quad (12)$$

где  $r_0$ ,  $\bar{w} = w_0/2$  – начальный радиус скважины и средняя скорость расширения скважины, соответственно. Уравнение (12) выполняется при  $0 \leq t \leq \tau_*$ , где  $\tau_*$  – время достижения максимального расширения скважины на основании,

$$\tau_* = 2(r_* - r_0) / w_0, \quad (13)$$

где  $r_*$  – максимальный радиус скважины.

В соответствии с (5), (9)–(13) отношение температуры ПД в сечении заряда, имеющем координату  $x$ , в момент времени  $t = x/D + \tau$  ( $x/D$  – время прихода детонационной волны в сечение  $x$ ) к температуре взрыва равно следующему.

I. При  $\tau \leq x \leq D$  (до прихода стационарной волны):

в случае  $0 \leq \tau \leq 2(r_* - r_0) / w_0$

$$T(x, \tau) / T_B = (2k / (k+1)) \left\{ \left[ (1/k) + (k-1)x / (k(x + D\tau)) \right]^{2/k-1} \left[ r_0 / (r_0 + \bar{w}\tau) \right]^2 \right\}^G; \quad (14)$$

в случае  $\tau > 2(r_* - r_0) / w_0$

$$T(x, \tau) / T_B = (2k / (k+1)) \left\{ \left[ (1/k) + (k-1)x / (k(x + D\tau)) \right]^{2/k-1} \left[ r_0 / r_* \right]^2 \right\}^G. \quad (15)$$

II. При  $x / D < \tau < 3(L - x) / D$  (после прихода в сечение  $x$  стационарной волны, но до прихода аксиальной волны разряжения,  $L$  – длина заряда):

$$T(x, \tau) / T_B = (2k / (k+1)) \left\{ \left[ (k+1) / 2k \right]^{2/k-1} \left( r_0 / r_* \right)^2 \right\}^G. \quad (16)$$

Для того, чтобы воспользоваться уравнениями (14)–(16), необходимо определить значение максимального радиуса скважины  $r_*$  [18, 19].

Согласно [19]:

$$r_* = r_o (P_*/P_m)^{\frac{1}{2k}},$$

где  $P_*$  – среднее детонационное давление,  $P_* = \rho_o D^2 / 2(k+1)$ ;  $P_m$  – давление, удерживаемое средой,  $P_m = -C \operatorname{ctg} \varphi + (C \operatorname{ctg} \varphi + \sigma_{\text{сж}}) \left( \mu / \left[ \sigma_{\text{сж}} \left( 1 + \ln \left( \sigma_{\text{сж}} / \sigma_p \right) \right) \right]^{\frac{\sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} \right)$ ,  $C$  – сцепление;  $\varphi$  – угол внутреннего трения;  $\mu$  – модуль сдвига среды;  $\sigma_{\text{сж}}$ ,  $\sigma_p$  – пределы прочности среды на сжатие и разрыв, соответственно.

В качестве примера рассмотрим взрыв скважинного заряда ЭВВ 200 мм в угольном массиве. Примем следующие значения параметров, характеризующих ЭВВ и угольные массивы:

- ЭВВ [16] –  $\rho_o = 1150 \text{ кг/м}^3$ ;  $D = 4800 \text{ м/с}$ ;  $k = 2,7$ ;  $\gamma = 1,25$ ;
- уголь [20, 21] –  $C = 5,5 \text{ МПа}$ ;  $\varphi = 36^\circ$ ;  $\mu = 5 \text{ ГПа}$ ;  $\sigma_{\text{сж}} = 15,0 \text{ МПа}$ ;  $\sigma_p = 2,0 \text{ МПа}$ ;
- $A = 1800 \text{ м/с}$ ;  $B = 0,9$ .

Результаты расчетов по уравнениям (14)–(16) представлены в виде зависимостей отношения температуры ПД к температуре взрыва от времени прихода детонационной волны в различные сечения скважинного заряда на рис. 2.

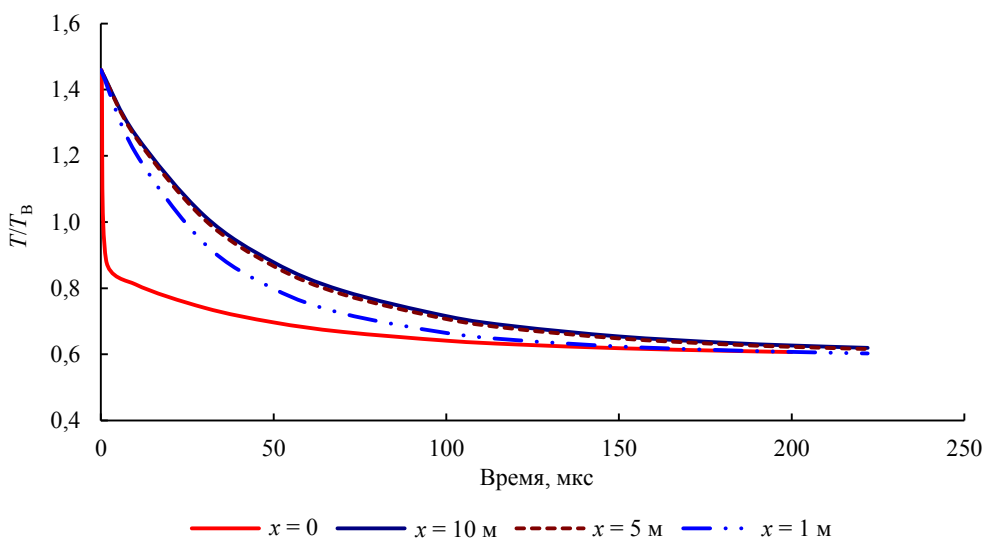


Рисунок 2. Зависимости отношения температуры ПД к температуре взрыва от времени прихода детонационной волны в разные сечения скважинного заряда

Figure 2. Dependence of detonation products and explosion temperatures ratio on the time of the detonation wave arrival at various borehole charge sections

Анализ рис. 2 показывает, что при  $\tau > 100$  мкс влияние координаты  $x$  на величину температуры ПД становится незначительным.

Оценим возможность воспламенения угольной пыли во время взрыва рассматриваемого заряда при непосредственном контакте с ПД.

Согласно экспериментальным данным, температура взрыва ЭВВ имеет величину 1800–2200 К [15]. Время прогрева частиц угольной пыли до воспламенения летучих при температуре окружающей частицу газовой среды  $T_{\text{ч}} \geq 1200 \text{ К}$  и низкой концентрации кислорода (10 % и менее) для широкого круга углей удовлетворяет эмпирическому уравнению [22]:

$$\tau_{в.л} = K_{в.л} \cdot 5,3 \cdot 10^{14} T_{ч} \cdot \delta^{0,8},$$

где  $K_{в.л}$  – эмпирический коэффициент, изменяющийся в пределах 0,6–1,4 в зависимости от месторождения;  $\delta$  – размер частицы.

На рис. 3 представлены зависимости размеров частиц угольной пыли, способных воспламениться от контакта с ПД ЭВВ, от времени прихода детонационной волны в данное сечение скважинного заряда для разных значений температуры взрыва. При расчетах полагали, что  $K_{в.л} = 0,8$  (среднее значение для кузбасских углей [22]) и температура среды, окружающей частицу, составляет не меньше 1200 К.

Анализ зависимостей, изображенных на рис. 3, показывает сильное влияние температуры взрыва ЭВВ на размеры частиц, способных к воспламенению при контакте с ПД на начальной стадии их расширения. Учитывая, что масса фракции угольных частиц с размером не более заданного резко уменьшается с уменьшением данного размера, для снижения опасности возгорания массивов целесообразно уменьшать массу потенциально способных к возгоранию частиц. Для этого при отработке малообводненных угольных пластов Кузбасса можно рекомендовать к применению ЭВВ с температурой взрыва не выше 1800 К.

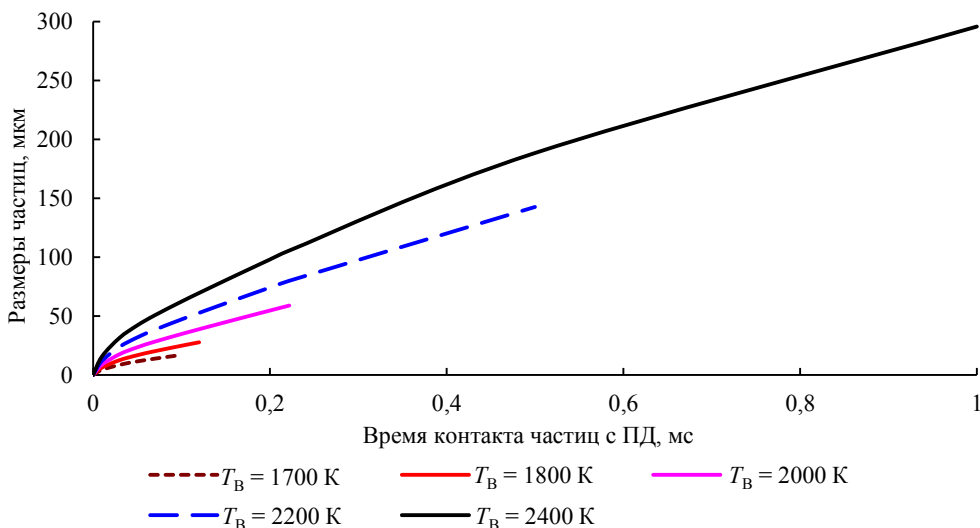


Рисунок 3. Зависимости размеров частиц угольной пыли, способных воспламениться от контакта с ПД ЭВВ, во время расширения взрывной полости при разных температурах взрыва

Figure 3. Dependences of the sizes of coal dust particles capable of igniting upon contact with emulsion explosive detonation products during the explosive chamber expansion at different explosion temperatures

Последнее достигается выбором соответствующего рецептурного состава ЭВВ. Однако данный вопрос выходит за рамки настоящей работы.

**Заключение.** В работе представлена методика определения температуры ПД, образующихся при взрыве скважинных зарядов ЭВВ, при их расширении в скважине в зависимости от времени.

Показано, что при нижнем инициировании зарядов влияние расстояния от места инициирования на скорость снижения температуры ПД сказывается на удалении менее 5 м и только в начальный период расширения ПД (в течении первых 100 мкс). С возрастанием времени с момента прихода детонационной волны в любое сечение заряда скорость снижения температуры ПД со временем становится одинаковой по всей длине заряда.

Показано сильное влияние температуры взрыва ЭВВ на размеры частиц, способных к воспламенению при контакте с ПД на начальной стадии их расширения, поэтому для снижения опасности возгорания угольных массивов рекомендовать к применению ЭВВ с температурой взрыва не выше 1800 К. Последнее достигается выбором соответствующего рецептурного состава ЭВВ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wang Xuguang. Emulsion explosives. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994. 380 p.
2. Козырев С. А., Власова Е. А., Соколов А. В. Оценка фактических энергетических характеристик эмульсионных взрывчатых веществ по данным экспериментального определения скорости детонации // Горный журнал. 2020. № 9. С. 47–53. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.06
3. Калаякин С. А. Безопасность взрывных работ в газоносных массивах угольных шахт. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2012. 524 p.
4. Валько В. В., Образ О. П., Гасилов В. А., Соловьева В. С., Савенко Н. О. Уравнения состояния продуктов детонации взрывчатых веществ. М.: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2021. 39 с. DOI: 10.20948/prgr-2021-51
5. Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. М.: Физматгиз, 1959. 800 с.
6. Kamlet M. J., Jacobs S. J. Chemistry of detonation. I. A simple method for calculating detonation properties of C-H-N-O explosives // Journal of Chemical Physics. 1968. Vol. 48. P. 23–35. DOI: 10.1063/1.1667908
7. Keshavarz M. H., Jafari M., Ebadpour R. Simple method to calculate explosion temperature of ideal and non-ideal energetic compounds // Journal of Energetic Materials. 2019. Vol. 38. No. 4. P. 1–8. DOI: 10.1080/07370652.2019.1679284
8. Le Metayer O., Saurel R. The Noble-Abel stiffened-gas equation of state // Physics of Fluids. 2016. Vol. 28. No. 4. P. 1–33. DOI: 10.1063/1.4945981.hal-01305974f
9. Селезнев А. А., Исаков А. М., Устимкин П. А., Зоткин С. П. Определение параметров УРС JWL для промышленного ВВ 6ЖВ на основе данных цилиндр-теста // Экстремальное состояние вещества. Детонация. Ударные волны: тезисы докладов XXIII Харитоновских чт. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2022. С. 65–69.
10. Nyberg U., Arvanitidis L., Olsson V., Ouchterlony F. Large size cylinder expansion tests on ANFO and gassed bulk explosives // Explosives and Blasting Technique. Lisse: Swets @ Zeitlinger. 2003. P. 181–213. DOI: 10.1201/9781439833476.ch23
11. Lee J., Persson P. A. Detonation behaviour of emulsion explosives // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1990. Vol. 15. No. 5. P. 208–216.
12. Paplinski A., Marena A. Investigation of the influence of cooling salts upon the explosive performance of emulsion explosives // Central European Journal of Energetic Materials. 2015. No. 12(3). P. 523–535.
13. Кук М. А. Наука о промышленных взрывчатых веществах. М.: Недра, 1980. 453 с.
14. Меньшиков П. В., Сеницын В. А., Шеменов В. Г. Определение детонационного давления и температуры взрыва промышленных эмульсионных взрывчатых веществ, применяемых на карьерах Урала // Advances in Current Natural Sciences. 2017. № 7. С. 96–102.
15. Silvestrov V. V., Bordzilovskii S. A., Karakhanov S. M., Plastinin A. V. On possibility detonation products temperature measurements of emulsion explosives // Archives of Metallurgy and Materials. 2014. Vol. 59. Issue 3. P. 1151–1154. DOI: 10.2478/amm-2014-0200
16. Горинов С. А. Иницирование и детонация эмульсионных взрывчатых веществ. Йошкар-Ола: Стринг, 2020. 214 с. DOI: 10.25625/y1981-6651-8304-y
17. Дубовик А. В. Низкоскоростные детонационные волны при незавершенной реакции в конденсированных веществах // Детонация. Критические явления, физико-механические превращения в ударных волнах. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1978. С. 30–34.
18. Горинов С. А. Критерий газоразрыва скальных горных пород при взрыве скважинного заряда ВВ // Известия вузов. Горный журнал. 2009. № 6. С. 64–70.
19. Друкованый М. Ф., Кравцов В. С., Чернявский Ю. Е., Шеленок В. В., Рева И. П., Зверьков С. Н. Расчет зон разрушения при взрыве цилиндрических зарядов в скальных породах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1976. № 3. С. 70–75.
20. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород / под ред. М. М. Протодяконова. М.: Недра, 1981. 192 с.
21. Соболев В. В., Куливар В. В., Мельников Д. В., Кириченко А. Л. Оценка параметров ударного сжатия породы при контактном взрыве заряда взрывчатого вещества // Перспективы розвитку будівельних технологій: матеріали 12-ї Міжнарод. наук.-практич. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів, 20 квітня 2018 р. Дніпро: НГУ. 2018. С. 132–135.
22. Бабий В. И., Куваев Ю. Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. М.: Энергоиздат, 1986. 208 с.

## Сведения об авторах:

**Горинов Сергей Александрович** – доктор технических наук, консультант ООО «Глобал Майнинг Эксплозив-Раша». E-mail: akaz2006@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8721-6215>

**Тагиев Сенан Мехманович** – начальник управления по производству ВВ ООО «КРУ-Взрывпром». E-mail: tagiev\_senan@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-9183-9298>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-38-48

**Temperature change of detonation products of emulsion explosive blasthole charge**Sergei A. Gorinov<sup>1</sup>, Senan M. Tagiev<sup>2</sup><sup>1</sup> Global Mining Explosive-Russia, LLC, Moscow, Russia.<sup>2</sup> KRU-Vzryvprom, LLC, Kemerovo, Russia.**Abstract**

**Introduction.** The article considers studying the temperature change of detonation products (DP) formed at emulsion explosive (EE) borehole charge explosion during its expansion in the borehole depending on time. It allows to assess the possibility of coal dust ignition upon contact with DP during explosive chamber formation.

**Research objective** is to develop a method for determining the temperature of DP which form under EE borehole charges explosion during their expansion in the borehole depending on time. The method is aimed at improving the safety of blasting when mining coal using EE.

**Methods of research.** The method for determining the temperature of DP which form under EE borehole charges explosion during their expansion in the borehole depending on time is based on analytical studies. The studies are based on the laws of both DP expansion during EE explosion and borehole expansion and rest on the zone theory of a charge explosion effect in solid environment. A polytropic gas model with an index represented by a continuous function of the current DP density is accepted as a model describing the regularities of DP expansion

**Results.** The method is presented for determining the temperature of DP which form under EE borehole charges explosion during their expansion in the borehole depending on time. It has been shown that under lower initiation of charges, the influence of the distance from the initiation point on the DP temperature fall rate manifests only at the distance of less than 5 m and only in the initial period of the DP expansion (during the first 50–100 μs). As the time from the detonation wave arrival moment grows in any charge section, the rate of DP temperature fall with time becomes independent of the section location along the charge length. A strong effect has been revealed of the EE explosion temperature on the size of particles capable of ignition upon contact with DP at the initial stage of expansion of the latter. It is therefore recommended to use EE with an explosion temperature of no more than 1800 K to reduce the risk of ignition of dry coal seams.

**Conclusions.** The regularities obtained make it possible to improve the safety of blasting in coal mining using EE.

**Keywords:** emulsion explosive; detonation products; temperature of detonation products; ignition of coal dust; explosive decomposition.

## REFERENCES

1. Wang Xuguang. *Emulsion explosives*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.
2. Kozyrev S. A., Vlasova E. A., Sokolov A. V. Estimation of factual energetics of emulsion explosives by experimental detonation velocity test data. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2020; 9: 47–53. (In Russ.) Available from: doi: 10.17580/gzh.2020.09.06
3. Kaliakin S. A. *The safety of blasting in gas bearing rock masses of coal mines*. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing; 2012.
4. Valko B. B., Obraz O. P., Gasilov V. A., Solovieva V. S., Savenko N. O. *Equation of state for the explosive detonation products*. Moscow: Keldysh Institute of Applied Mathematics, KIAM. 2021. (In Russ.) Available from: doi: 10.20948/prepr-2021-51
5. Baum F. A., Staniukovich K. P., Shekhter B. I. *Explosion physics*. Moscow: Fizmatgiz Publishing; 1959. (In Russ.)
6. Kamlet M. J., Jacobs S. J. Chemistry of detonation. I. A simple method for calculating detonation properties of C-H-N-O explosives. *Journal of Chemical Physics*. 1968; 48: 23–35. Available from: doi: 10.1063/1.1667908

7. Keshavarz M. H., Jafari M., Ebadpour R. Simple method to calculate explosion temperature of ideal and non-ideal energetic compounds. *Journal of Energetic Materials*. 2019; 38(4): 1–8. Available from: doi: 10.1080/07370652.2019.1679284
8. Le Metayer O., Saurel R. The Noble-Abel stiffened-gas equation of state. *Physics of Fluids*. 2016; 28(40): 1–33. Available from: doi: 10.1063/1.4945981.hal-01305974f
9. Seleznev A. A., Isakov A. M., Ustimkin P. A., Zotkin S. P. Determining the parameters of the Jones-Wilkins-Lee (JWL) equation of state (EOS) for the 6DZhV industrial explosive based on the data from the cylinder test. In: *Extreme state of matter. Detonation. Shock waves: Sci. conf. abstracts, 23th Kharitonovsky Readings*. Sarov: VNIIEF Publishing; 2022. (In Russ.)
10. Nyberg U., Arvanitidis L., Olsson V., Ouchterlony F. Large size cylinder expansion tests on ANFO and gassed bulk explosives. *Explosives and Blasting Technique*. Lisse: Swets @ Zeitlinger. 2003. P. 181–213. Available from: doi: 10.1201/9781439833476.ch23
11. Lee J., Persson P. A. Detonation behaviour of emulsion explosives. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 1990; 15(5): 208–216.
12. Paplinski A., Marena A. Investigation of the influence of cooling salts upon the explosive performance of emulsion explosives. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2015; 12(3): 523–535.
13. Kuk M. A. *The science of industrial explosives*. Moscow: Nedra Publishing; 1980. (In Russ.)
14. Menshikov P. V., Sinityn V. A., Shemenov V. G. Determination of detonation pressure and explosion temperature of industrial emulsion explosives used at ral quarries. *Advances in current natural sciences*. 2017; 7: 96–102. (In Russ.)
15. Silvestrov V. V., Bordzilovskii S. A., Karakhanov S. M., Plastinin A. V. On possibility detonation products temperature measurements of emulsion explosives. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2014; 59(3): 1151–1154. (In Russ.) Available from: doi: 10.2478/amm-2014-0200
16. Gorinov S. A. *Initiation and detonation of emulsion explosives*. Yoshkar-Ola: OOO IPF String Publishing; 2020. (In Russ.) Available from: doi: 10.25625/y1981-6651-8304-y
17. Dubovik A. V. *Low-speed detonation waves during an incomplete reaction in condensed matters. Detonation. Critical phenomena, physical and mechanical transformations in shock waves*. Chernogolovka: Branch of IPCP AS USSR Publishing; 1978. (In Russ.)
18. Gorinov S. A. The criterion of hard rock gas-rupture under the borehole explosive charge detonation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2009; 6: 64–70. (In Russ.)
19. Drukovanyi M. F., Kravtsov V. S., Cherniavskii Iu. E., Shelonok V. V., Reva I. P., Zverkov S. N. Calculating rupture zones when detonating cylindrical charges in hard rocks. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 1976; 3: 70–75. (In Russ.)
20. Protodiakonov M. M. (ed.) *Distribution and correlation of rock physical properties indices: reference book*. Moscow: Nedra Publishing; 1981. (In Russ.)
21. Sobolev V. V., Kulivar V. V., Melnikov D. V., Kirichenko A. L. Assessing rock shock-compression parameters under the contact detonation of the explosive charge. In: *Prospects for the development of construction technologies: Proceedings of the 12th Internat. sci. and pract. conf. of young scientists, graduate students and students, April 20, 2018*. Dnipro: NSU Publishing; 2018. (In Russ.)
22. Babii V. I., Kuvaev Iu. F. *Coal dust burning and the calculation of a coal-dust flame*. Moscow: Energoizdat Publishing; 1986. (In Russ.)

Received 24 August 2023

**Information about the authors:**

**Sergei A. Gorinov** – DSc (Engineering), consultant of Global Mining Explosive-Russia, LLC. E-mail: akaz2006@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8721-6215>

**Senan M. Tagiev** – Head of the Explosives Manufacture Department, KRU-Vzryvprom, LLC. E-mail: tagiev\_senan@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-9183-9298>

**Для цитирования:** Горинов С. А., Тагиев С. М. Изменение температуры продуктов детонации скважинного заряда эмульсионного взрывчатого вещества // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 5. С. 38–48. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-38-48

**For citation:** Gorinov S. A., Tagiev S. M. Temperature change of detonation products of emulsion explosive blasthole charge. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 5: 38–48 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-38-48



## ГЕОТЕХНОЛОГИЯ. ГОРНЫЕ МАШИНЫ

УДК 622.271.1

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-49-59

### Оценка трудоемкости разработки запасов по плану россыпи

Дорош Е. А.<sup>1\*</sup>, Тальгамер Б. Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «СибЗолото», г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

\*e-mail: egordoros3@gmail.com

#### Реферат

**Введение и цель работы.** Развитие золотодобывающей отрасли связано в первую очередь с наращиванием минерально-сырьевой базы и освоением перспективных месторождений. Вместе с тем на протяжении многих лет специалистами отмечается ухудшение качества запасов россыпного золота. Добыча высококатегорийных запасов существенно опережает их прирост, при этом прирост низкоккатегорийных запасов заметно опережает их добычу. В эксплуатацию вводится все больше месторождений со сложными горно-геологическими и горнотехническими условиями, разработка которых зачастую нерентабельна. В рамках данной работы рассмотрены вопросы, связанные с оценкой трудоемкости вскрышных работ на россыпях. Ввиду интенсивного вовлечения в разработку россыпных месторождений со значительной мощностью торфов в последние годы данная тема особенно актуальна.

**Методика проведения исследования.** Проанализированы существующие положения по оценке затрат на производство вскрышных работ и трудоемкости. Проведено моделирование россыпей с различной конфигурацией блоков запасов в плане и определена проблема. Построены графики зависимости соотношения коэффициентов вскрыши (эксплуатационный/геологический) от отношения периметра к площади запасов при эксплуатации россыпей открытым раздельным способом. Произведен анализ полученных результатов.

**Результаты исследования и их анализ.** В работе выполнен анализ влияния горизонтальных параметров запасов на трудоемкость вскрышных работ, обозначена необходимость достоверной оценки объемов вскрыши при подсчете запасов, предложена методика оперативного учета превышения эксплуатационного коэффициента вскрыши над геологическим.

**Выводы, область применения результатов.** Обозначена проблема, связанная со значительным расхождением эксплуатационного и геологического коэффициентов вскрыши, влияющая на достоверную оценку пригодности запасов для промышленного освоения на месторождениях 3–4-й категории по сложности геологического строения со значительной мощностью торфов и большим количеством обособленных блоков запасов. Представлена методика предварительной оценки трудоемкости вскрышных работ.

**Ключевые слова:** россыпные месторождения; классификация запасов; трудоемкость разработки; горнотехнические параметры; коэффициент вскрыши; золотодобыча.

**Введение.** Механизированная разработка россыпных месторождений золота в России насчитывает не один десяток лет. За этот период различными способами отработаны наиболее богатые и крупные месторождения – гидравлическим, подземным, дражным, открытым раздельным. Сегодня большая часть россыпей в стране разрабатывается открытым раздельным – 60–90 % и дражным – 5–15 % [1–4]

способами, а гидравлический и подземный способы используются в меньшей степени. Большая часть балансовых запасов россыпей приходится на открытый раздельный – 50–70 % и дражный способы разработки – 15–20 % [3, 5–11].

Горнотехнические условия залегания россыпей, разрабатываемых в настоящее время, достаточно сложные [3, 12, 13]. Большая часть месторождений в различной степени поражена мерзлотой, обводнена, некоторые россыпи сильно валунистые, пески труднопромывистые. Значительная доля запасов относится к глубокозалегающим с большой мощностью вскрышных пород. Несмотря на то что в эксплуатацию все чаще вводятся месторождения со сложными горно-геологическими и горнотехническими условиями залегания [14, 15], в последние годы объемы добычи россыпного золота не снижаются, а в некоторых регионах даже растут [16].

На сегодняшний день имеется достаточно много классификаций горных пород и грунтов по трудности разработки (буримости, взрываемости, экскавации и т. д.), существуют различные классификации запасов, использование которых не всегда позволяет правильно оценить трудность эксплуатации россыпи. Отсутствие критериев влияния некоторых горно-геологических и горнотехнических факторов на эксплуатацию запасов приводит к неточности прогнозирования экономических показателей разработки россыпей.

На практике при оценке россыпей учитывают, как правило, основные горно-геологические и горнотехнические параметры (объем запасов, мощности вскрыши и песков, содержание полезных компонентов, валунистость, глинистость, объем многолетней мерзлоты), при этом параметры месторождения в плане во внимание не принимаются.

В свою очередь ряд горно-геологических и горнотехнических параметров, значительно влияющих на экономические показатели, вообще остается без внимания. Происходит это ввиду специфики разработки россыпных месторождений и индивидуальности их геологического строения.

В рамках данной статьи рассмотрено влияние равномерности распределения запасов в плане на трудоемкость их эксплуатации, что особенно актуально при разработке глубоких россыпей.

**Проблематика оценки трудоемкости вскрышных работ при разработке россыпей.** Подсчет запасов россыпных месторождений золота выполняется по известным методикам [17–19]. Наибольшее распространение получил способ геологических блоков с опорой каждого блока на две соседние линии, а крайнего блока на одну. Оконтуривание россыпи проводится согласно кондиционным показателям, которые определяются технико-экономическим обоснованием. Согласно этой методике минимальное содержание химически чистого (х/ч) золота в выработке рассчитывается следующим образом:

$$C_{\text{мин.ок}} = C_{\text{мин.ок.н.в}} + K_{\text{скв}} G_{\text{ок}},$$

где  $C_{\text{мин.ок.н.в}}$  – минимальное содержание х/ч золота в оконтуривающей выработке при нулевой вскрыше, г/м<sup>3</sup>;  $K_{\text{скв}}$  – геологический коэффициент вскрыши в разведочной оконтуривающей выработке;  $G_{\text{ок}}$  – приращение (градиент) минимального содержания в оконтуривающей выработке на единицу коэффициента вскрыши, г/м<sup>3</sup>.

В формуле определения минимального содержания х/ч золота в выработке технико-экономическим обоснованием определяются параметры минимального содержания х/ч золота в оконтуривающей выработке при нулевой вскрыше  $C_{\text{мин.ок.н.в}}$  и приращения (градиент) минимального содержания в оконтуривающей выработке

на единицу коэффициента вскрыши  $G_{ок}$ . При этом для определения трудоемкости вскрышных работ используется геологический коэффициент вскрыши в разведочной оконтуривающей выработке  $K_{скв}$ .

Минимальное промышленное содержание  $x/c$  золота в блоке определяется по формуле:

$$C_{мин} = C_{мин.н.в} + K_{бл} G_{бл} + D_{ш} G_{ш}, \quad (1)$$

где  $C_{мин.н.в}$  – минимальное промышленное содержание при нулевой вскрыше, г/м<sup>3</sup>;  $G_{бл}$  – приращение (градиент) минимального промышленного содержания на единицу коэффициента вскрыши, г/м<sup>3</sup>;  $K_{бл}$  – коэффициент вскрыши по выработкам оцениваемого блока;  $G_{ш}$  – приращение (градиент) минимального промышленного содержания на единицу отклонения ширины россыпи от расчетной величины 50 м, г/м<sup>3</sup>;  $D_{ш}$  – отклонение ширины россыпи от расчетной величины 50 м, м/м.

В формуле (1) технико-экономическим обоснованием определяются параметры минимального содержания  $x/c$  золота в блоке при нулевой вскрыше  $C_{мин.н.в}$ , приращения (градиенты) минимального содержания на единицу коэффициента вскрыши торфов  $G_{бл}$  и на единицу отклонения ширины россыпи от расчетной величины 50 м  $G_{ш}$ . При этом для определения трудоемкости вскрышных работ также используется геологический коэффициент вскрыши по выработкам оцениваемого блока  $K_{бл}$ .

Из представленных данных видно, что при подсчете запасов для оценки трудоемкости вскрышных работ используют геологический коэффициент вскрыши, величина которого непосредственно влияет на отнесение блоков к категории балансовых. Понятно, что наиболее представительным показателем для оценки трудоемкости вскрышных работ является эксплуатационный коэффициент вскрыши, однако при подсчете запасов его не используют, так как его значение можно получить только после построения технологических схем и выполнения расчетов параметров вскрышных работ и разубоживания песков. В свою очередь эксплуатационный коэффициент вскрыши может значительно, иногда в разы, отличаться от геологического. В таком случае отнесение блоков к балансовым будет не всегда корректно.

На величину эксплуатационного коэффициента вскрыши влияют объем бортовой прирезки и объем предохранительной «рубашки». Объем предохранительной «рубашки» значительно понижает эксплуатационный коэффициент вскрыши на широких россыпях (где ширина  $B > 70$  м) с неравномерным распределением металла по вертикали. Величина объема бортовой прирезки зависит от расположения контура запасов в плане, мощности торфов и угла откоса бортов карьера. Степень влияния объема бортовой прирезки на эксплуатационный коэффициент вскрыши зависит от ширины россыпи, она наиболее высока на узких россыпях ( $B < 50$  м). Объем бортовой прирезки значительно увеличивает эксплуатационный коэффициент вскрыши на узких ( $B < 50$  м) и глубоких (мощность  $H > 20$  м) россыпях.

**Модели россыпей с различной конфигурацией блоков запасов в плане** представлены на рис. 1. На их основании сделана оценка трудоемкости вскрышных работ, обусловленная расхождением геологического и эксплуатационного коэффициентов вскрыши. У представленных моделей различны ширина и конфигурация блоков в плане, одинаковы мощность торфов и песков, геологические коэффициенты вскрыши, углы откосов вскрышного и добычного уступов. Поперечный разрез с указанием параметров россыпи представлен на рис. 2.

Россыпь, представленная на рис. 1, а, отличается равномерностью своих параметров. Россыпи с подобными параметрами распределения запасов в плане, как правило, относятся к 1–2-й категории по сложности геологического строения. Россыпь, представленная на рис. 1, б, отличается неравномерностью ширины блоков. Россыпи с подобными параметрами распределения запасов в плане, как правило, относятся ко 2–3-й категории по сложности геологического строения. Россыпь, представленная на рис. 1, в, отличается узкими блоками запасов. Россыпи с подобными параметрами распределения запасов в плане, как правило, относятся к 3-й категории по сложности геологического строения. Россыпь, представленная

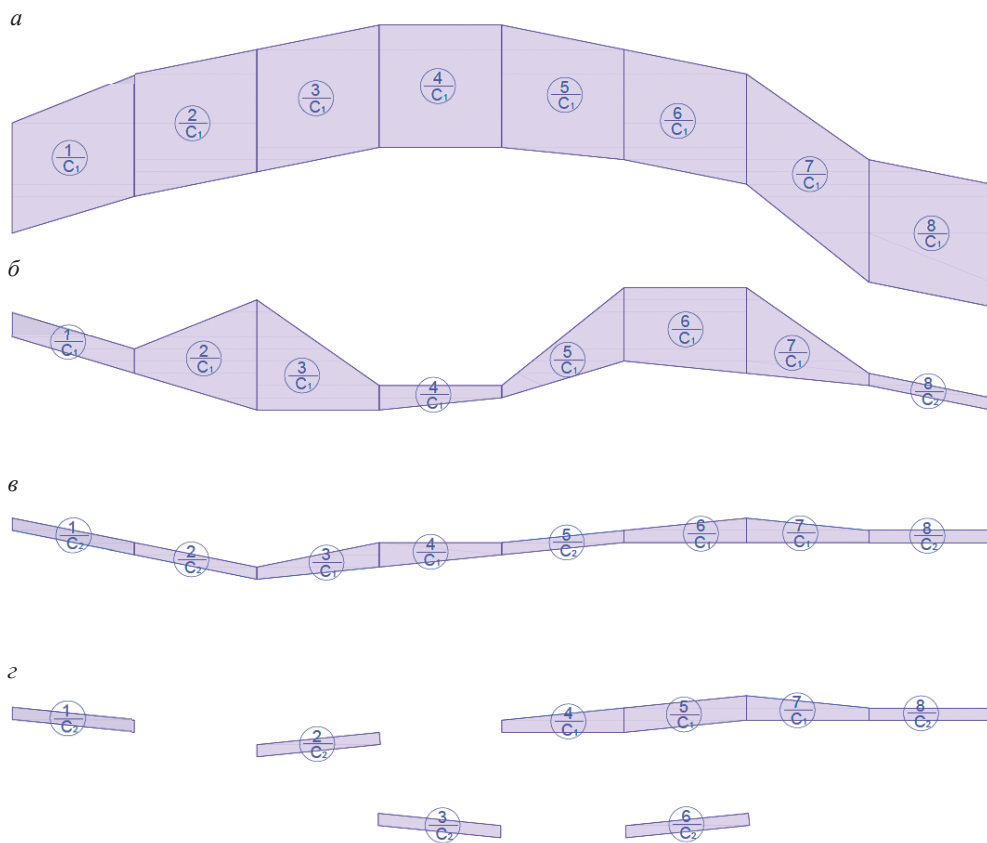


Рисунок 1. Россыпи с различными параметрами распределения запасов в плане: а – широкая россыпь с равномерными параметрами; б – россыпь с неравномерными параметрами; в – узкая россыпь; г – узкая россыпь со значительным количеством обособленных блоков

Figure 1. Placers with different parameters of reserves distribution in the plan: а – wide placer with uniform parameters; б – placer with uneven parameters; в – narrow placer; г – narrow placer with a significant number of isolated blocks

на рис. 1, г, отличается значительным количеством узких обособленных блоков. Россыпи с подобными параметрами распределения запасов в плане, как правило, относятся к 3–4-й категории по сложности геологического строения. Сравнение представленных россыпей с различной конфигурацией блоков запасов в плане приведено в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что у широкой россыпи с равномерной шириной (рис. 1, а) эксплуатационный коэффициент вскрыши может быть даже меньше геологического (в данном случае на 14 %). Для россыпи с неравномерными параметрами (рис. 1, б)

эксплуатационный коэффициент вскрыши больше геологического на 12,4 %. Для узкой россыпи (рис. 1, б) эксплуатационный коэффициент вскрыши больше геологического на 78,2 %. Для узкой россыпи со значительным количеством обособленных блоков (рис. 1, з) эксплуатационный коэффициент вскрыши больше геологического на 86,7 %. Видно, что в последнем случае объем работ по вскрытию россыпи  $V_{\text{вс}}$  составляет больше половины геологического объема вскрыши. Если учитывать этот объем при расчете эксплуатационного коэффициента вскрыши, что в этом случае уместно, то он будет уже на 130 % больше геологического и составит  $K_{\text{в}} = 46$ .

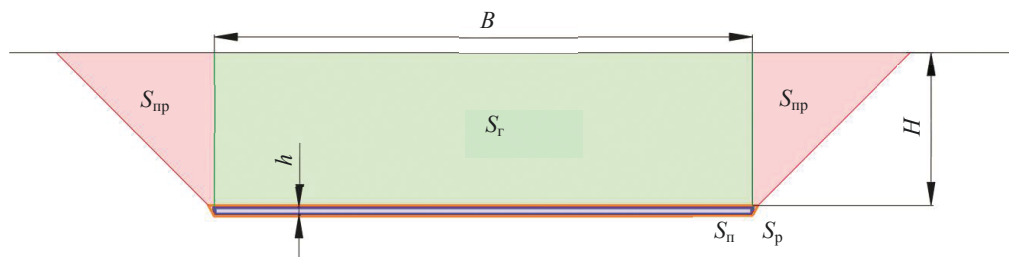


Рисунок 2. Поперечные параметры россыпи:  $B$  – ширина;  $H$  – мощность торфов;  $h$  – мощность песков;  $S_{\text{пр}}$  – площадь бортовой прирезки к торфам;  $S_{\text{г}}$  – площадь торфов геологическая;  $S_{\text{н}}$  – площадь песков геологическая;  $S_{\text{р}}$  – площадь разубоживания (бортовой прирезки, задирки, «рубашки»)

Figure 2. Transverse parameters of the placer:  $B$  is width;  $H$  is the thickness of peat;  $h$  is the thickness of the sands;  $S_{\text{пр}}$  is the area of side slicing to peat;  $S_{\text{г}}$  is the geological area of peat;  $S_{\text{н}}$  is the geological area of sands;  $S_{\text{р}}$  is the dilution area

На основании представленных данных можно сделать вывод, что исходя из отношения периметра россыпи к ее площади возможно предварительно оценить трудоемкость вскрышных работ.

Таблица 1. Параметры россыпей с различной конфигурацией блоков запасов в плане при равном геологическом коэффициенте вскрыши  $K_{\text{г}}$  ( $K_{\text{г}} = 20$ ,  $h = 1$  м,  $H = 20$  м)

Table 1. Parameters of placers with different configuration of reserves blocks in the plan under an equal geological stripping ratio  $K_{\text{г}}$  ( $K_{\text{г}} = 20$ ,  $h = 1$  м,  $H = 20$  м)

Тип россыпи	$L$ , м	$B_{\text{ср}}$ , м	$S_{\text{заот}}/S_{\text{г.вс}}$	$V_{\text{вс}}/V_{\text{г.вс}}$	$K_{\text{в}}$	$P/S$
Широкая россыпь с равномерными параметрами (рис. 1, а)	1047,06	95	0,205	0,033	17,2	0,0229
Россыпь с неравномерными параметрами (рис. 1, б)	1038,72	34	0,568	0,092	22,5	0,0599
Узкая россыпь (рис. 1, в)	1008,18	13	1,508	0,252	35,7	0,1558
Узкая россыпь со значительным количеством обособленных блоков (рис. 1, з)	1004,34	12	1,634	0,639	37,4	0,1687

$L$  – длина, м;  $B_{\text{ср}}$  – средняя ширина, м;  $S_{\text{заот}}/S_{\text{г.вс}}$  – соотношение площадей заоткоски и геологической вскрыши;  $V_{\text{вс}}/V_{\text{г.вс}}$  – соотношение объемов вскрытия и геологической вскрыши;  $K_{\text{в}}$  – эксплуатационный коэффициент вскрыши;  $P/S$  – соотношение периметра и площади россыпи м/м<sup>2</sup>.

**Графики зависимости соотношения коэффициентов вскрыши (эксплуатационный/геологический) от отношения периметра к площади запасов ( $P/S$ ) при эксплуатации россыпей по автотранспортной системе разработки представлены на рис. 3, по комбинированной (автотранспортная плюс бульдозерная) – на рис. 4.**

Благодаря представленным графикам возможно определить расхождение эксплуатационного и геологического коэффициентов вскрыши, опираясь на отношение периметра к площади запасов и за счет этого определяя трудоемкость вскрышных работ и область, в которой эта трудоемкость вскрышных работ при подсчете запасов определена не совсем верно.

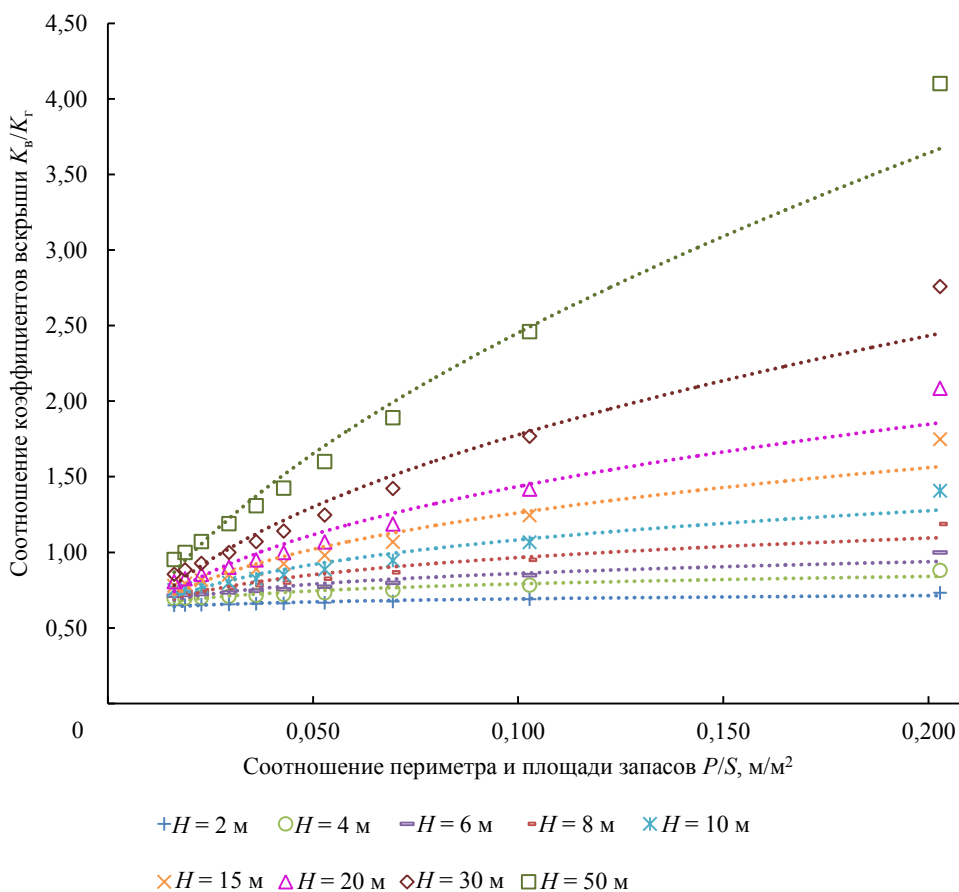


Рисунок 3. Зависимость  $K_{в}/K_{г}$  от  $P/S$  для разной мощности торфов  $H$  при транспортной системе разработки  
 Figure 3. Dependence of  $K_{в}/K_{г}$  on  $P/S$  for different thicknesses of peat  $H$  under the transport mining method

По графикам рис. 3–4 можно установить область, где  $K_{в}/K_{г}$  превышает 30 %, что существенно увеличивает трудоемкость вскрышных работ (табл. 2).

Для транспортной системы разработки (рис. 3) при мощности торфов до 8 м отношении  $K_{в}/K_{г}$  в основном меньше 1 для всех значений  $P/S$ , что свидетельствует о том, что трудоемкость вскрышных работ будет небольшой независимо от распределения запасов в плане. Значительное возрастание трудоемкости работ происходит при мощности торфов более 20 м при  $P/S \geq 0,086$  (ширина россыпи  $\leq 24$  м, табл. 2). При мощности торфов 30 м значительное увеличение трудоемкости работ будет при  $P/S \geq 0,058$  (ширина россыпи  $\leq 36$  м, табл. 2). При мощности торфов 50 м значительное повышение трудоемкости работ будет отмечаться при  $P/S \geq 0,036$  (ширина россыпи  $\leq 50$  м, табл. 2).

Для комбинированной системы разработки (рис. 4) при мощности торфов до 2 м отношение  $K_B/K_T$  меньше 1 для всех значений  $P/S$ , что свидетельствует о том, что трудоемкость вскрышных работ будет небольшой независимо от распределения запасов в плане. Значительное увеличение трудоемкости работ происходит при мощности торфов более 8 м при  $P/S \geq 0,094$  (ширина россыпи  $\leq 22$  м, табл. 2). При мощности торфов 10 м значительный рост трудоемкости работ будет отмечаться при  $P/S \geq 0,086$  (ширина россыпи  $\leq 24$  м, табл. 2). При мощности торфов 15 м трудоемкость работ будет заметно увеличиваться при  $P/S \geq 0,067$  (ширина россыпи  $\leq 31$  м, табл. 2). При мощности торфов 20 м существенный рост трудоемкости работ будет при  $P/S \geq 0,057$  (ширина россыпи  $\leq 37$  м, табл. 2). При мощности торфов 30 м трудоемкость работ будет резко возрастать при  $P/S \geq 0,043$  (ширина россыпи  $\leq 50$  м, табл. 2). При мощности торфов 50 м трудоемкость работ будет быстро расти при  $P/S \geq 0,030$  (ширина россыпи  $\leq 75$  м, табл. 2).

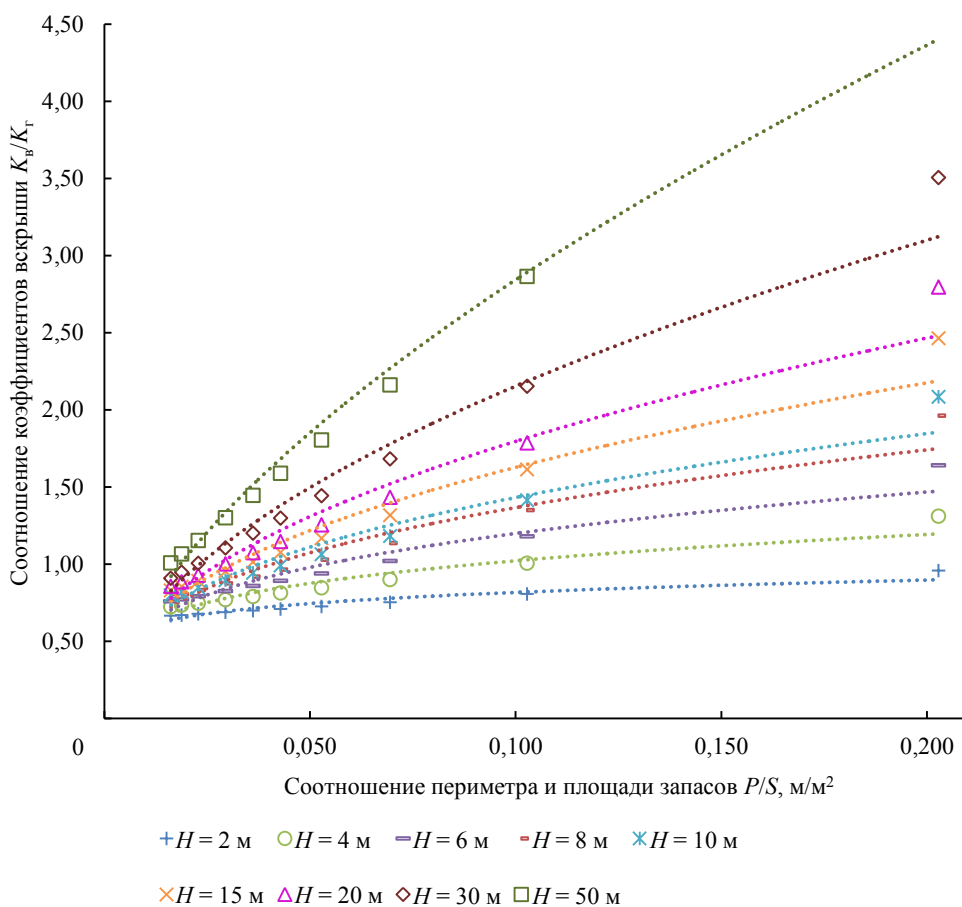


Рисунок 4. Зависимость  $K_B/K_T$  от  $P/S$  для разной мощности торфов  $H$  при комбинированной системе разработки

Figure 4. Dependence of  $K_B/K_T$  on  $P/S$  for different peat thicknesses  $H$  under a combined mining method

**Выводы.** При одинаковом геологическом коэффициенте вскрыши в зависимости от геометрических параметров россыпи и распределения запасов в плане эксплуатационный коэффициент вскрыши может существенно изменяться. Для широких и равномерных россыпей эти показатели сопоставимы, а для узких и глубоких

россыпей они могут значительно отличаться, поэтому в ряде случаев использование геологического коэффициента вскрыши для оценки трудоемкости вскрышных работ некорректно.

Наибольшее влияние на эксплуатационный коэффициент вскрыши оказывает объем бортовой прирезки, который в свою очередь зависит от угла откоса и мощности торфов. В зависимости от ширины россыпи его влияние на эксплуатационный коэффициент вскрыши различно.

**Таблица 2. Параметры россыпей, при которых трудоемкость вскрышных работ существенно возрастает**

**Table 2. Parameters of placers, under which the labor intensity of stripping increases significantly**

Мощность торфов, м	Ширина блока, м		Соотношение периметра и площади запасов	
	Транспортная система	Комбинированная система	Транспортная система	Комбинированная система
2	–	–	–	–
4	–	10	–	0,203
6	–	16	–	0,128
8	–	22	–	0,094
10	12	24	0,170	0,086
15	18	31	0,114	0,067
20	24	37	0,086	0,057
30	36	50	0,058	0,043
50	60	75	0,036	0,030

На россыпях со значительным количеством обособленных блоков объем работ по вскрытию может быть сопоставим с объемом вскрышных работ, что значительно влияет на трудоемкость работ.

У месторождений 1–2-й категории по сложности геологического строения с незначительной мощностью торфов эксплуатационный коэффициент вскрыши сопоставим с геологическим коэффициентом вскрыши, при этом отнесение блоков к категории балансовых в результате подсчета запасов вопросов не вызывает. У месторождений 3–4-й категории по сложности геологического строения с большой мощностью торфов и значительным количеством обособленных блоков запасов эксплуатационный коэффициент вскрыши значительно превышает геологический, и в этом случае отнесение блоков к категории балансовых не всегда оправдано.

При исследованиях установлено, что эксплуатационные объемы вскрыши возрастают пропорционально увеличению соотношения периметра запасов и их площади, что можно учитывать на стадии предварительной оценки трудоемкости освоения россыпей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ермаков С. А., Потехин А. В. Анализ применяемых способов разработки и оборудования на россыпных месторождениях Якутии // ГИАБ. 2012. № 7. С. 218–224.
2. Волков А. В. Золотые перспективы Иркутской области // Золото и технологии. 2017. № 4(38). С. 118–127.
3. Дорош Е. А., Тальгамер Б. Л. Анализ минерально-сырьевой базы золотодобычи в Ленском золотоносном районе и обоснование направлений развития способов разработки россыпей // Науки о Земле и недропользование. 2022. № 3. С. 118–127.
4. Тальгамер Б. Л., Тютрин С. Г., Ершов В. А. Состояние и перспективы дражной золотодобычи в Иркутской области // Золотодобыча. 2016. № 12(217). С. 11–15.



5. Куторгин В. И., Сапрыкин А. А., Джобадзе В. А., Тарасов А. С. Перспективы резервного фонда минерально-сырьевой базы россыпного золота // ЦНИГРИ Роснедра МПР России. 2008. № 4. С. 9–15.
6. Лунышин П. Д. Проблемы российских россыпей и пути их решения // Золото и технологии. 2018. № 2(40). С. 60–65.
7. Talgamer B. L., Dudinskiy F. V., Murzin N. V. Assessment of conditions and experience of technogenic placer dredging // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science – IOP Publishing. 2020. Vol. 408. Art. 012065. DOI: 10.1088/1755-1315/408/1/012065
8. Latysheva M. A. Problems and perspectives of the ineffective goldbearing deposits development // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 629. Art. 012028. DOI: 10.1088/1755-1315/629/1/012028
9. Golovina E., Dykusova A., Zhizhelev M. Innovative methods of extracting the loose gold from technogenic deposits in the Irkutsk region // International Scientific Conference “Investment, Construction, Real Estate: New Technologies and Special-Purpose Development Priorities” – ICRE. 2018. Vol. 212. Art. 01016. DOI: 10.1051/mateconf/201821201016
10. Alexandrova T. N., Alexandrov A. V., Litvinova N. M., Bogomyakov R. V. Basis and development of gold loss reduction methods in processing gold-bearing clays in the Khabarovsk territory // Journal of Mining Science. 2013. Vol. 49. No. 2. P. 319–325.
11. Grayson R. BAT – Best Available Techniques for placer gold miners // The Gold Miner’s Book. 2017. P. 17–28.
12. Бураков А. М., Ермаков С. А., Касанов И. С. Особенности горнотехнических условий разработки россыпных месторождений Якутии // ГИАБ. 2012. № 7. С. 171–179.
13. Дорош Е. А., Тальгамер Б. Л. Оценка перспектив развития россыпной золотодобычи в России // Матер. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. уч. «Геонауки–2021». Иркутск: ИрННТУ, 2021. С. 58–66.
14. Балашенко В. В., Соколов А. С., Душин А. В., Валиев В. Н. Конкурентоспособность золоторудных месторождений // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 1. С. 89–96.
15. Яковлев В. Л. О методологии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых для разработки стратегии развития минерально-сырьевой базы России // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 7. С. 5–20.
16. Лаломов А. В., Владимирцева О. В., Бочнева А. А. Роль россыпных месторождений золота в РФ // Золото и технологии. 2022. № 4(58). С. 36–45.
17. Куторгин В. И., Флерова И. В. Методика разведки россыпей золота и платиноидов. М: ЦНИГРИ, 1992. 142 с.
18. Цопанов О. Х. Методическое руководство по разведке россыпей золота и олова. Магадан: Магаданское книжное издательство, 1982. 110 с.
19. Учитель М. И. Разведка россыпей. Иркутск: Иркутский государственный университет, 1987. 247 с.

Поступила в редакцию 17 апреля 2023 года

#### Сведения об авторах:

**Дорош Егор Алексеевич** – исполнительный директор ООО «СибЗолото». E-mail: egordoros3@gmail.com  
**Тальгамер Борис Леонидович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки месторождений полезных ископаемых Иркутского национального исследовательского технического университета. E-mail: talgamer@istu.edu; <https://orcid.org/0000-0003-1413-0116>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-49-59

### Evaluating the labour intensity of development according to the placer plan

**Egor A. Dorosh<sup>1</sup>, Boris L. Talgamer<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> SibZoloto LLC, Irkutsk, Russia.

<sup>2</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

#### Abstract

**Introduction and research objective.** Gold mining industry development is connected, first of all, with the mineral resource base and promising fields development. However, specialists have consistently noted the degradation of placer gold reserves. High-grade reserves production significantly outgrows their increment, while low-grade reserves increment noticeably outstrips their production. More and more fields with complex mining and geological conditions are being put into operation, and their development is often unprofitable. This research considers stripping

labor intensity assessment in placers. This research topic is especially relevant, since in recent years, alluvial deposits with significantly thick peat have increasingly been involved in development.

**Methods of research.** The existing directives on assessing stripping cost and labor intensity were analyzed. Placers with different configuration of reserve blocks in the plan were modeled and the problem was stated. Dependency graphs of the stripping coefficients ratio (operational/geological) against the ratio of the perimeter to the area of reserves are constructed for a placer exploitation in an open pit method. The results obtained were analyzed.

**Research results and analysis.** The paper analyzes the influence of reserves horizontal parameters on stripping labor intensity, indicates the significance of a reliable stripping effort assessment when calculating reserves, and proposes a method for quick record of the stripping operational ratio excess over the geological ratio.

**Conclusions and scope of results.** A problem is identified associated with a significant discrepancy between the operational and geological stripping ratios, which affects the reliable assessment of reserves suitability for industrial development in deposits of categories 3–4 in terms of the geological structure complexity with significantly thick peat and a large number of separate reserve blocks. The technique of preliminary assessment of stripping labor intensity is presented.

**Keywords:** placer deposits; classification of reserves; labor intensity of development; mining parameters; stripping ratios; gold mining.

#### REFERENCES

1. Ermakov S. A., Potekhin A. V. Analysing the applied mining methods and equipment at placer deposit of Yakutia. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2012; 7: 218–224. (In Russ.)
2. Volkov A. V. Golden prospects of the Irkutsk region. *Zoloto i tekhnologii = Gold and Technologies*. 2017; 4(38): 118–127. (In Russ.)
3. Dorosh E. A., Talgamer B. L. Analysis of the mineral resource base of gold mining in the Lena gold-bearing district and substantiation of the development directions of placer mining methods. *Nauki o Zemle i nedropolzovanie = Earth Sciences and Subsoil Use*. 2022; 3: 118–127. (In Russ.)
4. Talgamer B. L., Tiutrin S. G., Ershov V. A. State and prospects of dredging in the Irkutsk region. *Zolotodobycha = Gold Mining*. 2016; 12(217): 11–15. (In Russ.)
5. Kutorgin V. I., Saprykin A. A., Dzhobadze V. A., Tarasov A. S. Prospects of the placer gold mineral resource base reserve fund. *TsNIGRI Rosnedra MPR Rossii = TsNIGRI Rosnedra of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation*. 2008; 4: 9–15. (In Russ.)
6. Luniashin P. D. The problems of Russian placers and their solutions. *Zoloto i tekhnologii = Gold and Technologies*. 2018; 2(40): 60–65. (In Russ.)
7. Talgamer B. L., Dudinskii F. V., Murzin N. V. Assessment of conditions and experience of technogenic placer dredging. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science – IOP Publishing*. 2020; 408: 012065. Available from: doi: 10.1088/1755-1315/408/1/012065
8. Latysheva M. A. Problems and perspectives of the ineffective goldbearing deposits development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 629: 012028. Available from: doi: 10.1088/1755-1315/629/1/012028
9. Golovina E., Dykusova A., Zhizhelev M. Innovative methods of extracting the loose gold from technogenic deposits in the Irkutsk region. In: *International Scientific Conference Investment, Construction, Real Estate: New Technologies and Special-Purpose Development Priorities ICRE*. 2018; 212: 01016. Available from: doi: 10.1051/mateconf/201821201016
10. Alexandrova T. N., Alexandrov A. V., Litvinova N. M., Bogomyakov R. V. Basis and development of gold loss reduction methods in processing gold-bearing clays in the Khabarovsk territory. *Journal of Mining Science*. 2013; 49(2): 319–325.
11. Grayson R. BAT – Best Available Techniques for placer gold miners. *The Gold Miner's Book*. 2017. P. 17–28.
12. Burakov A. M., Ermakov S. A., Kasanov I. S. Mining conditions of placer mining in Yakutia. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)* 2012; 7: 171–179. (In Russ.)
13. Dorosh E. A., Talgamer B. L. Assessing the growth prospects of placer mining in Russia. In: *Proceedings of the All-Russian science and technical conf. with internat. particip. Geosciences-2021*. Irkutsk: INRTU Publishing; 2021. P. 58–66. (In Russ.)
14. Balashenko V. V., Sokolov A. S., Dushin A. V., Valiev V. N. The competitiveness of gold fields. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 1: 89–96. (In Eng.)

15. Iakovlev V. L. Solid mineral deposits integrated development methodology for Russian mineral resource base development strategy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 7: 5–20. (In Russ.)

16. Lalomov A. V., Vladimirtseva O. V., Bochneva A. A. The role of gold placer deposits in Russian Federation. *Zoloto i tekhnologii = Gold and Technologies*. 2022; 4(58): 36–45. (In Russ.)

17. Kutorgin V. I., Flerova I. V. *Exploration technique for gold and platinoid placers*. Moscow: TsNIGRI Publishing; 1992. (In Russ.)

18. Tsopanov O. Kh. *Guidance on gold and tin placers exploration*. Magadan: Magadanskoe knizhnoe izdatelstvo Publishing; 1982. (In Russ.)

19. Uchitel M. I. *Placer exploration*. Irkutsk: Irkutsk State University Publishing; 1987. (In Russ.)

Received 17 April 2023

#### Information about the authors:

**Egor A. Dorosh** – Executive Director, SibZoloto LLC. E-mail: egordoros3@gmail.com

**Boris L. Talgamer** – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Mineral Deposits Development, Irkutsk National Research Technical University. E-mail: talgamer@istu.edu; <https://orcid.org/0000-0003-1413-0116>

**Для цитирования:** Дорosh E. A., Тальгамер B. Л. Оценка трудоемкости разработки запасов по плану россыпи // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 5. С. 49–59. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-49-59  
**For citation:** Dorosh E. A., Talgamer B. L. Evaluating the labour intensity of development according to the placer plan. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 5: 49–59 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-49-59

## Математическая модель формирования потоков горной массы комбайнами со шнековыми исполнительными органами малого диаметра

Шабаев О. Е.<sup>1</sup>, Нечепавев В. Г.<sup>1</sup>, Бридун И. И.<sup>1</sup>, Зинченко П. П.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Россия

\*e-mail: pawel.zin4enko@yandex.ru

### Реферат

**Цель работы** – разработка математической модели формирования потоков выгруженной, переброшенной, циркулирующей и остающейся на почве пласта разрушенной горной массы при ее выгрузке из очистных комбайнов со шнековыми исполнительными органами малого диаметра.

**Методика.** Достижение поставленной цели обеспечивалось на основе системного подхода, при рациональном сочетании теоретических и экспериментальных методов исследований. Математическая модель формирования и взаимодействия потоков разрушенной горной массы базируется на общепризнанных положениях теории выгрузки разрушенной горной массы, а также стендовых исследованиях процесса погрузки шнековыми исполнительными органами малого диаметра.

**Результаты.** Математическая модель позволяет устанавливать основные закономерности рабочего процесса выгрузки разрушенной горной массы шнековым исполнительным органом и определять для заданных структуры, конструктивных и режимных параметров очистных комбайнов объем разрушенной горной массы, выгружаемый лопастью шнека в течение одного оборота исполнительного органа; объем разрушенной горной массы, перебрасываемый выгружающей лопастью шнека в течение одного оборота исполнительного органа; объем разрушенной горной массы, циркулирующей в рабочем объеме опережающего шнека в течение одного оборота исполнительного органа; объем разрушенной горной массы, остающейся на почве пласта после прохода комбайна; производительность процессов выгрузки, переброса и циркуляции разрушенной горной массы при функционировании шнекового исполнительного органа очистного комбайна, предназначенного для выемки тонких пологих пластов.

**Выводы.** Разработана адекватная математическая модель формирования потоков погруженной, переброшенной, циркулирующей и оставшейся на почве пласта горной массы, позволяющая с учетом влияния структуры, конструктивных и режимных параметров очистного комбайна определять значения производительности погрузки, переброса, циркуляции и оставшейся на почве пласта горной массы.

**Ключевые слова:** очистной комбайн; выемка тонких пластов; шнек малого диаметра; процесс выгрузки; циркуляция; поток горной массы.

**Введение.** В настоящее время уголь является основным энергоносителем, позволяющим полностью удовлетворить потребности экономики и промышленности Донецкого региона. Промышленные запасы угля в регионе, по данным Донецкого государственного научно-исследовательского угольного института (ДонУГИ), составляют 6,84 млрд т, при этом 83,2 % всех угольных пластов имеют мощность 0,55–1,2 м [1]. При добыче угля из пластов такой мощности наиболее рентабельной является выемка с использованием струговых механизированных комплексов [2].

В Донецком регионе применение струговой выемки весьма затруднительно ввиду сложных горно-геологических и горнотехнических условий залегания угольных

пластов. Лишь 127 из 1092 разведанных шахтопластов являются пригодными к выемке с использованием струговых механизированных комплексов [1]. Поэтому при выемке углей в Донбассе преимущественное применение нашли очистные комбайны в составе механизированных комплексов.

При этом наиболее часто применяют очистные комбайны, оснащенные шнековыми исполнительными органами (ИО) малого диаметра. Это обусловлено простотой их конструкции, низкой энергоемкостью, высокой надежностью и приемлемой сортностью добываемого угля, а также хорошей приспособляемостью к обработке границы «уголь–боковые породы».

Однако шнеки малого диаметра характеризуются существенным недостатком – ограниченной погрузочной способностью вследствие малой площади окна выгрузки. В интенсивных режимах работы комбайна часть разрушенной горной массы в процессе выгрузки может перебрасываться через ступицу шнека в его нерабочую зону. Переброшенная горная масса частично размещается в зазорах дополнительного погрузочного устройства [3], а оставшаяся часть повторно перемещается в рабочее пространство шнека, т. е. циркулирует. При этом существенно возрастает энергоемкость процесса выгрузки, снижается сортность угля вследствие дополнительного измельчения, скорость перемещения комбайна ограничивается значениями 1–3 м/мин [4, 5].

Обоснование рациональных структуры и параметров шнековых исполнительных органов малого диаметра, обеспечивающих повышение погрузочной способности, может быть осуществлено на основе математического моделирования.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Созданием математической модели рабочего процесса погрузки отделенной горной массы занимались многие ученые и специалисты [4–12].

Математические модели формирования выгруженной, переброшенной, циркулирующей и оставшейся на почве пласта горной массы, предложенные в [6–11], основаны на теории винтового конвейера. Вместе с тем проведенный на кафедре горных машин Донецкого политехнического института (ДПИ) ряд стендовых экспериментальных исследований процесса погрузки горной массы шнеками малых диаметров показал, что значения погрузочной способности исполнительных органов, полученные экспериментально и с использованием модели винтового конвейера, отличаются между собой в 2–4 раза [4, 5]. Причиной столь значительной разницы является отличие физической картины процесса погрузки разрушенной горной массы шнеками малых диаметров от физической картины функционирования винтового конвейера.

В работах [4, 5] предложено математическое описание формирования потоков погруженной, переброшенной и циркулирующей горной массы с учетом специфики процесса погрузки угля шнековыми исполнительными органами малого диаметра. В этих работах не учитывается формирование остатка непогруженной горной массы на почве пласта, что не дает возможности оценки эффективности шнекового исполнительного органа малого диаметра как погрузочного органа в целом. Установление фактического объема непогруженной и оставшейся на почве пласта горной массы может быть использовано при определении параметров статических лемехов и гидроцилиндров передвижки, которыми оснащается решетчатый став забойных конвейеров.

В работе [12] предложена математическая модель процесса погрузки отделенной горной массы, учитывающая формирование выгруженной, переброшенной, циркулирующей и оставшейся на почве пласта горной массы. Однако в математической

модели остаток горной массы формируется в зоне между разгрузочным торцом шнека и полкой решетки забойного конвейера. Эта зона, как показывает опыт эксплуатации очистных комбайнов, заполнена недогруженной горной массой, оставшейся после передвижки конвейера на «новую машинную дорогу». Объем прошедшего в зазоры угля в предложенной модели определяется в зоне между нерабочей стороной шнека и корпусом поворотного редуктора привода резания. В принятой зоне непогруженная горная масса будет накапливаться в случае интенсивной циркуляции. Все это приводит к неточностям при определении объемов циркулирующей и ушедшей в зазоры горной массы, что скажется на результатах исследований.

**Цель исследования** – разработка математической модели формирования потоков выгруженной, переброшенной, циркулирующей и оставшейся на почве пласта разрушенной горной массы при ее выгрузке из очистных комбайнов со шнековыми исполнительными органами малого диаметра.

**Основной материал исследования.** При разработке математической модели формирования потоков погруженной, переброшенной, циркулирующей и оставшейся на почве пласта разрушенной горной массы приняты следующие допущения (обоснованием которых являются обобщение опыта эксплуатации шнековых очистных комбайнов в условиях тонких пологих пластов и общепризнанные положения теории выгрузки разрушенной горной массы в рассматриваемых условиях):

- при перемещении очистного комбайна вдоль линии очистного забоя за ним на почве пласта остается слой разрушенной горной массы высотой  $0,5(D_{\text{ио}} - D_y)$ , заполняя собой зазоры дополнительного погрузочного устройства ( $D_{\text{ио}}$  и  $D_y$  – диаметр исполнительного органа и его условный диаметр соответственно, м) [13];

- половина объема горной массы, разрушенной резцами, установленными на отрезном диске шнека, поступает в межлопастное пространство [14]; оставшийся объем остается на почве пласта и располагается в зазорах дополнительного погрузочного устройства [14];

- выгрузка разрушенной горной массы осуществляется без циркуляции при условии, что площадь окна выгрузки и скорость выгружаемого потока обеспечивают полную выгрузку разрушенной и накопленной в рабочем объеме шнека горной массы за один его оборот [4, 5]; в противном случае разница объемов разрушенной и накопленной в рабочем объеме шнека (за вычетом объема горной массы, не захваченной резцами) и выгруженной горной массы будет перебрасываться на его нерабочую сторону;

- переброшенная (на нерабочую сторону шнека) выгружающей лопастью разрушенная горная масса, суммируясь с не захваченной резцами и не поступившей от разрушения отрезным диском шнека горной массой, полностью располагается в зазорах дополнительного погрузочного устройства [4, 5]; при ограниченности площади зазоров (в случаях оснащения комбайна зачистным лемехом или полноразмерным погрузочным щитком) часть не выгруженной после прохода опережающего шнека разрушенной горной массы повторно перемещается в его рабочий объем [14]; остающаяся после прохода опережающего шнека разрушенная горная масса равномерно распределяется по площади зазоров [3];

- переброшенная на нерабочую сторону шнека и не ушедшая в зазоры разрушенная горная масса повторно перемещается в рабочий объем шнека [4, 5]; накоплением горной массы в пространстве между шнеком и вынесенным в уступ забоя корпусом редуктора ввиду малого значения объема можно пренебречь.

С учетом приведенных допущений модель формирования потоков выгруженной, переброшенной, циркулирующей и оставшейся на почве пласта разрушенной

горной массы при выгрузке ее очистным комбайном в условиях эксплуатации в тонких пологих пластах имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{в.об} = \begin{cases} V_{у.об} - V_{р.об} & \text{при } V_{у.об} - V_{р.об} \leq V_{в.ср} \\ \text{иначе } V_{в.ср} \end{cases} \\ V_{п.об} = \begin{cases} 0 & \text{при } V_{у.об} - V_{р.об} \leq V_{в.ср} \\ \text{иначе } V_{у.об} - (V_{р.об} + V_{в.ср}) \end{cases} \\ V_{ц.об} = \begin{cases} 0 & \text{при } V_{р.об} + V_{д.об} + V_{п.об} \leq V_{з.об} \\ \text{иначе } V_{р.об} + V_{д.об} + V_{п.об} - V_{з.об} \end{cases} \\ V_{о.об} = \begin{cases} V_{р.об} + V_{д.об} + V_{п.об} & \text{при } V_{з.об} \geq V_{р.об} + V_{д.об} + V_{п.об} \\ \text{иначе } V_{з.об} \end{cases} \\ Q_{в} = V_{в.об} \cdot n_{об} \cdot N_{зах}; & Q_{пер} = V_{п.об} \cdot n_{об} \cdot N_{зах}; \\ Q_{цир} = V_{ц.об} \cdot n_{об} \cdot N_{зах}; & Q_{ост} = V_{о.об} \cdot n_{об} \cdot N_{зах}. \end{array} \right.$$

где  $V_{в.об}$  – объем горной массы, выгруженной через окно выгрузки за один оборот исполнительного органа, м<sup>3</sup>/об;  $V_{у.об}$  – объем горной массы, разрушенной и накопленной за один оборот исполнительного органа, м<sup>3</sup>/об;  $V_{р.об}$  – объем оставшейся на почве пласта разрушенной горной массы (из-за невозможности ее выгрузки резцами опережающего шнека), м<sup>3</sup>/об;  $V_{в.ср}$  – средний объем разрушенной горной массы, выгруженный за оборот шнека, м<sup>3</sup>/об;  $V_{п.об}$  – объем горной массы, переброшенной выгружающей лопастью за один оборот исполнительного органа, м<sup>3</sup>/об;  $V_{ц.об}$  – объем горной массы, циркулирующей в рабочем объеме шнека за один оборот исполнительного органа, м<sup>3</sup>/об;  $V_{д.об}$  – объем горной массы, разрушенной отрезным диском, не попадающей в рабочий объем исполнительного органа, м<sup>3</sup>/об;  $V_{з.об}$  – объем разрушенной горной массы, размещающейся в зазорах дополнительного погрузочного устройства, м<sup>3</sup>/об;  $V_{о.об}$  – объем горной массы, оставшейся на почве пласта за один оборот исполнительного органа, м<sup>3</sup>/об;  $Q_{в}$ ,  $Q_{пер}$ ,  $Q_{цир}$ ,  $Q_{ост}$  – производительность по выгрузке разрушенной горной массы, перебросу, циркуляции и остатку горной массы, не погруженной шнековым исполнительным органом, соответственно, м<sup>3</sup>/мин;  $N_{зах}$  – число лопастей шнека, шт;  $n_{об}$  – частота вращения исполнительного органа, об/мин.

Объем горной массы, разрушенной и накопленной в рабочем объеме шнека за один его оборот, определяется по зависимости [5]:

$$V_{у.об} = N_1 \int_{\beta}^{\pi} f_0(\psi) h(\psi) d\psi + N_2 \int_0^{\pi} h(\psi) d\psi + N_3 \int_0^{\beta} h(\psi) d\psi,$$

где  $N_{1-3}$  – коэффициенты,  $N_1 = ((D_{ио} n_{рез}) / (2N_{зах})) k_p$ , м,  $N_2 = (D_{ио} / 2) k_d B_d k_p$ , м<sup>2</sup>,  $N_3 = N_1 (B_3 - B_d)$ , м<sup>2</sup>;  $\psi$  – угол поворота исполнительного органа относительно его оси вращения;  $f_0(\psi)$  – уравнение расположения резцового инструмента на разрушающей горный массив лопасти [14, 15];  $\beta$  – угол охвата шнека его лопастью,  $\beta = (2C_{ш} - 1)\pi$ , рад,  $C_{ш}$  – конструктивный параметр шнека [5];  $h(\psi)$  – толщина среза, м;  $n_{рез}$  – количество резцов в одной линии резания;  $k_p$  – коэффициент

разрыхления разрушенной горной массы;  $k_d$  – коэффициент, учитывающий часть отделенной от забоя отрезным диском горной массы, попадающей в рабочее пространство шнека [14];  $B_3, B_d$  – ширина захвата шнека и ширина его отрезного диска соответственно, м.

Объем оставшейся на почве пласта разрушенной горной массы (из-за невозможности ее выгрузки резцами опережающего шнека) определяется по зависимости:

$$V_{p.об} = 0,25(D_{ио} - D_y) B_3 \int_0^{\pi} h(\psi) d\psi.$$

Средний объем разрушенной горной массы, перемещаемый через окно выгрузки за один оборот шнека, находится по зависимости [16]:

$$V_{в.ср} = \frac{1}{\eta} \int_{\varphi_{от}}^{\eta} [S_{ок}(\varphi) - S_{вал}(\varphi)] d\varphi \pi d_{ст} \operatorname{tg} \alpha_{л.ст} k_{отс},$$

где  $\eta = \pi + \varphi_{от} + \varphi_в$ , рад;  $\varphi_{от}, \varphi_в$  – угол начала открытия и закрытия окна выгрузки, соответственно, рад [5];  $S_{ок}(\varphi)$  – площадь окна выгрузки, м<sup>2</sup> [4, 5];  $S_{вал}(\varphi)$  – площадь окна выгрузки, перекрытая «валком» невыгруженной горной массы, м<sup>2</sup> [4];  $d_{ст}$  – диаметр ступицы исполнительного органа, м;  $\alpha_{л.ст}$  – угол наклона лопасти шнека по диаметру ступицы, град;  $k_{отс}$  – коэффициент, учитывающий отставание выгружаемой горной массы относительно лопасти шнека [5].

Зависимость для определения объема разрушенной горной массы, размещающейся в зазорах дополнительного погрузочного устройства, имеет вид:

$$V_{з.об} = S_{зз} \frac{v_{п}}{n_{рез} n_{об}},$$

где  $S_{зз}$  – площадь зазоров дополнительного погрузочного устройства [3], м<sup>2</sup>;  $v_{п}$  – скорость перемещения комбайна, м/мин.

Зависимость для определения объема горной массы, разрушенной отрезным диском, не попадающей в рабочий объем исполнительного органа, представлена в виде:

$$V_{д.об} = \frac{D_{ио}}{2} B_d (1 - k_d) k_p \int_0^{\pi} h(\psi) d\psi.$$

Адекватность разработанной математической модели оценивалась путем сравнения значений производительности процессов выгрузки, переброса и циркуляции разрушенной горной массы, полученных на основе модельного эксперимента согласно предложенной математической модели, и данных экспериментальных исследований процесса выгрузки разрушенной горной массы на полноразмерном погрузочном стенде [17].

Стенд состоял из следующих основных составных частей (рис. 1): скребковый конвейер СП63М 1; очистной комбайн 1К-101 (режущая часть без механизма подачи 8); механизм подачи «Урал 37» очистного комбайна 3; ленточные конвейеры 9, 10; приемный бункер 7; подвижный бункер на тензометрических опорах 11; перегружатели 5, 6.

При проведении экспериментальных исследований процесса выгрузки опережающим исполнительным органом с изменяемым диаметром на полноразмерном



стенде имитировались следующие параметры комбайновой выемки в условиях тонких пологих пластов [17]:

- мощность вынимаемого пласта принималась равной диаметру шнека;
- частота вращения исполнительного органа составляла 80 об/мин;
- количество резцов в линии резания и лопастей на шнеке – 2;
- направление вращения шнека – от почвы к кровле;
- за исполнительным органом устанавливался элемент, имитирующий вынесенный в уступ забоя корпус комбайна К103М высотой 0,43 м и шириной 0,65 м, выполняющий функцию погрузочного щитка с зазорами;

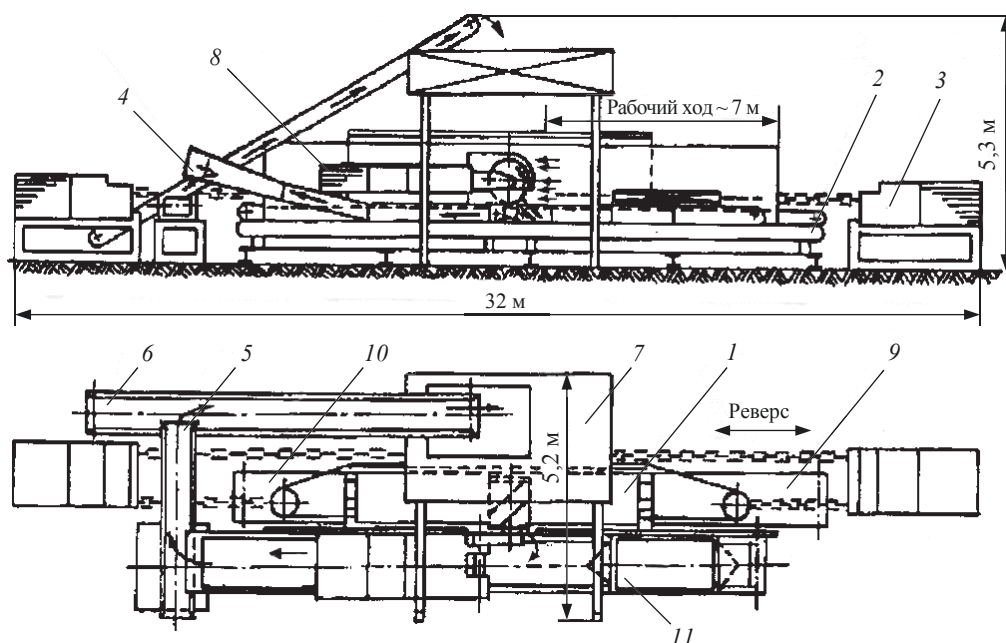


Рисунок 1. Схема полноразмерного погрузочного стенда конструкции Донецкого политехнического института

Figure 1. The scheme of a full-sized loading test bench of the Donetsk Polytechnic Institute design

– при стендовых исследованиях процесса погрузки корпус поворотного редуктора привода исполнительного органа устанавливался горизонтально, имитируя самое неблагоприятное положение для формирования окна погрузки.

Основные геометрические параметры шнековых исполнительных органов при проведении экспериментальных исследований (ИО1 и ИО2) приведены в табл. 1.

Для сравнения результатов стендовых и модельных исследований производительность по выгрузке  $Q_v$ , перебросу  $Q_{пер}$ , циркуляции  $Q_{цир}$  и остатку  $Q_{ост}$  горной массы, не погруженной шнековым исполнительным органом, приводилась к единой размерности (т/мин) с учетом плотности разрушенного угля в разрыхленном состоянии, которая согласно стендовым исследованиям составила 0,78 т/м<sup>3</sup>. В табл. 2 приведены результаты модельных и экспериментальных исследований процесса выгрузки разрушенной горной массы шнеками малых диаметров в условиях полноразмерного погрузочного стенда и выполнено их сравнение.

Сравнение показывает, что расхождение результатов модельных и стендовых экспериментов для значений производительности процессов выгрузки, переброса и

циркуляции разрушенной горной массы не превышает 10, 15 и 20 %, соответственно. Следовательно, разработанная математическая модель может быть достоверно использована для установления закономерностей влияния структуры и параметров очистных комбайнов для выемки тонких пологих пластов на показатели эффективности их работы.

**Таблица 1. Основные параметры шнекового исполнительного органа**  
**Table 1. The main parameters of the auger executive tool**

Параметр	Исполнительный орган	
	ИО1	ИО2
Диаметр шнека по резцам $D_{ИО}$ , м	0,56	0,63
Диаметр ступицы шнека $d_{ст}$ , м	0,30	0,32
Угол наклона лопасти шнека по диаметру ступицы $\alpha_{л,ст}$ , град	37	40
Ширина захвата шнека $B_3$ , м	0,80	0,85
Ширина отрезного диска $B_д$ , м	0,100	0,105

**Таблица 2. Сравнение результатов экспериментальных и модельных исследований**  
**Table 2. Comparison of experimental and model study results**

Скорость $v_{п}$ , м/мин	Стенд, т/мин			Модель, т/мин				Расхождение результатов, %		
	$Q_в$	$Q_{пер}$	$Q_{цир}$	$Q_в$	$Q_{пер}$	$Q_{цир}$	$Q_{ост}$	$ \Delta_в $	$ \Delta_{пер} $	$ \Delta_{цир} $
$D_{ИО} = 0,56 \text{ м}$										
2,9	1,16	1,19	0,82	1,22	1,11	0,74	0,36	5,17	6,72	9,76
3,4	1,22	1,53	1,10		1,53	1,10	0,43	0	0	0
3,5	1,23	1,60	1,16		1,61	1,17	0,44	0,81	0,63	0,86
$D_{ИО} = 0,63 \text{ м}$										
3,2	1,36	0,94	0,51	1,4	0,88	0,45	0,43	3,20	6,30	11,56
3,4	1,44	0,96	0,51		1,03	0,58	0,45	2,53	7,01	13,31
3,5	1,44	1,06	0,59		1,10	0,63	0,47	5,53	3,84	6,88
3,6	1,28	1,32	0,84		1,17	0,69	0,48	9,65	11,04	17,37
6,0	1,44	2,86	2,06		2,97	2,17	0,80	2,53	3,95	5,49

**Выводы.** Разработана математическая модель формирования и взаимодействия потоков выгруженной, переброшенной, циркулирующей и оставшейся на почве пласта разрушенной горной массы при выгрузке ее шнековым очистным комбайном в условиях эксплуатации в тонких пологих пластах. Модель позволяет устанавливать основные закономерности рабочего процесса выгрузки разрушенной горной массы шнековым исполнительным органом и определять для заданных структуры, конструктивных и режимных параметров очистных комбайнов:

- объем разрушенной горной массы, выгружаемый лопастью шнека в течение одного оборота исполнительного органа;
- объем разрушенной горной массы, перебрасываемый выгружающей лопастью шнека в течение одного оборота исполнительного органа;
- объем разрушенной горной массы, циркулирующей в рабочем объеме опережающего шнека в течение одного оборота исполнительного органа;
- объем разрушенной горной массы, оставшейся на почве пласта после прохода комбайна;

– производительность процессов выгрузки, переброса и циркуляции разрушенной горной массы при функционировании шнекового исполнительного органа очистного комбайна, предназначенного для выемки тонких пологих пластов.

Установлена адекватность разработанной математической модели. Расхождение результатов моделирования не превышают:

- 10 % для производительности процесса выгрузки разрушенной горной массы;
- 15 % для производительности процесса переброса разрушенной горной массы;
- 20 % для производительности процесса циркуляции разрушенной горной массы.

Разработанная математическая модель может быть достоверно использована для выполнения теоретических исследований, направленных на установление закономерностей влияния структуры и параметров очистных комбайнов для выемки тонких пологих пластов на показатели эффективности их работы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горные машины для подземной добычи угля / под ред. П. А. Горбатова. Донецк: Норд Компьютер, 2006. 669 с.
2. Гуляев В. Г. Актуальность и проблемы создания автоматизированных струговых комплексов для безлюдной выемки пологих тонких угольных пластов Донецкого бассейна // Вестник Донецкого национального технического университета. 2016. № 6. С. 24–34.
3. Шабаев О. Е., Бридун И. И., Зинченко П. П. Влияние дополнительных погрузочных устройств на производительность очистных комбайнов со шнеками малых диаметров // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: матер. 16-й Междунар. конф., 19–20 ноября 2020 г. Тула: ТулГУ, 2020. Т. 1. С. 187–194.
4. Нечепаяев В. Г. Механо-гидравлические шнековые системы выгрузки и транспортирования. Донецк: ДонНТУ, 2005. 215 с.
5. Бойко Н. Г. Очистные комбайны для тонких пластов. Донецк: ДонНТУ, 2010. 476 с.
6. Миничев В. И. Угледобывающие комбайны. Конструирование и расчет. М.: 1976. 248 с.
7. Kuidong Gao, Xin Zhang, Kao Jiang, Yang Yang, Guangjun Yin, Bing Liu. An applied model of minimum rotating speed for drum shearer to avoid drum clogging // Journal of Engineering Research. 2019. Vol. 7. No. 1. P. 1–19.
8. Nguyen K. L., Gabov V. V., Zadkov D. A. Improvement of drum shearer coal loading performance // Eurasian Mining. 2018. No. 2. P. 22–25.
9. Nguyen K. L., Gabov V. V., Zadkov D. A. Improving efficiency of cleanup and coal flow formation on conveyor by shearer loader with accessory blade // Eurasian Mining. 2019. No. 1. P. 37–39.
10. Ayhan M., Eyyuboglu E. M. Comparison of globoid and cylindrical shearer drums' loading performance // The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 2006. Vol. 106. P. 51–56.
11. Nguyen K. L., Gabov V. V., Zadkov D. A., Le T. B. Justification of process of loading coal onto face conveyors by auger heads of shearer-loader machines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Volume. 2018. Vol. 327. Art. 042132.
12. Ткачев В. В., Бубликов А. В. Использование имитационного моделирования для исследования системы автоматического управления добычным комбайном. Днепропетровск: НГУ, 2015. 182 с.
13. Тарасевич В. И., Тарасевич А. В. Влияние резцов шнекового исполнительного органа на выгрузку угля из рабочего пространства шнека // Научные труды Донецкого национального технического университета. Сер. Горно-электромеханическая. Вып. 94. Донецк: ДонНТУ, 2005. С. 210–217.
14. Тарасевич В. И. Повышение производительности выгрузки угля очистными комбайнами для тонких пластов со шнековыми исполнительными органами: дис. ... канд. техн. наук. Донецк: 1979. 190 с.
15. Бойко Н. Г., Тарасевич В. И., Нечепаяев В. Г. Заполнение шнека очистного комбайна разрушенным углем // Известия вузов. Горный журнал. 1980. № 4. С. 96–99.
16. Шабаев О. Е., Нечепаяев В. Г., Зинченко П. П. Методика выбора параметров очистных комбайнов со шнеками малых диаметров применительно к заданным горно-геологическим условиям // Вестник Донецкого национального технического университета. 2020. № 3. С. 43–51.
17. Альшиц Я. И., Тарасевич В. И., Нечепаяев В. Г. Стенд для исследования процессов погрузки угля шнековыми исполнительными органами очистных комбайнов // Угольное машиностроение. 1977. № 1. С. 10–12.

Сведения об авторах:

**Шабаяв Олег Евгеньевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой горных машин Донецкого национального технического университета. E-mail: oeshabaev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0845-7449>

**Нечепаяв Валерий Георгиевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой основ проектирования машин Донецкого национального технического университета. E-mail: nechepayev@mech.donntu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4016-1661>

**Бридуи Игорь Игоревич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры горных машин Донецкого национального технического университета. E-mail: ss13835@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3199-8518>

**Зинченко Павел Петрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры горных машин Донецкого национального технического университета. E-mail: pawel.zin4encko@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4070-2715>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-60-69

## Mathematical model of mined bulk flows formation by small-diameter auger executive tools

Oleg E. Shabaev<sup>1</sup>, Valerii G. Nechepayev<sup>1</sup>, Igor I. Bridun<sup>1</sup>, Pavel P. Zinchenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia.

### Abstract

**Research objective** is to develop a mathematical model of formation of mined bulk flow which was unloaded, shifted, as well as circulating and remaining on the seam floor when it is unloaded from shearers equipped with small-diameter auger executive tools.

**Methods of research.** The objective has been achieved due to the systems approach under a rational combination of theoretical and experimental research methods. The mathematical model of the mined bulk flows formation and interaction is based on the generally accepted provisions of the mined bulk unloading theory, as well as on bench studies of the process of loading with small-diameter auger executive tools.

**Results.** The mathematical model makes it possible to establish the main regularities of the mined bulk unloading workflow performed by the auger executive tool. It also allows to determine the volume of the mined bulk unloaded by the auger blade in one revolution of the executive tool for the required structure, design parameters, and operating parameters of shearers; the volume of the mined bulk shifted by the unloading blade of the auger in one revolution of the executive tool; the volume of the mined bulk circulating in the working volume of the leading auger in one revolution of the executive tool; the volume of the mined bulk remaining on the seam floor after shearer's passing; the performance of the processes of the mined bulk unloading, shifting and circulation during the operation of the auger executive tool of the shearer for low flat seams.

**Conclusions.** An adequate mathematical model has been developed for the flow formation of mined bulk which was unloaded, shifted, as well as circulating and remaining on the seam floor. The model makes it possible to determine the values of the productivity for mined bulk loading, shifting, circulation, as well as for the mined bulk remaining on the seam floor, taking into account the effect of the structure, design parameters, and operating parameters of shearers.

**Keywords:** shearer; mining of low seams; small-diameter auger; unloading process, circulation; mined bulk flow.

### REFERENCES

1. Gorbatov P. A. (ed.) *Mining machines for deep coal mining*. Donetsk: Nord Computer Publishing; 2006. (In Russ.)
2. Guliaev V. G. The relevance and challenges of creating automated plow systems for manless mining of flat thin coal seams of the Donetsk basin. *Vestnik Donetskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta* = *Vestnik Donetsk National Technical University*. 2016; 6: 24–34. (In Russ.)
3. Shabaev O. E., Bridun I. I., Zinchenko P. P. The effect of additional loading devices on the capacity of shearers with small-diameter augers. In: *Social-economic and environmental problems of the mining industry*,

construction, and energy industry: Proceedings of the 16th Internat. conf., 19–20 November 2020. Vol. 1. Tula: TulSU Publishing; 2020. P. 187–194. (In Russ.)

4. Nechepaev V. G. *Mechano-hydraulic auger systems of unloading and transportation*. Donetsk: DonNTU Publishing; 2005. (In Russ.)

5. Boiko N. G. *Shearers for low seams*. Donetsk: DonNTU Publishing; 2010. (In Russ.)

6. Minichev V. I. *Coal mining combines. Design engineering*. Moscow; 1976. (In Russ.)

7. Kuidong Gao, Xin Zhang, Kao Jiang, Yang Yang, Guangjun Yin, Bing Liu. An applied model of minimum rotating speed for drum shearer to avoid drum clogging. *Journal of Engineering Research*. 2019; 7(1): 1–19.

8. Nguyen K. L., Gabov V. V., Zadkov D. A. Improvement of drum shearer coal loading performance. *Eurasian mining*. 2018; 2: 22–25.

9. Nguyen K. L., Gabov V. V., Zadkov D. A. Improving efficiency of cleanup and coal flow formation on conveyor by shearer loader with accessorial blade. *Eurasian mining*. 2019; 1: 37–39.

10. Ayhan M., Eyyuboglu E. M. Comparison of globoid and cylindrical shearer drums' loading performance. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2006; 106: 51–56.

11. Nguyen K. L., Gabov V. V., Zadkov D. A., Le T. B. Justification of process of loading coal onto face conveyors by auger heads of shearer-loader machines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Volume*. 2018; 327: 042132.

12. Tkachev V. V., Bublikov A. V. *Using simulation modelling to study the automatic control of a mining machine*. Dnipro: NMU Publishing; 2015. (In Russ.)

13. Tarasevich V. I., Tarasevich A. V. The influence of auger executive tool cutters on coal unloading out of the working space. *Nauchnye trudy Donetskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. gorno-elektromekhanicheskaja = Scientific Papers of the Donetsk National Technical University. Series: Mining and Electromechanics*. Issue 94. Donetsk: DonNTU Publishing; 2005. P. 210–217. (In Russ.)

14. Tarasevich V. I. *Improving the capacity of coal unloading with the shearers for low seams equipped with auger executive tools: PhD in Eng. Diss*. Donetsk; 1979. (In Russ.)

15. Boiko N. G., Tarasevich V. I., Nechepaev V. G. Filling the auger of the shearer with crushed coal. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institution. Mining Journal*. 1980; 4: 96–99. (In Russ.)

16. Shabaev O. E., Nechepaev V. G., Zinchenko P. P. The procedure of selecting the parameters of shearers with small-diameters augers as applied to given mining and geological conditions. *Vestnik Donetskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik Donetsk National Technical University*. 2020; 3: 43–51. (In Russ.)

17. Alshits Ia. I., Tarasevich V. I., Nechepaev V. G. Research test bench for the processes of coal loading by shearer auger executive tools. *Ugolnoe mashinostroenie = Mechanical Engineering for Coal Industry*. 1977; 1: 10–12. (In Russ.)

Received 19 February 2023

#### Information about the authors:

**Oleg E. Shabaev** – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Mining Machinery, Donetsk National Technical University. E-mail: oeshabaev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0845-7449>

**Valerii G. Nechepaev** – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Machine Design Foundations, Donetsk National Technical University. E-mail: nechepayev@mech.donntu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4016-1661>

**Igor I. Bridun** – PhD (Engineering), Associate Professor, associate professor of the Department of Mining Machinery, Donetsk National Technical University. E-mail: ss13835@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3199-8518>

**Pavel P. Zinchenko** – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Mining Machinery, Donetsk National Technical University. E-mail: pawel.zin4encko@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4070-2715>

**Для цитирования:** Шабаяев О. Е., Нечепаяев В. Г., Бридуи И. И., Зинченко П. П. Математическая модель формирования потоков горной массы комбайнами со шнековыми исполнительными органами малого диаметра // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 5. С. 60–69. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-60-69

**For citation:** Shabaev O. E., Nechepaev V. G., Bridun I. I., Zinchenko P. P. Mathematical model of mined bulk flows formation by small-diameter auger executive tools. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 5: 60–69 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-60-69

## Обоснование сценарного подхода к определению границ карьеров с учетом стохастического характера исходных данных

Фомин С. И.<sup>1</sup>, Говоров А. С.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: govorovalex5487@mail.ru

### Реферат

**Введение.** В работе проведено обоснование сценарного подхода к определению границ карьеров, представлена система с набором определенных состояний и условиями перехода из одного состояния в другое.

**Актуальность темы** исследования обоснована необходимостью повышения надежности и устойчивости проектных решений относительно границ карьеров к изменению внешних факторов.

**Цель работы** – обоснование сценарного подхода к определению границ карьеров с учетом стохастического характера исходных геологических и экономических данных.

**Методика проведения исследования.** Основополагающий метод для обоснования границ карьеров – математическое моделирование и анализ данных о содержаниях полезных компонентов в руде и изменении цен на минеральное сырье во времени. В методику проведения исследования заложены принципы работы с исходными данными в условиях неопределенности.

**Результаты.** На примере золоторудного месторождения установлено, что распределение содержания полезного компонента подчинено логарифмически нормальному закону распределения. Выявлены наиболее вероятные значения содержаний, определена прогнозная цена на золото и сформулированы два сценария развития событий: пессимистичный и оптимистичный.

**Выводы.** Сценарный подход позволяет определить возможные проектные максимальные и минимальные границы карьеров при соответствующих значениях бортового содержания. Эти два варианта могут быть использованы для принятия проектных решений по изменению границ карьеров в пределах между максимальными и минимальными в условиях волатильности рынка минерального сырья при изменении экономических или геологических исходных данных.

**Ключевые слова:** полезные компоненты; бортовое содержание; карьер; границы карьеров; рудные месторождения; стохастический характер; исходные данные.

**Введение.** При разработке рудных сложноструктурных месторождений важной задачей проектирования является выбор стратегии определения границ карьеров [1].

**Цель работы** – разработка и обоснование сценарного подхода к определению границ карьеров. Обосновывается применение методов математической статистики с целью снизить негативные последствия влияния стохастического характера исходных геологических и экономических данных на результаты реализации проектных решений.

**Методика проведения исследования.** Для определения и обоснования границ карьеров предполагается рассмотрение двух сценариев развития событий:

- сценарий 1, NPV = 0, границы карьера максимальны (NPV – Net Present Value, чистая приведенная стоимость);
- сценарий 2, NPV = max, границы карьера минимальны.

Метод представляется как система, характеризующаяся некоторыми состояниями и условиями перехода от одного состояния к другому.

На схеме (рис. 1) представлены 4 состояния системы.

**S-1** – состояние, в котором происходит анализ геологических данных, а именно распределения содержания полезного компонента в руде для блочной модели. Переход к следующему состоянию происходит после получения данных о распределении и диапазоне наиболее вероятных значений содержаний полезного компонента в массиве месторождения.

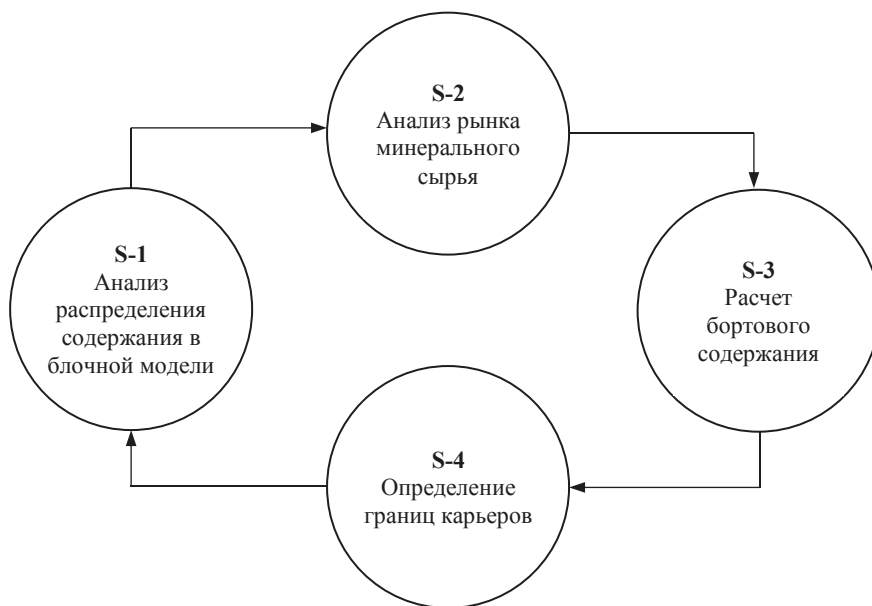


Рисунок 1. Схема реализации стратегии определения границ карьеров  
Figure 1. Scheme of executing the strategy of open pit limits determination

**S-2** – состояние, когда анализируется экономическая ситуация на рынке определенного вида минерального сырья. Переход к следующему состоянию происходит после получения информации о трендах развития цен на рынке и прогнозирования минимальных и максимальных цен.

**S-3** – состояние определения бортового содержания (БС) полезного компонента. Переход к следующему состоянию осуществляется после определения максимальных и минимальных БС.

**S-4** – состояние, когда производится оптимизация границ карьеров. Результатом оптимизации являются два вида возможных границ: максимальные и минимальные. Переход к первому состоянию осуществляется через 1 год или с учетом изменения геологических или экономических исходных данных.

Одним из факторов, в наибольшей степени влияющим на определение границ карьеров, является бортовое содержание полезного компонента. Бортовое содержание – это показатель, характеризующий разделение руды и вскрышной породы при проектировании границ карьера [2, 3].

При проектировании карьеров необходимо учитывать стохастический характер исходных геологических и экономических данных [4–6].

Неподтверждение данных геологической разведки приводит к снижению экономических показателей отработки, корректировке проектных решений или вообще

к консервации открытой разработки. Одним из вариантов снижения степени неопределенности геологических исходных данных является использование результатов эксплуатационной доразведки месторождений, проводимых параллельно с ведением эксплуатационных горных работ [7, 8].

При долгосрочном проектировании границ карьеров и стратегии их изменения целесообразно применять инструменты математической статистики. С помощью анализа распределения содержаний полезных компонентов в рудном массиве выявляются диапазоны наиболее вероятных значений содержаний и составляются обоснованные прогнозы по распределению содержаний по глубине месторождения [9–11].

Как правило, содержания полезных компонентов в руде распределяются в массиве согласно нормальному или логарифмически нормальному закону распределения (рис. 2).

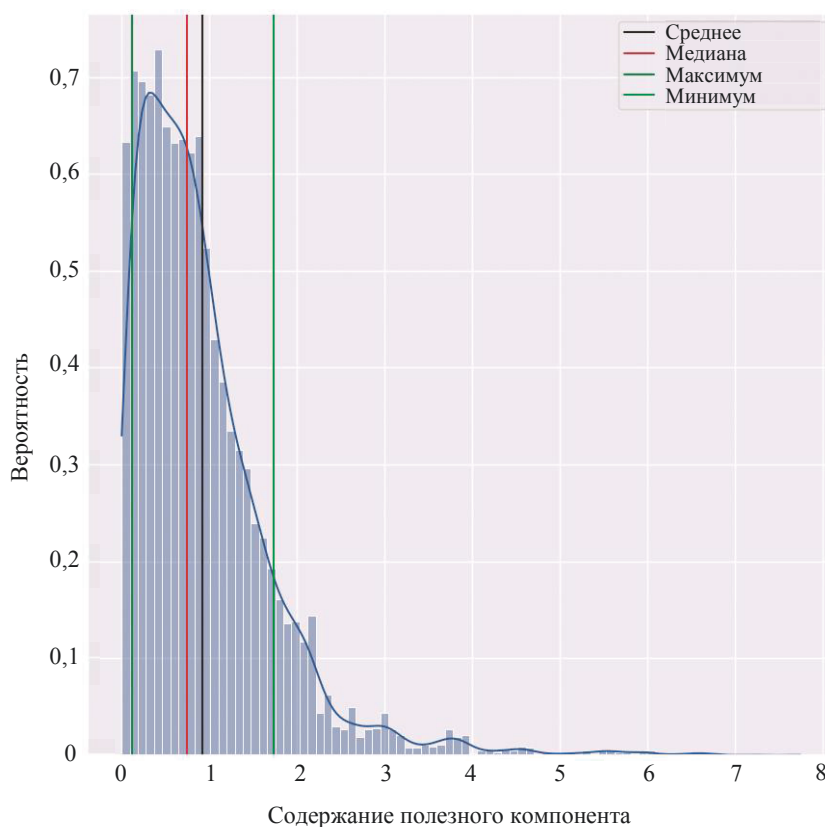


Рисунок 2. Гистограмма результатов анализа распределения полезного компонента на золоторудном месторождении

Figure 2. Histogram of commercial element distribution analysis in the gold ore field

Анализ данных, представленных на графике (рис. 2), позволяет сделать вывод, что содержания полезных компонентов на золоторудном месторождении распределены по логнормальному закону. Наиболее вероятными являются содержания, находящиеся в пределах от 0,11 до 1,73 г/т при математическом ожидании в 0,92 г/т.

Для определения бортового содержания полезных компонентов в руде следует учитывать стохастический характер исходных данных о ситуации на рынках мине-



рального сырья. Цены золота и других металлов на финансовом рынке подвержены высокой степени волатильности [12–14].

Прогнозирование цен на рынке минерального сырья является многофакторной системной задачей. Однако финансовые аналитики и эксперты за годы наблюдения за рынком установили некоторые закономерности изменения цен и предложили математические инструменты для их идентификации [15–18].

Одним из способов оценки ситуации на рынках минерального сырья является установление тренда в изменении цен. Такие тренды могут быть восходящими и нисходящими.

На ранних стадиях проектирования целесообразно проводить анализ рынка по взвешенному скользящему среднему. Взвешенное скользящее среднее – преобразование простого скользящего среднего во временном ряду, где наибольший вес имеют последние значения, а наименьший – предыдущие.

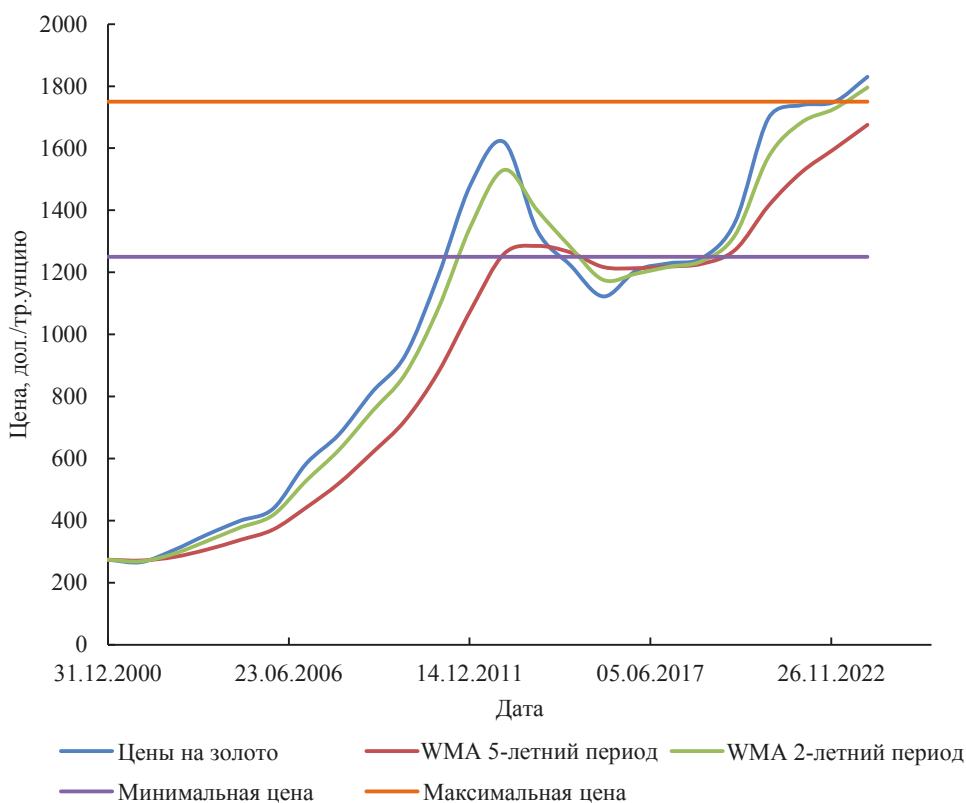


Рисунок 3. График изменения цен на золото (за период с 2000 до 2023 г.)

Figure 3. Gold price chart (from 2000 to 2023)

На рис. 3 представлены график изменения цен на золото и две линии взвешенного скользящего среднего за двухлетний и пятилетний периоды. Анализ данных, представленный на графике, показывает, что наблюдается возрастающий тренд, однако целесообразно учитывать вероятность снижения цен и проводить экспертную оценку.

Для обоснования границ карьеров предлагается рассмотреть два сценария: пессимистичный и оптимистичный.

Пессимистичный сценарий реализуется в случае, если цена на золото достигает уровня пятилетнего минимума. Оптимистичный сценарий характеризуется ростом цены, но в качестве возможного значения принимается прогнозная цена по взвешенному скользящему среднему. Текущие максимумы не рекомендуется принимать из-за высокой вероятности снижения цены от этой отметки.

В данном случае пессимистичный вариант достигается при цене на золото примерно 1250 дол. за тройскую унцию, оптимистичный вариант – 1750 дол. за тройскую унцию.

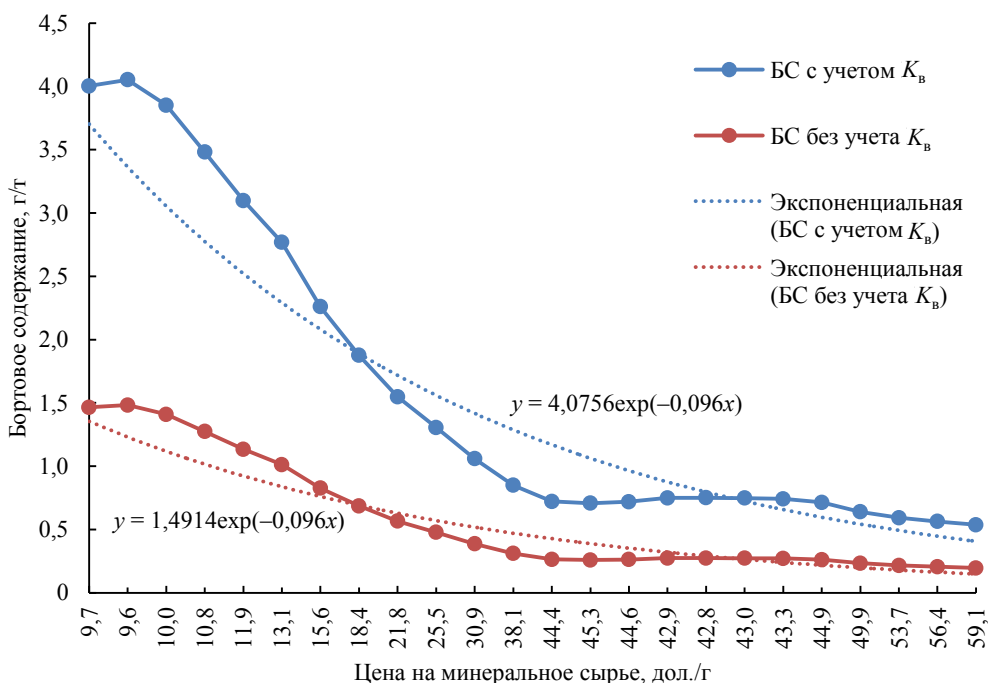


Рисунок 4. График зависимости бортового содержания от цены на золото с учетом и без учета коэффициента вскрыши

Figure 4. Graph of cutoff grade against gold price with and without the stripping ratio

При определении границ карьера важно учитывать наиболее вероятные значения содержаний полезных компонентов в массиве при определении бортового содержания полезных компонентов в добываемой руде. Это, как минимум, позволяет отслеживать, насколько принятое бортовое содержание соответствует наиболее вероятным значениям. В случае если рассчитанное БС попадает в зону менее вероятных значений и после будет использоваться в проектных решениях, то это может привести к корректировке проектных решений.

Предлагается определять бортовое содержание полезных компонентов в добываемой руде с учетом коэффициента вскрыши:

$$\alpha_p = \frac{\left[ (Z_d + Z_{п.р} + Z_{кoc.р}) + K_v (Z_{вск} + Z_{п.п} + Z_{кoc.п}) \right]}{\left[ \varepsilon (C - R) \right]}, \tag{1}$$

где  $Z_d$ ,  $Z_{п.р}$ ,  $Z_{вск}$ ,  $Z_{п.п}$  – текущие удельные эксплуатационные затраты на добычу, переработку руды, вскрышу и переработку породы, соответственно, р./т;

$Z_{\text{к.р.}}$ ,  $Z_{\text{к.п}}$  – косвенные удельные затраты на добычу и переработку руды, на удаление и переработку породы, соответственно, р./т;  $K_{\text{в}}$  – средний эксплуатационный коэффициент вскрыши, т/т;  $\varepsilon$  – извлечение полезного компонента из руды, %,  $C$  – цена конечного продукта на рынке минерального сырья, р./т;  $R$  – удельные затраты на маркетинг, р./т.

Расчет бортового содержания полезного компонента в руде с учетом средне-эксплуатационного коэффициента вскрыши позволяет на стадии определения оптимальных границ карьеров учесть разноску бортов в результате проектирования способа вскрытия, размещения системы съездов и других внутрикарьерных коммуникаций.

В случае если коэффициент вскрыши не учитывается в расчете на стадии оптимизации границ карьеров, то при проектировании системы съездов и других коммуникаций границы карьера расширятся за счет увеличения объемов удаляемой вскрышной породы до 1,5 раз [17].

На рис. 4 представлен график зависимости БС от цены на золото. На графике отображены БС с учетом коэффициента вскрыши и без него.

Для расчета используются максимальная и минимальная цены, определенные с помощью взвешенного скользящего среднего.

**Выводы.** Минимальное бортовое содержание, рассчитанное за период с 2018 до 2023 г. с учетом коэффициента вскрыши по формуле (1), составляет 0,53 г/т. Максимальное БС – 4,05 г/т. Без учета коэффициента вскрыши БС составило 0,19 и 1,48 г/т соответственно.

Зависимости, представленные на графике, показывают, что бортовые содержания, рассчитанные с учетом и без учета коэффициента вскрыши, существенно различаются. Также наблюдается увеличение разницы между двумя рассчитанными БС при ухудшении экономических условий.

При минимальном БС в ходе оптимизации максимальные границы будут достигаться при NPV проекта, равном нулю. При максимальном БС границы карьеров будут стремиться к минимуму, а NPV проекта будет достигать максимума.

Определение максимальных границ карьера на начальных стадиях проектирования позволяет не размещать на выделенной территории объекты и сооружения, которые могут препятствовать добыче запасов руды. Минимальные границы позволяют достигать максимума NPV при возможном ухудшении экономических условий.

Таким образом, использование инструментов математической статистики в анализе данных блочной модели месторождений, оценке и прогнозировании развития трендов изменения цен на рынке минерального сырья позволяет снижать негативное воздействие стохастического характера исходных геологических и экономических данных на принимаемые проектные решения по границам карьера.

Разработка сценариев при обосновании границ карьера позволяет оценить максимальные и минимальные границы, в пределах которых можно изменять промежуточные границы по этапам разработки месторождения в соответствии с внешними условиями.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Litvinenko V. S., Tsvetkov P. S., Molodtsov K. V. The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector // Eurasian mining. 2020. No. 1. P. 36–41.
2. Lerchs H., Grossmann I. F. Optimum design of open-pit mines // CIM. Bulletin 58. 1965. No. 633. P. 47–54.
3. Капугин Ю. Е. Обоснование бортового содержания и оптимизация стратегии развития открытых горных работ. СПб.: Недра, 2017. 280 с.

4. Брагин В. И., Харитонова М. Ю., Мацко Н. А. Вероятностный подход к оценке динамического бортового содержания // Записки Горного института. 2021. № 251. С. 617–625. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.1
5. Lane K. F. The economic definition of ore: cut off grades in theory and practice. London: Mining Journal Books, 1991. 149 p.
6. Матрохина К. В., Трофимец В. Я., Мазаков Е. Б., Маховиков А. Б., Хайкин М. М. Развитие методологии сценарного анализа инвестиционных проектов предприятий минерально-сырьевого комплекса // Записки Горного института. 2023. № 259. С. 112–124. DOI: 10.31897/PMI.2023.3
7. Gilani S.-O., Sattarvand J., Hajihassani M., Abdullah S. S. A stochastic particle swarm based model for long term production planning of open pit mines considering the geological uncertainty // Resources Policy. 2020. Vol. 68. P. 8–12. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101738
8. Dagdelen K., Kawahata K. Value creation through strategic mine planning and cutoff-grade optimization // Mining Engineering. 2008. No. 60. P. 39–45.
9. Шпанский О. В., Лигоцкий Д. Н., Борисов Д. В. Проектирование границ открытых горных работ. СПб.: СПГИ(ТУ), 2003. 90 с.
10. Фомин С. И., Пасынков Д. В., Семенов А. С. Оценка эффективности принятия проектных решений // Записки Горного института. 2009. Т. 180. С. 12–15.
11. Кантемиров В. Д., Яковлев А. М., Титов Р. С. Применение геоинформационных технологий блочного моделирования для совершенствования методов оценки качественных показателей полезных ископаемых // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 1. С. 63–73. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-63-73
12. Fomin S. I., Ivanov V. V., Semenov A. S., Ovsyannikov M. P. Incremental open-pit mining of steeply dipping ore deposits // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020. Vol. 15. P. 1306–1311.
13. Зайцев А. Ю. Методический подход к обоснованию капитальных вложений золоторудных месторождений на основе удельных затрат // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 459–464. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.459
14. Blischenko A. A. Modern mine survey techniques in the process of mining operations in open-pit mines (quarries) // Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues. 2019. P. 58–62. DOI: 10.1201/9781003017226-8
15. Kholmiskiy A. V., Sidorov D. V. Arrangements for increase the efficiency of mining operations on the deep ore mines // Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues. 2019. P. 71–74. DOI: 10.1201/9781003017226-10
16. Armstrong M., Lagos T., Emery X., Homem-de-Mello T., Lagos G., Saure D. Adaptive open-pit mining planning under geological uncertainty // Resources. 2021. Vol. 72. P. 515–529. DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102086
17. Пасынков Д. В., Семенов А. С. Определение эффективности инвестиций при реализации проектов рудных карьеров // Записки Горного Института. 2009. № 180. С. 12–15.
18. Стагурова О. В. Алгоритм Лерча-Гроссмана в задаче определения границ карьера в его предельном положении // Недропользование. XXI век. 2010. № 6. С. 38–42.

Поступила в редакцию 4 мая 2023 года

#### Сведения об авторах:

**Фомин Сергей Игоревич** – доктор технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета. E-mail: fominsi@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0939-1189>

**Говоров Алексей Сергеевич** – аспирант кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета. E-mail: govorovalex5487@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9071-862X>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-70-78

### Justifying the scenario approach to pit limits determination taking into account the stochastic nature of the input data

Sergei I. Fomin<sup>1</sup>, Aleksei S. Govorov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia.

#### Abstract

**Introduction.** The research justifies the scenario approach to pit limits determination. The procedure is presented as a system with a set of certain states and conditions of transition from one state to another. The research relevance is explained by the importance of improving pit limit design solutions reliability and resistance to changing external factors, given the stochastic nature of the geological and economic input data.

**Research objective** is to justify the scenario approach to pit limits determination considering the stochastic nature of the geological and economic input data.

**Methods of research.** The fundamental method for pit limits justification is mathematical modeling and analysis of data on the content of useful components in ore and mineral prices change over time. The research methodology is based on the principles of working with initial data under uncertainty.

**Results.** By the example of a gold ore field, it has been found that the distribution of the useful components is subject to the log-normal law of distribution. The most likely values of the content have been found, the forecasted price of gold has been determined, and two scenarios of events have been formulated: pessimistic and optimistic.

**Conclusions.** The scenario approach allows to determine possible maximum and minimum pit design limits under corresponding values of cutoff grades. These two variants can be used for making design decisions on pit limits adjustment between the maximum and the minimum in conditions of mineral market volatility under changing economic or geological initial data.

**Keywords:** commercial elements; cutoff grade; open pit; pit boundaries; ore fields; stochastic nature; initial data.

#### REFERENCES

- Litvinenko V. S., Tsvetkov P. S., Molodtsov K. V. The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector. *Eurasian Mining*. 2020; 1: 36–41.
- Lerchs H., Grossmann I. F. Optimum design of open-pit mines. *CIJ Bulletin*. 1965; 58(633): 47–54.
- Kaputin Iu. E. *Rationale of cutoff grade and optimization of open-pit mining development strategy*. St. Petersburg: Nedra Publishing; 2017. (In Russ.)
- Bragin V. I., Kharitonova M. Iu., Matsko N. A. A probabilistic approach to the dynamic cut-off grade assessment. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2012; 251: 617–625. (In Russ.) Available from: doi: 10.31897/PMI.2021.5.1
- Lane K. F. *The economic definition of ore: cut off grades in theory and practice*. London: Mining Journal Books; 1991. 149 p.
- Matrokhina K. V., Trofimets V. Ia., Mazakov E. B., Makhovikov A. B., Khaikin M. M. Developing the methodology of scenario analysis of investment projects of mineral resources sector enterprises. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2023; 259: 112–124. (In Russ.) Available from: doi: 10.31897/PMI.2023.3
- Gilani S.-O., Sattarvand J., Hajihassani M., Abdullah S. S. A stochastic particle swarm based model for long term production planning of open pit mines considering the geological uncertainty. *Resources Policy*. 2020; 68: 8–12. Available from: doi: 10.1016/j.resourpol.2020.101738
- Dagdelen K., Kawahata K. Value creation through strategic mine planning and cutoff-grade optimization. *Mining Engineering*. 2008; 60: 39–45.
- Shpanskii O. V., Ligotskii D. N., Borisov D. V. *Designing the limits of open-pit mining*. St. Petersburg: SPGGI (TU) Publishing; 2003. (In Russ.)
- Fomin S. I., Pasyukov D. V., Semenov A. S. Estimating the efficiency of making design solutions. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2009; 180: 12–15. (In Russ.)
- Kantemirov V. D., Iakovlev A. M., Titov R. S. Applying geoinformation technologies of block modelling to improve the methods of assessing quality indicators of minerals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 1: 63–73 (In Russ.). Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2021-1-63-73
- Fomin S. I., Ivanov V. V., Semenov A. S., Ovsiyannikov M. P. Incremental open-pit mining of steeply dipping ore deposits. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020; 15: 1306–1311.
- Zaitsev A. Iu. Methodological approach to substantiation of capital investments of gold ore fields based on unit costs. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2019; 238: 459–464. (In Russ.) Available from: doi: 10.31897/PMI.2019.4.459
- Blischenko A. A. Modern mine survey techniques in the process of mining operations in open-pit mines (quarries). *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues*. 2019. P. 58–62. Available from: doi: 10.1201/9781003017226-8
- Kholmskiy A. V., Sidorov D. V. Arrangements for increase the efficiency of mining operations on the deep ore mines. *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues*. 2019. P. 71–74. Available from: doi: 10.1201/9781003017226-10
- Armstrong M., Lagos T., Emery X., Homem-de-Mello T., Lagos G., Saure D. Adaptive open-pit mining planning under geological uncertainty. *Resources*. 2021; 72: 515–529. Available from: doi: 10.1016/j.resourpol.2021.102086

17. Pasynkov D. V., Semenov A. S. Determining the efficiency of investment when executing ore mine projects. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2009; 180: 12–15. (In Russ.)

18. Stagurova O. V. Lerch-Grossman algorithm in the problem of open coast mining delimitation in its limited position. *Nedropolzovanie. XXI vek = 21 Century Subsoil Use*. 2010; 6: 38–42. (In Russ.)

Received 4 May 2023

#### Information about the authors:

**Sergei I. Fomin** – DSc (Engineering), professor of the Department of Mineral Deposits Development, Saint Petersburg Mining University. E-mail: [fominsi@mail.ru](mailto:fominsi@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-0939-1189>

**Aleksei S. Govorov** – PhD student, Department of Mineral Deposits Development, Saint Petersburg Mining University. E-mail: [govorovalex5487@mail.ru](mailto:govorovalex5487@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-9071-862X>

**Для цитирования:** Фомин С. И., Говоров А. С. Обоснование сценарного подхода к определению границ карьеров с учетом стохастического характера исходных данных // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 5. С. 70–78. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-70-78

**For citation:** Fomin S. I., Govorov A. S. Justifying the scenario approach to pit limits determination taking into account the stochastic nature of the input data. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 5: 70–78 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-70-78

## МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО. ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 550.837

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-79-89

### Моделирование рассеяния электромагнитного поля на 3D-объектах в непроводящей среде

Ратушняк А. Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия  
*e-mail: geo\_info@mail.ru*

#### Реферат

**Цель работы.** В настоящей статье проведено сопоставление результатов математического моделирования низкочастотного магнитного поля индуктивного источника, рассеиваемого на 3D-проводящих объектах, с данными физического моделирования, выполненного другими авторами, применительно к низкочастотным индуктивным методам наземной и скважинной электроразведки. Сопоставление результатов должно стать тестом правильности алгоритма расчетов гармонического электромагнитного поля стороннего источника на проводящем 3D-объекте.

**Методика проведения исследований.** Математическое моделирование рассеяния гармонического электромагнитного поля на проводящем 3D-объекте выполнено с помощью специализированного пакета программ, предназначенного для расчета магнитного поля стороннего индуктивного источника на локальном объекте, находящегося в непроводящей вмещающей среде (воздух). Результаты физического моделирования определены по литературным данным различных отечественных и зарубежных авторов.

**Анализ результатов.** Проведенное сравнение расчетов и результатов физического моделирования составляющих переменного магнитного поля для аналогичных физико-геометрических условий и параметров источников, а также проводящего 3D-тела при магнитном типе возбуждения проводящей сферы, куба и тонкой проводящей пластины показало хорошее качественное и количественное соответствие величин и пространственных характеристик составляющих магнитного поля. Выполненное сравнение указывает на необходимость учета индуктивного слагаемого, обусловленного изменением магнитного поля по закону Фарадея, при проведении математического моделирования рассеяния гармонического электромагнитного поля на проводящих 3D-объектах.

**Область применения результатов.** Результаты выполненной работы могут быть использованы при проведении геофизических электромагнитных исследований методами индукционных дистанционных и частотных зондирований при поисково-разведочных работах на рудных месторождениях полезных ископаемых и применении электромагнитных методов дефектоскопии проводящих материалов.

**Ключевые слова:** проводящий 3D-объект; физическое моделирование; математическое моделирование; переменное магнитное поле.

**Введение.** Целью настоящих исследований является сравнение результатов математического моделирования низкочастотного магнитного поля гармонического индуктивного источника с проводящим 3D-объектом с материалами физического моделирования применительно к методам индуктивной электроразведки, а также с аналитическим решением распределения магнитного поля, рассеиваемого проводящей сферой.

В настоящей работе для аналитического расчета гармонического магнитного поля, рассеиваемого проводящим 3D-объектом, расположенным в непроводящей среде, и его сопоставления с материалами физического моделирования используется частный случай уравнения рассеяния низкочастотного гармонического электромагнитного поля стороннего источника на локальном проводящем 3D-объекте, приведенный в работах [1, 2].

Уравнение рассеяния поля получено как суперпозиция аномальных напряженностей электрического и магнитного полей вторичных электрических и магнитных диполей, возникающих в центрах элементарных объемов под действием внешнего электрического и магнитного полей.

Уравнение рассеяния гармонического электромагнитного поля учитывает как парный, так и перекрестный эффекты физических полей. Парный эффект полей заключается в учете двух сил, действующих со стороны электрического и со стороны переменного магнитного поля, и в поляризации 3D-проводника токами проводимости и токами индукции. Перекрестный эффект полей заключается в создании магнитного поля электрическим полем по закону Био-Савара (токами в проводящей среде) и электрического поля – магнитным полем по закону Фарадея (изменением потока магнитной индукции).

В случае непроводящей вмещающей среды в уравнении рассеяния отсутствуют аномальные слагаемые поля, соответствующие возбуждению проводящего 3D-объекта токами проводимости ввиду их отсутствия. Для расчета напряженности магнитного поля из [1, 2]:

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}^0 - \frac{1}{4\pi} \int_V G^{HH}(\mathbf{r}/\mathbf{r}') k^2(\mathbf{r}') \Phi(\mathbf{r}') dV, \quad (1)$$

где  $\mathbf{H}^0$  – напряженность магнитного поля источника в однородной среде, А/м;  $V$  – объем проводящего 3D-тела, м<sup>3</sup>;  $G^{HH}(\mathbf{r}/\mathbf{r}') = \text{rot rot}(1/R)$  – тензорная функция Грина, м<sup>-3</sup>,  $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ , м;  $k = \sqrt{j\omega\mu_0\sigma}$  – волновое число, м<sup>-1</sup>;  $\omega$  – круговая частота, 1/с,  $\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м,  $\sigma$  – удельная электропроводность 3D-объекта, См/м.

С помощью вектора  $\Phi = (\xi H_\xi d\xi d\eta + \eta H_\eta d\xi d\zeta + \zeta H_\zeta d\xi d\eta) / c$  обозначен поток вектора напряженности магнитного поля  $\mathbf{H}$ , пересекающего малый объем  $dV = d\xi d\zeta d\eta$  в ортогональных направлениях  $\xi, \eta, \zeta$  (единичные орты) через площадь  $S$  сечения элементарного объема по направлению магнитного поля,  $c = \text{const}$ . В отличие от традиционно используемой в электродинамике физической величины скалярного потока магнитной индукции через площадь  $\Phi$ , введенное обозначение вектора позволяет учитывать направление вектора магнитного поля и ориентировку плоскости, в которой создается вихрь индукционной плотности тока.

Для точек  $\mathbf{r} \in V$  уравнение (1) является системой интегральных соотношений для напряженности магнитного поля, описывающей возбуждение проводящего 3D-тела переменным магнитным полем по закону Фарадея. Для точек  $\mathbf{r} \notin V$  уравнение (1) является интегральной формулой для расчета напряженности магнитного поля.

**Алгоритм численного моделирования.** Численная реализация уравнения (1) основывается на обобщении метода решения одномерного скалярного интегрального уравнения, предложенного Фредгольмом [3]. В трехмерном случае для век-



торного поля она заключается в замене непрерывного интеграла по объему (или по нескольким объемам) суммой по конечному числу элементов объема, столь малых, что электропроводность и напряженности поля можно считать постоянными величинами в пределах каждого из них.

Перегруппируем слагаемые системы и запишем уравнение рассеяния (1) в матричном виде с симметричными дифференциальными операторами, используя соотношение векторного анализа  $\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{F} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{F} - \Delta \mathbf{F}$  и волновое уравнение для скалярной функции Грина, из которого следует, что  $\Delta g(\mathbf{r} - \mathbf{r}') = k_0^2 g(\mathbf{r} - \mathbf{r}') - 4\pi \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$ .

Перегруппируем слагаемые и внесем  $H_m(\mathbf{r}')$  под знак интеграла, используя свойство дельта-функции Дирака и представив ее в качестве общего множителя. Заменяем интеграл по объему  $V$  суммой при  $N \rightarrow \infty$  элементарных объемов  $dV_j$  и перенесем интегрирование на множитель, стоящий в скобках. Для текущей точки  $\mathbf{r}_i$  элементарного объема получим:

$$\sum_{j=1}^N \sum_{n=1}^3 \left[ \delta_{mn} \delta_{r_p} \psi(\mathbf{r}_p) + \frac{k^2(\mathbf{r}_p) d^2(\mathbf{r}_p)}{4\pi c} \bar{G}_{mn}(\mathbf{r}_i/\mathbf{r}_p) \right] H_n(\mathbf{r}_p) = H_m^0(\mathbf{r}_i),$$

где  $\psi(\mathbf{r}_p) = 1 - k^2(\mathbf{r}_p) d^2(\mathbf{r}_p) / 2c$ .

Рассматривая

$$A_{mn}(\mathbf{r}_i/\mathbf{r}_p) = \delta_{mn} \delta_{r_p} \psi(\mathbf{r}_p) + \frac{k^2(\mathbf{r}_p) d^2(\mathbf{r}_p)}{4\pi c} \bar{G}_{mn}(\mathbf{r}_i/\mathbf{r}_p)$$

как элементы матрицы  $\mathbf{A}$  размером  $N \times N$ , а  $H_m^0$  и  $H_n$  как  $N$ -мерные векторы, где индексы  $m$  и  $n = 1, 2, 3$  ( $x, y, z$ ), получим матричное представление интегрального уравнения, т. е. систему линейных алгебраических уравнений вида  $[\mathbf{A}] \cdot [\mathbf{H}] = [\mathbf{H}^0]$ , где  $\mathbf{A}$  – матрица размером  $3N \times 3N$ ,  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{H}^0$  – векторы неизвестных и свободных членов размером  $3N$ . Алгоритмы численной реализации системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) изложены в работах [2, 4]. В данной работе для численного решения СЛАУ использовался метод исключения Гаусса.

**Модель 1.** Рассмотрим расчет переменного магнитного поля для 3D-проводящего однородного тела в форме куба, находящегося в непроводящей среде, в однородном низкочастотном внешнем магнитном поле. Этот случай позволяет провести численное сравнение результатов математического моделирования с аналитическим решением задачи о рассеянии однородного гармонического поля на проводящей сфере. Формулы для аналитического расчета магнитного поля сферы с радиусом  $a$  приведены в работах [5–7] и имеют вид:

$$H_r = H_0 \left( 1 - \frac{a^3}{r^3} D \right) \cos \theta; \quad H_\theta = -H_0 \left( 1 + \frac{a^3}{2r^3} D \right) \sin \theta,$$

где  $D = \frac{3c \operatorname{th}(ka)}{ka} - \frac{3}{(ka)^2} - 1$ ,  $\mathbf{H}_i = H \mathbf{i}$ .

Параметры расчетов: величина напряженности нормального магнитного поля  $H_z^0 = 1$  А/м, удельная электропроводность тела  $\sigma_v = 1$  См/м,  $f = 10^4$  Гц, ребро куба

$d = 50$  м, расстояние от центра тела до линии наблюдений  $y = 0$  составляет  $z = 250$  м.

На рис. 1 приведены графики  $ReH_x$ ,  $ReH_z$  и  $ImH_x$ ,  $ImH_z$  проводящих сферы (индекс  $S$ ) и куба по профилю наблюдений. Математическая модель соответствует физической модели в масштабе 100 : 1.

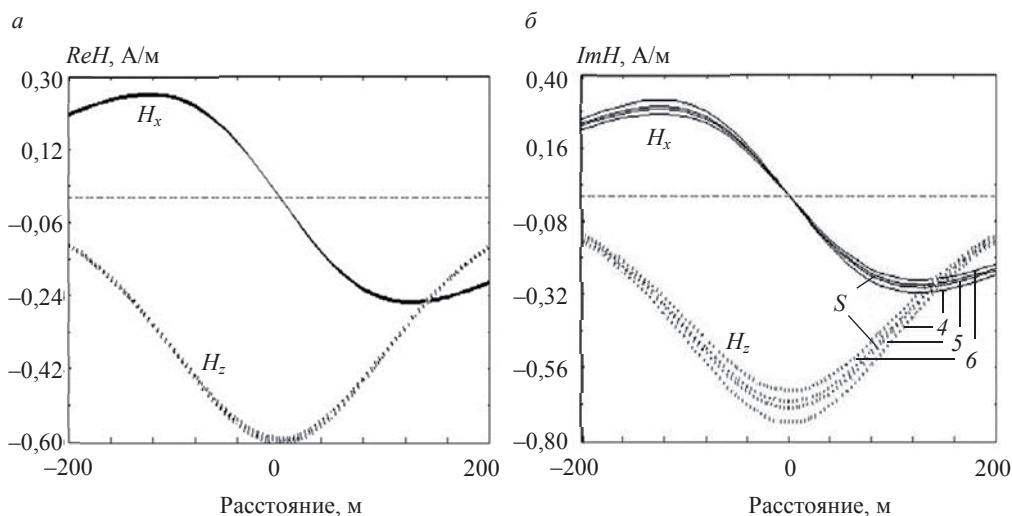


Рисунок 1. Графики  $ReH_x$ ,  $ReH_z$  – а и  $ImH_x$ ,  $ImH_z$  – б сферы (индекс  $S$ ) и куба по оси  $X$  в однородном магнитном поле

Figure 1. Graphs of  $ReH_x$ ,  $ReH_z$  – a and  $ImH_x$ ,  $ImH_z$  – б of a sphere (index  $S$ ) and a cube along the  $X$  axis in a uniform magnetic field

Цифрами на кривых обозначено число разбиений каждой стороны куба на элементарные объемы. Составляющие магнитного поля от проводящей сферы обозначены буквой  $S$ . Объем сферы с радиусом  $a$  принят равным объему куба  $V_{3D} = d^3 = 4\pi a^3/3 = V_S$ .

Как видно из приведенных графиков рис. 1, кривые  $Re$  компонентов поля для сферы и куба практически сливаются. Для  $Im$  компонентов поля достаточно хорошее приближение поля куба и сферы равных объемов достигается при разбиении проводящего куба уже на  $5^3$  элементов.

На рис. 2 приведены частотные характеристики  $Re$  и  $Im$  квадратур  $H_z$  – составляющей напряженности аномального магнитного поля – для точки, находящейся на полярной оси  $x = 0$ ,  $z = 250$  м вне проводящих 3D-тела и сферы равных объемов. В качестве аргумента приведен безразмерный волновой параметр сферы  $P = \omega\mu_0\sigma a^2$ .

Рассмотренный пример расчетов переменного магнитного поля при магнитном типе возбуждения показывает соответствие перераспределения внешнего магнитного поля проводящего 3D-тела полю проводящей сферы, определяемому по аналитическим формулам.

**Модель 2.** Рассмотрим расчет переменного магнитного поля для 3D-проводящего однородного тела в форме куба, находящегося в непроводящей среде, в однородном низкочастотном внешнем магнитном поле магнитного диполя. Этот случай позволяет провести численное сравнение с результатами физического моделирования, выполненного применительно к индуктивной электроразведке над проводящим шаром [8] методом индуктивного профилирования. Обобщение экспериментальных работ приведено в работе [9].

В качестве модельного объекта использовался чугунный шар диаметром  $d = 0,16$  м. В качестве установки использовалась экваториальная система из приемной и генераторной катушек малого диаметра с одинаковыми направлениями осей (установка  $ZZ$ ), разносимых на расстояние  $r = 0,4$  м (разнос) с моментом диполя  $M_z = 10^3$  А · м<sup>2</sup>. Расположение катушек – продольное (вдоль линии профиля над центром шара) и поперечное (середина установки проходит над центром шара). Физическое моделирование выполнялось с проведением модульных измерений амплитуд  $B_z$  магнитной индукции с частотой тока в магнитном диполе  $f = 15$  МГц.

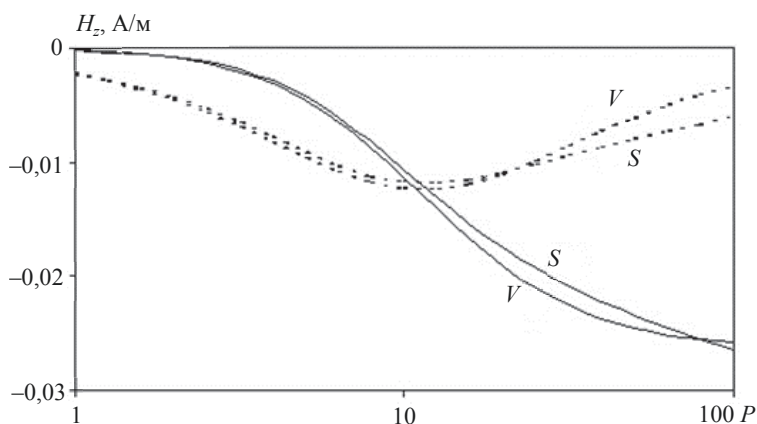


Рисунок 2. Графики зависимости  $Re$  (сплошные) и  $Im$  (штриховые)  $H_z$  на полярной оси  $Z$  проводящих сферы  $S$  и куба  $V$  от волнового параметра  $P$   
Figure 2. Dependency graphs of  $Re$  (solid) and  $Im$  (dashed)  $H_z$  on the polar axis  $Z$  of the conducting sphere  $S$  and cube  $V$  on the wave parameter  $P$

На рис. 3 приведены графики  $ReB_{za}$  по оси  $X$  над шаром при продольном и поперечном расположении установки.

Высокая частота тока в магнитном диполе в соответствии с частотной характеристикой рис. 2 обуславливает перераспределение аномалии из квадратуры  $Im$  в  $Re$ . Локальный проводник при продольном расположении установки отмечается двумя экстремумами равной величины с расстоянием между аномалиями, близким к величине разноса.

При поперечном расположении установки проводящее тело отмечается максимумом при положении магнитного диполя над центром тела. В обоих случаях расположения установки погружение проводящего тела приводит к уменьшению аномалии магнитного поля.

Аналогичные модельные измерения над проводящим шаром выполнены авторами работы [10]. В качестве модельного объекта использовался алюминиевый шар диаметром  $d = 0,05$  м с удельной электропроводностью  $\sigma = 0,35 \cdot 10^8$  См/м, моделирующий проводящее рудное тело. В качестве установки использовалась экваториальная система из приемной и генераторной катушек малого диаметра с одинаковыми направлениями осей (установка  $ZZ$ ), разносимых на различное расстояние (разнос  $r$ ) с продольным направлением установки относительно профиля над центром шара вдоль оси  $X$ . Физическое моделирование выполнялось с проведением фазочувствительных измерений фаз  $\varphi_z$  и амплитуд  $H_z$  магнитного поля с частотой тока в магнитном диполе  $f = 500$  Гц.

На рис. 4 приведены графики рассчитанных фаз  $\varphi_z$  и амплитуд  $H_z$ , приведенных к величине первичного поля установки  $H_z^0 = -1/(4\pi r^3)$ , для соответствующей мате-

математической модели масштаба 100 : 1 над центром проводящего куба с ребром  $h = d$  на разнотах  $r = 5, 10, 15$  м.

Подобие математической и физической моделей обеспечивается равенством величин волновых параметров  $P_\phi = \omega \mu_0 \sigma_\phi d^2 = \omega \mu_0 \sigma_m h^2 = P_m$  за счет изменения величины электропроводности математической модели  $\sigma_m$ .

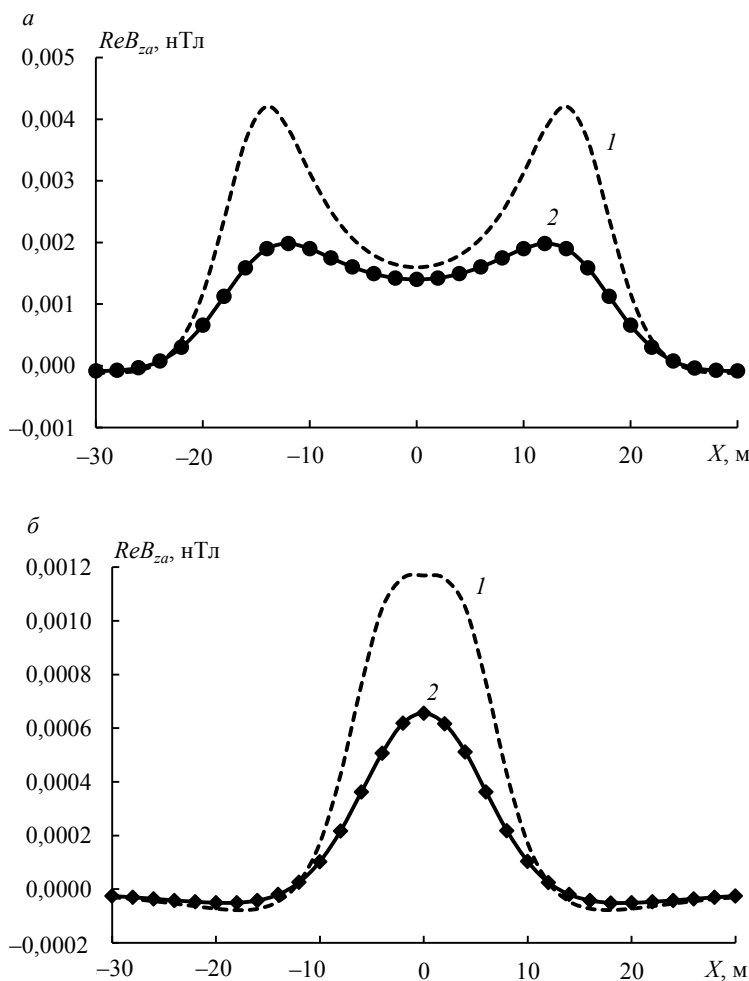


Рисунок 3. Графики  $ReB_{z\alpha}$  по оси  $X$  над шаром продольной –  $a$  и поперечной –  $b$  установок; глубина центра шара: 1 – 11,3 м; 2 – 13 м  
 Figure 3. Graphs of  $ReB_{z\alpha}$  along the  $X$  axis over the ball of longitudinal –  $a$  and transverse –  $b$  installations; depth of the ball center: 1 – 11.3 m; 2 – 13 m

Отмечая качественное соответствие рассчитанных и экспериментальных результатов, приведенных в [10, с. 64], отметим, что величина рассчитанного модуля поля превышает величину модуля первичного поля источника  $|H_z| = \sqrt{Re H_z^0 + Im H_z^0} > |H_z^0|$ , поскольку аномалия магнитного поля содержится в основном в квадратуре  $Im H_z^0$ . Соответственно, приведенное поле составляет величину, по модулю превышающую единицу. Для соответствия величин фазовых углов

необходимо более точное определение величины удельной электропроводности шара, которое приведено, очевидно, по справочной литературе. В приведенных расчетах принято  $\sigma = 5 \cdot 10^{-3}$  См/м, что соответствует волновому параметру объема  $P = 5 \cdot 10^{-4}$ .

Рассмотренные примеры физического моделирования и расчетов переменного магнитного поля при магнитном типе возбуждения локального проводящего тела магнитным диполем показывают их качественное соответствие.

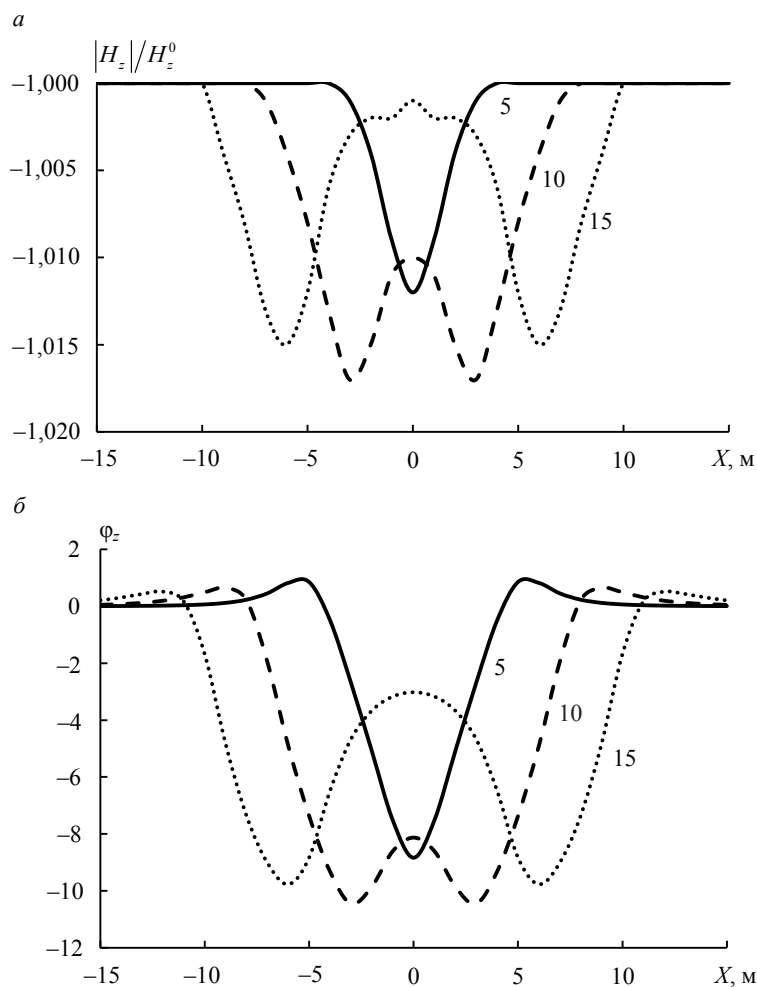


Рисунок 4. Графики относительных амплитуд  $|H_z|/H_z^0$  –  $a$  и фаз  $\varphi_z$  –  $b$ , рассчитанных по оси  $X$  при  $z = 4$  м над центром шара на разносах  $r = 5, 10, 15$  м (шифр кривых)

Figure 4. Graphs of relative amplitudes  $|H_z|/H_z^0$  –  $a$  and phases  $\varphi_z$  –  $b$ , calculated along the  $X$  axis under  $z = 4$  m above the ball center at  $r = 5, 10, 15$  m (code of curves)

**Модель 3.** Модельные измерения с проводящим 3D-телом выполнены авторами работы [11] применительно к электроразведке методом дипольного электромагнитного профилирования скважин (ДЭМПС).

В качестве проводящего объекта использовался прямоугольный параллелепипед из тонкого дюралюминиевого листа толщиной 2,7 мм, моделирующий тонкий

проводящий пласт с размерами по простиранию, существенно превосходящими мощность и размер установки. В качестве установки использовалась система из трех ортогональных приемных и одной генераторной катушек малого диаметра, разносимых на различное расстояние  $L$  (разнос). Ось датчика  $H_z$  – составляющей магнитного поля – совпадает с направлением момента генераторной катушки  $M_z$ , соответствующей магнитному диполю. Физическое моделирование выполнялось с проведением модульных измерений амплитуд  $H_z$  магнитного поля с частотой тока в магнитном диполе  $f = 1125$  Гц.

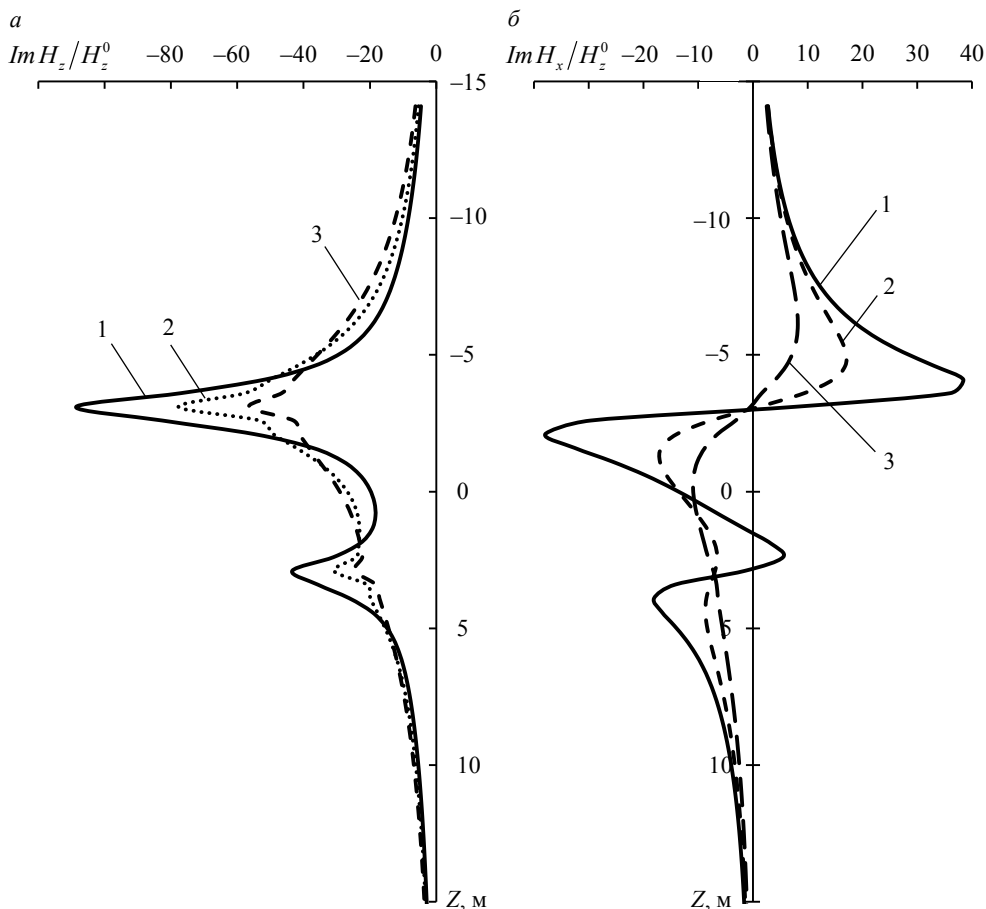


Рисунок 5. Графики отношений осевой  $Im H_z / H_z^0$  – а и поперечной  $Im H_x / H_z^0$  – б составляющих магнитного поля по оси  $Z$ , пересекающей проводящее 3D-тело на разном расстоянии  $y$ , м, от вертикальной границы (шифр кривых)

Figure 5. Graphs of the ratios of the axial  $Im H_z / H_z^0$  – а and transverse  $Im H_x / H_z^0$  – б magnetic field components along the  $Z$  axis, crossing the conducting 3D body at different distances  $y$ , m, from the vertical boundary (code of curves)

На рис. 5 приведены графики вдоль оси  $Z$  рассчитанных мнимых квадратур  $H_y$  и  $H_z$ , приведенных к величине первичного поля установки  $H_z^0 = 1/(2\pi r^3)$  для разноса  $L = 12$  м, для математической модели, соответствующей физической, в масштабе 60 : 1.

При различных положениях линии наблюдений, направленной по оси  $z$  и пересекающей проводник на небольшом расстоянии  $y$  до вертикальной границы тела,

верхняя и нижняя границы проводящего 3D-объекта отмечаются однополярными аномалиями осевой составляющей поля  $ImH_z$  на границах тела и знакопеременными аномалиями поперечной составляющей  $\dot{Im}H_x$ . Однополярные аномалии вертикальной составляющей магнитного поля  $ImH_z$  напротив границ тела объясняются концентрацией индукционных токов вблизи внешней границы тела. Знакопеременные аномалии горизонтальной составляющей  $ImH_x$  обусловлены скачком (разрывом) магнитного поля, пересекающим поверхность с токами.

Величины аномалий уменьшаются по мере приближения линии наблюдений к центру проводящего объекта ( $y \rightarrow y_s$ ) и в предельном случае положения в центре объекта равняются нулю ввиду симметрии модели.

Аномалии вертикальной составляющей магнитного поля, измеренные внутри модельного объекта, имеют вид постоянных значений [11, рис. 3.35], что связано с погрешностями физического моделирования. При этом аномалии горизонтальной составляющей магнитного поля снаружи проводящего модельного объекта являются знакопеременными, что соответствует теоретическим расчетам.

Математическое моделирование может быть полезным для оценки правильности результатов физического моделирования, выполняемого отечественными и зарубежными исследователями не только вопросов электромагнитных методов исследований, но и дефектоскопии проводящих материалов [12–15].

**Выводы.** Примеры расчетов переменного магнитного поля при магнитном типе возбуждения проводящего 3D-тела в непроводящей среде показывают соответствие полю модельных объектов, определяемых по физическому моделированию и аналитическим формулам. Для гармонического режима изменения электромагнитного поля описание возбуждения проводящего 3D-тела электрическим и переменным магнитным полем позволяет адекватно описать парный и перекрестный эффекты физических полей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ратушняк А. Н. Рассеяние гармонического электромагнитного поля на локальных проводниках // Известия вузов. Горный журнал. 2006. № 1. С. 149–156.
2. Аэроэлектроразведка при поисках месторождений проводящих руд / А. И. Человечков [и др.]. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 72 с.
3. Крылов В. И., Бобков В. В., Монастырский П. И. Начала теории вычислительных методов: интегральные уравнения, некорректные задачи и улучшение сходимости. Минск: Наука и техника, 1984. 263 с.
4. Кормильцев В. В., Ратушняк А. Н. Моделирование геофизических полей при помощи объемных векторных интегральных уравнений. Екатеринбург: РФФИ–УрО РАН, 2000. 98 с.
5. Дивильковский М. А. Задача о шаре, помещенном в однородное электрическое или магнитное поле // Журнал технической физики. 1939. Т. 9. № 5. С. 433–443.
6. March Н. W. The field of magnetic dipole in presence of a conducting sphere // Geophysics. 1953. Vol. 18. P. 671–684.
7. Светов Б. С. Теория, методика, интерпретация материалов низкочастотной индуктивной электроразведки. М.: Недра, 1973. 254 с.
8. Молочнов Г. В., Балобаев В. Т. Проводящее тело в электромагнитном поле вертикального магнитного диполя // Ученые записки ЛГУ. Вопросы геофизики. 1958. № 249. Вып. 10. С. 24–36.
9. Вешев А. В., Ивочкин В. Г., Игнатьев Г. Ф. Электромагнитное профилирование. Л.: Недра, 1971. 216 с.
10. Захаров В. Х. Дипольное индуктивное профилирование с амплитудно-фазовыми измерениями при поисках и разведке сульфидных руд. Л.: Недра, 1967. 156 с.
11. Лебедин Л. В., Попов Н. И., Савинова М. И., Шрага А. Б. Скважинная индукционная электроразведка с аппаратурой СИНУС. Л.: Рудгеофизика, 1990. 224 с.
12. Heagy L. J., Oldenburg D. W. Modeling electromagnetics on cylindrical meshes with applications to steel-cased wells // Geophysics. 2019. Vol. 125. P. 115–130.
13. Heagy L. J., Cockett R., Kang S., Rosenkjaer G. K., Oldenburg D. W. A framework for simulation and inversion in electromagnetics // Computers & Geosciences. 2017. Vol. 107. P. 1–19.

14. Oldenburg D. W., Heagy L. J., Kang S., Cockett R. 3D electromagnetic modelling and inversion: a case for open source // *Exploration Geophysics*. 2020. Vol. 51(1). P. 25–37.

15. Kang S., Oldenburg D. W., Heagy L. J. Detecting induced polarisation effects in time-domain data: a modelling study using stretched exponentials // *Exploration Geophysics*. 2020. Vol. 51(1). P. 122–133.

Поступила в редакцию 17 мая 2023 года

#### Сведения об авторе:

**Ратушняк Александр Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией электрометрии Института геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН. E-mail: geo\_info@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2446-1330>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-79-89

## Modelling the electromagnetic field scattering on 3D objects in a non-conducting medium

**Aleksandr N. Ratushniak<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Bulashevich Institute of Geophysics UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

### Abstract

**Research objective.** The results of mathematical modelling of the low-frequency magnetic field of an inductive source scattered on 3D conducting objects were compared with the data of physical modelling performed by other authors in relation to low-frequency inductive methods of surface and borehole electrical exploration. Results comparison should test the correctness of the algorithm for calculating the harmonic electromagnetic field of a third-party source on a conducting 3D object.

**Methods of research.** Mathematical modelling of harmonic electromagnetic field scattering on a conducting 3D object is carried out using a specialized software package designed to calculate the magnetic field of a third-party inductive source on a local object located in a non-conducting host medium (air). The results of physical modelling were determined according to the literary data of various domestic and foreign authors.

**Results analysis.** Comparison of calculations and results of physical modelling of alternating magnetic field components for similar physical-geometric conditions and source parameters and conducting 3D body at magnetic type of conducting sphere, cube and thin conducting plate excitation showed good qualitative and quantitative correspondence of values and spatial characteristics of magnetic field components. The comparison shows that it is important to take into account the inductive component conditioned by the change in the magnetic field according to Faraday's law, when modelling harmonic electromagnetic field scattering on conducting 3D objects.

**Scope of the results.** Research results can be used at geophysical electromagnetic survey using induction remote and frequency sounding methods during prospecting and exploration at ore fields. The research results can also be used when applying electromagnetic methods for flaw survey of conductive materials.

**Keywords:** conducting 3D object; physical modelling; mathematical modelling; alternating magnetic field.

### REFERENCES

1. Ratushniak A. N. Diffusion of harmonic electromagnetic field on local conductors. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2006; 1: 149–156. (In Russ.)

2. Chelovechkov A. I. et al. *Aerial prospecting by electric methods at mineral exploration of conductive ore*. Ekaterinburg: UB RAS Publishing; 2012. (In Russ.)

3. Krylov V. I., Bobkov V. V., Monastyrnyi P. I. *The fundamentals of the theory of computational techniques: integral equations, ill-posed problems, and convergence acceleration*. Minsk: Nauka i tekhnika Publishing; 1984. (In Russ.)

4. Kormiltsev V. V., Ratushniak A. N. *Modelling geophysical fields through volume vector integral equations*. Ekaterinburg: RFBR UB RAS Publishing; 2000. (In Russ.)



5. Divilkovskii M. A. The problem of a sphere located into a homogeneous electric or magnetic field. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = The Journal of Applied Physics*. 1939; 9(5): 433–443. (In Russ.)
6. March H. W. The field of magnetic dipole in presence of a conducting sphere. *Geophysics*. 1953; 18: 671–684.
7. Svetov B. S. *Theory, methods, and interpretation of materials of low-frequency inductive electrical survey*. Moscow: Nedra Publishing; 1973. (In Russ.)
8. Molochnov G. V., Balobaev V. T. Conducting body in electromagnetic field of vertical magnetic dipole. *Uchenye zapiski LGU. Voprosy geofiziki = Proceedings of LSU. Geophysics*. 1958; 249(10): 24–36. (In Russ.)
9. Veshev A. V., Ivochkin V. G., Ignatiev G. F. *Electromagnetic profiling*. Leningrad: Nedra Publishing; 1971. (In Russ.)
10. Zakharov V. Kh. *Dipole induction profiling with amplitude-phase observations at prospecting and exploration of sulphide ore*. Leningrad: Nedra Publishing; 1967. (In Russ.)
11. Lebedkin L. V., Popov N. I., Savinova M. I., Shraga A. B. *Downhole induction survey with SINUS equipment*. Leningrad: Rudgeofizika Publishing; 1990. (In Russ.)
12. Heagy L. J., Oldenburg D. W. Modeling electromagnetics on cylindrical meshes with applications to steel-cased wells. *Geophysics*. 2019; 125: 115–130.
13. Heagy L. J., Cockett R., Kang S., Rosenkjaer G. K., Oldenburg D. W. A framework for simulation and inversion in electromagnetics. *Computers & Geosciences*. 2017; 107: 1–19.
14. Oldenburg D. W., Heagy L. J., Kang S., Cockett R. 3D electromagnetic modelling and inversion: a case for open source. *Exploration Geophysics*. 2020; 51(1): 25–37.
15. Kang S., Oldenburg D. W., Heagy L. J. Detecting induced polarisation effects in time-domain data: a modelling study using stretched exponentials. *Exploration Geophysics*. 2020; 51(1): 122–133.

Received 17 May 2023

**Information about the author:**

**Aleksandr N. Ratushniak** – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Electrical Logging Laboratory, Bulashevich Institute of Geophysics UB RAS. E-mail: [geo\\_info@mail.ru](mailto:geo_info@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-2446-1330>

**Для цитирования:** Ратушняк А. Н. Моделирование рассеяния электромагнитного поля на 3D-объектах в непроводящей среде // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 5. С. 79–89. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-79-89

**For citation:** Ratushniak A. N. Modelling the electromagnetic field scattering on 3D objects in a non-conducting medium. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 5: 79–89 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-79-89

## ОХРАНА ТРУДА

УДК 622.4+519.67

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-90-101

### Исследование влияния параметра фоновой стратификации на время естественного проветривания карьера на базе численного моделирования

Амосов П. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

*e-mail: p.amosov@ksc.ru*

#### Реферат

**Цель работы.** Оценка влияния параметра фоновой стратификации на время естественного проветривания карьера и уровень загрязнения атмосферы верхнего борта карьера вниз по ветровому потоку.

**Методика.** Описана азротермодинамическая модель атмосферы, в которой уравнения динамики в приближении несжимаемой жидкости дополнены уравнением переноса тепла, а также учетом механизмов плавучести и фоновой стратификации. Описаны необходимые модификации в неспециализированной программе COMSOL, обеспечивающие возможность выполнения исследований азротермодинамики атмосферы при ее различных состояниях. Построена и апробирована двухмерная CFD-модель атмосферы карьера, который при проведении массовых взрывов проветривается по рециркуляционной схеме. Выполнены численные эксперименты процессов естественного проветривания карьера для скоростей ветрового потока на верхнем борту карьера 1 и 2 м/с, при вариации параметра фоновой стратификации (от 0,0 до +0,05 °С/м) и фиксированном начальном местоположении пылегазового облака.

**Результаты и их анализ.** Отмечены существенные различия в азротермодинамических параметрах потоков и пространственном распределении отклонений потенциальной температуры при разных условиях состояния атмосферы. Показано существенное увеличение времени естественного проветривания карьера при усилении инверсионного состояния атмосферы по сравнению с ее нейтральным состоянием. Спрогнозировано отсутствие смещения месторасположения наиболее загрязненной области карьера при сильной инверсии. Отмечено смещение такой области в сторону подветренного борта карьера при малых значениях параметра фоновой стратификации.

**Выводы и область применения.** Для рециркуляционной схемы проветривания усиление инверсионного состояния атмосферы существенно увеличивает время естественного проветривания, но снижает уровень загрязнения, выносимого на верхний борт карьера вниз по потоку.

**Ключевые слова:** карьер; CFD-модель; атмосфера; параметры конвекции; фоновая стратификация; взрывные работы; естественное проветривание.

**Работа выполнена** в рамках темы НИР № гос. рег. 1021051803680-5 (FMEZ-2022-0010) «Процессы трансформации природных и техногенных систем в условиях изменения климата в Арктической зоне Российской Федерации (на примере Мурманской области)».

**Введение и актуальность.** В последние годы отмечается интерес к использованию компьютерного моделирования на базе хорошо верифицированных программ (Flowvision, ANSYS Fluent, ANSYS CFX, COMSOL и др.), которые не являются специализированными для решения задач рудничной аэрологии (карьеры, подземные выработки). Обусловлено это созданием высокопроизводительных компьютеров,

разработкой верифицированных программных комплексов вычислительной гидродинамики (CFD-моделирование), а также подготовкой поколения специалистов в области информационных технологий. Подчеркнем, что проблема обеспечения безопасных условий труда горнорабочих в силу особенностей климатических и горно-геологических условий Заполярья, способствующих ослаблению естественного воздухообмена в карьерном пространстве и усложняющих создание нормальных санитарно-гигиенических условий труда, по-прежнему остается актуальной.

Известно достаточно много примеров использования перечисленных неспециализированных программ для оценки качества воздуха на объектах горнопромышленного комплекса (карьеры, хвостохранилища, отвалы).

Программный код Flowvision [1, 2] используют специалисты-практики Н. Р. Баширов [3], преподаватели и сотрудники Санкт-Петербургского горного университета (Е. Б. Гридина, И. А. Петров и др.) [4].

Широко используется в исследованиях программа ANSYS Fluent [5, 6]. Можно отметить работы специалистов Санкт-Петербургского горного университета (К. Н. Ястребова [7], С. Г. Гендлер и И. А. Борисовский [8]). Определенный объем исследований под руководством С. А. Козырева выполнен группой сотрудников Горного института КНЦ РАН [9, 10]. Следует упомянуть работы китайских исследовательских групп (Yuan Wang с коллегами [11], Huang Z. с коллегами [12]), а также изыскания индийского специалиста Kumar Vaibhav Raj [13]. К исследованиям по использованию CFD-моделирования для решения проблем аэрологии карьеров присоединились сотрудники Горного института УрО РАН (С. А. Бублик, М. А. Семин) [14].

Попытки моделирования аэротермодинамических процессов и исследования структуры полей скорости в карьере на базе программного кода COMSOL [15, 16] предприняты П. В. Амосовым с коллегами в Горном институте КНЦ РАН, позже в ИППЭС КНЦ РАН [17, 18] выполнены исследования процессов естественного проветривания.

Специалисты чилийского университета г. Сантьяго [19] используют ранее разработанный решатель OpenFOAM для изучения проблемы циркуляции воздуха при интенсивной инсоляции внутри крупных карьеров, где преобладают механические и плавучие эффекты, что имеет важное значение для рассеивания загрязняющих веществ.

В приведенных примерах при решении проблем обеспечения качества атмосферы в ходе деятельности предприятий горнопромышленного комплекса воздушная среда рассматривается в известных приближениях (приближение несжимаемой жидкости, для неизотермических потоков модели «несжимаемого идеального газа», приближение Буссинеска, слабой сжимаемости), весьма далеких от реальной атмосферы.

Представляется, что существует возможность пользовательской модификации неспециализированных программных комплексов (не только COMSOL) с тем, чтобы их можно было применять для исследований процессов атмосферного переноса газовых и пылевых загрязнений при различных состояниях (неустойчивых, нейтральных, инверсионных) приземного слоя атмосферы. Предлагается вернуться к модели атмосферного пограничного слоя, в которой используют систему уравнений гидротермодинамики с гидростатическим приближением в приближении Буссинеска и без включения полностью сжимаемой системы. Примером такой модели является модель микроклимата атмосферы, описанная как в работах прошлого века [20–22], так и в современных исследованиях [23, 24].

Для достижения цели исследования использована ранее построенная в программе COMSOL [15, 16] двухмерная компьютерная модель аэрогазодинамики атмосферы карьера [17, 18], которая через источники члены управляющих уравнений дополнена учетом механизмов плавучести и фоновой стратификации. Такая модификация позволяет говорить об аэротермогазодинамической модели атмосферы карьера. Представленная далее система уравнений подобна системе уравнений, описанной в работе [22], с соответствующим набором краевых условий.

**Цель исследования** – продемонстрировать влияние параметра фоновой стратификации на время естественного проветривания карьера (рециркуляционная схема проветривания) при фиксированной глубине карьера, а также на уровень загрязнения атмосферы верхнего борта карьера вниз по ветровому потоку.

**Математическая модель.** Система управляющих уравнений аэротермодинамики и переноса загрязнений (газовая компонента) в двухмерной постановке (координаты  $X-Z$ ) в программе COMSOL [15, 16] имеет следующий вид:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial \pi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta_T \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta_T \frac{\partial u}{\partial z} \right); \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial \pi}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta_T \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta_T \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho \lambda \vartheta'; \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z}; \quad (3)$$

$$\rho C_p \frac{\partial \vartheta'}{\partial t} + \rho C_p u \frac{\partial \vartheta'}{\partial x} + \rho C_p w \frac{\partial \vartheta'}{\partial z} = -\rho C_p S w + \frac{\partial}{\partial x} \left( k_T \frac{\partial \vartheta'}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_T \frac{\partial \vartheta'}{\partial z} \right); \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u \frac{\partial k}{\partial x} + \rho w \frac{\partial k}{\partial z} = \eta_T P(\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta_T \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta_T \frac{\partial k}{\partial z} \right) - \rho \varepsilon; \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \rho w \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{C_{\varepsilon 1} \varepsilon \eta_T P(\bar{u})}{k} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta_T \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta_T \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_C \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_C \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (7)$$

где  $t$  – время;  $u$ ,  $w$  – компоненты вектора скорости  $\bar{u}$  потоков в направлении осей  $x$ ,  $z$ , соответственно;  $\rho$  – плотность воздуха;  $C_p$  – теплоемкость воздуха при постоянном давлении;  $\vartheta'$  – отклонение потенциальной температуры от фоновой;  $\pi$  – приведенное давление;  $\lambda$  – параметр конвекции (плавучести),  $\lambda = g / T$  (числитель – ускорение свободного падения, знаменатель равен 273 K);  $S$  – параметр фоновой стратификации (положительные значения параметра соответствуют условиям устойчивого состояния атмосферы);  $C$  – концентрация газовой компоненты;

$\eta_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$  – коэффициент динамической турбулентной вязкости;  $k_T = C_p \eta_T / Sc$  – коэффициент теплопроводности;  $k_C = \eta_T / (\rho Sc)$  – коэффициент диффузионного переноса загрязнений;  $k$  – удельная кинетическая энергия турбулентности;  $\varepsilon$  – скорость вязкой диссипации энергии турбулентности;  $P(\bar{u})$  – тензор скоростей

деформаций,  $P(\bar{u}) = \nabla \bar{u} : (\nabla u + (\nabla \bar{u})^T)$ ,  $\nabla$  – оператор Гамильтона,  $T$  – транспонирование;  $Sc$  – число Прандтля–Шмидта;  $C_\mu = 0,09$ ,  $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ ,  $\sigma_k = 1,0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$  – константы ( $k$ - $\varepsilon$ )-модели турбулентности.

Коэффициенты турбулентного переноса тепла и примеси в уравнениях (4) и (7) определяются посредством осреднения коэффициента турбулентной вязкости по области моделирования с поправкой на число Прандтля–Шмидта [25].

Используемые при описании граничных и начальных условий обозначения подробно описаны в документации программного продукта COMSOL [15, 16].

#### **Начальные и граничные условия для уравнений (1)–(6).**

Начальные условия при  $t = 0$ :

$$\bar{u} = \bar{u}(\bar{x}); \quad \mathcal{S}' = 0; \quad \pi = \pi_0; \quad k = k_0; \quad \varepsilon = \varepsilon_0.$$

Граничные условия ( $H$  – верхняя граница модели) приняты как в исходной модели [22], так и частично установлены по умолчанию [15, 16].

Входная граница:

$$u = u_\phi(z); \quad w = 0; \quad \mathcal{S}' = 0, \quad \text{где } u_\phi(z) \text{ – профиль горизонтальной скорости.}$$

Выходная граница:

$$\bar{n}(-k_T \nabla \mathcal{S}') = 0, \quad \text{где } \bar{n} \text{ – единичный вектор нормали к границе;}$$

$$\eta_T (\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T) \bar{n} = 0, \quad \pi = \pi_0 \text{ – отсутствие вязких напряжений.}$$

Верхняя граница  $z = H$ :

$$u = u_\phi(H); \quad w = 0; \quad \mathcal{S}' = 0.$$

Подстилающая поверхность  $z = \delta(x)$ :

$$\mathcal{S}' = f(x, z, t);$$

$\bar{n}\bar{u} = 0; \quad \eta_T (\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T) \bar{n} = \left[ \rho C_\mu^{0,25} k^{0,25} / \left( \frac{\ln(\delta_w^+)}{\kappa} + C^+ \right) \right] \bar{u}$  – логарифмическая функция стенки, где  $\kappa$  – постоянная Кармана.

**Для параметров турбулентности** использованы следующие граничные условия, которые установлены по умолчанию [15, 16].

Входная граница:

$$k = k_0; \quad \varepsilon = \varepsilon_0.$$

Выходная граница:

$$\bar{n}\nabla k = 0; \quad \bar{n}\nabla \varepsilon = 0.$$

Верхняя граница  $z = H$ :

$$k = k_0; \quad \varepsilon = \varepsilon_0.$$

Подстилающая поверхность  $z = \delta(x)$ :

$$\bar{n}\nabla k = 0; \quad \varepsilon = C_\mu^{0,75} k^{1,5} / (\kappa \delta_w); \quad \delta_w^+ = \delta_w \rho C_\mu^{0,25} k^{0,5} / \eta.$$

#### **Начальные и граничные условия для уравнения (7).**

Начальные условия при  $t = 0$ :

$C = C_0$  – в области пылегазового облака (ПГО);

$C = 0$  – в остальной области моделирования.

Граничные условия [15, 16].

Входная граница:

$$C = 0.$$

Выходная граница:

$$\bar{n}(-k_C \nabla C) = 0 \text{ – конвективный поток.}$$

Верхняя граница  $z = H$ :

$\vec{n}\vec{N} = 0$ ;  $\vec{N} = -k_c \nabla C + C\vec{u}$  – условие изоляции/симметрии.

Подстилающая поверхность  $z = \delta(x)$ :

$\vec{n}\vec{N} = 0$ ;  $\vec{N} = -k_c \nabla C + C\vec{u}$  – условие изоляции/симметрии.

**Геометрия модели и последовательность вычислений.** Для выполнения расчетов выбрана геометрия карьера (глубина 500 м), который проветривается по рециркуляционной схеме [26, с. 34]: относительная длина карьера в направлении движения ветра равна 3, угол откоса подветренного борта карьера более  $15^\circ$ . В численных экспериментах варьируются следующие параметры модели:

- параметр фоновой стратификации от 0,0 до  $+0,05$  °C/м с шагом  $0,005$  °C/м, т. е. рассмотрены ситуации от равновесной до глубокой инверсии;
- значения скорости набегающего ветрового потока на борту карьера на высоте 10 м приняты равными 1 и 2 м/с.

В расчетах зафиксированы два параметра модели:

- местоположение ПГО вблизи подошвы карьера в его центральной части;
- начальная концентрация газовой компоненты в облаке принята равной 100 ПДК.

Последовательность выполнения расчетов трехшаговая:

- на 1-м шаге получаем стационарное поле скорости и распределение коэффициентов турбулентной вязкости в приближении несжимаемой жидкости с использованием  $(k-\epsilon)$ -модели турбулентности;
- на 2-м шаге, отталкиваясь от результатов предыдущего шага, решаем нестационарную задачу аэротермодинамики с выходом практически на стационарный режим аэротермодинамических параметров;
- на 3-м шаге выполняем нестационарный расчет распространения газовой компоненты с учетом сложившегося к концу второго шага поля скорости и коэффициентов диффузионного переноса загрязнений.

**Результаты расчетов и анализ результатов.** Вертикальные распределения горизонтальной компоненты скорости и отклонения потенциальной температуры вдоль перпендикуляра, восстановленного к середине подошвы карьера, при скорости ветра 1 и 2 м/с и трех значениях параметра фоновой стратификации (0,00,  $+0,025$  и  $+0,05$  °C/м) приведены на рис. 1. Анализ вертикальных распределений горизонтальной компоненты скорости позволяет отметить следующие моменты.

При нейтральной стратификации имеем результат, который строго соответствует использованию стандартной модели несжимаемой жидкости:

- в верхней части карьера (с отметки 205 м) наблюдается прямой поток, а в нижней – обратный;
- отношение модулей горизонтальной компоненты скорости строго следует задаваемому граничному условию (скорость ветра 1 или 2 м/с).

Увеличение значения параметра стратификации существенно изменяет поведение профиля горизонтальной компоненты скорости:

- изменение знака происходит не единожды, а 3–4 раза, т. е. практически имеем «слоеный пирог» с разным направлением потоков;
- в нижней половине чаши карьера модуль горизонтальной компоненты скорости составляет несколько сантиметров в секунду;
- пространственное расположение максимума модуля обратного потока в зависимости от параметра стратификации изменяется, при этом величина скорости сохраняется (при скорости ветра 1 м/с –  $0,15$  м/с, а при скорости ветра 2 м/с –  $0,33$  м/с).

Анализ вертикальных распределений отклонений потенциальной температуры свидетельствует о следующем:

- в условиях инверсии в чаше карьера формируется «слоеный пирог» (2 слоя при скорости ветра 1 м/с и 3 слоя при ветре 2 м/с);

- уровень положительных отклонений потенциальной температуры при скорости ветра 1 м/с до высот 50–90 м (в зависимости от стратификации) незначительный;

- при скорости ветра 2 м/с в нижней половине карьера прогнозируются заметные отрицательные отклонения потенциальной температуры, а в верхней – положительные;

- переход от отрицательных отклонений к положительным наблюдается при скорости ветра 1 м/с в районе высотных отметок ~265–275 м, а при скорости ветра 2 м/с – ~273–289 м;

- на высоте верхнего борта карьера наблюдаются максимальные отклонения потенциальной температуры, при этом отсутствует линейность в зависимости от величины параметра фоновой стратификации.

В табл. 1 приведены прогнозные значения времени проветривания карьера при вариации параметра фоновой стратификации и скорости ветра.

Отметим наиболее существенные закономерности:

- при значениях параметра фоновой стратификации  $+0,010$  °C/м и выше (состояния инверсии) координаты точки максимального загрязнения сохраняются (район вблизи подошвы карьера по его центру);

- при равновесном и слабоустойчивом состояниях атмосферы координаты области с максимальным загрязнением «мигрируют» по пространству карьера вблизи его подветренного борта;

- скорость роста времени проветривания карьера с усилением инверсионного состояния уменьшается;

- при инверсионных состояниях атмосферы отсутствует линейная зависимость времени проветривания от скорости ветра, что имеет место при использовании в аналогичных расчетах модели несжимаемой жидкости [18].

Проанализированы пространственные распределения газовой компоненты по объему карьера при двух значениях скорости ветрового потока и трех величинах параметра фоновой стратификации на моменты времени, близкие к прогнозным значениям времени очищения атмосферы карьера до уровня ПДК. Можно отметить несколько моментов.

Во-первых, при сильной инверсии (0,05 и 0,025 °C/м):

- область максимального загрязнения находится вблизи подошвы карьера, практически в месте начального положения ПГО;

- конвективный перенос продолжает оставаться основным механизмом рассеивания загрязнения по отмеченным выше слоям «пирога», но скорость распространения загрязнения ослабевает с увеличением значения параметра фоновой стратификации.

Во-вторых, при равновесном и близком ему состояниях атмосферы прогнозируется смещение области максимального загрязнения в сторону подветренного борта.

Определенный интерес представляет информация по выносу загрязнения непосредственно из карьера. Проанализирована информация в точке мониторинга на верхнем борту карьера вниз по потоку с учетом вариации и скорости ветра, а также параметра фоновой стратификации. Оказалось, что при скорости ветра 2 м/с уровни концентрации выше, чем при скорости 1 м/с. Особенно заметные различия наблюдаются при значениях параметра фоновой стратификации от 0,005 до 0,02 °C/м.

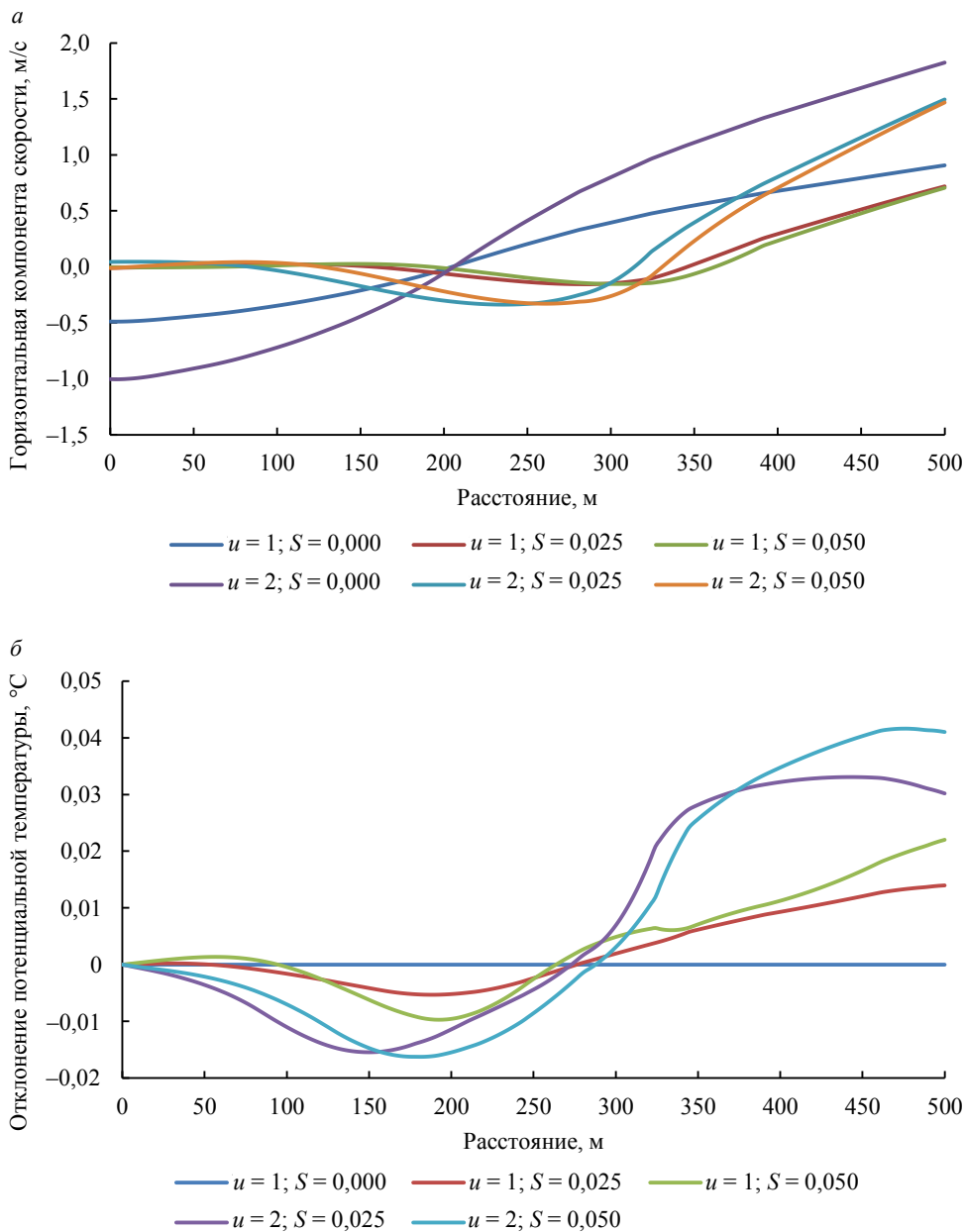


Рисунок 1. Вертикальное распределение горизонтальной компоненты скорости –  $a$  и отклонений потенциальной температуры –  $b$  вдоль перпендикуляра, восстановленного к середине подошвы карьера, при скорости ветра 1 и 2 м/с и вариации параметра фоновой стратификации: 0,00, +0,025 и +0,05 °С/м

Figure 1. Vertical distribution of the horizontal velocity component –  $a$  and potential temperature deviations –  $b$  along the perpendicular erected to the middle of the open-pit bottom under the wind speeds of 1 and 2 m/s and the background stratification parameter variations: 0.00, +0.025 and +0.05 °C/m



При нейтральной стратификации максимальные значения уровней загрязнения на борту карьера практически совпадают. Отметим, что при большей скорости ветра время достижения максимума загрязнения сокращается, что вполне естественно. Но линейности при этом не прослеживается.

**Таблица 1. Время проветривания карьера при вариации параметра стратификации и скорости ветра на борту карьера, с**  
**Table 1. Open-pit ventilation time under variations in the stratification parameter and wind speed on the pit wall, s**

Параметр фоновой стратификации $S$ , °C/м	Скорость ветра	
	1 м/с	2 м/с
0	~ 4685	~2315
0,005	~ 17 430	~ 4170
0,010	~ 21 840	~ 7000
0,015	~ 24 180	~8700
0,020	~ 25 590	~ 9880
0,025	~ 26 640	~ 10 770
0,030	~ 27 450	~ 11 550
0,035	~ 28 140	~ 12 150
0,040	~ 28 650	~ 12 660
0,045	~ 29 100	~ 13 140
0,050	~ 29 460	~ 13 500

Опыт использования двухмерной аэротермогазодинамической модели показал принципиальную возможность ее усложнения за счет учета как природных, так и технологических факторов (тепловой баланс поверхности, радиационные потоки, влажность атмосферы, угол откоса борта карьера, глубина карьера, начальные местоположение и загазованность пылегазового облака и др.), оказывающих серьезное влияние на процесс естественного проветривания. Предполагается, что включение обозначенных параметров может быть реализовано на следующих этапах работ.

Представляется весьма интересным применение подобной модели к задаче проветривания карьеров при эксплуатации оборудования с двигателями внутреннего сгорания в условиях инверсионного состояния атмосферы.

**Выводы.** В рамках неспециализированного программного продукта COMSOL предложены и выполнены дополнения в источниковых членах управляющих уравнений, в результате чего создана аэротермодинамическая модель микроклимата атмосферы карьера. Модификации включают учет механизмов плавучести и фоновой стратификации, которые обеспечивают расчет аэротермодинамики атмосферы при ее различных состояниях.

Созданная в двухмерном варианте аэротермодинамическая модель микроклимата атмосферы карьера апробирована на упрощенной модели карьера, проветриваемого при проведении массовых взрывов по рециркуляционной схеме.

При фиксированной глубине карьера 500 м, местоположении ПГО и начальной концентрации в нем при вариации скорости ветрового потока на верхнем борту карьера 1 и 2 м/с и вариации параметра фоновой стратификации в интервале от 0,000 до 0,050 °C/м выполнены численные эксперименты процессов естественного проветривания.

Проведен анализ аэротермодинамических параметров в карьере, времени естественного проветривания, пространственных распределений загрязнений в объеме карьера на момент завершения проветривания, загрязнения верхнего борта карьера вниз по потоку.

Показано существенное (относительно нейтрального состояния) увеличение времени естественного проветривания при усилении инверсионного состояния атмосферы. Скорость роста времени проветривания с усилением инверсионного состояния уменьшается.

Отмечено постоянство месторасположения наиболее загрязненной области карьера при сильной инверсии и смещение такой области в сторону подветренного борта карьера при малых значениях параметра фоновой стратификации.

Показано, что усиление инверсионного состояния снижает уровень загрязнения, выносимого на верхний борт карьера вниз по потоку. Максимальные значения уровней загрязнения атмосферы на борту карьера наблюдаются при условии нейтральной стратификации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Руководство пользователя FlowVision. Версия 3.09.04. М.: ООО «ТЕСИС», 2015. 1295 с.
2. Щеляев А. FlowVision – современный российский инструмент математического моделирования. URL: <https://sapr.ru/article/21879> (дата обращения: 11.07.2023).
3. Баширов Н. Р. Метод динамического проектирования отвалов при предварительной симуляции воздушного потока // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 2. С. 40–47.
4. Gridina E. B., Andreev R. E. Mathematical modeling based on CFD method of wind currents in combined working out of the Olenegorsky pit in the Flowvision software package // International Review on Modelling and Simulations. 2017. Vol. 10. No. 1. P. 62–69.
5. Федорова Н. Н., Вальгер С. А., Данилов М. Н., Захарова Ю. В. Основы работы в ANSYS 17. М.: ДМК Пресс, 2017. 210 с.
6. ANSYS products 19.0 with documentation. URL: <https://avxhm.se/software/ANSYS-Products-19-0-with-Documentation.html> (дата обращения: 11.07.2023).
7. Ястребова К. Н. Имитационное моделирование процесса обтекания бортов открытой горной выработки естественным ветровым потоком // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 8. С. 60–62.
8. Гендлер С. Г., Борисовский И. А. Оценка особенностей формирования температурных инверсий при открытой добыче полезных ископаемых в условиях Арктики // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. Вып. 4. С. 59–75. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-59-75
9. Козырев С. А., Скороходов В. Ф., Никитин Р. М., Амосов П. В., Массан В. В. Оценка аэрологической обстановки на открытых горных работах на основе трехмерных моделей карьеров // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2015. Т. 18. № 2. С. 178–182.
10. Назарчук О. В. Исследование процесса загрязнения атмосферы карьерного пространства от точечных стационарных источников в условиях температурной инверсии и штиля // Проблемы недропользования. 2021. № 4. С. 97–104. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.04.097
11. Wang Y., Du C., Xu H. Key factor analysis and model establishment of blasting dust diffusion in a deep, sunken open-pit mine // ACS Omega. 2021. No. 6. P. 448–455. DOI: 10.1021/acsomega.0c04881
12. Huang Z., Ge S., Jing D., Yang L. Numerical simulation of blasting dust pollution in open-pit mines // Applied Ecology and Environmental Research. 2021. No. 17(5). P. 10313–10333. DOI: 10.15666/aeer/1705\_1031310333
13. Raj K. V. Three dimensional computational fluid dynamics models of pollutant transport in a deep open pit mine under Arctic air inversion and mitigation measures: PhD in Engineering diss. URL: <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/5756> (дата обращения: 11.07.2023).
14. Бублик С. А., Семин М. А. Математическое моделирование тепло- и воздухораспределения в карьерах при естественном проветривании // Горное эхо. 2022. № 1(86). С. 126–133.
15. Интегрированная среда численного моделирования COMSOL. URL: <https://www.comsol.ru> (дата обращения: 8.11.2020).
16. CFD module user's guide. URL: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.cfd/CFDModuleUsersGuide.pdf> (дата обращения: 11.07.2023).
17. Амосов П. В. Доминирующий фактор в паре «взрывные работы–ветровой режим» // Известия СПбГИ(ТУ). 2020. № 54(80). С. 93–98. DOI: 10.36807/1998-9849-2020-54-80-93-98

18. Амосов П. В. Численное моделирование процесса проветривания карьера при проведении массовых взрывов по пылевому фактору // Известия вузов. Горный журнал. 2022. № 6. С. 125–138. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-6-125-138
19. Flores F., Garreaud R., Munoz R. C. OpenFOAM applied to the CFD simulation of turbulent buoyant atmospheric flows and pollutant dispersion inside large open pit mines under intense insolation // Computers & Fluids. 2014. No. 90. P. 72–87. DOI: 10.1016/j.compfluid.2013.11.012
20. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 320 с.
21. Пененко В. В., Алоян А. Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.
22. Бакланов А. А. Численное моделирование в рудничной аэрологии. Апатиты: КФАН СССР, 1988. 200 с.
23. Шлычков В. А., Мальбахов В. М., Леженин А. А. Численное моделирование атмосферной циркуляции и переноса загрязняющих примесей в Норильской долине // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18. № 5-6. С. 490–496.
24. Рапуга В. Ф., Шлычков В. А., Леженин А. А., Романов А. Н., Ярославцева Т. В. Численный анализ данных аэрозольных выпадений примесей от высотного источника // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 08. С. 713–718.
25. Теодорович Э. В. Явления турбулентного переноса и метод ренормализационных групп // Журнал прикладной математики и механики. 1988. Т. 52. Вып. 2. С. 218–224.
26. Никитин В. С., Битколов Н. З. Проектирование вентиляции в карьерах. М.: Недра, 1980. 171 с.

Поступила в редакцию 14 марта 2023 года

#### Сведения об авторе:

**Амосов Павел Васильевич** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. E-mail: p.amosov@ksc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-90-101

### Studying the effect of background stratification on the open-pit natural ventilation time based on the numerical modelling

**Pavel V. Amosov**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, the city of Apatity, Russia.

#### Abstract

**Research objective** is to evaluate the effect of background stratification parameter on the time of open-pit natural ventilation and level of open-pit upper wall atmospheric pollution down the wind flow.

**Methods of research.** An atmospheric aerothermodynamic model has been described. In the model, a heat transfer equation and buoyancy and background stratification mechanisms calculation are added to the dynamic equations in the approximation of an incompressible fluid. The necessary modifications in the non-dedicated COMSOL program are described. The modifications make it possible to study the various states of atmospheric aerothermodynamics. A two-dimensional CFD model of atmosphere was built and tested for an open-pit ventilated according to the recirculation scheme during large-scale blasts. Numerical experiments were carried out for open-pit natural ventilation for 1 and 2 m/s wind flow velocities on the open-pit upper wall under a changing background stratification parameter (from 0.0 to +0.05 °C/m) and a fixed initial location of the dust and gas cloud.

**Results and analysis.** Significant differences in the flow aerothermodynamic parameters are noted as well as in the spatial distribution of potential temperature deviations under different air conditions. A significant increase in the time of open-pit natural ventilation is shown with an increase in the inversion state of the atmosphere compared to its neutral state. No shift in the location of the most polluted pit area is predicted under a strong inversion. A shift of such an area towards the lee side of the open pit was noted at low values of the background stratification parameter.

**Conclusions and scope of results.** For a recirculation ventilation scheme, an increase in the inversion state of the atmosphere significantly increases the time of natural ventilation, but reduces the level of pollution carried down the open-pit upper wall.

**Keywords:** open pit; CFD model; atmosphere; convection parameters; background stratification; blasting; natural ventilation.

**The research was carried out** within the state research and development theme no. 1021051803680-5 (FMEZ-2022-0010) “Processes of natural and man-made systems transformation under changing climate in the Russian Arctic (as illustrated by the Murmansk region)”.

## REFERENCES

1. *FlowVision user manual. Version 3.09.04.* Moscow: OOO TESIS Publishing; 2015. (In Russ.)
2. Shcheliaev A. *FlowVision – modern Russian tool for mathematical modelling.* (In Russ.) Available from: <https://sapr.ru/article/21879> [Accessed 11 July 2023].
3. Bashirov N. R. Method for dynamic design of dumps in preliminary simulation of airflow. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2018; 2: 40–47. (In Russ.)
4. Gridina E. B., Andreev R. E. Mathematical modeling based on CFD method of wind currents in combined working out of the Olenegorsky pit in the Flowvision software package. *International Review on Modelling and Simulations.* 2017; 10(1): 62–69.
5. Fedorova N. N., Valger S. A., Danilov M. N., Zakharova Iu. V. *ANSYS 17 basics.* Moscow: DMK Press Publishing; 2017. (In Russ.)
6. *ANSYS products 19.0 with documentation.* Available from: <https://avxhm.se/software/ANSYS-Products-19-0-with-Documentation.html> [Accessed 11 July 2023].
7. Iastrebova K. N. Imitation modelling of the process of open pit slopes flow by natural wind current. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry.* 2014; 8: 60–62. (In Russ.)
8. Gendler S. G., Borisovskii I. A. Estimation of peculiarities of temperature inversion formation in open mining in the arctic conditions. *Izvestiia Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle = Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences.* 2021; 4: 59–75. (In Russ.) Available from: doi: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-59-75
9. Kozyrev S. A., Skorokhodov V. F., Nikitin R. M., Amosov P. V., Massan V. V. Assessment of aerological setting in open pit based on 3D open-pit model. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Scientific Journal of Murmansk State Technical University.* 2015; 18(2): 178–182. (In Russ.)
10. Nazarchuk O. V. Investigation of pollution process of the atmosphere of open pit space from point stationary sources under conditions of temperature inversions and still. *Problemy nedropolzovaniia = Problems of Subsoil Use.* 2021; 4: 97–104. (In Russ.) Available from: doi: 10.25635/2313-1586.2021.04.097
11. Wang Y., Du C., Xu H. Key factor analysis and model establishment of blasting dust diffusion in a deep, sunken open-pit mine. *ACS Omega.* 2021; 6: 448–455. Available from: doi: 10.1021/acsomega.0c04881
12. Huang Z., Ge S., Jing D., Yang L. Numerical simulation of blasting dust pollution in open-pit mines. *Applied Ecology and Environmental Research.* 2021; 17(5): 10313–10333. Available from: doi: 10.15666/aer/1705\_1031310333
13. Raj K. V. *Three dimensional computational fluid dynamics models of pollutant transport in a deep open pit mine under Arctic air inversion and mitigation measures: PhD in Engineering diss.* Available from: <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/5756> [Accessed 11 July 2023].
14. Bublik S. A., Semin M. A. Mathematical modelling of heat and air distribution in open pits under natural ventilation. *Gornoe ekho = Mining Echo.* 2022; 1(86): 126–133. (In Russ.)
15. *Integrated environments of COMSOL numerical modelling.* Available from: <https://www.comsol.ru> (In Russ.) [Accessed 8 November 2020].
16. *CFD module user's guide.* Available from: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.cfd/CFDModuleUsersGuide.pdf> [Accessed 11 July 2023].
17. Amosov P. V. Dominant factor in the pair “blasting–wind mode”. *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta = Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University).* 2020; 54(80): 93–98. (In Russ.) Available from: doi: 10.36807/1998-9849-2020-54-80-93-98
18. Amosov P. V. Numerical modeling of open pit aeration under major blasts according to the dust factor. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering.* 2022; 6: 125–138. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2022-6-125-138
19. Flores F., Garreaud R., Munoz R. C. OpenFOAM applied to the CFD simulation of turbulent buoyant atmospheric flows and pollutant dispersion inside large open pit mines under intense insolation. *Computers & Fluids.* 2014; 90: 72–87. (In Russ.) Available from: doi: 10.1016/j.compfluid.2013.11.012

20. Marchuk G. I. *Mathematical modelling in the environmental problem*. Moscow: Nauka Publishing; 1982. (In Russ.)
21. Penenko V. V., Aloian A. E. *Models and methods for environmental protection problems*. Novosibirsk: Nauka Publishing; 1985. (In Russ.)
22. Baklanov A. A. *Numerical modelling in mining aerology*. Apatity: Kola branch of AS USSR Publishing; 1988. (In Russ.)
23. Shlychov V. A., Malbakhov V. M., Lezhenin A. A. Numerical modeling of atmospheric circulation and pollution transport in the Norilsk suburb. *Optika atmosfery i okeana = Atmospheric and Oceanic Optics*. 2005; 18(5-6): 490–496. (In Russ.)
24. Raputa V. F., Shlychov V. A., Lezhenin A. A., Romanov A. N., Iaroslavtseva T. V. Numerical analysis of aerosol substance fallout from a high-altitude source. *Optika atmosfery i okeana = Atmospheric and Oceanic Optics*. 2014; 27(08): 713–718. (In Russ.)
25. Teodorovich E. V. The phenomena of turbulent transport and the method of renormalization groups. *Zhurnal prikladnoi matematiki i mekhaniki = The Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1988; 52(2): 218–224. (In Russ.)
26. Nikitin V. S., Bitkolov N. Z. *Open-pit ventilation design*. Moscow: Nedra Publishing; 1980. (In Russ.)

Received 14 March 2023

#### Information about the author:

**Pavel V. Amosov** – PhD (Engineering), leading researcher, Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS. E-mail: p.amosov@ksc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

**Для цитирования:** Амосов П. В. Исследование влияния параметра фоновой стратификации на время естественного проветривания карьера на базе численного моделирования // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 5. С. 90–101. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-90-101

**For citation:** Amosov P. V. Studying the effect of background stratification on the open-pit natural ventilation time based on the numerical modelling. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 5: 90–101 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-90-101

## ИСТОРИЯ. ИНФОРМАЦИЯ. РЕЦЕНЗИИ

УДК 622.235

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-102-119

### Итоги XVII Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования»

Глебов И. А.<sup>1\*</sup>, Кутуев В. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

\*e-mail: i.glebov@igduran.ru

#### Реферат

*В статье представлены результаты XVII Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования», организованной Институтом горного дела УрО РАН (г. Екатеринбург) совместно с Институтом горного дела ДВО РАН (г. Хабаровск), Горным институтом КНЦ РАН (г. Апатиты), Горным институтом УрО РАН (г. Пермь), Институтом горного дела СО РАН (г. Новосибирск) и Институтом горного дела Севера СО РАН (г. Якутск). В рамках конференции заслушаны научные доклады и сообщения по следующим вопросам: безопасное недропользование; проектирование месторождений полезных ископаемых; геотехника для открытой, подземной и комбинированной разработки месторождений полезных ископаемых; строительная геотехнология подземных и наземных сооружений; проблемы экологии горнопромышленного комплекса и природопользования; геомеханические, геодинамические процессы и разрушение горных пород при освоении месторождений; геоинформационное обеспечение при освоении месторождений; геофизика; аэрология и горная теплофизика; экономические проблемы недропользования; управление качеством минерального сырья и переработка техногенных отходов. В заключении статьи приведено решение участников конференции, принятое по итогам четырехдневной работы.*

**Ключевые слова:** конференция; «Проблемы недропользования»; молодые ученые; геотехнология; геоэкология; геомеханика; геодинамика; геоинформатика; разрушение горных пород; аэрология горных предприятий; горная теплофизика; экономика; управление качеством; минеральное сырье; обогащение полезных ископаемых.

**Введение.** 7–10 февраля 2023 г. Институтом горного дела УрО РАН (г. Екатеринбург) совместно с Институтом горного дела ДВО РАН (г. Хабаровск), Горным институтом КНЦ РАН (г. Апатиты), Горным институтом УрО РАН (г. Пермь), Институтом горного дела СО РАН (г. Новосибирск) и Институтом горного дела Севера СО РАН (г. Якутск) проведена XVII Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования».

Конференция прошла в очном и дистанционном форматах благодаря опыту конференций 2020–2022 гг., объединив более 150 молодых специалистов, представляющих академические институты, университеты и производственные предприятия России и стран ближнего зарубежья: Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова (КГТУ, г. Бишкек), Институт горного дела им. Кунаева (ИГД, г. Алматы), Институт проблем комплексного освоения недр РАН (ИПКОН РАН, г. Москва), Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет) (СКГМИ (ГТУ), г. Владикавказ), Мурманский арктический государственный университет (МАГУ, г. Апатиты), Институт

проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра (ИППЭСКНЦ РАН, г. Апатиты), Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ, г. Санкт-Петербург), Белорусский национальный технический университет (БНТУ, г. Минск), Институт динамики геосфер (ИДГ РАН, г. Москва), Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС, г. Иркутск), Кузбасский государственный технический университет (КузГТУ, г. Кузбасс), Федеральный исследовательский центр угля и углехимии (ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово), Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ, г. Пермь), Уральский государственный горный университет (УГГУ, г. Екатеринбург) и др.



Приветственное слово Виктора Леонтьевича Яковлева (советник РАН, член-корреспондент РАН)

Opening speech by Viktor L. Iakovlev (Counsellor of the Russian Academy of Sciences (RAS), Corresponding Member of RAS)

По основным направлениям исследований в области горного дела заслушано и обсуждено 82 доклада. Ведущие специалисты и молодые ученые обсудили темы, связанные с проектированием месторождений полезных ископаемых; геотехникой для открытой, подземной и комбинированной разработки месторождений полезных ископаемых; строительной геотехнологией подземных и наземных сооружений; проблемами экологии горнопромышленного комплекса и природопользования; геомеханическими и геодинамическими процессами при освоении месторождений; разрушением горных пород и их массивов при комплексном освоении месторождений; геофизикой; геоинформационным обеспечением при освоении месторождений; обогащением россыпных месторождений; экономическими проблемами недропользования; управлением качеством минерального сырья и переработкой техногенных отходов.

**7 февраля, первый день конференции.** Открытие мероприятия традиционно началось с приветствия участникам конференции от руководства научных институтов в лице И. В. Соколова, В. Л. Яковлева (ИГД УрО РАН); С. А. Ткача (ИГДС СО РАН); А. Н. Шулюпина, А. Г. Секисова (ИГД ДВО РАН); С. В. Лукичева (Гой КНЦ РАН); И. А. Санфиорова (ГИ УрО РАН); А. П. Хмелинина (ИГД СО РАН).

Четырехдневный регламент конференции по традиции включал научную школу молодых ученых и выступления участников по основным направлениям исследований в области недропользования.

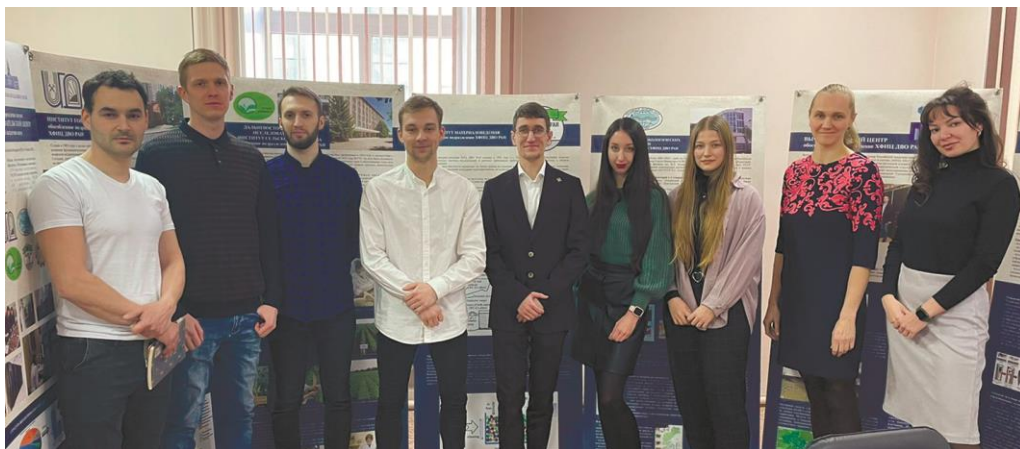
В рамках научной школы первого дня конференции были заслушаны выступления [1]:

– докторов технических наук *Сергея Викторовича Корнилко* (ИГД УрО РАН) и *Владимира Матвеевича Закалинского* (ИПКОН РАН) [2];

– кандидатов технических наук *Дениса Сергеевича Кормицикова* (ГИ УрО РАН) и *Александра Сергеевича Опалева* (ГоИ КНЦ РАН);

– научного сотрудника ИГД ДВО РАН *Натальи Николаевны Варламовой*.

Также участники прослушали доклады студентов и аспирантов СКГМИ (ГТУ) (г. Владикавказ) (*С. А. Бугулов, Д. В. Еналдиев, А. А. Найденов, З. В. Кожиев, Л. А. Зассеева, М. В. Касоева, Е. В. Лопушняк*) и их научных руководителей (кандидаты технических наук *А. К. Джиева, Н. М. Стадник*), которые были посвящены следующим вопросам: обогащение россыпных месторождений; повышение экологической эффективности добычи ПИ; моделирование горнотехнических систем рудных месторождений в ГГИС; загрязнение почвы тяжелыми металлами и способ ее рекультивации; защита окружающей среды при недропользовании; цифровизация горной промышленности.



Участники конференции на площадке, организованной ИГД ХФИЦ ДВО РАН  
Participants of the conference at the site organized by the Institute of Mining of the Khabarovsk Federal Research Center FEB RAS

**8 февраля, второй день конференции.** Вторым днем конференции открыли доклады сотрудников ИГД ХФИЦ ДВО РАН (г. Хабаровск). Инженер *П. А. Жизневская* рассказала, как на примере выбранных горнодобывающих предприятий Дальневосточного региона, занимающихся добычей и переработкой руд цветных металлов, был выполнен финансово-экономический анализ устойчивости предприятий, определен уровень их деловой активности и платежеспособности, на основе чего составлены рекомендации по совершенствованию деятельности предприятий. Предложено использование комплексной оценки финансового состояния организации, что позволит всесторонне оценить финансово-хозяйственную деятельность, определить недостатки работы и предложить направления развития [3]. Инженер *В. И. Мишнев* поделился с участниками конференции результатами исследований



детонационных характеристик взрывчатых веществ на примере Солнцевского угольного разреза. Младший научный сотрудник *А. Е. Копылова* в своем докладе поведала коллегам о применении ультразвуковых воздействий при переработке золотосодержащих хвостов методом комбинированной пневмо-электрофлотации [4].

Младший научный сотрудник *А. Д. Васюта* рассказал о разработке и внедрении ИГД ДВО РАН высокоэффективного промывочного прибора ПБШ-100 скрубберно-бочечного типа, который снижает энергоемкость промывки песков и увеличивает извлечение золота за счет автоматизации процесса обогащения на шлюзах [5].

Младший научный сотрудник *А. В. Леоненко* сделал доклад на тему «Экологические последствия россыпной золотодобычи в границах влияния ликвидированного горного предприятия (на примере Хабаровского края)».

В докладе младшего научного сотрудника *В. В. Таганова* представлены результаты лабораторных экспериментальных исследований миграции частиц золота в техногенной горной массе под воздействием циклического фильтрационного потока. По результатам эксперимента автором установлена зависимость интенсивности изменения содержания золота по глубине от медианного размера частицы вмещающей горной массы, а также получены качественные и количественные характеристики процесса миграции золота [6].

Далее участники конференции заслушали доклады в рамках научной школы:

– кандидата технических наук, зав. лаб. ИГДС СО РАН (г. Якутск) *Ларисы Лукиничны Федоровой* на тему «Исследование геокриологических параметров массива горных пород месторождений криолитозоны»;

– младшего научного сотрудника ИГДС СО РАН (г. Якутск) *Владислава Игоревича Федорова* об оценке качества энергетического угля при хранении в условиях Крайнего Севера;

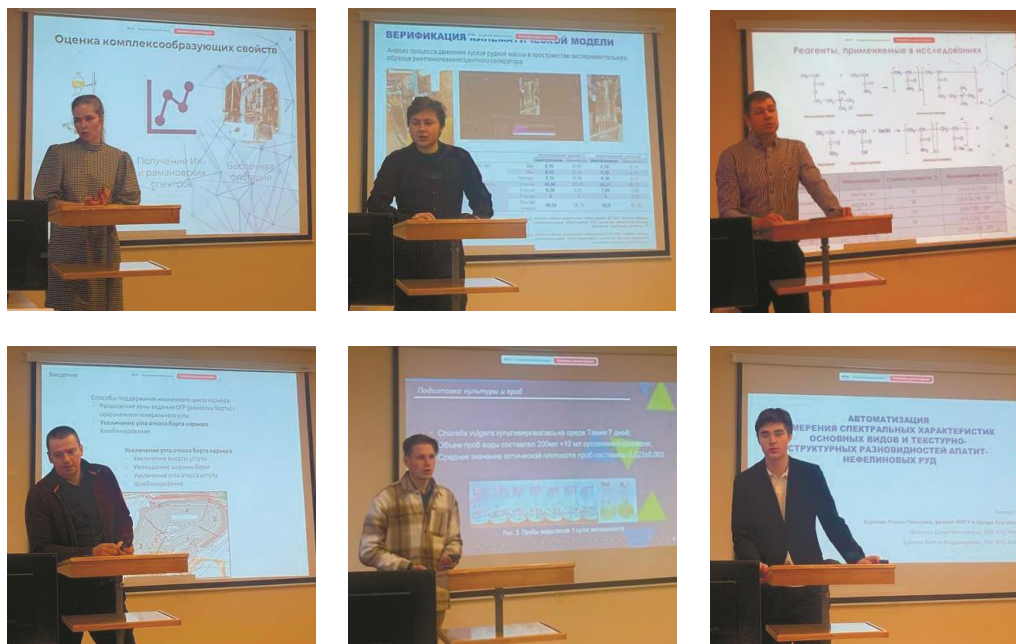
– научного сотрудника ГоИ КНЦ РАН (г. Апатиты) *Марии Сергеевны Кульковой* об исследовании удароопасности медно-никелевых месторождений рудника «Северный» АО «Кольская ГМК».

Во второй половине дня были заслушаны выступления участников конференции из г. Апатиты. Специалисты ГоИ КНЦ РАН технолог *Е. А. Базарова*, научные сотрудники *А. В. Артемьев*, *А. С. Калюжный* поведали о результатах изучения комплексобразующих свойств азотсодержащих монопроизводных дикарбоновых кислот по отношению к медь- и никельсодержащим минералам; влияния физико-химических свойств обводненных отходов обогатительных фабрик на эффективность технологии частичного замкнутого водооборота (на примере апатит-нефелиновых руд Хибинского массива); влияния статической нагрузки от горнотранспортного оборудования на устойчивость уступов, расположенных в скальных породах.

Студенты филиала Мурманского арктического государственного университета *Р. П. Воронин*, *Д. А. Асанович* сделали доклады по актуальным прикладным исследованиям: «Автоматизация измерения спектральных характеристик основных видов и текстурно-структурных разновидностей апатит-нефелиновых руд»; «Применение компьютерного моделирования для совершенствования конструкции радиометрического сепаратора».

*Г. А. Щеглов*, аспирант Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН (г. Апатиты), поведал аудитории о способности микроводоросли *Chlorella vulgaris* снижать концентрацию азота в сточных водах горнодобывающих предприятий. Целью исследования являлось изучение в различных условиях способности микроводоросли к поглощению и утилизации неорганических соединений азота в сточных водах горнодобывающего производства на примере сточных

вод отстойников карьера и хвостохранилища предприятия «Карельский окатыш» (г. Костомукша, республика Карелия). В результате исследования автором зафиксировано снижение аммонийной формы азота в воде при культивировании микроводоросли *Chlorella vulgaris* при определенных условиях, что свидетельствует о перспективности разработки биотехнологий очистки сточных вод от аммония в биореакторах [7].



Участники второго дня конференции на площадке, организованной ГоИ КНЦ РАН: Екатерина Александровна Базарова, Данил Алексеевич Асанович, Александр Васильевич Артемьев, Антон Сергеевич Калюжный, Глеб Андреевич Щеглов, Роман Павлович Воронин  
 Participants of the second day of the conference at the site organized by the Mining Institute KSC RAS: Ekaterina A. Bazarova, Danil A. Asanovich, Alexander V. Artemiev, Anton S. Kaliuzhnyi, Gleb A. Shcheglov, Roman P. Voronin

С интересными докладами выступили аспиранты Санкт-Петербургского государственного университета.

Тема *А. Э. Кортаевой* – «Биоремедиация сточных вод горных предприятий с помощью водной растительности». В докладе отмечено, что загрязнение поверхностных и подземных водных объектов является одной из главных проблем современного общества в связи с ускоренным развитием отраслей промышленности и сельского хозяйства, ростом городов. Фиторемедиация, являясь одним из экологических и экономических способов удаления разнообразных загрязняющих веществ, получила широкое распространение в системах очистки сточных вод. Текущее исследование, проводимое на базе Научного центра «Экосистема» СПбГУ, было направлено на изучение аккумуляционной способности прибрежно-водной растительности с целью использования выявленных видов-гипераккумуляторов при фиторемедиации водных объектов.

Работа *А. А. Стицына* – «Исследование пылевязывающих свойств гидрогеля как средства пылевзрывозащиты угольных шахт». В докладе представлены результаты лабораторных исследований физико-химических свойств рассматриваемого

гидрогеля, определения его рабочей концентрации, кинетики его сушки в смеси с угольной пылью, пылединамических процессов в физической модели горной выработки, обработанной раствором гидрогеля.

Старший преподаватель Белорусского национального технического университета (г. Минск) *В. А. Кузьмич* представила результаты исследования физико-механических и водно-физических свойств шламовых грунтов в горно-геологической информационной системе «Micromine Origin & Beyond». Представлена модель обработанного шламохранилища как слабого основания с возможностью последующего складирования на него галитовых отходов.

Доклад кандидата физико-математических наук *С. А. Рябовой*, старшего научного сотрудника Института динамики геосфер РАН, Института физики Земли РАН (г. Москва), «Перспективность использования вейвлет-анализа при оценке магнитного типпера» был посвящен совершенствованию магнитотеллурического метода – активно развивающегося метода разведочной геофизики. Рассмотрены возможности применения вейвлет-преобразования на разных этапах оценивания элементов магнитотеллурических функций на примере магнитного типпера с привлечением результатов инструментальных наблюдений за геомагнитным полем в Геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ им. акад. М. А. Садовского РАН.

В завершении второго дня участникам конференции был представлен доклад «Стратегия формирования рабочей зоны карьеров на основе управления бортовым содержанием с учетом неопределенности на рынке минерального сырья», в котором *А. С. Говоров*, аспирант Санкт-Петербургского государственного университета, отметил, что база данных по содержаниям полезных компонентов в руде и ценам на рынке минерального сырья должна ежегодно пополняться и актуализироваться. Бортовое содержание должно рассчитываться с учетом коэффициента вскрыши и прогнозных цен на минеральное сырье. При разработке стратегии формирования рабочей зоны карьеров предлагается рассматривать два сценария развития событий: оптимистичный, когда границы карьеров максимальны, и пессимистичный, когда границы карьеров минимальны.

**9 февраля, третий день конференции.** Третий день конференции открыл доклад младшего научного сотрудника ИГД ДВО РАН (г. Хабаровск) *М. А. Ломова* на тему «Аварии в горной промышленности в России, произошедшие вследствие динамических проявлений в горном массиве. Контроль горного давления на месторождении Южное (Приморский край)». В первой части доклада автор привел анализ и сопоставление источников по авариям в горной промышленности в России за 2017–2022 гг., показывающий, что несчастные случаи на горнодобывающем предприятии могут возникать по разным причинам; представил подробную статистику по авариям, произошедшим вследствие динамических проявлений в горном массиве. Во второй – рассказал о разработке и установке измерительных средств для создания геодинамического полигона для комплексного геомеханического мониторинга удароопасности и техногенной сейсмичности в Дальнегорском рудном районе; в частности, о проектировании сети геофонов и установке на опасном по горным ударам Южном месторождении автоматизированной системы горного давления «Prognoz-ADS» [8].

Сотрудники ИГДС СО РАН (г. Якутск) старший инженер *С. Д. Шамаев* и старший научный сотрудник *Е. А. Хоютанов* рассказали о распознавании зон неоднородностей на радарограммах автодорог на основе нейронных сетей; сравнении результатов моделирования в разных горно-геологических информационных системах.

Аспирант ФГБОУ ВО ИРГУПС (г. Иркутск) *Н. Д. Шаванов* в своем докладе продемонстрировал результаты экспериментальных исследований по изучению химического и фазового состава, физических свойств и особенностей структуры паровозных шлаков станции Могоча Забайкальской железной дороги с целью установления возможности их вовлечения в составы композиционных материалов для усиления земляного полотна железнодорожного пути. Установлено, что паровозные шлаки являются непучинистыми, удельная эффективная активность природных радионуклидов для данных отходов соответствует допустимым нормам, поэтому их можно использовать для получения дорожно-строительных материалов. Отмечено, что утилизация изучаемых золошлаковых отходов в дорожном строительстве возможна при комплексном изменении их свойств за счет использования вяжущих материалов и стабилизирующих добавок различной природы [9].

Об исследовании особенностей гидроразрыва х-образной системы скважин в лабораторных условиях рассказал *А. В. Патутин*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИГД СО РАН (г. Новосибирск). В докладе представлены результаты лабораторных исследований закономерностей развития трещины гидроразрыва, создаваемой в двух пересекающихся скважинах в неоднородном поле напряжений. Установлено, что в однородном поле напряжений скважины с высокой вероятностью объединятся единым продольным разрывом, расположенным в плоскости, пересекающей оси скважин вне зависимости от угла между ними. В случае действия максимального напряжения, направленного перпендикулярно этой плоскости, в более крепких блоках трещина образуется на стенке одной из скважин по направлению действия данного напряжения. В блоках с добавлением угольной фракции также происходит соединение скважин разрывом, однако с увеличением расстояния между скважинами трещина переориентируется в направлении действия максимального напряжения. Для исследования особенностей распространения трещины гидроразрыва использовался лабораторный стенд независимого трехосного нагружения, его подробное описание приведено в [10].

Младший научный сотрудник ИГД СО РАН *В. В. Плохих* рассмотрел проблему создания новых пневматических ударных машин для повышения эффективности и безопасности горных работ. Решением этой проблемы может стать создание пневмоударных машин, позволяющих реализовать «адаптивные технологии», в которых необходимо изменение энергетических параметров машины в зависимости от свойств обрабатываемой среды непосредственно в процессе работы. Предложена новая принципиальная конструктивная схема пневмоударного устройства с упругим клапаном, в которой возможно регулирование параметров (энергии и частоты ударов). На основе результатов экспериментальных исследований работы клапана изготовлена физическая модель пневмоударной машины и проведена валидация имитационной модели [11].

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник *Т. В. Шилова*, инженер *Д. С. Журкина*, техники *Р. А. Ефремов* и *К. Е. Медведева* ИГД СО РАН сделали интересные доклады, посвященные экспериментальным исследованиям проницаемости угля при расклинивании и частичном заполнении трещины проппантом; зависимости прочностных и деформационных характеристик образцов сыпучих материалов от микропараметров, задаваемых в расчетах методом дискретных элементов, при простом сдвиге; наблюдению и обработке трехкомпонентных данных поверхностных сейсмических волн; созданию базы данных «Брахисинклинальные месторождения угля России» соответственно.

В рамках научной школы третьего дня конференции выступили:

– доктор технических наук, профессор ИГД СО РАН *Александр Михайлович Красюк* с докладом «Методология подготовки и представления диссертационной работы»;

– кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИГД СО РАН *Антон Игоревич Конурин*, который рассказал о геомеханическом и горно-технологическом моделировании для обоснования параметров систем подземной разработки рудных месторождений.

В докладе *Д. О. Чещина*, кандидата технических наук, старшего научного сотрудника ИГД СО РАН, приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению параметров пневмосистемы при бурении горизонтальных скважин пневмоударником с продувкой. Рассмотрен процесс пневмотранспорта частиц в вертикальной и горизонтальной скважинах, определены основные негативные факторы, влияющие на движение частиц. Представлена имитационная модель пневмотранспортной системы для бурения пневмоударником, на которой установлены зависимости скорости воздушного потока от параметров скважины и расхода воздуха. Проведена оценка эффективности транспортирования шлама для данной модели. Установлено, что при снижении расхода воздуха возрастает количество осаждаемых частиц, что увеличивает риск закупоривания скважины. Показано, что при определенных параметрах пневмофорсунок и производительности компрессорной установки можно добиться расхода воздуха, достаточного для работы пневмоударника. Таким образом, полученные результаты подтвердили возможность использования способа интервальной продувки горизонтальной скважины при бурении пневмоударником [12].

Инженер ИГД СО РАН *А. А. Леуткин* в своем докладе рассмотрел проблему управления рабочими процессами в скважинном виброисточнике на основе линейного электромагнитного ударного двигателя, для электропитания которого требуется спускать в скважину два кабеля: силовой и сигнальный. Предложен способ управления рабочим циклом молота без наличия датчиков положения бойка.

В докладе аспиранта Института Угля ФИЦ УУХ СО РАН (г. Кемерово) *М. К. Королева* представлены результаты патентной аналитики крепей сопряжения, на основе которой были выявлены основные тенденции их развития, в том числе проведен анализ динамики изобретательской и патентной активности, анализ правовых статусов патентных семейств, анализ стран разработки технологий и их правовой охраны, а также кратко представлены результаты анализа полных текстов патентных документов. В заключении доклада на основе проведенной патентной аналитики дан краткий прогноз перспектив развития крепей сопряжения [13].

Во второй половине дня заслушаны доклады инженеров Горного института УрО РАН (г. Пермь) *Т. В. Злобина*, *Е. Г. Кузьминых*, *А. А. Оглоблина*, *А. В. Тацый* по актуальным темам: «Алгоритм прогноза плотности выделения сейсмической энергии для Верхнекамского месторождения калийных солей»; «Исследование способов повышения энергоэффективности системы вентиляции проектируемого рудника»; «Термометрический контроль формирования и состояния ледопородных ограждений строящихся шахтных стволов»; «Исследование интенсивности массообмена в тупиковых горных выработках, проветриваемых нагнетательным способом».

Выступления пермяков завершил *В. О. Лядов*, ассистент кафедры Пермского национального исследовательского политехнического университета. В своем докладе он представил методику выполнения и результаты исследований газоносности по свободным и связанным газам силвинитовых пород Гремячинского месторождения

калийных солей. Автор доклада отмечает: «Методика исследований газоносности по свободным газам заключалась в последовательном измерении интенсивности газовыделений из загерметизированных шпуров. Полученные в результате значения прироста давления в шпурах использовались в дальнейшем расчете газоносности сильвинитовых пород по свободным газам. Также был исследован компонентный состав свободных газов. Исследования газоносности пород по связанным газам проводились в лабораторных условиях с помощью шаровой мельницы и газового хроматографа» [14].

Выступление *К. В. Барановского*, кандидата технических наук, старшего научного сотрудника ИГД УрО РАН (г. Екатеринбург) было посвящено проблеме разработки эффективных технологий, обеспечивающих повышение производительности, полноты и комплексности извлечения вкрапленных руд в условиях неуклонного снижения объема подземной добычи богатых медно-никелевых руд, связанного с исчерпанием их запасов. В результате проведенных исследований предложены рациональные конструкции комбинированных систем разработки, основанных на сочетании технологий с естественным поддержанием очистного пространства и с принудительным обрушением руды и вмещающих пород [15].

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИГД УрО РАН *А. А. Рожков* в своем докладе отметил, что развитие методологии снижения ущерба от переизмельчения руды, позволяющей выбрать эффективное и безопасное решение уже на стадии проектирования горнотехнической системы подземного рудника, представляет собой актуальную научно-практическую проблему. Для ее решения предложена систематизация технологических мероприятий, отличающаяся классификационными признаками (технология отработки основных запасов, порядок осуществления относительно очистной выемки), разработан алгоритм выбора на основе экспертно-аналитического метода оценки мероприятий [16]. На примере месторождений гранулированного кварца, золота и медноколчеданных руд представлены результаты реализации разрабатываемого методологического подхода [17–19].

Доклад научного сотрудника ИГД УрО РАН *И. В. Никитина* был посвящен вопросу обеспечения своевременного ввода в эксплуатацию подземных рудников на кимберлитовых месторождениях. В качестве решения предложены рациональные схемы поэтапного вскрытия рудовыдачными автоуклонами из карьера и обоснованы области их эффективного применения в зависимости от глубины залегания трубки, глубины карьера и производственной мощности рудника [20].

Научный сотрудник ИГД УрО РАН *Ю. М. Соломеин* рассказал о перспективах применения на месторождениях бедных железных руд экологоориентированной подземной геотехнологии. В отличие от традиционных технологий с обрушением руды, предлагается поэтапно-камерная система разработки с восходящей выемкой, позволяющая сохранить земную поверхность и сократить объемы размещаемых на ней отходов. Достигается данный результат за счет формирования выработанного пространства в виде замкнутых емкостей, не соединяющихся с соседними выемочными единицами в горизонтальной плоскости, и последующего размещения в них значительной части отходов горного производства в виде бесцементной закладки [21].

Старший научный сотрудник ИГД УрО РАН, кандидат технических наук *А. М. Яковлев* сделал доклад на тему «Оценка вариантов развития открытых горных работ с использованием геоинформационного моделирования».

Третий день конференции завершился докладом кандидата технических наук, старшего научного сотрудника ИГД УрО РАН *С. В. Сентябова*, в котором он расска-

зал о проведенных геомеханических исследованиях, доказывающих, что природное напряженное состояние массива горных пород формируется в результате наложения полей напряжений, обусловленных гравитационными и тектоническими силами, а также переменными пульсирующими составляющими, оно представлено нормальными компонентами тензора напряжений. По результатам измерения напряжений на различных рудниках Урала и Сибири суммарные тектонические и переменные напряжения достигают нескольких десятков МПа.

**10 февраля, четвертый день конференции.** В последний день конференции выступали докладчики из г. Екатеринбурга. С докладами из Уральского государственного горного университета выступили:

– магистр *Я. М. Мезенина* (рук. *А. Г. Студенок*, кандидат технических наук, доцент), об учете процессов геохимической миграции металлов при разработке проекта экологического мониторинга объектов размещения отходов предприятий минерально-сырьевого комплекса;

– магистрант *И. В. Глазачев*, об оценке механизмов поступления радона в здания, изучение которых позволяет прогнозировать поведение и распространение данного газа в воздухе здания и грунтах основания фундамента, а также предотвращать его проникновение;

– студент *А. А. Арсланов*, об устройстве для повышения эффективности классификации тонкодисперсных техногенно-минеральных отходов. В докладе отмечено, что «существующие на сегодняшний день техники и технологии сепарации не могут обеспечить сепарацию частиц микро- и наноразмеров в строго заданных интервалах крупности. Из-за этого уменьшается эффективность утилизации мелкодисперсных техногенно-минеральных отходов. Ценность добавок из микро- и наноразмерных частиц заключается в том, что есть возможность получать материалы с уникальными свойствами. Массовая доля отходов при производстве композиционных материалов составляет от 9 до 15 млн т/год. Содержащиеся в отходах наночастицы – легирующие элементы, обладающие высоким уровнем качества. Такая сфера, как производство материалов для промышленности, специализирующаяся на электронике, активно использует данные легирующие элементы» [22];

– студент *А. М. Бельских*, о моделировании в аппаратах воздушного охлаждения термовихревого теплообмена. В докладе предложен способ повышения экономической эффективности аппаратов воздушного охлаждения с помощью устойчивой системы вихрей, создающих эффект «торнадо», формирующий процесс термовихревого теплообмена. Также представлена математическая модель термовихревого теплообмена в аппаратах воздушного охлаждения [23];

– лаборант-исследователь *В. А. Стороженко*, о ликвидации накопленного вреда на территориях остановленных медных рудников Свердловской области;

– студенты *В. А. Смирнов* и *М. Ю. Захаров* (рук. *В. С. Бочков*, кандидат технических наук, доцент) в своем докладе рассмотрели проблему быстрого изнашивания оборудования различных конусных дробилок, проанализировали разные способы уменьшения изнашивания и защиты от него оборудования, выделили их основные достоинства и недостатки. Предложили возможность объединения разных способов контроля изнашивания для развития устройств по измерению и защите от избыточного изнашивания различных видов конусных дробилок, рассказали о возможности автоматизации процесса дробления руды и минимизации затрат горно-обогажительных комплексов путем повышения эффективности оборудования.

С докладами, посвященными актуальным вопросам недропользования, выступили молодые ученые Института горного дела УрО РАН.

Научный сотрудник *А. Ю. Смирнов* рассмотрел основные принципы схематизации гидрологических задач. Особое внимание было уделено принципам численного моделирования, последовательности организации рабочего процесса и типичным ошибкам. Также был проведен сравнительный анализ численных моделей, полученных методами конечных элементов и конечных разностей. Показано, что для решения профильных фильтрационных задач наиболее точными являются методы конечных элементов, поскольку такие модели лучше передают физический смысл протекающих процессов (в определении граничных условий, геометрии и т. д.) [24].



Участники конференции на площадке, организованной ИГД УрО РАН  
Participants of the conference at the site organized by the Institute of Mining UB RAS

В докладе научного сотрудника *В. Ю. Новолокиной* было отмечено, что в пробах шлама Левихинского медноколчеданного рудника преобладают сульфаты, оксиды и гидроксиды железа. Анализ водной и кислотной вытяжки показал, что из шлама может выщелачиваться до 24 элементов, относящихся ко 2-му, 3-му и 4-му классу опасности, в концентрациях, превышающих ПДК. Проанализировано несколько вариантов использования шлама из пруда-осветлителя: рекультивация отвалов пустых пород и некондиционных руд; закладка выработанного пространства карьеров; производство строительных материалов; извлечение ценных компонентов; складирование после обезвоживания в геотубах (geotube). Методом балльно-рейтинговой оценки получено приоритетное направление использования донных отложений: производство строительных материалов на основе государственно-частного партнерства, реализация которого позволит государству и частному сектору извлекать взаимную выгоду, при этом будет произведена 100 % очистка пруда.

Младший научный сотрудник *А. И. Усманов* доложил об исследовании процесса адсорбции углеводородов нефти органо-минеральными мелиорантами, изучалась нефтеемкость различных пропорций органо-минеральных мелиорантов, состоящих из торфяного, сапропелевого и диатомитового сырья [25].



В докладе научного сотрудника *А. В. Собенина* были рассмотрены исследования по перераспределению тяжелых металлов в системе «сточные воды–отходы» с использованием отходов железо-магниевого производства. Процесс взаимодействия показал, что отходы эффективно удаляют ионы металлов ( $Cd^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ) из промышленных сточных вод. Эффективность удаления загрязнителя из раствора зависит от массы навески отходов, начальной концентрации ионов металлов и времени контакта.

Старший научный сотрудник *Р. С. Титов* рассказал об исследовании возможности производства скандиевого концентрата из хвостов мокрой магнитной сепарации железных руд.

В докладе научного сотрудника *В. А. Черепанова* отражено современное состояние горнотехнических условий карьеров во взаимосвязи с развитием транспорта, обозначены основные виды карьерного транспорта и направления их совершенствования и приведены тенденции развития горнотранспортных машин с накопителями энергии, а также с дистанционным и роботизированным управлением. В ИГД УрО РАН на протяжении последних лет ведется разработка современных инновационных решений в области транспортных систем карьеров, соответствующих большинству отмеченных в докладе тенденций, в том числе для определения областей применения, обоснования конструктивных параметров, а также для разработки технологии использования различных видов карьерного транспорта [26].

Младшие научные сотрудники *Я. А. Брусницына*, *К. В. Шепель*, *А. А. Горбунов*, *Р. А. Шапочкин*, *В. В. Черных* и научные сотрудники *М. А. Чендырев*, *Д. А. Коптяков* представили доклады по направлениям геоэкология, геотехнология и геомеханика: «Разработка мероприятий по биоремедиации почв и техногенных грунтов» (*Я. А. Брусницына*); «Оценка возможности использования отходов производства при разработке мероприятий по иммобилизации тяжелых металлов» [27] (*К. В. Шепель*); «Оценка воздействия на окружающую среду при отработке месторождения полевошпатового сырья» (*А. А. Горбунов*); «Обоснование источников альтернативного водоснабжения пос. Левиха и станции нейтрализации кислых шахтных вод (Свердловская область)» [28] (*Р. А. Шапочкин*); «О влиянии параметров транспортных коммуникаций на геометрические параметры карьера» (*В. В. Черных*); «Об области применения канатных наклонных карьерных подъемных установок» (*М. А. Чендырев*); «Исследование способов определения механических свойств, характеризующих процессы упругого деформирования горных пород» (*Д. А. Коптяков*).

В докладе научного сотрудника *Е. Ю. Ефремова* показаны результаты исследования геогидродинамического режима, формирующегося вокруг подземных работ при системах разработки с обрушением кровли. С помощью моделирования установлено, что фактором, определяющим водоприток к очистной зоне, являются фильтрационные свойства водоносных отложений, а не проницаемость зоны обрушения. Отмечено, что при проектировании осушения необходимо учитывать морфологию подошвы водоносных комплексов [29, 30].

Завершающим стал доклад председателя Совета молодых ученых ИГД УрО РАН, научного сотрудника *И. А. Глебова* «Обоснование параметров схемы вскрытия глубоких горизонтов трубки Нюрбинская». В докладе отражены основные моменты диссертационной работы на соискание степени кандидата технических наук. Автором предложен алгоритм определения конструктивного угла нерабочего борта карьера для усовершенствования аналитического метода определения дополнительного разноса бортов, разработанного в Криворожском горнорудном институте [31].

**Решения конференции.** В 2023 году перед недропользователями встал серьезный вопрос об импортозамещении не только оборудования, но и программного обеспечения. Молодым ученым институтов РАН и университетов необходимо участвовать в продвижении и разработке конкурентоспособного отечественного программного обеспечения.

Количество участников конференции растет. Однако проведение конференции в онлайн-формате не позволяет участникам пообщаться «с глазу на глаз» и обсудить интересующие вопросы более детально. Поэтому в феврале 2024 года необходимо провести XVIII Всероссийскую молодежную научно-практическую конференцию «Проблемы недропользования» с привлечением на базовую площадку конференции (ИГД УрО РАН) большего числа очных участников, тем самым уменьшив количество участников в режиме онлайн.

Для поддержания очного участия молодых ученых в научных молодежных мероприятиях Совету молодых ученых ИГД УрО РАН высказать предложения руководству ИГД УрО РАН, ИГД ДВО РАН, ГИ УрО РАН, ГоИ КНЦ РАН, ИГД СО РАН, ИГДС СО РАН в срок до 1 июня 2023 г.

Признать лучшими доклады молодых ученых в трех номинациях.

Доклад молодого ученого:

– *Копыловой Александры Евгеньевны*, младшего научного сотрудника ИГД ДВО РАН, «Применение ультразвуковых воздействий при переработке золотосодержащих хвостов методом комбинированной пневмо-электрофлотации»;

– *Калюжного Антона Сергеевича*, научного сотрудника ГоИ КНЦ РАН, «Влияние статической нагрузки от горнотранспортного оборудования на устойчивость уступов, расположенных в скальных породах»;

– *Плохих Вадима Валерьевича*, младшего научного сотрудника ИГД СО РАН, «Результаты исследования процесса механического замыкания упругого клапана и применение его в пневмоударной машине с регулируемыми параметрами рабочего цикла»;

– *Оглоблиной Алины Алексеевны*, инженера ГИ УрО РАН, «Термометрический контроль формирования и состояния ледопородных ограждений строящихся шахтных стволов»;

– *Шамаева Семена Дмитриевича*, старшего инженера ИГДС СО РАН, «Распознавание зон неоднородностей на радарограммах автодорог на основе нейронных сетей»;

– *Собенина Артема Вячеславовича*, научного сотрудника ИГД УрО РАН, «Оценка возможности использования отходов железо-магниевого производства для очистки сточных вод от тяжелых металлов ( $Cd^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ )».

Доклад аспиранта:

– *Шаванова Николая Дмитриевича*, аспиранта, ассистента ИРГУПС «Изучение технологических свойств продуктов сжигания угля с целью их утилизации в дорожном строительстве»;

– *Спицына Андрея Александровича*, аспиранта СПГУ «Исследование пылевязывающих свойств гидрогеля как средства пылевзрывозащиты угольных шахт»;

– *Кожиева Заурбека Валерьевича*, аспиранта СКГМИ (ГТУ) «Технологическое моделирование рудных месторождений в ГГИС: проблемы и перспективы».

Доклад студента и магистранта:

– *Зассеевой Луизы Алановны*, магистранта СКГМИ (ГТУ) (рук. Дзэбоева Фатима Маирбековна) «Загрязнение почв тяжелыми металлами как результат производства полиметаллов и один из способов ее рекультивации»;

– *Еналдиева Давида Вадимовича*, студента СКГМИ (ГТУ) (рук. Джюева Ада Константиновна) «Гравитационно-флотационная технология извлечения золота из руд и россыпей»;

– *Смирнова Владислава Антоновича* и *Захарова Михаила Юрьевича*, студентов УГГУ (рук. Бочков Владимир Сергеевич) «Анализ видов изнашивания футеровок конусных дробилок и автоматизированный контроль их состояния»;

– *Асановича Данила Алексеевича*, студента филиала МАГУ «Применение компьютерного моделирования для совершенствования конструкции радиометрического сепаратора»;

– *Воронина Романа Павловича*, студента филиала МАГУ «Автоматизация измерения спектральных характеристик основных видов и текстурно-структурных разновидностей апатит-нефелиновых руд».

Опубликовать итоги XVII Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» в научно-техническом журнале «Известия вузов. Горный журнал».

Выразить признательность за информационную поддержку молодежного мероприятия сетевому периодическому научному изданию «Проблемы недропользования» и научному журналу «Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук», а также научно-техническим и производственным журналам «Горный информационно-аналитический бюллетень», «Горный журнал», «Горный журнал Казахстана», издательскому дому «Руда и металлы».

Выразить особую благодарность за профессиональное ведение мероприятия модераторам конференции: Сергею Викторовичу Корнилку, Андрею Валерьевичу Глебову, Тимуру Фаритовичу Харисову, Кириллу Васильевичу Барановскому, Петру Андреевичу Рыбникову и Игорю Андреевичу Глебову.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Программа конференции «Проблемы недропользования». URL: <https://conf.igduran.ru/files/Programma.pdf> (дата обращения: 09.03.2023).
2. Мингазов Р. Я., Шиповский И. Е., Закалинский В. М. Проблемы механизма действия взрыва новой конструкции скважинного заряда // Проблемы недропользования. 2023. № 2(37). С. 41–46. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.041
3. Жизневская П. А. Анализ деятельности предприятий горнодобывающей и обрабатывающей промышленности Хабаровского края // Вестник ЗаБГК. 2022. № 15. С. 144–148.
4. Копылова А. Е., Прохоров К. В. Применение ультразвуковых воздействий при переработке золотосодержащих хвостов методом комбинированной пневмо-электрофлотации // Проблемы недропользования. 2023. № 2(37). С. 14–22. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.014
5. Васюта А. Д., Журавлев К. А. Анализ работы шлюзовых промывочных приборов и оценка их энергоёмкости // Проблемы недропользования. 2023. № 2(37). С. 32–39. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.032
6. Таганов В. В., Алексеев В. С. Разработка инновационной технологии формирования обогащенных зон техногенных комплексов россыпных месторождений // Проблемы недропользования. 2023. № 2(37). С. 23–31. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.023
7. Щелов Г. А. Изучение способности *Chlorella vulgaris* снижать концентрацию азота в сточных водах горнодобывающих предприятий // Проблемы недропользования. 2023. № 2(37). С. 112–120. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.112
8. Ломов М. А. Разработка цифровых моделей природно-технических систем для контроля удароопасности глубокозалегающих месторождений России // Молодые ученые – Хабаровскому краю: матер. XXIV краевого конкурса молодых ученых, Хабаровск, 12–18 января 2022 года. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2022. С. 103–108.
9. Бесполитов Д. В., Шаванов Н. Д., Панков П. П., Коновалова Н. А., Корякина Е. А. Изучение состава и свойств золошлаковых отходов с целью их утилизации в строительной индустрии // Вопросы современной науки и практики. 2022. № 3. С. 23–31. DOI: 10.17277/voprosy.2022.03.pp.023-031
10. Патугин А. В., Скулкин А. А. Исследование особенностей гидроразрыва х-образной системы скважин в лабораторных условиях // Проблемы недропользования. 2023. № 2(37). С. 47–56. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.047

11. Плохих В. В. Создание пневматической ударной машины для реализации адаптивных технологических процессов // ГИАБ. 2022. № 7. С. 91–103. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_7\_0\_91
12. Чецин Д. О. Обоснование возможности применения способа интервальной продувки при бурении горизонтальных скважин пневмоударниками // Проблемы недропользования. 2023. № 2(37). С. 66–76. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.066
13. Королев М. К. Тенденции развития конструкций крепей сопряжения с применением подходов патентного ландшафта // Проблемы недропользования. 2023. № 2(37). С. 78–84. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.078
14. Лядов В. О., Папулов А. С. Результаты исследований полной газоносности пород продуктивного пласта Гремячинского месторождения калийных солей // Проблемы недропользования. 2023. № 2(37). С. 99–111. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.099
15. Антипин Ю. Г., Барановский К. В., Рожков А. А., Никитин И. В., Соломеин Ю. М. Исследование влияния показателей извлечения на эффективность подземной отработки месторождений бедных комплексных руд // Горная промышленность. 2022. № 1S. С. 46–52. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-46-52
16. Соколов И. В., Рожков А. А. Систематизация способов снижения потерь рудной мелочи в очистном пространстве // Известия вузов. Горный журнал. 2022. № 5. С. 14–24. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-5-14-24
17. Соколов И. В., Смирнов А. А., Рожков А. А. Технология взрывной отбойки крепких ценных руд при веерном расположении скважин // Записки Горного института. 2019. Т. 237. С. 285–291. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.285
18. Соколов И. В., Смирнов А. А., Антипин Ю. Г., Барановский К. В., Никитин И. В., Рожков А. А., Соломеин Ю. М., Дедов О. Ю. Особенности подземной разработки Ветренского золоторудного месторождения // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 4. С. 12–22. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-4-12-22
19. Соколов И. В., Антипин Ю. Г., Рожков А. А. Модернизация системы разработки маломощного месторождения богатых медноколчеданных руд // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т. 12. № 3. С. 444–453. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-3-444-453
20. Никитин И. В. Оптимизация параметров вскрытия при подземной разработке подкарьерных запасов кимберлитового месторождения // Проблемы недропользования. 2017. № 1. С. 21–28.
21. Антипин Ю. Г., Барановский К. В., Рожков А. А., Никитин И. В., Соломеин Ю. М. Оптимизация параметров подземной геотехнологии отработки подкарьерных запасов рудных месторождений методом экономико-математического моделирования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2022. Т. 20. № 2. С. 23–35. DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-23-35
22. Арсланов А. А., Бельских А. М., Макаров Н. В., Макаров В. Н. Обоснование параметров эффективного классификатора тонкодисперсных техногенных минеральных отходов // Проблемы недропользования. 2023. № 2(37). С. 7–13. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.007
23. Бельских А. М., Арсланов А. А., Макаров Н. В., Макаров В. Н. Моделирование в аппаратах воздушного охлаждения термовихревого теплообмена // Проблемы недропользования. 2023. № 2(37). С. 86–92. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.086
24. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А., Смирнов А. Ю. Организация противофильтрационных мероприятий на шламохранилищах // Проблемы недропользования. 2022. № 2. С. 104–114. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.02.104
25. Антонинова Н. Ю., Усманов А. И., Собенин А. В., Горбунов А. А. Исследование влияния торфодиамитового мелиоранта на формирование устойчивого травяного покрова при рекультивации нарушенных земель // ГИАБ. 2022. № 5. С. 131–141. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_5\_0\_131
26. Журавлев А. Г., Черепанов В. А. Современные технологические и конструктивные решения в карьерном транспорте // Проблемы недропользования. 2022. № 4. С. 75–93. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.04.075
27. Антонинова Н. Ю., Шубина Л. А., Шепель К. В., Собенин А. В., Усманов А. И. Оценка возможности использования отходов производства при разработке мероприятий по иммобилизации тяжелых металлов // ГИАБ. 2022. № 5-1. С. 46–55. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_5\_1\_0\_46
28. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А., Шапочкин Р. А. Обоснование альтернативных источников водоснабжения в горнодобывающих районах с высокой техногенной нагрузкой на примере поселка Левиха Свердловской области // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 2. С. 74–86. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-74-86
29. Ефремов Е. Ю. Характеристика распределения прорывов глинистых отложений в горные выработки из вышележащих осадочных пород // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. № 12. С. 126–134.
30. Ефремов Е. Ю., Рыбников П. А., Рыбникова Л. С. Обоснование осушения гидрогеодинамической системы «водовмещающие отложения–дезинтегрированный массив» при подземной разработке железорудных месторождений // Успехи современного естествознания. 2023. № 3. С. 47–57. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38015> (дата обращения: 30.06.2023).

31. Акишев А. Н., Лель Ю. И., Глебов И. А., Буднев А. Б. Технология вскрытия и разработки kimberлитовых карьеров с использованием крутонаклонных автосъездов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. № 3. С. 93–105. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-3-1-87-99

Поступила в редакцию 13 марта 2023 года

#### Сведения об авторах:

**Глебов Игорь Андреевич** – научный сотрудник, председатель Совета молодых ученых Института горного дела УрО РАН. E-mail: i.glebov@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4436-3594>

**Кутуев Вячеслав Александрович** – научный сотрудник, заместитель председателя Совета молодых ученых Института горного дела УрО РАН. E-mail: 9634447996@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8423-0246>

#### Фото:

**Варламова Наталья Николаевна** – младший научный сотрудник, председатель Совета молодых ученых Института горного дела ДВО РАН.

**Шиббаева Дарья Николаевна** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Горного института КНЦ РАН.

**Чендырев Михаил Андреевич** – научный сотрудник Института горного дела УрО РАН.

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-102-119

## The results of the 17th All-Russian youth scientific and practical conference Problems of Subsoil Use

Igor A. Glebov<sup>1</sup>, Viacheslav A. Kutuev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

#### Abstract

*The results of the 17th All-Russian youth scientific and practical conference Problems of Subsoil Use are presented in the article. The conference was organized by the Institute of Mining UB RAS (Ekaterinburg) together with the Institute of Mining EFB RAS (Khabarovsk), Mining Institute KSC RAS (Apatity), Mining Institute UB RAS (Perm), Institute of Mining SB RAS (Novosibirsk), and the Mining Institute of the North SB RAS (Yakutsk). Scientific reports and briefs on the following issues were heard at the conference: safe subsoil use; mine planning; geotechnics for open, underground and combined mining methods; construction geotechnology of underground and surface structures; ecological problems of the mining complex and natural resource management; geomechanical processes, geodynamic processes, and rock breaking during field development; geoinformational support during field development; geophysics; aerology and mining thermophysics; economic problems of subsoil use; crude minerals quality management and technogenic waste processing. The decision made by the conference participants after the four-day work is announced at the end of the article.*

**Keywords:** conference; Problems of Subsoil Use; young scientists; geotechnology; geoecology; geomechanics; geodynamics; geoinformatics; rock breaking; aerology of mining enterprises; mining thermal physics; economics; quality control; crude minerals; mineral processing.

#### REFERENCES

1. *Problems of Subsoil Use: conference program.* (In Russ.) Available from: <https://conf.igduran.ru/files/Programma.pdf> [Accessed 09 March 2023].
2. Mingazov R. Ia., Shipovskii I. E., Zakalinskii V. M. Problems of the action mechanism of the explosion of the new design of the borehole charge. *Problemy nedropolzovaniia = Problems of Subsoil Use.* 2023; 2(37): 41–46. (In Russ.) Available from: doi: 10.25635/2313-1586.2023.02.041
3. Zhiznevskaya P. A. Analyzing the performance of mining and processing enterprises in the Khabarovsk region. *Vestnik ZabGK = Bulletin of the Transbaikalian Mining College.* 2022; 15: 144–148. (In Russ.)
4. Kopylova A. E., Prokhorov K. V. Application of ultrasonic impacts in the processing of gold-containing tailings by combined pneumatic-electric flotation. *Problemy nedropolzovaniia = Problems of Subsoil Use.* 2023; 2(37): 14–22. (In Russ.) Available from: doi: 10.25635/2313-1586.2023.02.014

5. Vasiuta A. D., Zhuravlev K. A. Operation analysis of lock flushing devices and evaluation of their energy intensity. *Problemy nedropolzovaniia = Problems of Subsoil Use*. 2023; 2(37): 32–39. (In Russ.) Available from: doi: 10.25635/2313-1586.2023.02.032
6. Taganov V. V., Alekseev V. S. Development of innovative technology for the formation of enriched zones of technogenic complexes of placer deposits. *Problemy nedropolzovaniia = Problems of Subsoil Use*. 2023; 2(37): 23–31. (In Russ.) Available from: doi: 10.25635/2313-1586.2023.02.023
7. Shcheglov G. A. Study of reducing nitrogen concentration in the mining wastewater by *Chlorella vulgaris*. *Problemy nedropolzovaniia = Problems of Subsoil Use*. 2023; 2(37): 112–120. (In Russ.) Available from: doi: 10.25635/2313-1586.2023.02.112
8. Lomov M. A. Developing digital models of natural and technical systems to control rock-bump hazard of Russian deep-seated deposits. In: *Young scientists to the Khabarovsk region: Proceedings of the 24th regional competition of young scientists, Khabarovsk, 12–18 January 2022*. Khabarovsk: Pacific National University, 2022. p. 103–108. (In Russ.)
9. Bespolitov D. V., Shavanov N. D., Pankov P. P., Konovalova N. A., Koriakina E. A. Studying the composition and properties of ash and slag waste for their disposal in the construction industry. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo = Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University*. 2022; 3: 23–31. (In Russ.) Available from: doi: 10.17277/voprosy.2022.03.pp.023-031
10. Patutin A. V., Skulkin A. A. Study of hydraulic fracturing of an x-shaped system of boreholes in laboratory conditions. *Problemy nedropolzovaniia = Problems of Subsoil Use*. 2023; 2(37): 47–56. (In Russ.) Available from: doi: 10.25635/2313-1586.2023.02.047
11. Plokhikh V. V. Creating percussion tool to implement adaptive technologies. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2022; 7: 91–103. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236\_1493\_2022\_7\_0\_91
12. Cheshchin D. O. Justification of the possibility of using the interval purge method of interval blowing when drilling horizontal wells with air hammers. *Problemy nedropolzovaniia = Problems of Subsoil Use*. 2023; 2(37): 66–76. (In Russ.) Available from: doi: 10.25635/2313-1586.2023.02.066
13. Korolev M. K. Development trends for junction support with application of patent landscape approaches. *Problemy nedropolzovaniia = Problems of Subsoil Use*. 2023; 2(37): 78–84. (In Russ.) Available from: doi: 10.25635/2313-1586.2023.02.078
14. Liadov V. O., Papulov A. S. Results of studies on the full gas content in rocks of the productive formation of the Gremyachinskoye potash salt deposit. *Problemy nedropolzovaniia = Problems of Subsoil Use*. 2023; 2(37): 99–111. (In Russ.) Available from: doi: 10.25635/2313-1586.2023.02.099
15. Antipin Iu. G., Baranovskii K. V., Rozhkov A. A., Nikitin I. V., Solomein Iu. M. Research of extraction indicators influence on the efficiency of underground mining of low-grade complex ore deposits. *Gornaia promyshlennost = Mining Industry*. 2022; 1S: 46–52. (In Russ.) Available from: doi: 10.30686/1609-9192-2022-1S-46-52
16. Sokolov I. V., Rozhkov A. A. Systematizing the methods of fine ore loss reduction in the stoping area. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2022; 5: 14–24. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2022-5-14-24
17. Sokolov I. V., Smirnov A. A., Rozhkov A. A. Technology of blasting of strong valuable ores with ring borehole pattern. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2019; 237: 285–291. (In Russ.) Available from: doi: 10.31897/PMI.2019.3.285
18. Sokolov I. V., Smirnov A. A., Antipin Iu. G., Baranovskii K. V., Nikitin I. V., Rozhkov A. A., Solomein Iu. M., Dedov O. Iu. Peculiarities of underground mining of Vetrensky gold mine. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2018; 4: 12–22. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2018-4-12-22
19. Sokolov I. V., Antipin Iu. G., Rozhkov A. A. Modernization of the mining system of small deposits of rich copper pyrite ores. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020; 12(3): 444–453. (In Russ.) Available from: doi: 10.21177/1998-4502-2020-12-3-444-453
20. Nikitin I. V. Optimization the parameters of opening in underground development of the kimberlite deposit underlying reserves. *Problemy nedropolzovaniia = Problems of Subsoil Use*. 2017; 1: 21–28. (In Russ.)
21. Antipin Iu. G., Baranovskii K. V., Rozhkov A. A., Nikitin I. V., Solomein Iu. M. Optimization of underground geotechnology parameters for the mining of under-pit reserves of ore deposits by the method of economic and mathematical modeling. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2022; 20(2): 23–35. (In Russ.) Available from: doi: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-23-35
22. Arslanov A. A., Belskikh A. M., Makarov N. V., Makarov V. N. Substantiation of the parameters of an effective classifier of fine-dispersed technogenic mineral wasted. *Problemy nedropolzovaniia = Problems of Subsoil Use*. 2023; 2(37): 7–13. (In Russ.) Available from: doi: 10.25635/2313-1586.2023.02.007
23. Belskikh A. M., Arslanov A. A., Makarov N. V., Makarov V. N. Modeling of thermal vortex heat exchange in air cooling devices. *Problemy nedropolzovaniia = Problems of Subsoil Use*. 2023; 2(37): 86–92. (In Russ.) Available from: doi: 10.25635/2313-1586.2023.02.086

24. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A., Smirnov A. Iu. Organization of anti-filtration measures at tailings dams. *Problemy nedropolzovaniia = Problems of Subsoil Use*. 2022; 2: 104–114. (In Russ.) Available from: doi: 10.25635/2313-1586.2022.02.104

25. Antoninova N. Iu., Usmanov A. I., Sobenin A. V., Gorbunov A. A. Effect of peat-diatomite ameliorant on grass cover persistency in disturbed land reclamation. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2022; 5: 131–141. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236\_1493\_2022\_5\_0\_131

26. Zhuravlev A. G., Cherepanov V. A. Modern technological and design solutions in mining transport. *Problemy nedropolzovaniia = Problems of Subsoil Use*. 2022; 4: 75–93. (In Russ.) Available from: doi: 10.25635/2313-1586.2022.04.075

27. Antoninova N. Iu., Shubina L. A., Shepel K. V., Sobenin A. V., Usmanov A. I. Assessment of the possibility of using industrial waste in the development of measures for the immobilization of heavy metals. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2022; 5-1: 46–55. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236\_1493\_2022\_5\_1\_46

28. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A., Shapochkin R. A. Rationale for alternative water sources for mining regions with high environmental footprint on the example of Levikha village of the Sverdlovsk region. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 2: 74–86. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2023-2-74-86

29. Efremov E. Iu. Characteristics of mud inrushes distribution from caved zone into deposit located under sedimentary structure. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019; 12: 126–134. (In Russ.)

30. Efremov E. Iu., Rybnikov P. A., Rybnikova L. S. Development of drainage design of the hydrogeodynamic system “caving zone-aquifer” conditions due to sublevel caving method. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniia = Advances in Current Natural Sciences*. 2023; 3: 47–57. (In Russ.) Available from: doi: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38015> [Accessed 30 June 2023].

31. Akishev A. N., Lel Iu. I., Glebov I. A., Budnev A. B. Technology for opening and developing kimberlite quarries using steeply inclined ramps. *Izvestiia Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle = Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2021; 3: 93–105. (In Russ.) Available from: doi: 10.46689/2218-5194-2021-3-1-87-99

Received 13 March 2023

#### Information about the authors:

**Igor A. Glebov** – researcher, Chairman of the Council of Young Scientists, Institute of Mining UB RAS. E-mail: [i.glebov@igduran.ru](mailto:i.glebov@igduran.ru); <https://orcid.org/0000-0003-4436-3594>

**Viacheslav A. Kutuev** – researcher, Deputy Chairman of the Council of Young Scientists UB RAS. E-mail: [9634447996@mail.ru](mailto:9634447996@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-8423-0246>

#### Photo:

**Natalia N. Varlamova** – junior researcher, Chairman of the Council of Young Scientists, Institute of Mining FEB RAS.

**Daria N. Shibaeva** – PhD (Engineering), leading researcher, Institute of Mining KSC RAS.

**Mikhail A. Chendyrev** – researcher, Institute of Mining UB RAS.

**Для цитирования:** Глебов И. А., Кутуев В. А. Итоги XVII Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 5. С. 102–119. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-102-119

**For citation:** Glebov I. A., Kutuev V. A. The results of the 17th All-Russian youth scientific and practical conference Problems of Subsoil Use. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 5: 102–119 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-102-119

**В журнале публикуются статьи по следующим группам специальностей научных работников**

**2.3. Информационные технологии и телекоммуникации**

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования

**2.5. Машиностроение**

2.5.2. Машиноведение

2.5.3. Трение и износ в машинах

2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

2.5.6. Технология машиностроения

2.5.10. Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы

2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства

**2.8. Недропользование и горные науки**

2.8.1. Технология и техника геологоразведочных работ

2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр

2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

2.8.7. Теоретические основы проектирования горнотехнических систем

2.8.8. Геотехнология, горные машины

2.8.9. Обогащение полезных ископаемых

2.8.10. Охрана труда, промышленная безопасность, безопасность в чрезвычайных ситуациях (недропользование)