

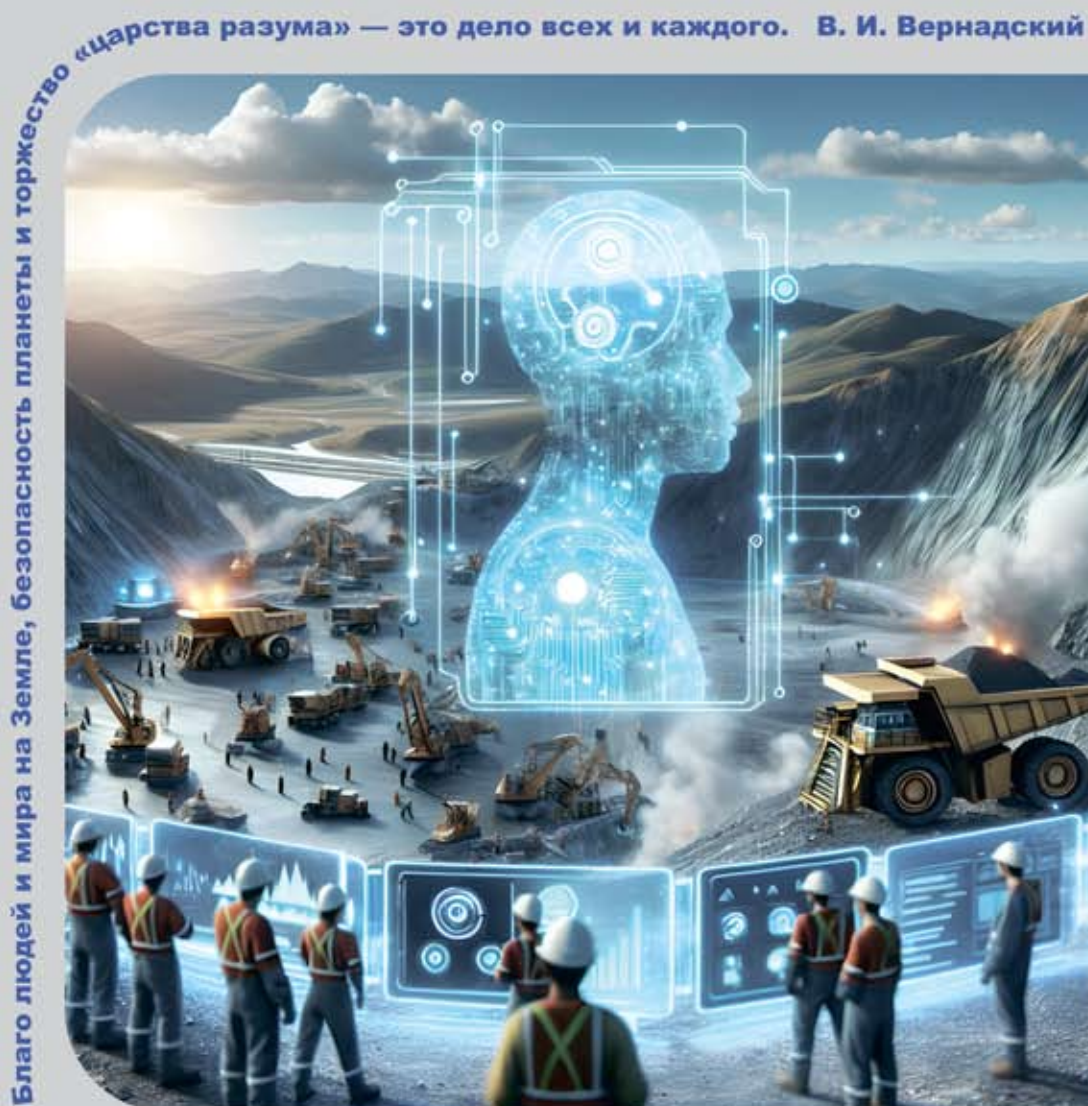
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
ЖУРНАЛ

МАРШЕЙДЕРИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

№ 3, май-июнь 2024 г.

www.n-gn.ru

«Mine Surveying and Subsurface Use»
«Mine Surveying and Subsurface Use»
«Mine Surveying and Subsurface Use»
«Mine Surveying and Subsurface Use»
«Mine Surveying and Subsurface Use»
«Mine Surveying and Subsurface Use»



3-й международный конгресс и выставка



VOSTOK CAPITAL
— 21 год динамичного успеха —

24–25 сентября 2024, Москва

При поддержке:



Минпромторг
России

Бронзовый
спонсор:



НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ
АКОНИТ
НАДЕЖНЫЕ РЕШЕНИЯ • ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Партнёр в сфере инженерных
инноваций:

BELUGA TEC

СРЕДИ ДОКЛАДЧИКОВ 2023



Руслан Ситников,
первый заместитель
председателя,
Правительство Иркутской
области



Милена Милич,
специальный представитель
губернатора в Москве,
Правительство Сахалинской
области



Игорь Елисеев,
генеральный директор,
Гурбей Золото



Сергей Васильев,
генеральный директор,
Озерновский горно-
металлургический комбинат



Александр Завалюев,
управляющий директор,
Покровский рудник



Акыл Токтобаев,
заместитель председателя
правления,
Алтынкен



Роман Щетинский,
заместитель генерального
директора по стратегии и
инвестициям,
Высочайший



Иван Руденко,
директор департамента
стратегического развития,
Атлас Майнинг



Виктор Николайчук,
директор по инвестициям,
Золотой Альянс

Среди участников мероприятия 2023:



ПОЛЮС



POLYMETAL
INTERNATIONAL PLC



СЕЛИГДАР



GV GOLD



ЮГК



АТЛАС
МАЙНИНГ



УГМК



HIGHLAND
GOLD



ALROSA



ПАВЛИК



GOLDMININGRUS.COM



№3(131)

май-июнь 2024 г.



Учредитель журнала
Общество с ограниченной
ответственностью
«Издательский дом
«Недропользование и горные
науки»

Редакционный совет

Г.И. Айнбиндер – ООО «АГЭЦ», Москва
И.И. Айнбиндер – ИПКОН РАН, Москва
А.А. Барях – ФИЦ УрО РАН, Пермь
В.М. Вернигор – АО «Технологии контроля безопасности», Москва
В.И. Голик – ФГБОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)», Владикавказ
В.А. Гордеев – ООО «Союз маркшейдеров России», Москва
В.В. Грицков – ООО «Союз маркшейдеров России», Москва
В.А. Дрибан – РНИМИ, Донецк
А.А. Добрынин – ИПКОН РАН, Москва
В.Н. Захаров – ИПКОН РАН, Москва
В.А. Игнаткина – НИТУ «МИСиС», Москва
Г.В. Калабин – ИПКОН РАН, Москва
Д.Р. Каплунов – ИПКОН РАН, Москва
Н.М. Качурин – ТулГУ, Тула
Р.В. Ключев – СКГМИ (ГТУ), Владикавказ
С.Б. Кулибаба – ИПКОН РАН, Москва
В.В. Куликов – МГРИ, Москва
Л.Ш. Махмудова – ФГБОУ ВО «ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллион-шикова», Грозный
Н.В. Милетенко – Минприроды РФ, Москва
М.Б. Носырев – Екатеринбург
Ф.К. Низаметдинов – Союз маркшейдеров Казахстана, КарТУ, г. Караганда, Республика Казахстан
В.Н. Одинцев – ИПКОН РАН, Москва
В.Д. Пропп – ФГБОУ ВО «УГТУ», Екатеринбург
И.А. Пыталев – МГТУ им. Г.И. Носова, Магнитогорск
Х.Э. Таймасханов – ФГБОУ ВО «ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллион-шикова», Грозный
К.Н. Трубецкой – ИПКОН РАН, Москва
М.А. Тюленев – КузГТУ, Кемерово
А.А. Хорешок – КузГТУ, Кемерово
В.А. Чантурия – ИПКОН РАН, Москва
И.К. Чунуев – Кыргызская горная ассоциация, КГТУ им. И.Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан

Издатель:

ООО «Издательский дом «Недропользование и горные науки»
Адрес редакции и издателя:
117647, ул. Академика Капицы, д. 26, 1.
Тел.: +7(915) 111 0386
E-mail: office@n-gn.ru, articles@n-gn.ru
http://www.n-gn.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-83630 от 26.07.2022 г.

По решению ВАК журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых могут быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук по разработке месторождений полезных ископаемых и по наукам о Земле

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ и в Российский индекс научного цитирования.

Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory»

© Маркшейдерия и недропользование



В ЭТОМ НОМЕРЕ:

МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВЫЕ РЕСУРСЫ

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

ГЕОМЕХАНИКА

МАРКШЕЙДЕРСКОЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ

ФИЗИКА ГОРНЫХ ПОРОД И ПРОЦЕССОВ

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Журнал издается с 2001 года

Редакция:

Главный редактор
Ю.В. Дмитрак
Заместитель главного редактора
В.Н. Хетагуров
Ведущий редактор
Н.А. Федотенко
Ученый секретарь
Н.А. Милетенко
Верстка и дизайн
Н.Р. Алкснитис
Помощник главного редактора
Б.Н. Пашичев

Подписной индекс издания
в каталоге «Урал-Пресс»,
в объединенном каталоге АРЗИ
«Пресса России» – 88016

В течение года можно произвести
подписку на журнал непосредственно в редакции

За точность приведенных сведений
и содержание данных, не подлежащих открытой публикации,
несут ответственность авторы

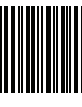
При перепечатке ссылка на журнал
«Маркшейдерия и недропользование» обязательна

Журнал отпечатан в типографии
«CLUB PRINT»
тел.: +7(495) 669 5009

ISSN 2079-3332



24 003





№3(131)

may-june 2024



Founder of the magazine
Publishing House
Minerals Management
and Mining Sciences,
Limited liability company

Editorial Council

G.I. Ainbinder – LLC «AGETS», Moscow
I.I. Ainbinder – ICEMR RAS, Moscow
A.A. Baryakh – PFRC UB RAS, Perm
V.M. Vernigor – JSC «Security Control Technologies», Moscow
V.I. Golik – NCIMM (STU), Vladikavkaz
V.A. Gordeev – LLC «Union of Surveyors of Russia», Moscow
V.V. Gritskov – LLC «Union of Surveyors of Russia», Moscow
V.A. Driban – RANIMI, Donetsk
A.A. Dobrynin – ICEMR RAS, Moscow
V.N. Zakharov – ICEMR RAS, Moscow
V.A. Ignatkina – NUST MISIS, Moscow
G.V. Kalabin – ICEMR RAS, Moscow
D.R. Kaplunov – ICEMR RAS, Moscow
N.M. Kachurin – TulSU, Tula
R.V. Klyuev – SKGMI (GTU), Vladikavkaz
S.B. Kulibaba – IPKON RAN, Moskva
V.V. Kulikov – MGRI, Moscow
L.Sh. Makhmudova – FGBOU VO «GGNTU named after M.D. Milionshchikov», Grozny
N.V. Miletchenko – Ministry of Natural Resources RF, Moscow
F.K. Nizametdinov – Union of Surveyors of Kazakhstan, KSTU, Karaganda, Republic of Kazakhstan
M.B. Nosyrev – Ekaterinburg
V.N. Odintsev – IPCON RAS, Moscow
V.D. Propp – URSMU, Ekaterinburg
I.A. Pytalev – FSBEIHE NMST, Magnitogorsk
Kh. E. Taymaskhanov – FGBOU VO «GGNTU named after M.D. Milionshchikov», Grozny
K.N. Trubetskoy – ICEMR RAS, Moscow
M.A. Tyulenev – KuzSTU, Kemerovo
A.A. Horeshek – KuzSTU, Kemerovo
V.A. Chanturia – ICEMR RAS, Moscow
I.K. Chunuev – Kyrgyz Mining Association, Kyrgyz Mining and Metallurgical Institute of KSTU named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan

Publisher:

Publishing House Minerals Management and Mining Sciences, LLC
Address of the editorial office and publisher:
117647, Akademika Kapitsa st., 26, 1.
Phone: +7(915) 111 0386
E-mail: office@n-gn.ru, articles@n-gn.ru
http://www.n-gn.ru

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Mass communications, communication and protection of cultural heritage
Registration certificate PI No. FS 77-83630 dated July 26, 2022

By decision of the Higher Attestation Commission, the journal is included in the List of leading peer-reviewed scientific journals and publications in which the main scientific results can be published dissertations for the degree of candidate and doctor of science in the development mineral deposits and geosciences

*The journal is included in the Abstract Journal and Databases of VINITI and in the Russian science citation index
Information about the journal is published annually in the international reference system in the periodicals and continuing editions of Ulrich's Periodicals Directory*

© Mine Surveying and Subsoil Use

**IN THIS ISSUE:**

MINERAL-SOURCE OF RAW MATERIALS

METHODS AND TECHNOLOGY OF MINERAL
RESOURCES EXPLORATION

GEOMECHANICS

SURVEYING AND GEOLOGICAL SUPPORT OF MINING
OPERATIONS

ROCKS AND PROCESSES PHYSICS

MINERAL PROCESSING

THEORETICAL FOUNDATIONS OF MINING ENGINEERING
SYSTEMS DESIGN

The journal has been published since 2001

Edition:

Chief editor
Y.V. Dmitrak
Deputy Editor-in-Chief
V.N. Khetagurov
Lead Editor
N.A. Fedotenko
Scientific secretary
N.A. Miletchenko
Layout and design by
N.R. Alksnitits
Assistant Editor-in-Chief
B.N. Pashichev

*Subscription index of the publication
in the Ural-Press catalog, in the unified catalog ARZI
«Press of Russia» – 88016*

During the year, you can subscribe to the journal directly
in the editorial office

For the accuracy of the information provided and the content
of data not subject to open publications are the responsibility
of the authors

When reprinting a link to the journal
«Mine Surveying and Subsoil Use» required

The magazine was printed in the printing house
«CLUB PRINT»
phone: +7(495) 669 5009

ISSN 2079-3332



24 003



9 772079 333778



СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Минерально-сырьевые ресурсы Mineral-source of raw materials

Г. И. Архипов

Современное состояние золотодобывающей отрасли в Дальневосточном федеральном округе

G. I. Arhipov

The current state of the gold mining industry in the Far Eastern federal district4

Техника и технология недропользования

Methods and technology of mineral resources exploration

А. В. Матвеев

Параметры технологии разработки полускальных вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами в условиях угольных разрезов центрального Кузбасса

A. V. Matveev

Parameters of the technology for the development of semi-horizontal overburden rocks by excavator-automobile complexes in the conditions of coal mines of central Kuzbass.....16

В. Д. Кантемиров, Р. С. Титов, А. М. Яковлев

Оценка сверхнормативных потерь полезного ископаемого на примере разработки известнякового месторождения

V. D. Kantemirov, R. S. Titov, A. M. Yakovlev

Estimation of excess mineral losses on the example of limestone deposit development23

Геомеханика

Geomechanics

Н. М. Яковлев

Применение рейтинговых классификаций для обоснования системы разработки месторождения «Плато Расвумчорр» (Российская Федерация)

N. M. Yakovlev

Application of rating classifications to substantiate the development system of the Plato Rasvumchorr deposit (Russia)34

Ю. С. Щегольков

Обоснование критериев основных угловых параметров процесса сдвижения для условий отработки запасов Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей

Y. S. Shchegolkov

Substantiation of the criteria of the main angular parameters of the shear process for the conditions of mining the Verkhnekamskoye potassium-magnesium salt deposit42

Е. Е. Одинов, В. Н. Гусев

Применение метода прогнозирования состояния массива в сложных горно-геологических условиях

E. E. Odintsov, V. N. Gusev

Application of the method of massif condition forecasting in complex mining and geological conditions.....55

Б. Б. Луганцев, А. И. Чавкин, Ю. В. Турук, Е. А. Гревцева,

Н. Б. Афонина

Сохранение горных выработок для повторного использования на больших глубинах

B. B. Lugancev, A. I. Chavkin, J. V. Turuk, E. A. Grevtseva,

N. B. Afonina

Conservation of mine workings for reuse at great depths.....61

А. И. Рысин, В. Н. Тюпин

Влияние геометрической формы образцов сильвинита на значение их прочности при одноосном сжатии для горно-геологических условий Палашерского участка Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей

A. I. Rysin, V. N. Tyupin

The influence of the geometric shape of sylvinit samples on the value of their strength under uniaxial compression for the mining and geological conditions of the Palashersky area of the Upper Kama potash-magnesium salt deposit.....67

А. А. Поморцева, Г. Б. Поспехов

Формирование напряженно-деформированного состояния массива штабеля кучного выщелачивания золота

A. A. Pomortseva, G. B. Pospekhov

Formation of stress-strain state of the massif of heap leaching gold stack72

Маркшейдерское и геологическое обеспечение горных работ Surveying and geological support of mining operations

В. В. Кушнерчук, В. В. Хаустов, В. Н. Тюпин, Л. А. Семенова,

А. И. Карноушкин

О проблеме эксплуатации восстающих дренажных скважин при осушении Михайловского месторождения (Курская магнитная аномалия)

V. V. Kushnerchuk, V. V. Khaustov, V. N. Tyupin, L. A. Semenova,

A. I. Karnyushkin

About the problem of operation of rising drainage wells during drainage of the Mikhailovskoye field (Kursk magnetic anomaly)80

Н. В. Литвиненко, Е. А. Романько, С. Е. Гавришев,

Ю. Д. Маврин

Обоснование параметров маркшейдерской съемки складов полезного ископаемого при помощи БПЛА

N. V. Litvinenko, E. A. Romanko, S. E. Gavrishchev, Y. D. Mavrin

Justification of parameters of mine surveying of mineral warehouses using UAV89

О. В. Волков, Ю. В. Васильев, Д. П. Иноземцев, А. В. Филатов,

В. И. Козырев

Результаты мониторинга деформационных процессов методами высокоточной геодезии и радарной интерферометрии на геодинамическом полигоне

O. V. Volkov, Yu. V. Vasiliev, D. P. Inozemtsev, A. V. Filatov,

V. I. Kozzyrev

The results of monitoring deformation processes using high-precision geodesy and radar interferometry at the geodynamic polygon of the Polar oil and gas condensate field.....97

Физика горных пород и процессов

Rocks and processes physics

А. В. Тимохин, В. Д. Кантемиров, Р. С. Титов

Исследование сигнального наложения гидравлики в моделях пустот как обоснование электрометрии для картирования карстопоявлений

A. V. Timokhin, V. D. Kantemirov, R. S. Titov

Investigation of the signal overlap of hydraulics in void models as a justification for electrometry for mapping karst phenomena.....104

Обогащение полезных ископаемых

Mineral processing

Е. Г. Коваленко, Г. П. Двойченкова, В. В. Морозов, И. В. Пестряк,

В. А. Чуть-Ды

Выбор технологии повышения гидрофобности и извлекаемости алмазов трубки «Ботубинская»

E. G. Kovalenko, G. P. Dvoichenkova, V. V. Morozov, I. V. Pestryak,

V. A. Chut-Dy

The choice of technology to increase the hydrophobicity and recoverability of diamonds of the Botuobinskaya tube.....112

Теоретические основы проектирования горнотехнических систем

Theoretical foundations of mining engineering systems design

С. И. Фомин, А. Лелен

Определение производительности карьеров цементной промышленности, разрабатывающих минеральное сырье с использованием комбайнов послойного фрезерования SM

S. I. Fomin, A. Ljeljen

Output determination of open-cast mining cement raw materials deposits using surface miners SM122

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗОЛОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ В ДАЛЬНЕВОСТОЧНОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ

Г. И. Архипов,

Институт горного дела Хабаровского федерального исследовательского центра, г. Хабаровск, Россия

Аннотация: Дальневосточный федеральный округ (ДФО) располагает значительной сырьевой базой золота и развитой золотодобывающей промышленностью. Освоение сырьевой базы золота ведется очень активно. В период 2001–2021 годов добыча золота в федеральном округе выросла с 70 до 193 т. В разработку интенсивно вовлекаются месторождения с упорными (труднообогатимыми) рудами. В числе 10 крупнейших золотодобывающих субъектов страны, добывающих порядка 90 % золота в России, постоянно находится шесть субъектов ДФО. Переработка труднообогатимых концентратов осуществляется в основном на территории ДФО предприятиями группы «Атлас Майнинг» и «Полиметалл», аффинаж производится за пределами ДФО. С учетом объемов производимого на территории ДФО золотого концентрата автор статьи считает целесообразным размещение аффинажного завода в пределах ДФО (например, в г. Амурске).

Ключевые слова: Дальневосточный федеральный округ, золото, месторождения, сырьевая база, добыча.

Для цитирования: Архипов Г. И. Современное состояние золотодобывающей отрасли в Дальневосточном федеральном округе // Маркшейдерия и недропользование. 2024. №3. С. 4–15. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_4_15.

THE CURRENT STATE OF THE GOLD MINING INDUSTRY IN THE FAR EASTERN FEDERAL DISTRICT

G. I. Arhipov,

Institute of Mining of the Khabarovsk Federal Research Center, Khabarovsk, Russia

Abstract: The Far Eastern Federal District has a significant raw material base of gold and a developed gold mining industry. The development of the raw material base of gold is being carried out very actively. In the period 2001–2021, gold production in the Far Eastern Federal District increased from 70 to 193 tons. Among the 10 largest gold mining entities of the country, which produce about 90 % of gold in Russia, there are 6 subjects of the Far Eastern Federal District. Processing of hard-to-beneficiate concentrates is carried out mainly in the Far Eastern Federal District by the enterprises of the Atlas Mining and Polymetal groups, refining is carried out outside the Far Eastern Federal District, given the volume of gold concentrate produced in the Far Eastern Federal District, it would be advisable to build a refinery within the Far Eastern Federal District (for example, in the city of Amursk).

Keywords: Far Eastern Federal District, gold, deposits, raw material base, mining.

For citation: Arhipov G. I. The current state of the gold mining industry in the Far Eastern Federal District. Surveying and subsoil use. 2024;(3):4–15. (In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_3_4_15.

Вся территория Дальнего Востока и Забайкалья (Дальневосточный федеральный округ – ДФО) является в различной степени золотоносной. По количеству месторождений, разведанным запасам (почти половина общероссийских разведанных запасов) и добыче (две трети общероссийской) золота ДФО занимает первое место среди федеральных округов страны. В целом по округу на начало 2023 года было выявлено около 6 700 месторождений, рудопроявлений, точек минерализации золота (порядка 900 коренных и 5 800 россыпных).

Постановка проблемы

Золото и обстоятельства вокруг него – самая обсуждаемая тема в сфере горнорудной промышленности (конференции, периодическая печать на экономические темы, материалы электронных средств информации и др.). Проблемы

золотодобывающей промышленности последнего времени в России суммированы [1–4]. Определенный практический интерес и актуальность представляет обзор состояния золотодобывающей отрасли в ДФО, возможностей использования ресурсов золота ДФО в разрезе субъектов.

Методология

Методологическую основу исследования составляют общенаучные методы: системный, аналитический, статистический и т. п.

С целью изучения возможностей использования ресурсов золота ДФО проанализированы данные по размещению и использованию его ресурсов по субъектам. Источники информации – оперативные данные ВСЕГЕИ, государственный доклад Федерального агентства недропользования России, подготовленные ВИМС материалы территориальных

фондов геологической информации, публикации экспертов по данному вопросу, статистические данные Таможенной службы России, обзоры и публикации маркетинговых компаний о золоте и минерально-сырьевых ресурсах ДФО.

Сырьевая база золота Дальневосточного федерального округа

На начало 2023 года государственным балансом на территории ДФО учтено 4 693 месторождения, в том числе коренных 333 (из них 268 – собственных и 65 – комплексных золотосодержащих) и россыпных – 4 360. В распределенном фонде недр было учтено: 2 661 месторождение, в том числе 243 коренных (199 собственно золоторудных и 44 комплексных) и 2 418 россыпных. В нераспределенном фонде недр соответственно оставалось 2 032 объекта, в том числе 90 коренных (69 собственных и 21 комплексное) и 1 942 россыпных месторождения [2]. Коренных месторождений с запасами более 10 т золота в каждом учтено 67, россыпей с запасами более 3 т в каждой – 29, они показаны на рисунке и в таблице 1 (в таблице перечислены и другие основные месторождения субъектов ДФО).

Таблица 1 / Table 1

Основные месторождения золота субъектов Дальневосточного федерального округа (запасы, освоенность, недропользователь) (по данным ВСЕГЕИ на 15.03.2023 [2])

The main gold deposits of the subjects of the Far Eastern Federal District (reserves, development, subsoil user) (according to VSEGEI as of 15.03.2023 [2])

Месторождение / Deposits		Запасы, т / Reserves, t	Освоенность / Mastery	Недропользователь / Subsurface user
Магаданская область. Коренные / Magadan Region. Indigenous	Наталкинское	1418	Р	АО «Полюс Магадан»
	Павлик	149	Р	АО «ЗРК «Павлик»
	Биркачан	15	Р	ООО «Омолонская ЗРК»
	Штурмовское	13	Р	АО «Сусуманский ГОК «Сусуманзолото»
	Дукатское	7,5	Р	АО «Серебро Магадана»
	Сопка Кварцевая	5,7	Р	ООО «Эвенская ГРК»
	Игуменовское	1	Р	ОАО «ГеоЦентр»
	Кедровое	46	П	ООО «Новая рудная компания»
	Дегдеканское	38,6	П	ООО «Магаданское ГРП»
	Тэутэджак	20,8	П	ООО «Рудник Тэутэджак»
	Бурхалинское	2,1	П	ООО «Верина»
	Перекачанное	108	Рв	ООО «Северо-Восточная ГРК»
	р. Берелёх (Сухое Русло)	3,84	Р	АО «Сусуманский ГОК «Сусуманзолото»
Магаданская область. Россыпи / Magadan Region. Placer	р. Берелёх	3,8	Р	
	Столбовая Мал. р.	3,5	Р	ООО «Конго»
	руч. Болотный	3,8	П	АО «ГДК «Берелёх»
	руч. Раковский	3,1	П	

Месторождение / Deposits		Запасы, т / Reserves, t	Освоенность / Mastery	Недропользователь / Subsurface user
Республика Саха (Якутия). Коренные / Republic of Sakha (Yakutia). Indigenous	Нежданинское	587	Р	АО «Южно-Верхоянская ГДК»
	Гросс	102	Р	ООО «Нерюнгри-Металлик»
	Центральное	24,5	Р	АО «Полюс Алдан»
	Дражное	23,9	Р	АО «Тарынская ЗРК»
	Канавное	23,7	Р	АО «Полюс Алдан»
	Северное	22	Р	
	Якутское	17	Р	
	Таборное	16	Р	ООО «Рудник Таборный»
	Дэлбэ	15	Р	АО «Полюс Алдан»
	Сентачан	13	Р	АО «Звезда»
	Рябиновое	11	Р	ООО «Рябиновое»
	Боковое	9,6	Р	АО «Полюс Алдан»
	Бадран	8,9	Р	АО «ГРК «Западная»
	Самолазовское	8,5	Р	ООО «Самолазовское»
	Порфиновое	5	Р	АО «Полюс Алдан»
	Дуэтское	3,9	Р	ООО «Рудник «Дуэт»
	Трассовое	2,2	Р	АО «Золото Селигдара»
	Дорожное	2	Р	АО «Полюс Алдан»
	Кючус	175	П	ООО «Белое Золото»
	Хвойное	32,4	П	АО «Золото Селигдара»
	Мало-Тарынское	12	П	ООО «Богуславец»
	Базовское	8,6	Рв	ООО «Эльгинское»
Республика Саха (Якутия). Россыпи / Republic of Sakha (Yakutia). Placer	Малтан	6,7		Н
	Оночалахское	5,6		Н
	р. Бол. Куранах	57	Р	ЗАО «САХА Голд Майнинг»
	р. Аллах-Юнь (Видный)	4	Р	ОАО «СА «Золото Ыныкчана»
	р. Бол. Тарын	3,7	Р	ЗАО «Поиск Золото»
	Ольчан-Вольник	3,5	Р	
	р. Нера-Антагачан	2,7	Р	ООО «Нера - Антагачан»
	р. Аллах-Юнь (Ыныкчан)	1,8	Р	ОАО «СА «Золото Ыныкчана»
Забайкальский край. Коренные / Trans-Baikal Territory. Indigenous	Тасеевское	143	Р	ООО «Тасеевское»
	Ключевское	97	Р	АО «Рудник «Западная-Ключи»
	Дарасунское	73	Р	ООО «Дарасунский рудник»
	Ново-Широкинское	20	Р	АО «Ново-Широкинский рудник»
	Нойон-Тологой	12	Р	ООО «Байкалруд»
	Солонеченское	1,5	П	ООО «ГРК «Солонеченское»

Месторождение / Deposits		Запасы, т / Reser- ves, t	Освоен- ность / Mastery	Недропользователь / Subsurface user
Забайкальский край. Коренные	Итакинское	62,6	Рв	ООО «Итакинская золотодобывающая компания»
	Култуминское	133	П	ООО «Восток ГеоСервис»
	Лугоканское	124	П	ООО «Промышленные инвестиции»
Забайкальский край Россыли / Trans-Baikal Territory. Placer	Амазар Большой р.	2,9	Р	ПАО «Ксеньевский прииск»
	Каменные конгломераты	7,65	Р	ООО «Каменский карьер»
	Тура р. (средняя часть)	2,9	Р	АО «Прииск «Соловьевский»
	Черный Урюм р.	4,3	Р	ПАО «Ксеньевский прииск»
	Борзя Нижняя р.	4,5	Р	ООО «ГДК «НУРГОЛД»
Чукотский автоном. округ. Коренные / Chukotka Auton. district. Indigenous	Майское	173	Р	ООО «ЗРК Майское»
	Каральвеемское	28	Р	АО «Рудник Каральвеем»
	Купол	15,8	Р	АО «Чукотская ГГК»
	Валунистое	11	Р	ООО «Рудник «Валунистый»
	Морошка	2,1	П	АО «Чукотская ГГК»
	Песчанка	350	П	ООО ГДК «Баимская»
	Кекура	66	Рв	ЗАО «Базовые металлы»
	Клен	18,7	Рв	ООО «Клен»
Чукотский автоном. округ. Россыли / Chukotka Auton. district. Placer Auton. district. Placer	р. Рывеем	1,1	Р	ООО «АС Шахтер»
	руч. Факторный	3,3	П	
	р. Нутэкинген-кывеем	8		Н
	р. Чаанай	7,4		
	р. Ленотап	5,8		
	руч. Скрытый	4,3		
	р. Кувет	3,9		
	р. Оленья	3		
Хабаровский край / Khabarovsk Krai	Албазинское	123	Р	ООО «Ресурсы Албазино»
	Полянка	45,6	Р	ООО «НГК «Ресурс»
	Кутынское	42,6	Р	ООО «Кутынская ГГК»
	Многовершинное	41,9	Р	АО «Многовершинное»
	Хаканджинское	24,9	Р	ООО «Хаканджинское»
	Белая Гора	12,3	Р	ООО «Белая Гора»
	Малютка	23,4	П	ООО «Амур Золото»
	Малмыжское	477,8	П	ООО «Амур Минералс»
	Дяппе	92,1	П	ООО «Дяппе»
	Чульбаткан	92	Рв	ООО «Удинск Золото»
Амурская область / Amur Region	Маломирское	63	Р	ООО «Маломирский рудник»
	Пионер	47,5	Р	АО «Покровский рудник»
	Соловьевское	10,4	Р	АО «Прииск Соловьевский»

Месторождение / Deposits		Запасы, т / Reser- ves, t	Освоен- ность / Mastery	Недропользователь / Subsurface user
Амурская область / Amur Region	Березитовое	9,6	Р	ООО «Березитовый рудник»
	Бамское	99	П	ООО «Амурское ГРП»
	Эльгинское	63,4	Рв	ООО «ТЭМИ»
	Иканское	57		Н
	р. Нагима (погреб. россыпь)	5	Р	АО «Прииск Соловьевский»
	р. Уркима (россыпь)	1	Р	
Камчатский край / Kamchatka Krai	Аметистовое	32	Р	АО «Аметистовое»
	Озерновское	28,8	Р	АО «СИГМА»
	Бараньевское	20,4	Р	АО «Камчатское золото»
	Асачинское	20,3	Р	АО «ТСГ Асача»
	Агинское	5,8	Р	АО «Камголд»
	Кумроч	34,4	Рв	АО «Быстринская ГК
	Родниковое	30,9	Рв	АО «ТСГ Асача»
	Малетойваям	13,6	Рв	ООО «Камчатская медная компания»
	Мутновское	5,3	Рв	ООО «Компания «СТЭПС ИСТ»
Республика Бурятия / Republic of Buryati	Ирокиндинское	18,2	Р	ООО «Ирокинда»
	Зун-Холбинское	12,6	Р	ООО «Зун-Холба»
	Кедровское	11,1	Р	ООО «Артель старателей «Западная»
	Зун-Оспинское	6,6	Р	ООО «Артель старателей «Китой»
	Барун-Холбинское	7,6	Рв	ООО «Зун Хада»
	Зэгэнгольское	12	Рв	ООО «РИЗЗИ РЕСУРС»
	Холоднинское	34,6		Н

Список сокращений: Р – разрабатываемые, Рв – разведываемые, П – подготавливаемые к освоению, Н – нераспределенный фонд.

Балансовые запасы золота ДФО составляют порядка 7 550 т, в основном они локализованы в таких субъектах, как: Магаданская область – 37 %, Республика Саха (Якутия) – 19,5 %, Забайкальский край – 15 %, Чукотский АО – 13,2 %, Хабаровский край – 6,9 %, Амурская область – 5,6 %, Камчатский край – 1,2 %. Наиболее крупными месторождениями золоторудной базы ДФО являются разрабатываемые и подготавливаемые к освоению или разведываемые месторождения золота с общими ресурсами более 100 т в каждом – Наталкинское, Нежданинское, Быстринское, Майское, Павлик, Куранахская группа, Тасеевское, Гросс, Кючус, Малмыжское, Песчанка, Перекатное, Култуминское.

Магаданская область

Магаданская область является крупнейшей золотоносной провинцией России и мира (в области на начало 2022 года локализовано примерно 18 % российских запасов золота). По состоянию на 2023 год балансом учтено 1197 месторождений, в которых содержится более 2 тыс. т золота, в том числе разведанных запасов коренного золо-

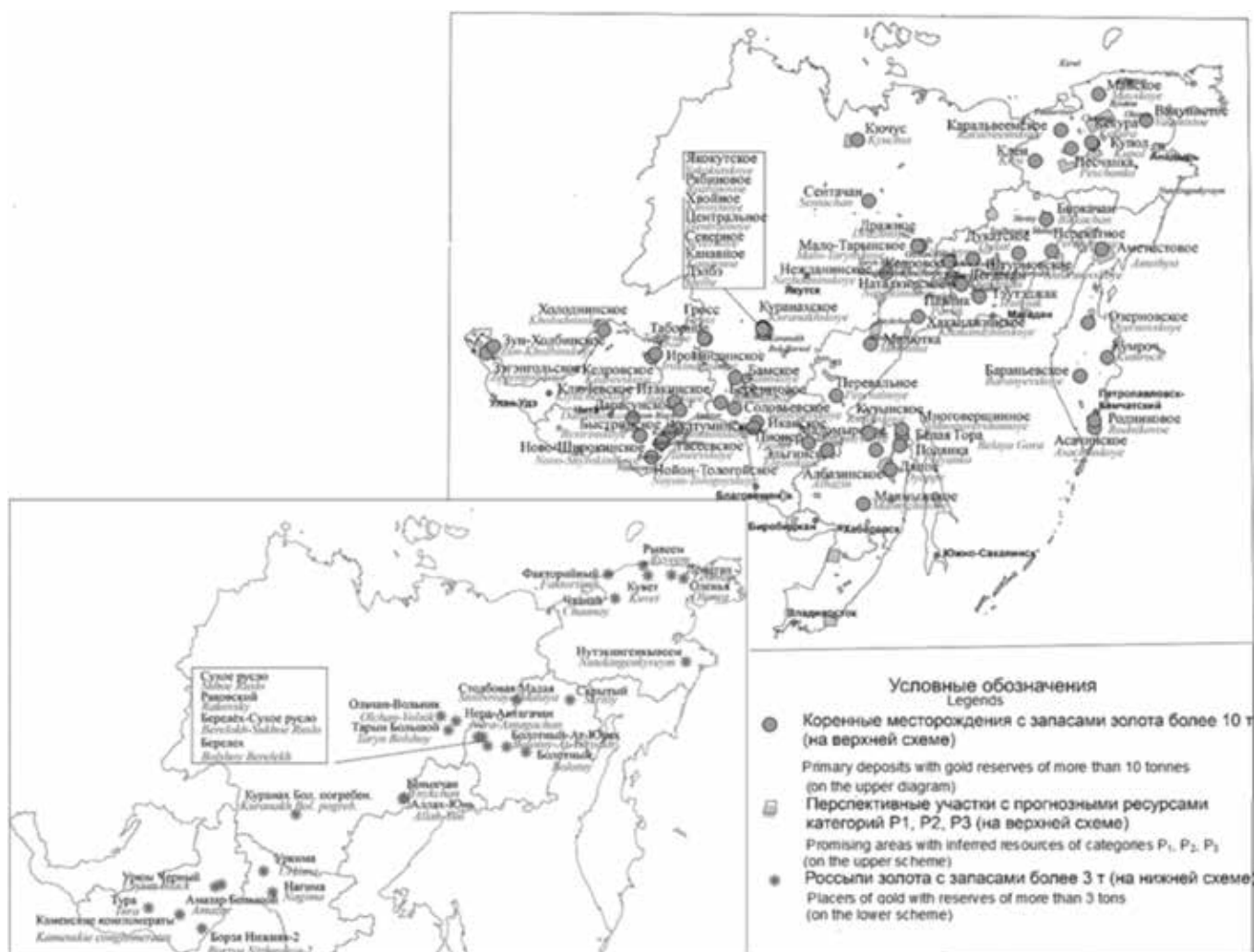


Рис. 1. Основные месторождения золота и перспективные площади с прогнозными ресурсами золота категорий P₁, P₂, P₃ Дальневосточного федерального округа (составлено с использованием материалов ВСЕГЕИ)

Fig. 1. Main gold deposits and promising areas with probable gold resources of categories P₁, P₂, P₃ of the Far Eastern Federal District (compiled using VSEGEI materials)

та — 1867 т в 51 месторождении, россыпного — 138 т в 1146 месторождениях. С 1979 года в минерально-сырьевой базе золота все более преобладает коренное, представленное собственно золотыми, золотосеребряными месторождениями. Балансовые запасы (категории A + B + C₁) золота в период 2010–2022 годов находились в интервале 1539–1652 т, запасы коренных месторождений составляли около 92 %, россыпных — 8 % [2].

Запасы отдельных месторождений показаны в *таблице 1*.

Основное количество запасов заключено в месторождениях Наталкинском и Павлик. Их руды имеют невысокие концентрации золота, но легкообогатимы. По величине прогнозных ресурсов коренного золота область занимает второе место в ДФО после Республики Саха (Якутия).

Экономика Магаданской области с 1928 года основывается на добыче золота. За почти 100-лентнюю историю в области добыто более 3430 т золота. Эксперты области [5] подсчитали, что уровень добычи в 50 т золота в год при имеющихся балансовых запасах категорий A + B + C₁ может обеспечить работу предприятий в течение более 30 лет, а ресурсный потенциал золота с учетом оценок балансовых запасов, включая категорию C₂ и забалансовые запасы, позво-

ляет обеспечить добычу золота на период около 40 лет, с учетом же прогнозных ресурсов категорий P₁ и P₂ — на еще более длительный срок (почти 65 лет). В связи с длительностью отработки месторождений россыпного золота в Магаданской области сформирован большой объем техногенных образований, который, по оценкам разных экспертов, составляет от 250 до 1 тыс. т золота со средним содержанием от 1 до 0,1 г/м³. С учетом потенциала техногенного комплекса ресурсная обеспеченность по золоту может составить около 80 лет.

В последние годы рудные месторождения в области разрабатываются в среднем 17 предприятиями, россыпные — около 120. В 2021 году в области добыто всего 52 т золота, в том числе коренного 32 т (две трети из которых приходится на Наталкинское месторождение), россыпного — почти 20 т. Готовятся к освоению месторождения: Дегдеканское, Утинское, Ирбычан, разведуются: Перекатное, Бургали, в нераспределенном фонде находятся месторождения Мальдяк, Ойра, Светлое и др. Рудные месторождения обрабатывают крупные компании — АО «Полюс Магадан», АО «ЗРК «Павлик», ООО «Омолонская ЗРК» с добычей в объеме 9–30 т (в период 2014–2020 годов), россыпные — мелкие и средние

предприятия (общим числом около 100). Уровень добычи россыпного золота в области составляет 17–19 т в год (доля в общей добыче — порядка 40 %; в российской добыче она составляет 25 %). Наибольшие объемы добычи россыпного золота — у АО «Сусуманский ГОК «Сусуманзолото» (холдинг «Сусуманзолото» входит в «Уральскую горно-металлургическую компанию» — УГМК [6]), АО «ГДК «Берелёх», ООО «Конго». АО «Сусуманзолото» строит на месторождении Штурмовском также подземный рудник.

Республика Саха (Якутия)

На начало 2023 года на территории Республики Саха (Якутия) балансом учтено более 800 месторождений золота (коренных и россыпных) с запасами около 1700 т (эти запасы категорий А + В + С₁ составляют более 9 % общероссийских запасов) и забалансовыми — более 500 т. Более 87 % запасов находится в коренных месторождениях. Учтено 79 месторождений рудного золота с балансовыми запасами более 1420 т, забалансовыми — около 500 т и 723 месторождения россыпного золота с балансовыми запасами около 280 т, забалансовыми — 17,5 т [2].

Как территория с перспективным потенциалом рудного золота Якутия определилась в первой половине XX столетия после открытия на Алдане коренных месторождений — Лебединского, Куранахского и др., добыча на которых ведется до настоящего времени. Куранахский ГОК был крупнейшим в СССР, на нем добывалось до 13 т золота в год. В настоящее время запасы коренного золота, определяющие перспективы наращивания золотодобычи, сосредоточены в крупных месторождениях: Нежданинском, Гросс, Куранахской группе, Кючус (табл. 1). В последнее время в республике рудным золотом занимается 19 предприятий: разрабатывается 14 коренных месторождений, примерно столько же подготавливается к эксплуатации, разведывается и подготавливается к распределению. Основная часть распределенных запасов промышленных категорий рудного золота находится у компании «Полюс Золото» (около 35 %). Главными разрабатываемыми рудными месторождениями являются: Нежданинское (запасы золота по категориям А + В + С₁ + С₂ на начало 2022 года — 587 т, добыча в 2021 году — 2,6 т; недропользователь — АО «Южно-Верхоянская ГДК» холдинга Polymetal International), Гросс (запасы золота — 102 т, добыча — 12 т; недропользователь — ООО «Нерюнгри-Металлик» холдинга NORD GOLD S. E.), Куранахская группа месторождений кор выветривания (запасы — 127 т, добыча — 7,4 т; недропользователь — АО «Полюс Алдан» холдинга ПАО «Полюс»). Лицензия на месторождение Кючус с запасами 175 т золота с 2021 года принадлежит ООО «Белое золото» — совместному предприятию структур «Селигдара» и ГК «Ростехнологии». Выход месторождения на промышленную эксплуатацию намечен на 2029 год.

Аллювиальные россыпи различного возраста распространены в Верхне-Индигоирском, Адычанском, Куларском, Аллах-Юньском, Южно-Якутском и других золотоносных районах. Основные разрабатываемые россыпи — это россыпи рек Большой Куранах, Ольчан-Вольник, Большой Тарын, Нера-Антагачан, Аллах-Юнь, Лазо, Чугас, Кылгас, Кемюс, Кристалл, Хорсун, Эльги-Тонор, Большая Тырканда; в нераспределенном фонде находится россыпь реки Селигдар. В последние годы в республике россыпным золотом занимается более 100 недропользователей. Основная часть распределен-

ных запасов промышленных категорий россыпного золота принадлежит компании «Алдголд» холдинга «Высочайший» (более 8 %).

Погодовая добыча золота в Якутии в течение 2008–2022 годов возросла с 19 до 46 т. Рост объемов золотодобычи вызван увеличением производственных мощностей на предприятиях компаний «Селигдар», «Полюс Алдан» и «Нерюнгри-Металлик». Основные горнодобывающие предприятия — АО «Южно-Верхоянская ГДК», АО «Полюс Алдан», ООО «Нюрингри-Металлик», ЗАО «САХА Голд Майнинг». Созданная сырьевая база золотодобывающей промышленности, по оценкам специалистов, обеспечит ее использование при достигнутом уровне годовой добычи в течение около 50 лет, а сырьевой потенциал республики позволяет поддерживать этот уровень в течение еще более длительного времени с учетом выполнения геологоразведочных работ по воспроизводству запасов. Тем более что на территории республики имеются предпосылки для выявления новых геолого-промышленных типов золоторудных месторождений, известных в сопредельных регионах и в мировой практике (древних золотоносных конгломератов, золото-сульфидно-кварцевых месторождений «зеленокаменных докембрийских поясов», большеобъемных штокверковых месторождений золота типов наталкинского, карлинского, золото-серебряного эпитептермального, золото-медно-порфирового, золото-медно-окисно-железистого, золото-скарнового и др. типов), а прогнозный потенциал в осваиваемых геолого-промышленных типах месторождений вдвое превышает разведанные запасы и может быть существенно расширен за счет новых типов месторождений [7].

Золотодобыча ведется частными предпринимателями в виде акционерных обществ, обществ с ограниченной ответственностью, артелей старателей. Государственные органы не имеют своей доли в уставных капиталах акционерных обществ и не владеют акциями действующих золотодобывающих предприятий, но уделяют большое внимание развитию золотодобычи в части привлечения инвестиций для освоения золоторудных месторождений Якутии. Геологоразведочные работы на золото в республике ведутся большей частью на частной инициативе, что обусловливается высоким уровнем цен на золото уже в течение ряда лет. В то же время остаются проблемы по воспроизводству и развитию минерально-сырьевой базы золотодобывающих предприятий. С целью их решения освоение месторождений золота (как и освоение других видов минерального сырья) пользуется поддержкой государственных административных органов: в республике в свое время разрабатывался и выполнялся ряд программ по развитию производства золота. В 1990-е и в начале 2000-х годов инвесторами самых крупных месторождений собирались стать иностранные компании (канадские, южноафриканская, американская). Однако дальше подготовки ТЭО проектов разработки дела не продвигались. Экономические показатели проектов, по расчетам иностранных компаний, были невысокими (цены на золото тогда были невысокими).

Забайкальский край

На территории края по состоянию на 2022 год балансом учитывается 476 месторождений золота (69 коренных и 407 россыпных) с суммарными запасами категорий А + В + С₁ — 640 т золота, категории С₂ — 672 т; забалансовыми — 324 т. Основные

разрабатываемые и подготавливаемые к освоению месторождения перечислены в *таблице 1*. Забайкалье — старейший золотодобывающий край. Добыча золота в 2021 году составила более 41 т, в том числе на собственно золоторудных месторождениях — почти 8 т, на комплексных — 21,5 т, на россыпных — более 11 т. По итогам 2022 года в Забайкалье, по данным Роснедр, добыто 36,5 т золота. К 2030 году планируется увеличение добычи минимум на 10 т. Лидерами коренной добычи являются предприятия: ЗАО «Рудник Апрельково», ОАО «Ново-Широкинский рудник», ЗАО ГРК «Западная», ООО «Мангазья Майнинг», ООО «Дарасунский рудник». Россыпные месторождения разрабатывают ООО А/С «Бальжа», ООО «Газимур», ООО «Даурия», ОАО «Прииск Ксеньевский», ОАО «Прииск Соловьевский», ОАО «Прииск Усть-Кара», ООО «Урюмкан» [8].

Активную работу по воспроизводству запасов золота в крае проводят предприятия холдинга Highland Gold Mining. В короткие сроки выполнены масштабные ГРП на Култуминском (ООО «Восток ГеоСервис», 133 т золота) и Лугоканском месторождениях (ООО «Промышленные инвестиции», 124 т золота). Лицензией на разработку Култуминского месторождения владел «Норникель», отказавшийся от объекта в 2015 году из-за низкой инвестиционной привлекательности, хотя, по данным «Норникеля», запасы золота на месторождении по категориям $C_1 + C_2$ составляли 125,38 т, серебра — 977,7 т (а также меди — 632,8 тыс. т, железа — 24,4 млн т). Первая очередь ГОКа на Култуминском месторождении будет сдана ООО «Култуминское» в 2024 году, выход на проектную мощность планируется на конец 2025 года. К 2029 году ожидается выход на переработку до 13 млн т руды ежегодно. Инвестор оценил объем инвестиций в 72 млрд руб.

Чукотский автономный округ

Чукотский автономный округ исторически является одним из ведущих золотодобывающих регионов России (в 2022 году по объему добычи он занял 8-е место). На начало 2023 года балансом в округе учтено 405 месторождений коренного и россыпного золота с суммарными запасами золота категорий $A + B + C_1$ в количестве 564 т, категории C_2 — 214 т и забалансовыми — 303 т. Всего выявлено около 50 рудных объектов золота, золота-серебра и полиметалльных месторождений с попутным золотом и серебром, на балансе состоит 11 собственно золоторудных месторождений и 1 комплексное с суммарными запасами категорий $A + B + C_1$ — 463 т, C_2 — 211 т, забалансовыми — 288 т. Апробированные прогнозные ресурсы золота для территории Чукотки суммарно составляют около 2360 т. В округе на золото выдано 209 лицензий, из них 111 — на россыпное золото [2, 9]. Разрабатываются месторождения Купол, Майское, Двойное, Каральвеевское, Валунистое, подготавливаются к освоению месторождения Морошка, Быстринское, разведываются 3 собственно золоторудных месторождения Клен, Кекура, Горный-7 и комплексное медно-порфировое месторождение Песчанка (*табл. 1*). В нераспределенном фонде учитывается 1 собственно золоторудное месторождение — Сопка Рудная.

Россыпных месторождений золота на балансе округа числится 393 с суммарными запасами категорий $A + B + C_1$ — 101 т, категории C_2 — 3,55 т. Разрабатывается 32 россыпных месторождения, подготавливается к освоению 54 месторождения, в нераспределенном фонде числится 307 месторождений.

Объем золотодобычи в Чукотском АО в 2021 году составил 25,3 т (рудного золота — 23,1 т, россыпного — 2,2 т), в 2022 году — 21,9 т золота (19,7 т — рудного и 2,2 т — россыпного).

Добычу рудного золота вели АО «Чукотская горно-геологическая компания» (до июня 2022 году принадлежала холдингу Kinross Gold, теперь — Highland Gold Mining), ООО «ЗК «Майское» («Полиметалл»), ОАО «Рудник Каральвеев» («Золотые проекты»), «Рудник Валунистый» и ЗАО «Базовые металлы» (Highland Gold Mining). На россыпях наибольший объем добычи обеспечивали «Артель старателей «Шахтер» и «Артель старателей «Полярная звезда». Основной объем добычи золота (более 36 % от добычи по округу) приходится на серебряно-золотое месторождение Купол (АО «Чукотская ГГК»).

Основные перспективы по добыче золота в округе связываются с продолжающейся разработкой месторождений Майское, Валунистое, Купол, Водораздельной площади, Баимской рудной зоны с месторождением Песчанка. Освоение месторождения Песчанка начала реализовывать казахстанская компания KAZ Minerals в январе 2019 года. Запуск был запланирован на 2027 год. Общий бюджет проекта оценивался в 730 млрд руб. В июле 2023 года KAZ Minerals продала проект казахстанской компании Trianon Limited, принадлежащей основным акционерам KAZ Minerals. Затраты на все геологоразведочные работы в округе в 2022 году за счет всех источников финансирования составили около 4,6 млрд руб., из них на благородные металлы — около 4,4 млрд руб. (92 %).

Хабаровский край

По запасам золота край занимает пятое место в ДФО. На территории края на начало 2023 года балансом учтено 387 месторождений, балансовых запасов категорий $B + C_1 + C_2$ — 811 т (3 % от общероссийских запасов), забалансовых — 281 т. Запасы коренного золота по 34 месторождениям категорий $B + C_1$ составляют 457 т, категории C_2 — 309 т, забалансовые — 273 т (95 % от всех запасов края). Запасы россыпного золота по 353 месторождениям категории $B + C_1$ составляют 26 т, категории C_2 — 15 т, забалансовые — около 9 т (5 %). Прогнозные ресурсы коренного золота по состоянию на начало 2022 года оценены на 103 объектах, относимых к четырем геолого-промышленным типам: золотокварцевому, золотосульфидно-кварцевому, золотосеребряному и золотосульфидному. Учтены 2 медно-порфировых объекта (Ямтульский рудный район и Анаджаканский рудный узел), на которых золото является попутным компонентом. Прогнозные ресурсы коренного золота составляют 1650 т, в том числе по категориям: P_1 — 274 т, P_2 — 435 т, P_3 — 941 т. Прогнозные ресурсы россыпного золота оценены в 79 т. Более 99 % запасов коренного золота и столько же россыпного распределены между недропользователями [2].

Золото является главным полезным ископаемым, добываемым в крае, по объему золотодобычи край занимает третье место в ДФО после Магаданской области и Якутии: она возросла с 16 т в 2008 году почти в два раза. Добыча без учета технологических потерь (товарная продукция) в 2022 году составила 29,4 т, в том числе из коренных месторождений почти 25 т, из россыпных — 4,6 т [10].

Совокупная ежегодная мощность золотоизвлекательных фабрик края составляет около 9 млн т переработки руды.

Всего на территории края учитывается 80 золотодобывающих предприятий. Непосредственно золотодобычей в 2022 году занималось 43 предприятия, в том числе 14 предприятий занимаются эксплуатацией и подготовкой к эксплуатации месторождений коренного золота. Крупнейший недропользователь в крае – ООО «Ресурсы Албазино» (более 25 % от добычи края).

Основные разрабатываемые коренные месторождения – Албазинское (добыча в 2021 году – 8,1 т), Многовершинное (6,5 т), Полянка (2,1 т), Белая Гора (1,7 т), Хаканджинское, Перевальное, Светлое; на месторождении Малютка в июле 2023 года начата добыча руды компанией «Амур Золото» (дочернее предприятие шведской Kory Goldfields), до конца 2023 года планировалось ввести в эксплуатацию ГОК с производственной мощностью 1,2 т золота в год); месторождения Чульбаткан, Малмыжское, Дяппенское, Благодатное разведуются.

На россыпных месторождениях работает почти 40 предприятий. Разрабатываются россыпи – Гадыйчан руч. (увальная); бассейн реки Тяпки; Правый Улахан-Харыялах ручей; на реке Иркиндан; на правом притоке реки Немуй и др. Готовятся к освоению россыпи: Курун-Урях – Иоткан; на правом притоке реки Мая (глубокозалегающая); Кириллинский ручей; левый приток реки Бичи; Курукан Правый руч.; левый приток реки Чумикан (глубокозалегающая) и др. Разведуются еще более 5 россыпей.

Амурская область

На территории Амурской области выделено 13 золотосодержащих районов (рудных и россыпных). Балансом учтено 746 месторождений с запасами категории $A + B + C_1 + C_2$ – 480 т, среди которых выявлено более 50 коренных месторождений и проявлений золота, около 630 россыпей; разведано 24 коренных месторождения золота с общими запасами 400 т. Прогнозные ресурсы коренного золота в области составляют почти 1 300 т [2]. Наиболее значительными коренными месторождениями золота, золота и серебра, многометалльными с золотом являются Пионер, Бамское, Маломирское, Березитовое, Токурское, Кировское, Албынское (Харгинское), Сагурское, Прогнозное, Унгличанское, Боргуликанское. Ресурсы наиболее крупного Покровского месторождения, разрабатывающегося с 1999 года, близки к исчерпанию. Подготавливаются к освоению Бамское и Унгличанское месторождения, разведуются Эльгинское, Отвальное, Снежинка и др. месторождения.

Запасы россыпей области составляют почти 80 т, прогнозные ресурсы – более 53 т. Из россыпных месторождений в 2021 году добыто более 8 т золота. Основные из разрабатываемых россыпей находятся на реках Иликан, Большой Мадалан, Олонгро, Стойба Верхняя, Стойба Нижняя, Уркима, Нагима, Харга, готовятся к отработке участки на реках Иликан и Селемджа, в нераспределенном фонде находятся россыпи рек Ларба Средняя, Тында Малая, Ясная Поляна. Более 80 % россыпей распределено между недропользователями. Большинство россыпей является мелкими объектами (запасы их составляют от десятков до сотен кг), но на них постоянно ведутся поисковые и разведочные работы (вследствие их малозатратности и легкости освоения, а также традиционности такого занятия среди населения области). Россыпное золото добывают 26 предприятий. Основные золотодобывающие предпри-

ятия – АО «Прииск «Соловьевский», АО «Хэргу», ООО «РОССЗОЛОТО», АО «ЗДП «Коболдо», артель старателей «Тукурингра», «Прииск Дамбуки».

В 2021 году вся добыча золота в области составила 35,7 т. Перспективы золотодобычи в области (как и на других территориях Дальнего Востока) связаны с коренными месторождениями. Создание устойчивой и надежной минерально-сырьевой базы рудного золота определяется объемами геологоразведочных работ, направленных на реализацию прогнозных ресурсов в пределах уже определившихся рудных полей и рудоперспективных площадей, расположенных в Северо-Становой, Южно-Становой и Буреинской металлогенических зонах. Необходимы новые золоторудные объекты, открытие крупнообъемных месторождений новых геолого-промышленных типов.

Добычу и геологоразведочные работы (разведку и переоценку месторождений) в 2000-е годы проводили и проводят 40-70 предприятий различных форм собственности. Более 75-85 % золота в области добывала ГК «Петропавловск», ее предприятия провели геологоразведочные работы еще на ряде месторождений золота в области (Ворошиловское, Талданское, Кировское, Чагойанская площадь и др.). В настоящее время добычу коренного золота осуществляют предприятия группы компаний «Атлас Майнинг» (структура УГМК) (бывший «Петропавловск») – операторы Маломирский, Албынский (месторождение отработано, ведется переработка ранее добытой руды), Покровский рудники. ООО «ТЭМИ» (с 2022 года находится в структуре «Уральской горно-металлургической компании» – УГМК) ведет добычу на Эльгинском месторождении (ранее проект принадлежал группе Petropavlovsk и компании Agestinia); ООО «Березитовый рудник» (входит в холдинг Nordgold) на одноименном месторождении и АО «Прииск Соловьевский» [2].

Камчатский край

На территории Камчатского края, по данным ВСЕГЕИ [2], на начало 2023 года балансом учтено 67 месторождений золота с суммарными запасами 198 т, прогнозными ресурсами – 1,4 т. Золото находится в собственно коренных и россыпных месторождениях золота, комплексных месторождениях цветных металлов (сульфидных медно-никелевых и медно-порфириновых), ртутных месторождениях. Большая часть месторождений края представлена жильными телами и реже – минерализованными зонами. Руды большинства месторождений отличаются высоким содержанием золота (среднее содержание его колеблется от 10 до 45 г/т), не содержат вредных примесей и являются легко обогащаемыми. На долю коренных месторождений приходится порядка 93 % балансовых запасов края. На балансе золота в крае находится также 52 россыпных месторождения, на долю которых приходится порядка 7 % балансовых запасов, сосредоточенных в северной части края: россыпь реки Дымной (разрабатывается), ручья Горного (готовится к освоению), ручья Крутого (нераспределенный фонд недр).

К группе разрабатываемых относятся собственно золоторудные месторождения: Агинское, Аметистовое, Асачинское, Золотое, Кунгурцевское, Оганчинское, Угловое, Южно-Агинское, Бараньевское, Озерновское и комплексное Шануч (часть его запасов подготавливается к освоению) (табл. 1); на стадии разведки находятся месторождения Курмоч, Малетойваям, Родниковое и комплексное Мутнов-

ское. Крупнейшие золотодобывающие предприятия края — АО «Аметистовое» (Аметистовое), АО «Камголд» (Агинское, Оганчинское, Южно-Агинское), АО «ТСГ Асача» (Асачинское, Родниковое).

В последние годы добычу золота в крае осуществляли 6–7 предприятий. В 2012–2015 годах на Камчатке добывалось по 2,5–3,6 т золота в год. В 2021 году было добыто 6,15 т рудного золота и 25 кг россыпного золота (руководство края последовательно проводит работу по прекращению добычи россыпного золота в туристических и рыбохозяйственных зонах). Добыча 2022 года составила 6,3 т, а в 2023 году увеличилась до 9,23 т (сообщение губернатора края В. Солодова в рамках I Дальневосточного форума недропользования). Прирост добычи получен на Асачинском, Озерновском, Бараньевском, Аметистовом месторождениях. Основное увеличение объемов добычи обеспечили предприятия компании Highland Gold Mining. HGM приобрела названные и другие активы у ГК «Ренова» и меняет стратегию их освоения, планирует законсервировать рудники на месторождениях Золотом и Кунгурцевском, которые обрабатывались подземным способом и являлись сырьевой базой для Агинской ЗИФ, модернизировать Агинскую ЗИФ, основной ресурсной базой которой с 2020 года стало Бараньевское месторождение. Запуск первой линии ЗИФ состоялся в ноябре 2023 года. Выход на плановые показатели намечен на 2024 год. Мощность переработки ЗИФ увеличится на 67 %, до 250 тыс. т, извлечение золота составит 96,6 %.

Активная добыча рудного золота в Камчатском крае с помощью инвестиций иностранных, совместных и российских компаний началась в начале 1990-х годов. По оценке геологов, ряд месторождений полуострова недоизучен (Бараньевское, Золотое, Озерновское, Кумроч, Мутновское, Сергеевское и др.) и имеют хорошие перспективы прироста запасов и ресурсов при проведении поисково-оценочных работ. Перспективы прироста запасов при доразведке на флангах имеют месторождения Родниковое, Агинское, Асачинское, Аметистовое. Перспективы дальнейшего развития сырьевой базы золота и серебра в крае связаны с реализацией прогнозных ресурсов осваиваемых месторождений и перспективных рудопроявлений Крерук, Апапель-Агликичское, Каракоевское, Оганчинское, Порожистое, Карымшинское, Кумрочское, Сергеевское, Озерновское, Хайокланское, Спрут, Тутхливаям и др.

Республика Бурятия

В Республике Бурятии учитывается 27 коренных месторождений золота с запасами категорий $A + B + C_1$ — 31 т, C_2 — 116 т и забалансовыми запасами — 9,2 т (из них — 24 собственных золоторудных месторождения, в том числе новое Верхне-Витимконское золото кварцевое) и 3 комплексных: Назаровское (золото-сульфидно-цинковое), Холоднинское (колчеданно-полиметаллическое), новое Светкинское (золото-полиметаллическое), а также 336 россыпных месторождений с запасами категорий C_1 — 16,6 т, C_2 — 9,1 т и забалансовыми — 6,4 т. На долю коренных месторождений приходится 65 % балансовых запасов золота, россыпных — 35 % [2].

В 2021 году добычу золота вели 34 недропользователя на 9 коренных и 50 россыпных месторождениях. Наиболее крупными золотодобывающими предприятиями являются ООО «Ирокинда» (1,7 т, месторождение Ирокиндинское)

и ООО «Артель старателей «Западная» (0,9 т, Кедровское). Добыча золота из коренных месторождений составила 4,2 т. На добыче россыпного золота ведущими являются предприятия ООО «Прииск «Ципиканский» — 582 кг, ООО «Кардинал» — 322 кг, ЗАО «Витимгеопром» — 194 кг, ООО «Кристалл» — 114 кг, ООО «Багдаринская ГРЭ» — 105 кг.

Компания «Энергоинвест» в июле 2023 года получила разрешение на приобретение рудника «Ирокинда» у компании «Бурятзолото» (входит в состав Nordgold). Ранее «Бурятзолото» продало по причине истощения запасов рудник ООО «Зун-Холба» кипрской компании Chesio Limited.

Приморский край

В Приморском крае балансом по золоту по состоянию на начало 2022 года учитывается 91 месторождение (9 коренных и 82 россыпных), в том числе 6 — только с забалансовыми запасами. Суммарные балансовые запасы золота категорий $A + B + C_1$ составляют 14,5 т, C_2 — 10,2 т, забалансовые — 3,3 т. 56 месторождений учитываются в распределенном фонде недр, 35 — не переданы в освоение [2].

Добыча золота в крае велась с середины XIX века на небольших, но многочисленных россыпях, которые довольно быстро были отработаны. В 1987–1992 годах в крае добывалось до 1,5 т золота ежегодно. В настоящее время Приморский край значительно уступает другим субъектам ДФО со сложившейся золоторудной специализацией минерально-сырьевого сектора экономики (Магаданской и Амурской областям, Чукотке, Якутии, Хабаровскому краю) по добыче золота и перспективам развития золотодобычи в ближайшие годы, хотя активное геологическое изучение золотоносности края в последние десятилетия привело к переоценке ряда ранее известных и оценке вновь выявленных рудно-россыпных узлов и открытию новых месторождений и рудопроявлений, промышленное значение которых еще не оценено окончательно: Глухое, Кумирное, Малиновское, Майское, Приморское, Салют, Крестовское, Милоградовское, Силанское, Союзное, Таежное, Ягодное и др. Коренные месторождения золота, Аскольдовское и Прогресс, ранее вовлекались в эксплуатацию.

В 2021 году в крае добыто 342 кг золота. Тогда же впервые поставлены на государственный учет две россыпи: Золотой ручей (кл.) и Терраса Кабанья, 1 техногенное — Прямой ручей (бассейн реки Малой Приисковой).

Сахалинская область

На острове Сахалин и на Курильских островах известен ряд месторождений рудного золота: Прасоловское, Рукосуевское, Лангерийское, Переселенческое, Жильное, Софья, Айнское и др. Несколько рудопроявлений золота находятся на полуострове Шмидта. Промышленные россыпи известны на острове Сахалин в трех золотоносных районах: Шмидтовском, Северном и Центральном.

Балансом запасов золота по области учитывается 2 коренных (Айнское и Прасоловское) и 19 россыпных месторождений. Суммарные запасы золота категорий $A + B + C_1$ составляют 1,3 т, C_2 — 77 кг, забалансовые — 546 кг. Балансовые запасы золота коренных месторождений категории C_1 составляют 600 кг (45 % от запасов области); забалансовые — 134 кг. Для площади Курильских островов в целом МПР России на начало 2012 года были утверждены прогнозные ресурсы золота в количестве 135 т (категории P_1 — 20 т, P_2 — 50 т, P_3 — 65 т), в том числе на острове Кунашир — 75 т.

Добыча золота в 2021 году из коренных месторождений составила 1,925 т (99 % от общей добычи по области). Добычей золота на Сахалине занимается компания «Курилгео» (создана в 2006 году) и артель старателей «Восток-2», добывающая в Лангерийском золотороссыпном районе по нескольку десятков кг золота в год [2].

Еврейская автономная область

На территории Еврейской автономной области в разное время было выявлено около 130 россыпей, рудное золото установлено в проявлении Гора Лысая.

Государственным балансом запасов золота по состоянию на начало 2022 года учитываются 30 россыпных месторождений. Суммарные балансовые запасы золота категорий А + В + С₁ составляют 978 кг, С₂ — 888 кг; забалансовые запасы — 399 кг, в том числе 3 россыпи (Веселый ручей, правый приток реки Сутара; Виктория р., правый приток реки Сутара; Сутара р., нижний полигон) имеют только забалансовые запасы в количестве 121 кг. Впервые поставлены на учет две россыпи: Ефросиневский ручей (р. Саранак) — 41,4 кг категории С₂ и Саранак-Иванковский ручей (р. Саранак) — 28,1 кг категории С₂, а запасы месторождения Ольгинский ручей полностью отработаны [2].

Область не относится к основным золотодобывающим субъектам ДФО, хотя на Малом Хингане золото добывалось еще во второй половине XIX века. В последние десятилетия ежегодная добыча золота в области не превышает десятков — первых сотен кг. В 2021 году было добыто 342 кг золота, в частности, на россыпи Еленинский ручей (правый приток реки Сутара) ООО «Артель старателей «Архара» добыла 76 кг золота.

Добыча золота в Дальневосточном федеральном округе

В отрасли «добыча полезных ископаемых» в ДФО работают почти 3 700 предприятий и организаций с общим числом работающих около 148 тыс. человек, что составляет 3,7 % от общего числа занятых в экономике ДФО. Золото является основным видом добываемых рудных полезных ископаемых в ДФО. Почти все коренные и россыпные месторождения ДФО распределены между недропользователями, порядка 250 коренных месторождений и 2200 россыпных разрабатывается или подготавливается к разработке. На все значимые месторождения золота выданы лицензии. Доля балансовых запасов ДФО, находящихся в распределенном фонде недр, составила более 90 %. По средним данным за 2018-2020 года, число предприятий, добывающих рудное золото, составляет 87 (2 % от общего числа предприятий, зарегистрированных в регионе), россыпное золото — около 360 (почти 10 %). Добыча золота сосредоточена на значительной территории ДФО и осуществляется операторами порядка 450-600 компаний (в разные годы), вместе с добычей в других округах РФ это позволяет полностью удовлетворить текущие запросы внутреннего рынка и экспорта золота. Внутренней потребности в ДФО практически нет из-за отсутствия материальных сфер его потребления, в частности, малого спроса от ювелирной промышленности [11], другие способы использования золота в ДФО относятся к нематериальной сфере потребления. В прошлом много десятилетий основной объем золота России, как и в ДФО, приносила россыпная золотодобыча (порядка 80 % общего объема производства), сейчас более 75 % объема — это рудное золото. Для ДФО характерны хорошая обеспеченность запасами золота для

высокого уровня добычи на период ближайших десятилетий и весьма высокие перспективы по ресурсам для длительной и надежной деятельности золотодобывающей отрасли. Обеспеченность действующих добывающих предприятий балансовыми запасами собственно золоторудных и комплексных месторождений удовлетворительна, россыпных недостаточна. Обеспечивается воспроизводство запасов золота. Вместе с тем в субъектах, в которых золотодобыча в значительной степени определяет и поддерживает удовлетворительное социально-экономическое состояние, требуется поддержание соответствующего уровня ГРП по воспроизводству сырьевой базы золота, что в общем и выполняется.

Состояние и перспективы развития золотодобывающей отрасли в ДФО в целом удовлетворительные: так, в 2020 году ВРП ДФО составил 6044,295 млрд руб., общая стоимость добытых полезных ископаемых — 1827 млрд руб., а стоимость золота (и серебра) в этой сумме составила 877 млрд руб. Налоговые доходы ДФО в 2020 году (федеральная часть, без НДС) составили 299 млрд руб., НДПИ (федеральная часть) — 107 млрд руб., в том числе по золоту и серебру — 34,29 млрд руб. Весь экспорт ДФО 2020 года составил 1735 млрд руб., в том числе всех минеральных продуктов — 1036 млрд руб., а руд драгоценных металлов — 44 млрд руб. Мировая ценовая тенденция с начала 2000-х годов благоприятна для золотодобывающей отрасли: если минимальная цена золота была в 2000 году 250 дол/унция, достигла максимума в сентябре 2011 года — 1830 дол/унция, затем не выходила из интервала 1100-2000 дол/унция, а в апреле-мае 2024 года находится в диапазоне 2300-2400 дол/унция. Отрасль имеет преференции для устойчивого существования и развития золотодобычи.

Объемы добычи и переработки руд ГОК на ряде месторождений — 300-500 тыс. т руды в год и более. На месторождении Наталка проектная мощность ГОК, составлявшая 10 млн т руды в год, уже превышает 12 млн т. Освоение сырьевой базы золота ведется очень активно. В разработку интенсивно вовлекаются месторождения с упорными и высокоупорными рудами. Переработка труднообогатимых концентратов осуществляется в основном на территории ДФО предприятиями группы «Атлас Майнинг» и «Полиметалл», аффинаж производится за пределами ДФО (Колымский аффинажный завод остановлен в 2015 году и затем закрыт). Учитывая объемы производимого на территории ДФО золотого концентрата, было бы целесообразным построить аффинажный завод в пределах ДФО (в г. Амурске).

Считается из опыта прошлого времени, что золото было и остается высоколиквидным востребованным товаром на международном рынке, в сфере бизнеса и торговли, мерой стабильности, особенно в условиях экономических потрясений [12]. Золото — драгоценный и в то же время и технический металл (однако промышленный спрос на золото невелик: 8-9 % его общего потребления, то есть несколько сотен тонн в год).

В конце 2022 года среди золотодобытчиков появились мнения о том, что бизнес, связанный с золотодобычей, становится нерентабельным, что золото вдруг стало неликвидным товаром [13, 14]. Действительно, сложилась следующая ситуация: многие предприятия золотодобычи вышли за грань рентабельности. Себестоимость производства

на большинстве россыпных объектов превышала цену золота, установленную Центробанком. Причиной считают два фактора: невысокую мировую цену (но это не так — см. табл. 2) и введенные ограничения на торговлю золотом из России (90 % драгоценных металлов из России вывозилось).

Таблица 2 / Table 2

Стоимость 1 грамма золота (в рублях) и (по базам данных Банка России и др. источникам)
The cost of 1 gram of gold (in rubles) and (according to the databases of the Bank of Russia and other sources)

Год / Year	Средняя цена золота за год за тр. унцию, дол. / Average gold price per year per tr. ounce, USD	Средняя цена золота за год за 1 грамм, дол. / Average price of gold per year per 1 gram, USD	Средний за год курс дол. к руб. / Average annual exchange rate to rub.	Средняя цена золота за год за 1 грамм, руб. (по курсу дол.) / Average price of gold for the year per 1 gram, rubles (at the exchange rate of dollars)	Средняя цена золота за год за 1 грамм, руб. (учетные цены ЦБ на аффинированное золото) / Average price of gold for the year per 1 gram, rubles (Central Bank discount prices for refined gold)
2018	1 269,38	40,82	63,00	2 571,66	2 557,83
2019	1 408,99	45,30	64,66	2 929,098	2 901,62
2020	1 784,45	57,38	73,45	4 214,561	4 155,84
2021	1 793,48	57,67	73,89	4 261,236	4 254,90
2022	1 804,25	58,01	67,65	3 924,377	3 983,27
2023 (1 янв. – 21 нояб.) / Jan 1 – Nov 21	1 960,42	63,04	85,82	5 410,093	5 297,79

Банк России снизил или временно приостанавливал активные закупки, а крупнейшие банки, которые были операторами по экспорту золота, попали под санкции и утратили возможность свободно торговать золотом. В течение небольшого периода 2022 года внутри страны даже действовал дисконт на золото, он достигал 15 %. Отчасти этому способствовал Банк России, который этот дисконт и устанавливал. В 2023 году ситуация стабилизировалась: сейчас цена на внутреннем рынке практически сравнялась с мировой — дисконт составляет порядка 1 %. Затраты российских добывающих компаний, несмотря на их довольно значительный рост, по-прежнему ниже общемировых: 1018 дол. против 1276 дол. на унцию (по данным «Интерфакс» со ссылкой на Metals Focus), хотя ведущие эксперты отмечают, что Россия всегда отличалась более низкой себестоимостью добычи золота по сравнению с другими странами. Обычно они были ниже на 25–27 %, а по сравнению со странами-лидерами даже на 35–45 %. За последние два года этот показатель почти сравнялся с мировым [1]. Но в целом с 2018 года более чем в два раза выросла и внутренняя цена (табл. 2). Отрицательным фактором для отрасли стал укрепившийся по отношению к доллару рубль.

По данным экспертов, средняя себестоимость добычи рудного золота в России в 2021 году составляла от 2600

до 3200 руб. за грамм для большинства компаний (но без компании «Полус», имеющей один из самых низких показателей себестоимости, распространяемым на объем около 80 т ее добычи). В 2021 году цена 1 грамма золота составляла почти 4 300 руб. за грамм (табл. 2). Однако впервые за многолетнюю историю российской золотодобычи перед участниками рынка встал вопрос сбыта. Это привело к росту экспорта золота, и за два года было продано за рубеж более 622 т (более 50 % в Англию). Объем продаж слитков драгоценных металлов физическим лицам в России вырос в 2022 году в 15 раз — до 75 т, в том числе 55 т составили мерные слитки весом от 1 г (продажи с дисконтом). В такой ситуации компания «Селигдар» выступила с инициативой, поддержанной другими авторитетами отрасли, работать с пенсионными фондами. Вряд ли предложение целесообразно в отношении государственной пенсионной системы, которая по определению должна быть надежной, а золото в последнее время показало ненадежность в отношении сбыта. Хотя, как известно, в июне 2021 года РФ полностью отказалась от валют недружественных стран в структуре Фонда национального благосостояния (ФНБ). С этого времени для пополнения фонда приобретаются только юани и золото. Министерство финансов РФ объявило, что в период с 7 декабря 2023 года по 12 января 2024 года направит на покупку иностранной валюты и золота в рамках бюджетного правила 244,8 млрд руб. для пополнения ФНБ, с ежедневной покупкой на сумму 11,7 млрд руб. (это примерно 22–23 т золота. Объем же средств ФНБ в октябре 2023 года составлял 13,6 трлн руб., в декабре — 11,8 трлн руб.). Такие объемы покупок не решают проблем реализации ежегодной добычи золота. К тому же месторождения золота — одни из наиболее динамично разрабатываемых объектов, они недолговечны как экономические предприятия (обычно продолжают 10–15 лет плюс не менее пяти лет, которые требуются на разведку и проектирование, кроме очень крупных месторождений, таких как Наталка, Надеждинское, Кючус, Куранахское). Поэтому вновь возникает вопрос о диверсификации горнорудной промышленности в ДФО и ее ориентации на освоение фундаментальных полезных ископаемых, таких как железные руды, титан, марганец, медь, свинец, цинк, олово, вольфрам, молибден, редкие металлы, с созданием региональных перерабатывающих предприятий [15].

Заключение

1. Основными точками роста для золотодобывающей отрасли ДФО являются запасы и ресурсы традиционно золотодобывающих субъектов региона, а также новые проекты Яно-Колымской зоны, Чукотского АО, Нижнего Амура в Хабаровском крае и прилегающих площадей Приморского края и др. Перспективно направление по продолжению изучения золотоносности зеленокаменных поясов докембрийских образований, занимающих значительные площади на территории ДФО. Одной из важных на перспективу задач является ГРР на россыпное золото для оценки ресурсного потенциала в пределах внутриконтинентальных впадин и приморских равнин Дальнего Востока.

2. Установлены следующие проблемы золотодобывающей промышленности [1], характерные для ДФО:

- 1) недоработки в финансировании отрасли;
- 2) отсутствие собственного высокотехнологичного оборудования;

- 3) ограниченность доступа к результатам работ исследовательских консалтинговых и инжиниринговых компаний;
- 4) кадровая необеспеченность;
- 5) недостаточность подготовленных ресурсов золота;
- 6) санкции в отношении реализации российского золота за рубеж;
- 7) вход в золотодобычу непрофильных компаний.

При выборе объектов добычи, стратегий и технических решений для их освоения рекомендуется учитывать [1] следующие факторы:

1) в тренде будут приповерхностные объекты и потенциально крупные месторождения нетрадиционных пока для России геолого-промышленных типов золота;

2) в части технологий будет рост кучного выщелачивания;

3) в утилизации отходов приоритетом станет технология укладки сгущённых хвостов в геотубы, что позволит решить проблему площадей под складирование хвостов, а также многочисленные проблемы их содержания, обслуживания и рекультивации. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Лесков, М. И. Золотодобывающая промышленность России: текущее состояние и перспективы / М. И. Лесков, С. С. Лесков // Золото и технологии. - 2023. - № 2. - С. 48-56.
2. ГИС-пакеты оперативной геологической информации [Электронный ресурс] // ГИС-Атлас «Недра России», 2020. - URL: <https://vsegei.ru/ru/info/atlaspacket/index.php> (дата обращения: 24.04.2023).
3. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году: государственный доклад. - М., 2022. - 626 с.
4. Добыча золота в России: актуальное состояние отрасли в 2022 году [Электронный ресурс] // Добывающая промышленность. - URL: <https://dprom.online/metalls/zolotodobycha-aktualnoe-sostoyanie-otrasli/> (дата обращения: 03.08.2023).
5. Гальцева, Н. В. Драгоценные металлы Магаданской области: анализ тенденций и оценка потенциала добычи на региональном и муниципальном уровнях / Н. В. Гальцева, О. А. Шарыпова // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. - 2023. - № 6 (185). - С. 38-46.
6. Будрис, А. Золото для Урала: зачем медный гигант УГМК рвется в элиту золотопромышленников [Электронный ресурс] / А. Будрис. - URL: <https://www.forbes.ru/biznes/473669-zoloto-dla-urala-zacem-mednyj-gigant-ugmk-rvetsa-v-elitu-zolotopromyslennikov> (дата обращения: 16.11.2023).
7. Батугина, Н. С. Добыча золота в Республике Саха (Якутия). Тенденция и перспективы развития / Н. С. Батугина, Р. Р. Ноговицын // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. - 2021. - № 1-6. - С. 75-80.
8. Добыча золота в Забайкальском крае: список месторождений и золотодобывающих компаний, история, технологии и перспективы [Электронный ресурс]. - URL: <https://zhazhdazolota.ru/dobycha/v-zabajkalskom-krae/> (дата обращения: 14.09.2023).
9. Новые горизонты. Минерально-сырьевой потенциал Чукотского автономного округа / А. А. Гермаханов, А. И. Черных, Е. В. Танин [и др.] // Недропользование XXI век. - 2023. - № 3-4. - С. 8-14.
10. Справка о состоянии минерально-сырьевой базы Хабаровского края на 01.01.2023 г. [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.tfidvfo.ru/msb/msb-khab.htm> (дата обращения: 15.01.2024).
11. Ли, Е. Почему ювелирное дело в ДФО может исчезнуть // Российская газета. - 2023. - № 147 (9092).
12. Репортаж с форума «Майнекс-2023»: обсудили будущее золотодобычи в России [Электронный ресурс]. - URL: https://dprom.online/series/dp2023_6/ (дата обращения: 13.12.2023).
13. Московская биржа отчиталась об оборотах торгов в 2022 году [Электронный ресурс] // БКС Экспресс. - URL: <https://bcs-express.ru/novosti-i-analitika/moskovskaia-birzha-otchitalas-ob-oborotakh-torgov-v-2022-godu> (дата обращения: 16.11.2023).
14. Золото, со всех сторон окруженное издержками: обзор [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.interfax.ru/business/903881> (дата обращения: 23.07.2023).
15. Архипов, Г. И. Минеральные ресурсы горнорудной промышленности Дальнего Востока. Стратегическая оценка возможностей освоения / Г. И. Архипов. - Хабаровск: Институт горного дела ДВО РАН. 2017. - 820 с.

REFERENCES

1. Leskov MI, Baushev SS. *Gold mining industry of Russia: current state and prospects. Gold and technology.* 2023;(2):48-56 (In Russ.).
2. GIS-packages of operational geological information (GIS-Atlas «Subsoil of Russia»). - Available from: <https://vsegei.ru/ru/info/atlaspacket/index.php>. 2020 (In Russ.).
3. State report «On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2021». Moscow, 2022 (In Russ.).
4. Gold mining in Russia: the current state of the industry in 2022. Mining industry. Available from: <https://dprom.online/metalls/zolotodobycha-aktualnoe-sostoyanie-otrasli> (In Russ.).
5. Galtseva NV, Sharypova OA. Precious Metals of the Magadan Region: Analysis of Trends and Assessment of Mining Potential at Regional and Municipal Levels. *Mineral resources of Russia. Economics and Management.* 2023;6(185):38-46 (In Russ.).
6. Budris A. Gold for the Urals: why the copper giant UMMC is rushing into the elite of gold producers. Available from: <https://www.forbes.ru/biznes/473669-zoloto-dla-urala-zacem-mednyj-gigant-ugmk-rvetsa-v-elitu-zolotopromyslennikov> (In Russ.).
7. Batugina NS, Nogovicyn RR. Dobycha zolota v Respublike Saha (Jakutija). Tendencija i perspektivy razvitija. [Gold mining in the Republic of Sakha (Yakutia). Trend and development prospects]. *Mineral resources of Russia. Economics and Management.* 2021;1-6:75-80 (In Russ.).
8. Gold mining in the Trans-Baikal Territory: list of deposits and gold mining companies, history, technologies and prospects. Available from: <https://zhazhdazolota.ru/dobycha/v-zabajkalskom-krae/> (In Russ.).

9. Germakhanov AA, Chernykh AI, Tanin EV, et al. New Horizons. Mineral and raw material potential of the Chukotka Autonomous Okrug. *Subsoil Use 21st Century*. 2023;3-4:8-14 (In Russ.).
10. Information on the state of the mineral resource base of the Khabarovsk Territory as of 01.01.2023 Available from: <http://www.tfdivfo.ru/msb/msb-khab.htm> (In Russ.).
11. Lee E. Why jewelry in the Far Eastern Federal District may disappear. Russian newspaper. 2023;147(9092) (In Russ.).
12. Report from the MINEX 2023 forum: the future of gold mining in Russia was discussed. Available from: https://dprom.online/series/dp2023_6/ (In Russ.).
13. The Moscow Stock Exchange reported on trading turnover in 2022. BKS Express. Available from: <https://bcs-express.ru/novosti-i-analitika/moskovskaia-birzha-otchitalas-ob-oborotakh-torgov-v-2022-godu> (In Russ.).
14. Gold, surrounded by costs on all sides. Review. Available from: <https://www.interfax.ru/business/903881> (In Russ.).
15. Arkhipov GI. Mineral Resources of the Mining Industry of the Far East. Strategic assessment of development opportunities. Khabarovsk, 2017 (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Архипов Геннадий Иванович:

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт горного дела» Дальневосточного отделения
Российской академии наук,
г. Хабаровск, Россия,
e-mail: arhipov@igd.khv.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Arhipov Gennady Ivanovich:

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
Senior Researcher,

Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Mining
of the Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences,
Khabarovsk, Russia,
e-mail: arhipov@igd.khv.ru



ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ



Геологический факультет МГУ — всемирно известный учебно-научный центр России. Хотя датой основания факультета считается 1938 г., минералогия в Московском Университете преподаётся уже более двух столетий. На кафедрах и в лабораториях факультета работают ученые с мировым именем, талантливая молодежь. Среди наших профессоров — 7 академиков и 6 членов-корреспондентов РАН, 18 членов Академии естественных наук РФ. Вся деятельность сотрудников факультета направлена на развитие геологической науки, образования и культуры — необходимых условий экономического и духовного возрождения России.

Контакты : Москва, Ленинские горы, д.1, МГУ имени М.В.Ломоносова, геологический факультет
Телефон:
+7 (495) 939-2970
Email:
dean@geol.msu.ru



WWW.N-GN.RU

ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ ПОЛУСКАЛЬНЫХ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ В УСЛОВИЯХ УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО КУЗБАССА

А. В. Матвеев,

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Россия

Аннотация: Представлен способ технологии разработки пород экскаваторно-автомобильными комплексами с применением мехлопат в условиях угольных разрезов центрального Кузбасса. Приведены результаты исследований параметров предложенной технологии разработки. Определена зависимость изменения удельных затрат по основным процессам при разработке вскрышных пород III и IV категории механическими лопатами с вместимостью ковша экскаватора от 6,3 до 55,8 м³ от средневзвешенного размера куска взорванной породы. Представленный способ позволяет оптимизировать параметры экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат за счет установления рационального значения величины средневзвешенного размера куска взорванной породы, который соответствует минимальной величине суммарных издержек и определяет соответствующие параметры всех процессов технологии разработки пород для всех типов современных экскаваторов при их применении в различных горнотехнических условиях карьеров. Результаты исследований могут быть полезными техническим службам карьеров и проектировщикам на стадии принятия решения для определения типа и количества горнотранспортного и вспомогательного оборудования для условий конкретного участка разреза.

Ключевые слова: центральный Кузбасс, угольные разрезы, вскрышные породы, буровзрывные работы, мехлопата, кусковатость пород, производительность, удельные затраты, рациональные параметры технологии.

Для цитирования: Матвеев А. В. Параметры технологии разработки полускальных вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами в условиях угольных разрезов центрального Кузбасса // Маркшейдерия и недропользование. 2024. №3. С. 16-22. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_16_22.

PARAMETERS OF THE TECHNOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF SEMI-HORIZONTAL OVERBURDEN ROCKS BY EXCAVATOR- AUTOMOBILE COMPLEXES IN THE CONDITIONS OF COAL MINES OF CENTRAL KUZBASS

A. V. Matveev,

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract: The article presents the results of studies of the parameters of the technology of rock mining by excavator-automobile complexes using mechanical shovels in the conditions of coal quarries of central Kuzbass. The dependence of the change in unit costs for the main processes during the development of overburden rocks of category III and IV with mechanical shovels with an excavator bucket capacity from 6.3 to 55.8 m³ on the weighted average size of pieces of blasted rock is determined. The presented method makes it possible to optimize the parameters of excavator-automobile complexes using mechanical shovels, by establishing a rational value of the weighted average size of a piece of blasted rock, which corresponds to the minimum value of total costs and determines the corresponding parameters of all processes of the rock development technology for all types of modern excavators when used in various mining conditions of quarries. The results of the research can be useful to the technical services of quarries and designers at the decision-making stage to determine the type and quantity of mining transport and auxiliary equipment for the conditions of a particular section of the section in accordance with the established requirements for ensuring the planned volume of work.

Keywords: central Kuzbass, coal pits, overburden, drilling and blasting, mechanical shovels, lumpiness of rocks, productivity, unit costs, rational parameters of technology.

For citation: Matveev A. V. Parameters of the technology for the development of semi-horizontal overburden rocks by excavator-automobile complexes in the conditions of coal mines of central Kuzbass. Surveying and subsoil use. 2024;(3):16-22. (In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_3_16_22.

При разработке рекомендаций по использованию экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат (ЭАКМЛ) на карьерах одним из главных факторов является зависимость изменения производительности экскаватора от кусковатости взорванных пород, которая определяет эффективность производства горных работ [1-3].

Кусковатость взорванных пород принято характеризовать величиной средневзвешенного размера кусков взорванных пород, который одновременно определяет производительность мехлопат и издержки по каждому процессу и технологии в целом [4].

В настоящее время для расчета производительности мехлопат предлагается ряд методик [5-9]. Сравнение результатов расчета по ним показало, что каждая из методик имеет свою область применения, при этом значения производительности мехлопаты, рассчитанные для конкретных условий по рекомендуемым формулам, иногда отличаются более чем в два раза [4].

В работе [10] предложена универсальная методика расчета производительности экскаваторов-мехлопат с вместимостью ковша экскаватора от 6,3 до 55,8 м³, которая показала более точные результаты.

Следующим этапом необходимо определить оптимальные параметры технологии разработки полускальных вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами в условиях угольных разрезов центрального Кузбасса с учетом экономических затрат. При этом особое внимание следует уделять повышению эффективности функционирования предприятия [11].

На горнодобывающих предприятиях существует множество подходов и разнообразие методик к способам учета затрат, а их применение обуславливается особенностями производственного процесса [12]. Учет затрат по каждому элементу обеспечивает исчисление фактической себестоимости работы, а также отнесения их по каждому отдельному процессу в технологической цепочке. При применении ЭАКМЛ прежде всего должны учитываться затраты на буровзрывные работы (БВР), величина которых является наибольшей по сравнению с другими издержками по процессам.

Важность экономических показателей в работе горнодобывающих предприятий и использование информационных технологий для их оценки не вызывает вопросов [13], при этом методический подход к экономической оценке и анализ организации производственного процесса горнодобывающего предприятия представлен в работах [14-16].

Учет производственных затрат — калькулирование, т.е. исчисление величины затрат, приходящихся на единицу продукции, является важнейшим рычагом в системе управления, который оказывает прямое влияние на непрерывное повышение технического уровня производства и его эффективность.

Для целей управления в производственном учете организуется группировка расходов по следующим четырем укрупненным экономическим элементам: материальным затратам, затратам на оплату труда, отчислениям на социальные нужды, амортизации.

Общепринятая классификация методов учета затрат в отечественной практике пока не выработана, на сегодняшний день существующие методы можно сгруппировать по трем основным признакам:

- 1) объектам учета затрат (отношение затрат к технологическому процессу производства);
- 2) полноте учета затрат (включение затрат в себестоимость продукции);
- 3) оперативности учета и контроля затрат.

Исчисление себестоимости работы комплекса оборудования ΣC_{yd} является завершающей стадией процесса калькулирования по таким элементам, как: производство буровзрывных работ, экскавация, транспортирование и отвалообразование, и важность себестоимости, как информации, необходимой для оценки эффективности эксплуатации месторождений [17].

Реализация методики оптимизации затрат технологического комплекса при разработке механическими лопатами вскрышных пород карьеров с применением автотранспорта осуществляется в следующем порядке.

При производстве работ по таким процессам, как бурение, экскавация и транспортирование горной массы, можно применять стоимость либо единицы продукции (погонный метр пробуренной скважины, кубический метр (тонна) погруженной и перевезенной горной массы на определенное расстояние), либо машино-часы работы на линии горнотранспортного и вспомогательного оборудования, которые уже включают материальные затраты, амортизацию, заработную плату и прочее.

В связи с этим необходимо различать отдельные составляющие в общей себестоимости технологической цепи производственного процесса, которые можно поделить на условно постоянные и условно переменные.

Методы и материал исследований

В статье использован комплекс методов: анализ результатов, выполненных ранее теоретических и экспериментальных работ; опыт применения ЭАКМЛ на карьерах; технико-экономический анализ с использованием стоимостных параметров.

При производстве взрывных работ к условно постоянным составляющим затратам относятся стоимость средств инициирования, работы по заряданию скважин, охрана при доставке взрывчатых материалов и заряжаемого блока, являющиеся минимальной частью в общем объеме. Затраты же на взрывчатые вещества будут сильно изменяться в широких диапазонах, а именно от их вида и требуемого количества для производства работ, на что, соответственно, влияют диаметр и наполнение скважин, сетка, обводненность блока и др.

Для простоты расчета суммы удельных затрат на подготовку одного кубического метра взорванной горной массы при известных общем объеме бурения и взорванной горной массы наиболее просто и, следовательно, оптимально учитывать укрупненно стоимость работы бурового оборудования из расчета стоимости пробуренных скважин на блоке и условно переменного объема заряжаемого взрывчатого вещества.

Так как в зависимости от полученного результата крупности дробления (средневзвешенного диаметра куса раздробленной породы) взорванной горной массы по взрываемому блоку и полноты наполнения объема ковша мехлопаты будет различаться часовая эксплуатационная производительность комплекта оборудования экскаватор — автосамосвал, тогда за основание расчета принимаем стоимость машино-часа работы задействованного оборудования.

Следовательно, производительность и сумма удельных затрат работы комплекта оборудования экскаватор – автосамосвал будет изменяться в зависимости от получаемой по результатам проведения взрывных работ крупности средневзвешенного размера кусков породы и различного сочетания вместимости ковша и кузова транспортного сосуда. То есть чем крупнее фракция раздробленной взрывом породы, тем ниже будет время цикла экскаватора и скорость загрузки, потребуется меньшее количество транспорта для исключения простоев под погрузкой и затрат на дизельное топливо либо электроэнергию. В противоположном случае, при переизмельчении породы, потребуется большее число машин для обеспечения максимальной производительности, которая будет ограничена только техническими характеристиками мехлопаты и организацией погрузки транспорта с учетом проведения необходимых вспомогательных работ по забою, в том числе уборки просыпей бульдозером и перемещения экскаватора по рабочей площадке.

При расчете количества выполняемых рейсов автотранспортом в зависимости от достижимости различной часовой производительности экскаватора принимается оптимальное сочетание по вместимости кузова и выполняемого количества рейсов за единицу времени.

Для расчетов обычно принимается стоимость работы одного машино-часа работы экскаватора, автосамосвала и бульдозера, в которых уже заблаговременно заложены затраты на топливо, амортизацию и др. Далее, стоимость часа работы оборудования делим на получаемую расчетную производительность экскаватора и получаем стоимость одного кубометра горной массы в зависимости от каждого конкретного размера средневзвешенного куска, затем учитываем потребное количество бульдозерной техники, занятой на планировке подъезда и приемки горной массы на автоотвале.

В соответствии с ВНТП-92 [18], для расчета затрат требуется 0,5 бульдозера при использовании экскаваторов с вместимостью ковша до 8 м³, 1 бульдозер – свыше 8 м³ с целью уборки просыпей в забое экскаватора и 1 бульдозер для приемки и складирования горной массы на автоотвале.

Таким образом, сумма удельных эксплуатационных затрат по процессам $\Sigma C_{\text{зд}}$ будет формироваться из следующих составляющих:

- 1) суммы удельных затрат на подготовку ВГМ (бурение и взрывание) с учетом средневзвешенного размера куска взорванной горной массы;
- 2) производительности и типа экскаватора – мехлопаты;
- 3) диапазона изменения удельных затрат на экскавацию в зависимости от его производительности и стоимости машино-часа работы различных типоразмеров комплекса горнотранспортного оборудования: экскаватор – автосамосвал – бульдозер в забое;
- 4) затрат на транспортирование горной массы;
- 5) стоимости машино-часа работы бульдозера на отвале.

Для исключения раскрытия коммерческой тайны предприятий далее расчеты будут приведены в условных рублевых единицах на условный объем производства работ.

На основании сбора и анализа технико-экономических показателей работы технологического оборудования, осуществляющего разработку взорванных вскрышных пород в условиях предприятий центрального Кузбасса, были по-

лучены значения затрат на обеспечение работы экскаваторов, бульдозерной техники в забое, бульдозера для отвальных работ и автотранспорта, которые складываются из материальных затрат, фонда оплаты труда, страховых выплат, ФСС от несчастных случаев, выплат компенсационного характера, амортизации ОПФ, аренды ОПФ и прочих расходов.

Установленные значения стоимости 1 машино-часа для экскаватора, бульдозера в забое, бульдозера для отвальных работ и автосамосвалов позволят определить величину удельных затрат как по процессам, так и в целом по оптимизируемой технологии.

На основании сбора и анализа статистики технико-экономических показателей работы всего бурового оборудования на предприятии за год, которые складываются из материальных затрат, фонда оплаты труда, страховых выплат, ФСС от несчастных случаев, выплат компенсационного характера, амортизации ОПФ [19], аренды ОПФ и прочих расходов, были получены затраты на обеспечение работы бурового станка.

Для горнотехнических условий разрезов выбор основных вариантов применения экскаваторов определяется такими характерными горнотехническими условиями, как:

- ✦ категория разрабатываемых пород: III (средне взрываемые породы) и IV (трудно взрываемые породы);
- ✦ степень обводненности массива, которая определяет тип ВВ и схему заряда в скважине: для сухих скважин (100 % «Гранулит»), для обводнённых скважин (100 % «Эмульсолит») и по среднегодовому потреблению ВВ.

Результаты исследований

Для вышеприведённых характерных горнотехнических условий с применением программного комплекса Blast Maker был произведён расчёт параметров БВР при различных параметрах качества дробления горной массы и подсчитаны удельные затраты по этому процессу на 1 м³ разрабатываемых вскрышных пород. При этом в программе расчёта не учтены затраты на зарядание скважин, монтирование сети, забойку скважин, доставку, хранение и охрану ВВ и ВМ.

Величина стоимости взрывчатых материалов позволит определить среднегодовую долю потребления различных типов ВВ (в зависимости от обводнённой взрываемых пород) и стоимостную долю средств инициирования и коммутации взрыва.

Стоимость средств инициирования для коммутации в расчётах может быть принята 1 % от стоимости ВВ, а среднегодовой расход ВВ складывается из расхода «Эмульсолита» – 80 %, «Гранулита» – 20 %.

В результате получено изменение удельных затрат на БВР от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород для двух категорий разрабатываемых пород (трудно взрываемые породы и средне взрываемые породы), которая определяет тип ВВ и схему заряда в скважине, что позволяет на основании разработанного методического подхода произвести расчеты эксплуатационных затрат по процессам для основных типов мехлопат, работающих на разрезах центрального Кузбасса.

Удельные эксплуатационные затраты по процессам разработки пород ЭАКМЛ при применении ЭКГ-15 приведены на рис. 1.

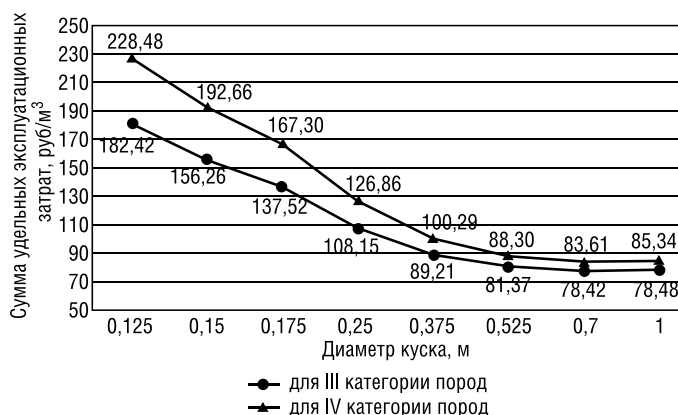


Рис. 1. Удельные эксплуатационные затраты по процессам разработки пород ЭАКМЛ при применении ЭКГ-15 /

Fig. 1. Specific operating costs for the processes of development of EACML rocks when using ECG-15

В табл. 1 указаны удельные эксплуатационные затраты по процессам разработки пород ЭАКМЛ при применении ЭКГ-15 для III и IV категорий пород.

Анализ графических зависимостей изменения суммарных удельных эксплуатационных затрат по процессам разработки пород ЭАКМЛ III и IV категории при применении современных типов мехлопат показал, что в принятом диапазоне изменения кусковатости взорванных пород зона минимальных значений для всех принятых типов мехлопат характеризуется определенным значением величины средневзвешенного размера кусков d_{cp} . При этом для каждого значения d_{cp} определены затраты по основным процессам.

Полученные графические зависимости суммарных удельных затрат по основным процессам разработки полускальных вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами с применением мехлопат (ЭАКМЛ) в условиях разрезов центрального Кузбасса, а также графики изменения производительности современных мехлопат от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород d_{cp} [4] позволяют установить для каждого из применяемых современных экскаваторов значения минимальных издержек и соответствующей сменной производительности, которые представлены в табл. 2.

Таблица 1 / Table 1

Удельные эксплуатационные затраты по процессам разработки пород ЭАКМЛ при применении ЭКГ-15 для III и IV категорий пород, руб/м³ / Specific operating costs for the development processes of EACML rocks when using ECG-15 for the III and IV categories of rocks

Процесс / Process	Диаметр куска, м / The diameter of the piece, m							
	0,125	0,15	0,175	0,25	0,375	0,525	0,7	1
III группа пород								
Уд. затраты на подготовку горных пород к выемке	139,55	112,32	92,65	60,94	38,87	27,73	21,00	13,98
Уд. затраты на выемочно-погрузочные работы	17,84	18,29	18,68	19,65	20,95	22,32	23,90	26,84
Уд. затраты на транспортирование	16,24	16,64	17,00	17,89	19,07	20,32	21,75	24,43
Уд. затраты на отвалообразование	8,79	9,01	9,20	9,68	10,32	11,00	11,77	13,22
Сумма уд. эксплуатационных затрат, $\Sigma C_{уд}$	182,42	156,26	137,52	108,15	89,21	81,37	78,42	78,48
IV группа пород								
Уд. затраты на подготовку горных пород к выемке	185,6	148,72	122,43	79,65	49,95	34,67	26,19	20,84
Уд. затраты на выемочно-погрузочные работы	17,84	18,29	18,68	19,65	20,95	22,32	23,90	26,84
Уд. затраты на транспортирование	16,24	16,64	17,00	17,89	19,07	20,32	21,75	24,43
Уд. затраты на отвалообразование	8,79	9,01	9,20	9,68	10,32	11,00	11,77	13,22
Сумма уд. эксплуатационных затрат, $\Sigma C_{уд}$	228,48	192,66	167,30	126,86	100,29	88,30	83,61	85,34

Таблица 2 / Table 2

Значения минимальных издержек и сменной производительности мехлопат при разработке вскрышных пород ЭАКМЛ / The values of minimum costs and replaceable productivity of the mehlopat in the development of overburden rocks of the EAKML

Гр. пород / Group of breeds	Параметр / Parameter	Экскаваторы-мехлопаты / Excavators mechanical shovels									
		ЭКГ-6,3	ЭКГ-8	ЭКГ-10	ЭКГ-12	ЭКГ-15	ЭКГ-18	ЭКГ-25	РН-2800ХРС (33 м³)	WK-45 (41,3 м³)	РН-4100ХРС (55,8 м³)
III	d_{cp} , м	0,525	0,525	0,525	0,7	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	$Q_{э}$, м³/см	2 461	3 177	4 009	4 463	5 654	6 173	8 786	11 683	14 584	19 402
	$Q_{э год}$, тыс. м³/год	1 531	1 976	2 494	2 776	3 517	3 839	5 465	7 267	9 071	12 068
	$\Sigma C_{уд}$, руб/м³	132,99	131,62	104,51	90,77	78,42	75,67	73,14	69,33	55,00	46,60
IV	d_{cp} , м	0,525	0,525	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0
	$Q_{э}$, м³/см	2 461	3 177	3662	4 463	5 654	6 829	8 786	11 683	14 584	19 402
	$Q_{э год}$, тыс. м³/год	1 531	1 976	2 278	2 776	3 517	3 517	5 465	7 267	9 071	12 068
	$\Sigma C_{уд}$, руб/м³	139,93	138,55	110,25	95,96	83,61	81,95	80,00	76,19	61,86	53,46

Для построения оптимального перспективного плана в целом по отрасли необходимо иметь индивидуальные зависимости капитальных вложений и себестоимости выпуска товарной продукции от производственной мощности предприятия [20].

На основании данных, приведенных в табл. 2, установлены эмпирические зависимости для определения значений минимальных издержек и соответствующей им сменной производительности мехлопат при разработке вскрышных пород ЭАКМЛ в условиях разрезов Кузбасса:

$$Q_3 = 433,23 \times E^{0,94}, \text{ м}^3/\text{см}, \quad (1)$$

где E – вместимость ковша, м^3 .

При III категории разрабатываемых пород

$$\Sigma C_{\text{уд}} = 304,87 \times E^{-0,46}, \text{ руб}/\text{м}^3. \quad (2)$$

При IV категории разрабатываемых пород

$$\Sigma C_{\text{уд}} = 294,15 \times E^{-0,42}, \text{ руб}/\text{м}^3. \quad (3)$$

Результаты оценки достоверности установленных формул для определения значений минимальных издержек и сменной производительности мехлопат при разработке вскрышных пород ЭАКМЛ в условиях разрезов центрального Кузбасса приведены в табл. 3.

Графические зависимости значений минимальных издержек и сменной производительности мехлопат при разработке вскрышных пород в условиях разрезов центрального Кузбасса приведены на рис. 2.

Обсуждение результатов исследований

Полученные зависимости позволяют техническим службам карьера и проектировщикам оперативно на стадии принятия решения с достаточной точностью определить тип и количество экскаваторов (ЭАКМЛ) для условий конкретного участка разреза в соответствии с установленными требованиями по обеспечению плановой добычи. В том числе результаты могут быть использованы при формировании инвестиционных горнорудных проектов [21].

В результате была решена одна из главных задач исследования – обоснование рациональных параметров технологии разработки взорванных вскрышных экскаваторно-автомобильными комплексами для разрезов Кузбасса.

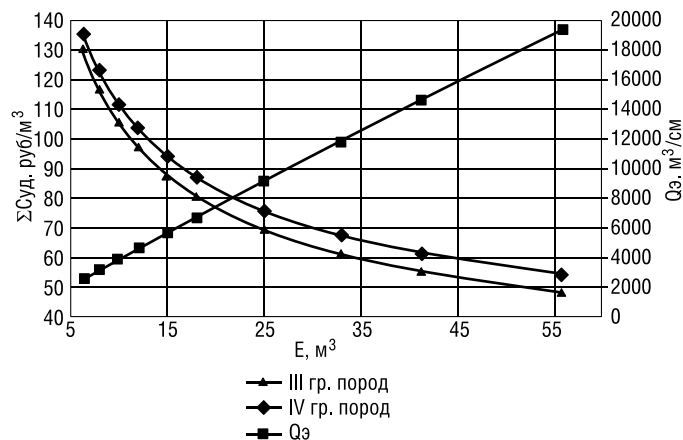


Рис. 2. Графические зависимости значений минимальных издержек и сменной производительности мехлопат при разработке вскрышных пород от вместимости ковша экскаватора

Fig. 2. Graphical dependences of the values of the minimum costs and the replaceable productivity of the mehlopat in the development of overburden rocks on the bucket capacity of the excavator

Для этого в соответствии с принятыми методами учета затрат при применении ЭАКМЛ на карьерах Кузбасса были установлены:

- ✦ затраты на обеспечение работы для всех принятых типов мехлопат, транспорта, бульдозерной техники в забое и по отвалообразованию;
- ✦ стоимость бурения одного погонного метра эксплуатируемых буровых станков на предприятиях, затраты на ВВ, зарядание скважин и охрану блоков.

Это позволило определить зависимость изменения удельных затрат на БВР от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород для двух категорий разрабатываемых пород – IV и III (трудно взрывающиеся породы и средне взрывающиеся породы), которая определяет тип ВВ и схему заряда в скважине. Также были установлены графические зависимости изменения суммарных удельных эксплуатационных затрат по процессам разработки ЭАКМЛ, оснащенных современными механическими лопатами с вместимостью ковша экскаватора от 6,3 до 55,8 м^3 .

Заключение

Предлагаемый способ оптимизации параметров экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат

Таблица 3 / Table 3

Результаты оценки и критерии достоверности формул для определения минимальных издержек и сменной производительности мехлопат / The results of evaluation and criteria for the reliability of formulas for determining the minimum costs and replaceable productivity of mehlopat

Группа пород / Group of breeds	Расчетные формулы / Calculation formulas	Ед. измер. / Unit of measurement	Критерий оценки достоверности / Criterion for assessing reliability		
			Козф. корреляции	Козф. детерминации	Средняя ошибка аппроксимации
-	$Q_3 = 433,23 \times E^{0,94}$	$\text{м}^3/\text{см}$	1,00	0,999	1,69 %
III	$\Sigma C_{\text{уд}} = 304,87 \times E^{-0,46}$	$\text{руб}/\text{м}^3$	0,970	0,942	6,04 %
IV	$\Sigma C_{\text{уд}} = 294,15 \times E^{-0,42}$	$\text{руб}/\text{м}^3$	0,964	0,929	6,13 %

дает возможность за счет установления рационального значения величины средневзвешенного размера куска взорванной породы, также дает возможность определения минимальной величины суммарных издержек и соответствующие им параметры всех процессов технологии разработки пород ЭАКМЛ, оснащенных современными механическими лопатами с вместимостью ковша экскаватора от 6,3 до 55,8 м³ при разработке пород III и IV категории.

Кроме того, разработанная методика позволяет решать следующие задачи при оптимизации параметров ЭАКМЛ:

- ✦ выбора величины удельного расхода ВВ в определенных условиях работы;
- ✦ выбора типа мехлопаты путем сравнения их технико-экономических показателей по величине суммарных

удельных затрат на работу экскаваторно-автомобильного комплекса;

- ✦ выбора технических средств (автосамосвалов, буровых станков, бульдозерной техники) различной производительности и стоимости;
- ✦ решения комплексной задачи путем выбора величины удельного расхода ВВ, типа мехлопаты, автосамосвала, бурового станка и бульдозера.

Таким образом, изложенное выше научно обоснованное техническое решение имеет важное значение для оптимизации параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами с применением мехлопат на разрезах Кузбасса и вносит существенный вклад в повышение эффективности открытых горных работ. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Сермин, Д. С. Анализ качества взорванных горных пород на основе интегрального распределения энергии / Д. С. Сермин, А. В. Матвеев, О. О. Лобанова // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: сб. трудов конф. - Новокузнецк: СибГИУ, 2020. - С. 210-212.
2. Ненашев, А. С. Развитие и состояние применяемых видов технологии ведения горных работ и систем разработки на разрезах Кузбасса / А. С. Ненашев, В. С. Федотенко, Н. А. Федотенко // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. - 2023. - № 3. - С. 249-268.
3. Ненашев, А. С. Организационные условия высокопроизводительной работы мощных экскаваторно-автотранспортных комплексов на разрезах / А. С. Ненашев, В. С. Федотенко // Маркшейдерия и недропользование. - 2019. - № 6 (104). - С. 49-52.
4. Чаплыгин, В. В. К вопросу оптимизации параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород на разрезах Кузбасса / В. В. Чаплыгин, А. А. Садыков, А. В. Матвеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2023. - № 9. - С. 84-98.
5. Временная методика расчета параметров взрывной отбойки пород на угольных разрезах / А. В. Бирюков, Н. Я. Репин, И. А. Паначев, А. С. Ташкинов. - М.: Типография ИГД им. А. А. Скочинского, 1976. - 50 с.
6. Ташкинов, А. С. Сравнительная оценка производительности карьерных экскаваторов при разработке взорванных пород / А. С. Ташкинов, А. А. Сысоев, И. А. Ташкинов // Вестник КузГТУ. - 2009. - № 4. - С. 17-20.
7. Кононенко, Е. А. Влияния кусковатости взорванных пород на производительность экскаватора Вискус 495HD / Е. А. Кононенко, А. Б. Исайченков // Маркшейдерия и недропользование. - 2014. - № 6. - С. 17-19.
8. Вилкул, Ю. Г. Влияние гранулометрического состава взорванной горной массы на технико-экономические показатели работы карьеров / Ю. Г. Вилкул, В. В. Перегудов // Криворожский технический университет, разработка рудных месторождений. - 2011. - № 94. - С. 3-7.
9. Зависимость производительности экскаватора от кусковатости взорванной породы на Житикаринском карьере / А. Е. Казангапов, А. Е. Куттыбаев, Г. Саменов, А. Н. Петрунько // Вестник КазНТУ. - 2006. - № 2. - С. 153-156.
10. Федотенко, В. С. Оптимизация параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами с применением мехлопат / В. С. Федотенко, В. В. Чаплыгин, А. В. Матвеев // Маркшейдерия и недропользование. - 2024. - № 1. - С. 17-31.
11. Артяева, М. А. Стоимостной подход при управлении увеличении ценности компании / М. А. Артяева // Инновации в науке: пути развития: мат-лы X Всерос. науч.-практ. конф., 26 дек. 2018 г. - Чебоксары, 2018. - С. 203-205.
12. Kovalchuk, V. A. The economic-mathematical modeling of the optimal structure of investment of a mining and dressing enterprise / V. A. Kovalchuk, T. M. Kovalchuk // Business Inform. - 2020. - Vol. 2, № 505. - P. 108-104.
13. Information for enterprise management in Economics 4.0 / I. Vysochyn, H. Sytnyk, T. Zhuk [et al.] // Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu. - 2022. - Vol. 3. - P. 141-145.
14. An approach to the economic assessment of production risk at a mining enterprise / N. V. Galkina, I. L. Kravchuk, A. V. Solin [et al.] // News of the Ural state mining university. - 2022. - Vol. 4. - P. 151-158.
15. Wang, X. Construction of economic management performance model of mining enterprises under the background of supply-side reform / X. Wang // Wseas transactions on business and economics. - 2023. - Vol. 20. - P. 2066-2076.
16. Trushina, G. S. Mining enterprise performance strategy economic evaluation / G. S. Trushina // Ugol. - 2017. - Vol. 3. - P. 52-55.
17. Бусырев, В. М. Экономические основы рационального освоения минерально-сырьевых ресурсов недр / В. М. Бусырев // Вестник Кольского научного центра РАН. - 2019. - № 2. - С. 75-82.
18. Временные нормы технологического проектирования угольных и сланцевых разрезов ВНТП 2-92. - М., 1993. - 78 с.
19. Кузнецов, А. Г. Применение ускоренной амортизации для повышения эффективности инвестиционных проектов в горной промышленности / А. Г. Кузнецов, Ю. А. Кузнецова // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. - 2011. - № 1. - С. 33-35.
20. Кузнецов, А. Г. Оптимизация стратегического планирования развития уранодобывающей отрасли на основе экономико-математического моделирования / А. Г. Кузнецов // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. - 2011. - № 4. - С. 39-45.
21. Гилярова, А. А. Концепция объектно-ориентированной бизнес-модели инвестиционного горнорудного проекта / А. А. Гилярова // Экономика и бизнес: теория и практика. - 2019. - № 10-1 (56). - С. 88-92.

REFERENCES

1. Sermin DS, Matveev AV, Lobanova OO. Analysis of the quality of blasted rocks based on the integral energy distribution. *Science and youth: problems, searches, solutions: proceedings of the conference*. Novokuzneck, 2020:210-12 (In Russ.).
2. Nenashev AS, Fedotenko VS, Fedotenko NA. The development and state of the applied types of mining technology and mining systems in the Kuzbass sections. *Proceedings of Tula State University. Earth Sciences*. 2023;3:249-68 (In Russ.).
3. Nenashev AS, Fedotenko VS. Organizational conditions of high-performance operation of powerful excavator-motor transport complexes in sections. *Surveying and subsoil use*. 2019;6(104):49-52 (In Russ.).
4. Chaplygin VV, Sadykov AA, Matveev AV. On the issue of optimizing the parameters of the technology for the development of semi-horizontal overburden rocks in the Kuzbass sections. *Mining information and analytical bulletin*. 2023;9:84-98 (In Russ.).
5. Birjukov AV, Repin Nja, Panachev IA, et al. A temporary method for calculating the parameters of explosive rock stripping at coal mines. Moscow: Printing house IGD im. A. A. Skochinskogo, 1976 (In Russ.).
6. Tashkinov AS, Sysoev AA, Tashkinov IA. Comparative evaluation of the productivity of quarry excavators in the development of blasted rocks. *Bulletin of KuzSTU*. 2009;4:17-20 (In Russ.).
7. Kononenko EA, Isajchenkov AB. The impact of the lumpiness of blasted rocks on the performance of the Bucyrus 495HD excavator. *Surveying and subsoil use*. 2014;6:17-9.
8. Vilkul JuG, Peregudov VV. The influence of the granulometric composition of the exploded rock mass on the technical and economic performance of quarries. *Krivoy Rog Technical University, development of ore deposits*. 2011;94:3-7 (In Russ.).
9. Kazangapov AE, Kutybaev AE, Samenov G, et al. Зависимость производительности экскаватора от кусковатости взорванной породы на Житикаринском карьере. *Bulletin of KazNTU*. 2006;2:153-56 (In Russ.).
10. Fedotenko VS, Chaplygin V V, Matveev AV. Optimization of the parameters of the technology for the development of semi-horizontal overburden by excavator-automotive complexes using mechlopat. *Surveying and subsoil use*. 2024;1:17-31 (In Russ.).
11. Artjaeva MA. A cost-based approach to managing increasing the value of a company // Innovations in science: ways of development: mat-ly X All-Russian Scientific and Practical conference. December 26th. 2018. Cheboksary, 2018:203-05 (In Russ.).
12. Kovalchuk VA, Kovalchuk TM. The economic-mathematical modeling of the optimal structure of investment of a mining and dressing enterprise. *Business Inform*. 2020;2(505):104-104.
13. Vysochyn I, Sytnyk H, Zhuk T, et al. Information for enterprise management in Economics 4.0. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. 2022;3:141-45.
14. Galkina NV, Kravchuk IL, Solin AV, et al. An approach to the economic assessment of production risk at a mining enterprise. *News of the Ural state mining university*. 2022;4:151-58.
15. Wang X. Construction of economic management performance model of mining enterprises under the background of supply-side reform. *Wseas transactions on business and economics*. 2023;20:2066-76.
16. Trushina GS. Mining enterprise performance strategy economic evaluation. *Ugol*. 2017;3:52-5.
17. Busyrev VM. The economic foundations of the rational development of mineral resources of the subsoil. *Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019;2:75-82 (In Russ.).
18. Temporary norms of technological design of coal and shale sections of VNTP 2-92. Moscow, 1993 (In Russ.).
19. Kuznecov AG, Kuznecova JuA. The use of accelerated depreciation to improve the efficiency of investment projects in the mining industry. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*. 2011;1:33-5 (In Russ.).
20. Kuznecov AG. Optimization of strategic planning for the development of the uranium mining industry based on economic and mathematical modeling. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*. 2011;4:39-45.
21. Giljarova AA. The concept of an object-oriented business model of an investment mining project. *Economics and Business: theory and practice*. 2019;10-1(56):88-92.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Матвеев Андрей Васильевич:
старший преподаватель,
кафедра открытых горных работ и электромеханики,
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
г. Новокузнецк, Российская Федерация,
e-mail: matveev-av@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Matveev Andrey Vasilyevich:
Senior Lecturer,
Department of Open-pit Mining and Electromechanics,
Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russian Federation,
e-mail: matveev-av@yandex.ru

ОЦЕНКА СВЕРХНОРМАТИВНЫХ ПОТЕРЬ ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО НА ПРИМЕРЕ РАЗРАБОТКИ ИЗВЕСТНЯКОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

*В. Д. Кантемиров, Р. С. Титов, А. М. Яковлев,
Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

Аннотация: Изложены методологические положения по оценке сверхнормативных потерь полезного ископаемого при открытой разработке месторождений со сложными горно-геологическими условиями. В качестве примера приведены показатели потерь полезного ископаемого при разработке Костанокского участка Чаньвинского месторождения известняков, используемых для производства каустической соды. Установлен фактический уровень потерь, превышающий 30 % от объема добычи сырья. Изложены основные причины повышенных потерь известняка по сравнению с уровнем, обоснованным проектом. Установлено, что при детальной геологической разведке массива известняков не были выявлены карстовые зоны и участки с повышенным содержанием глины, залегающие в виде «жил» в зонах повышенной трещиноватости. Вследствие этого в результате взрывных работ происходит перемешивание взрывааемых закарстованных заглинизированных участков с чистым известняком, загрязнение известняка до значений, превышающих допустимые проектом, что приводит к потере балансовых запасов полезного ископаемого при выемке. Разработаны рекомендации по расчету уровня потерь при отработке сложных забоев, которые характеризуются перемежаемостью породы с продуктивной толщей известняка и карстовыми зонами.

Ключевые слова: разработка месторождений, известняк, эксплуатационные потери, засорение сырья, разубоживание, карстовые зоны, методика оценки потерь.

Благодарности, финансирование: Авторы выражают особую признательность и большую благодарность коллегам из лаборатории управления качеством минерального сырья ИГД УрО РАН, а также коллективу редакции «Маркшейдерия и недропользование» за поддержку и помощь в написании и оформлении статьи. Работа выполнена в рамках НИР, тема 1 «Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем» (FUWE-2022-0005), рег. № 1021062010531-8-1.5.1.

Для цитирования: Кантемиров В. Д., Титов Р. С., Яковлев А. М. Оценка сверхнормативных потерь полезного ископаемого на примере разработки известнякового месторождения // Маркшейдерия и недропользование. 2024. №3. С. 23-33. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_23_33.

ESTIMATION OF EXCESS MINERAL LOSSES ON THE EXAMPLE OF LIMESTONE DEPOSIT DEVELOPMENT

*V. D. Kantemirov, R. S. Titov, A. M. Jakovlev,
Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia*

Abstract: The article presents methodological provisions for the assessment of increased mineral losses during open-pit mining of deposits with difficult mining and geological conditions. As an example, the indicators of mineral losses during the development of the Kostanok site of the Chanvin deposit of limestones used for the production of caustic soda are given. The actual level of losses exceeding 30 % of the volume of extraction of raw materials has been established. The main reasons for the increased limestone losses compared to the level justified by the project are outlined. It was found that during the detailed exploration of the limestone massif, karst zones and areas with a high clay content, lying in the form of «veins» in areas of increased fracturing, were not identified. As a result, as a result of blasting, the exploding quarried, clogged areas with pure limestone are mixed, its contamination to values exceeding those allowed by the project, which leads to the loss of balance reserves of minerals during excavation. Recommendations are given for calculating the level of losses during the development of complex faces, which are characterized by the intermittency of rocks with productive limestone strata and karst zones.

Keywords: operational losses of minerals, clogging of raw materials, dilution, karst zones, loss assessment methodology.

Acknowledgments, Funding: The authors express special gratitude and great gratitude to their colleagues from the Laboratory of Mineral Raw Materials Quality Management of the IGD Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, as well as to the editorial staff of «Surveying and Subsoil Use», for their support and assistance in writing and formatting the article. Methodological foundations of the strategy of integrated development of reserves of solid mineral deposits in the dynamics of development of mining systems (FUWE-2022-0005), reg. №. 1021062010531-8-1.5.1.

For citation: Kantemirov V. D., Titov R. S., Jakovlev A. M. Estimation of excess mineral losses on the example of limestone deposit development Surveying and subsoil use. 2024;(3):23-33. (In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_3_23_33.

Одним из элементов стратегии рационального недропользования является сокращение потерь полезного ископаемого (ПИ) при его добыче. Как правило, нормативный уровень потерь ПИ устанавливается проектом на основании геологических данных о месторождении, сложности залегания рудных тел и вмещающих пород, принятой технологии разработки конкретных добычных участков. В большинстве случаев уровень потерь составляет 2-9 % от общего объема добычи [1-7]. Однако при разработке некоторых сложноструктурных месторождений имеют место повышенные, сверхнормативные потери ПИ (20-35 %) [8].

Основными причинами высокого уровня потерь и разубоживания при добыче и переработке полезного ископаемого являются [1-8]:

- ✦ недостаточная изученность геологического строения месторождения;
- ✦ отсутствие должной экономической заинтересованности предприятий в наиболее рациональной разработке и обогащении полезного ископаемого;
- ✦ нарушение предусмотренных проектом технологических процессов при добыче и переработке;
- ✦ применение систем разработки и технологий горных работ, не соответствующих горно-геологическим условиям и особенностям геологического строения обрабатываемого месторождения и отдельных его частей;
- ✦ несовершенство принятых методик определения и нормирования потерь и разубоживания.

Цель исследований. Разработка методики оценки сверхнормативных потерь ПИ на примере отработки сложноструктурного месторождения известняков.

Объект исследований. Чаньвинское месторождение, Пермский край, АО «Березниковский содовый завод».

Чаньвинское месторождение характеризуется следующими горно-геологическими условиями отработки запасов:

- ✦ мощность вскрыши — не более 10 м при среднем ее значении 2,5 м;
- ✦ рельеф в пределах участка — относительно ровный с углами наклона дневной поверхности, практически не превышающими 15°.

Известняк отличается высокой чистотой, количество вредных примесей составляет 2-4 %. По качественным параметрам известняк пригоден для производства соды, извести, известняковой муки и строительного щебня. Месторождение эксплуатируется открытым способом.

Особенностью месторождения является его повышенная закарстованность и широкое развитие глинистых образований. Карстовые формы открытого типа представлены конусовидными, чашеобразными и блюдцеобразными воронками. Карстовые воронки целиком заполнены рыхлым материалом, представляющим собой обломки карбонатных пород, сцементированных песчанистой глиной. В большинстве случаев выше залегает маломощный слой песчанистой глины с небольшим количеством щебня известняка. По химическому составу глина имеет силикатную основу и содержит более 59 % SiO₂, более 20 % Al₂O₃ и до 8 % окислов же-

леза, а также 1,2 % TiO₂. Таким образом, широкое развитие глинистых образований является главным фактором, осложняющим эксплуатацию месторождения.

Участки месторождения с присутствием глинистых образований названы зонами повышенного и высокого содержания глин (ПВСГ). При проведении детальной разведки и доразведки месторождения зоны ПВСГ не были выявлены. Отсутствие достоверной информации о зонах ПВСГ приводит к высокой, а на отдельных участках к крайне высокой степени засорения взорванной горной массы извлекаемого известняка глинистыми включениями. Поэтому фактические потери ПИ значительно превышают установленные проектом. Разработка этих участков приводит к потерям ПИ свыше 30 %.

В границах участка ведения добычных работ на месторождении выделены следующие виды эксплуатационных потерь известняка:

- ✦ при отработке карстовых участков (глинистых тел) на контактах известняка с зоной карста (глины) при его выемке;
- ✦ при отработке участков зон дробления «заглинизированного» известняка (ПВСГ) внутри зоны на контактах известняка с глиняными прослоями;
- ✦ при отработке приконтактных зон известняка с засоряющими породами и некондиционным известняком, известняк — ПВСГ фронтальным забоем;
- ✦ при зачистке кровли известняков от покрывающих рыхлых пород;
- ✦ в бортах и днище карьера при недоработке выклинивающихся частей продуктивной толщи известняка (проектные потери).

Обрабатываемые участки Чаньвинского месторождения известняка по геолого-морфологическим признакам можно отнести к сложному типу с пологими и крутыми как прямолинейными, так и криволинейными контактами приконтактных зон известняк — глина (карст) или известняк — повышенное содержание глины (ПВСГ) (рис. 1).

Методы исследований

Эксплуатационные потери, возникающие при отработке карстовых участков, зон ПВСГ и приконтактных зон известняк — ПВСГ, рекомендуется объединить в одну группу потерь в зоне влияния участков засоряющих пород Π_{zn} в границах выемочного участка (блока).

Тогда объем потерь для оцениваемого участка отработки (блока) можно представить в виде

$$\Pi_{об} = \Pi_{zn} + \Pi_{мо} + \Pi_{зк}, \quad (1)$$

где Π_{zn} — потери известняка, образующиеся при отработке зон ПВСГ, карста и некондиционного известняка, т; $\Pi_{мо}$ — потери, образующиеся при производстве технологических операций БВР и транспортирования, т; $\Pi_{зк}$ — потери, образующиеся при зачистке кровли известняка от покрывающих пород, т. Потери известняка, образующиеся при отработке зон засоряющих пород (глин), определяются по следующей формуле, т:

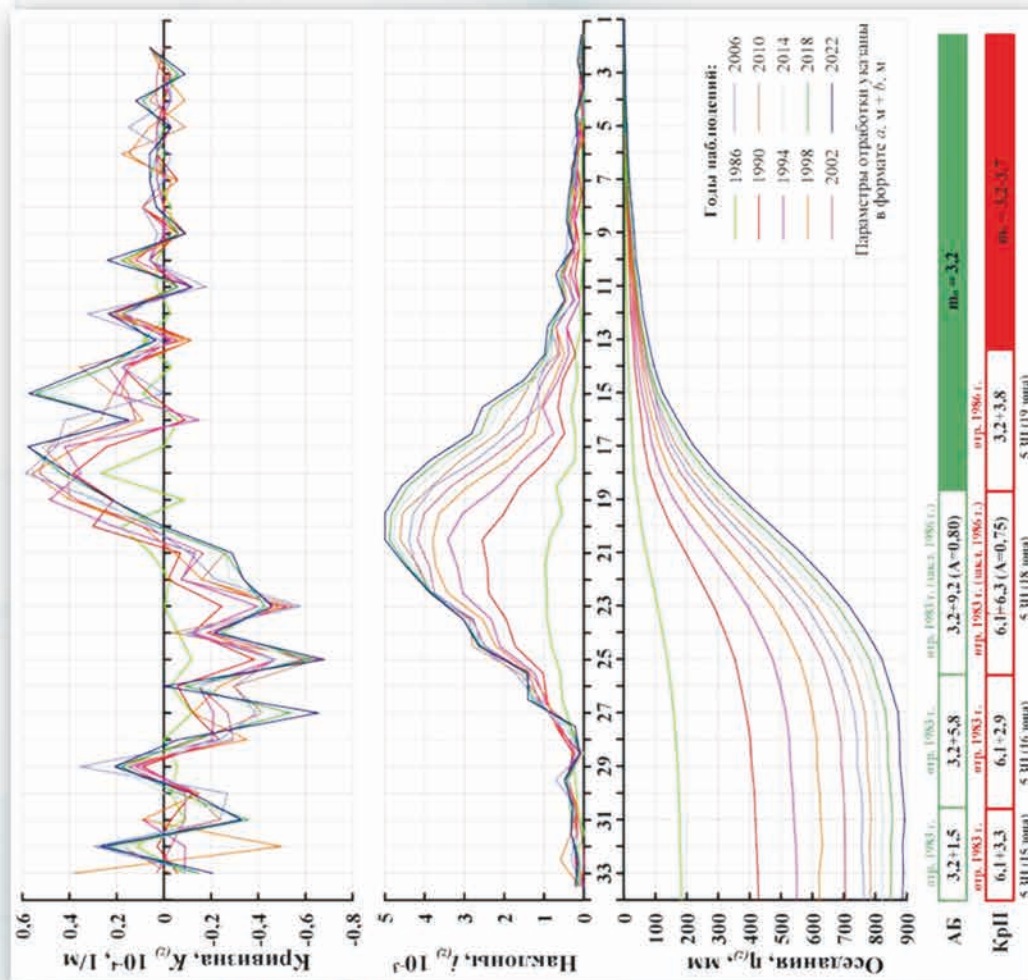


Рис. 3. Разрез сдвижений и деформаций по профильной линии № 5 рудника БКПРУ-2 за период с 1985 по 2022 год.
Fig. 3. Section of displacements and deformations along profile line No. 5 of the Berezniaki potash mine-2 for the period from 1985 to 2022

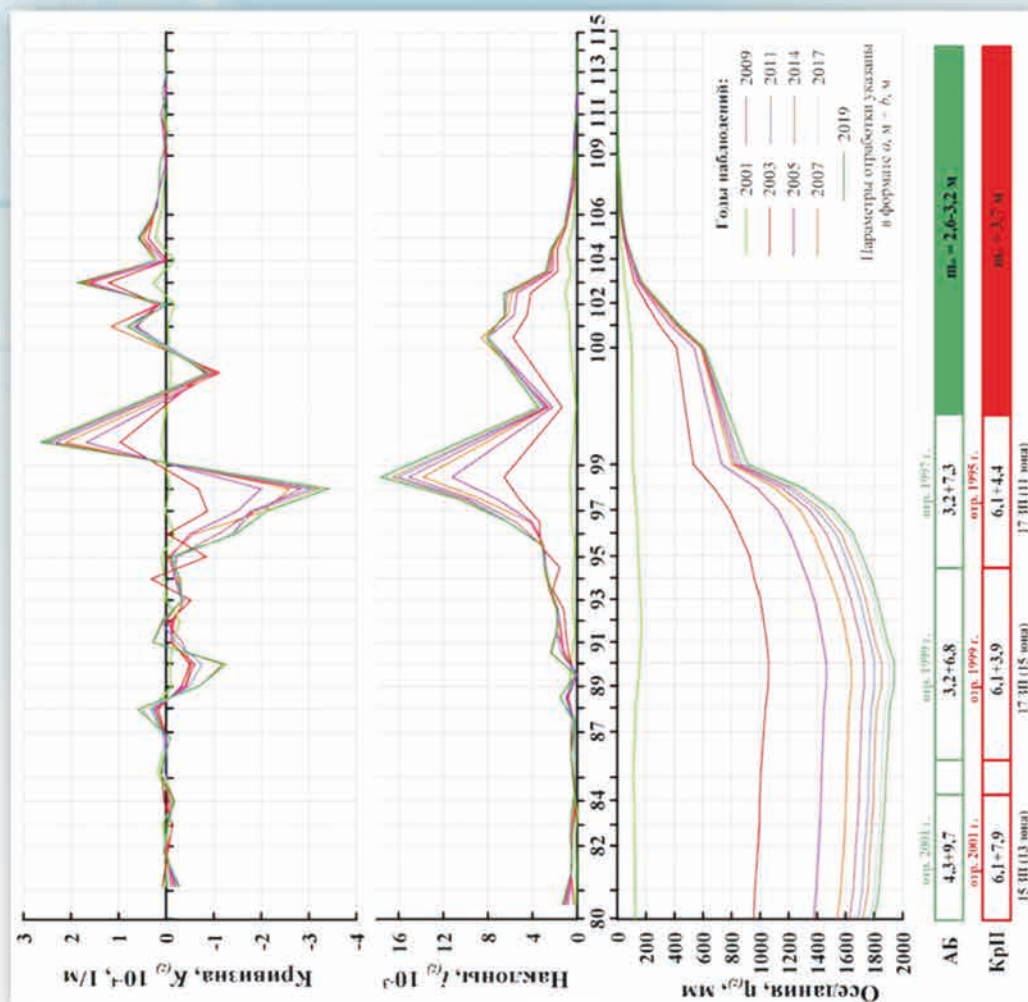


Рис. 4. Разрез сдвижений и деформаций в широтной проекции по профильной линии № 2 рудника БКПРУ-2 за период с 1998 по 2019 год
Fig. 4. Section of displacements and deformations along profile line No. 2 of the Berezniaki potash mine-2 for the period from 1998 to 2019

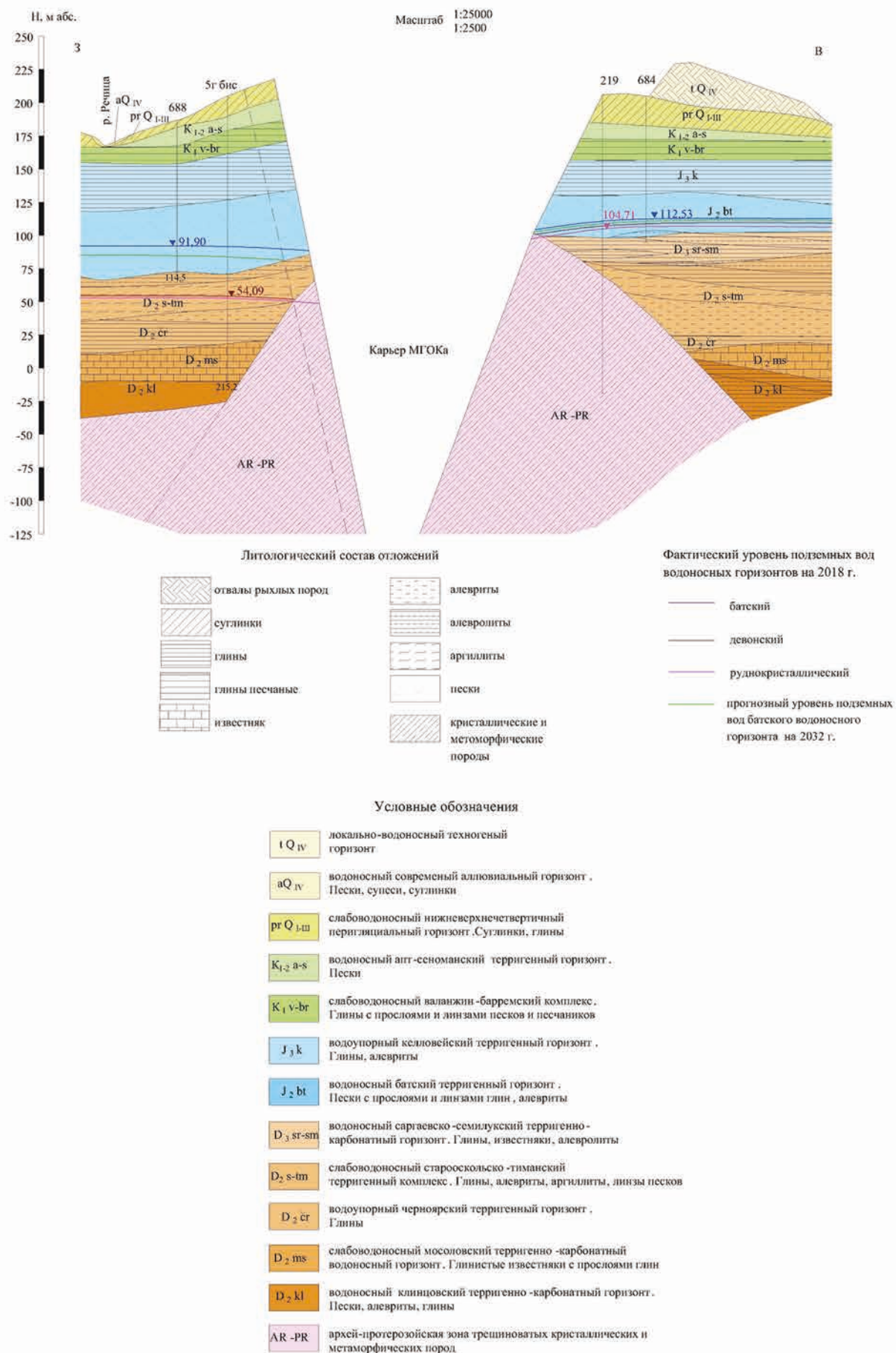


Рис. 1. Гидрогеологический разрез Михайловского месторождения
Fig. 1. Hydrogeological section of the Mikhailovskoye field

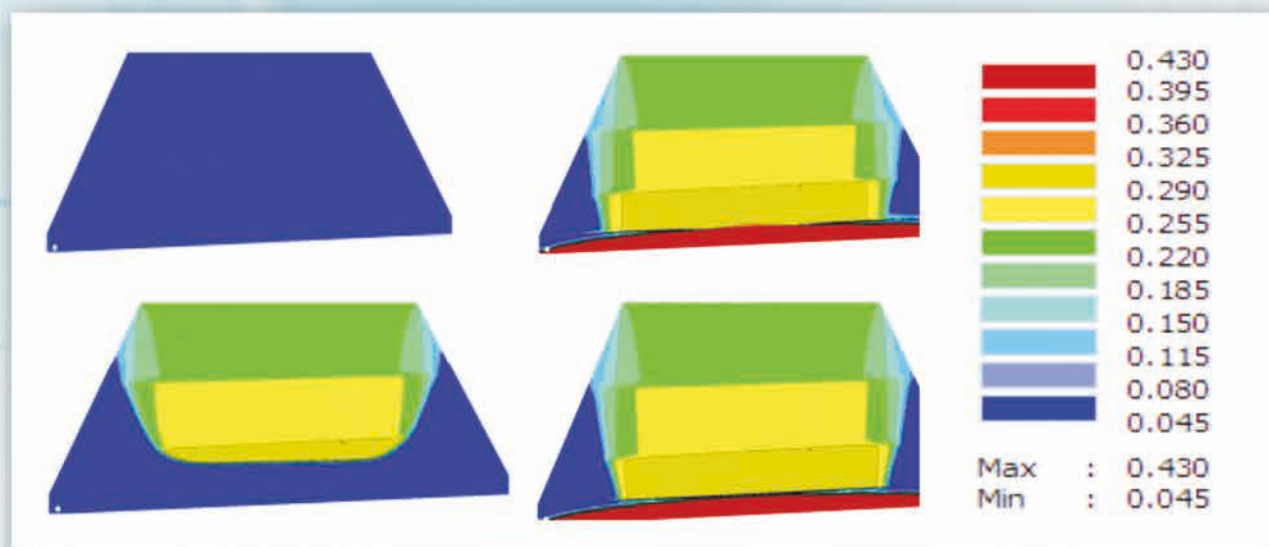


Рис. 3. Влажность окомкованной руды и степень обводнения дренажного слоя
Fig. 3. Moisture of pelletised ore and degree of watering of the drainage layer

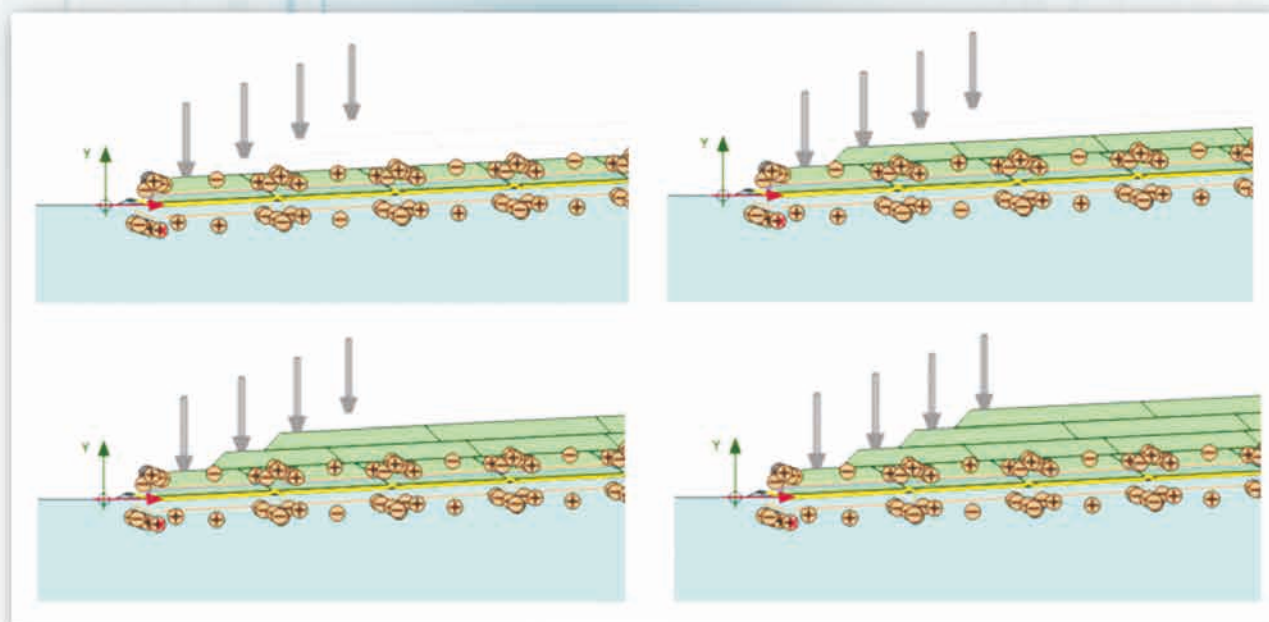


Рис. 4. Стадии численного моделирования формирования напряженного состояния штабеля при кучном выщелачивании (поперечное сечение)
Fig. 4. Stages of numerical modelling of heap leach stack stress state formation (cross section)

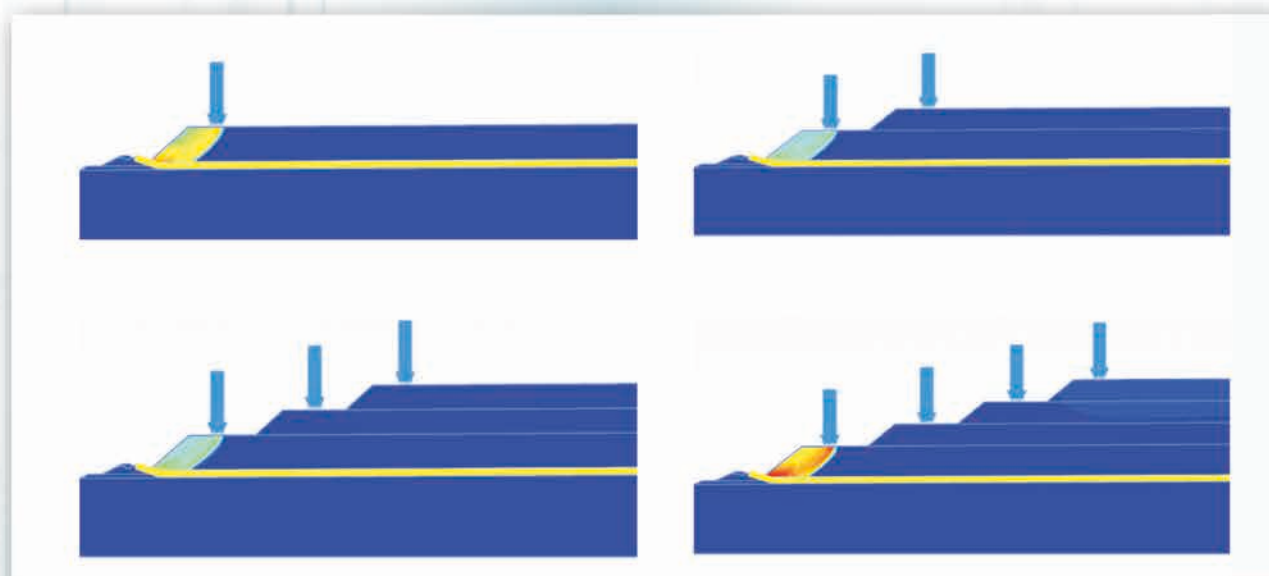


Рис. 5. Форма потери устойчивости штабеля при кучном выщелачивании (продольное сечение, с учетом нагрузки от транспорта, стадия эксплуатации)
Fig. 5. Form of stability loss of heap leach stack (longitudinal section, taking into account the load from transport, operation stage)



Группа компаний «ЭВОБЛАСТ» — российский разработчик, изготовитель и поставщик передовых взрывчатых материалов промышленного назначения, а также современных и эффективных экспертных решений для горной и строительной отраслей промышленности.

Значительный опыт реализации проектов в России — компания представлена на рынке с 1993 года.

- Производство и поставка инновационных эмульсионных взрывчатых веществ для заряжания восстающих скважин на подземных горных работах;
- Производство и поставка эмульсионных взрывчатых веществ для открытых горных работ;
- Разработка экспертных решений и оказание услуг премиального сервиса по ведению буровзрывных работ;
- Проведение комплексных аудитов буровзрывных работ с повышением эффективности и безопасности;
- Обучение эффективным практикам ведения буровзрывных работ.

ГК «ЭВОБЛАСТ»
125315, Россия, Москва,
Ленинградский пр-т., д. 72, к. 1, 8 этаж
тел.: +7 495 641 11 64
e: marketing@evoblast.ru
w: evoblast.ru



ОТКРЫТ ПРИЕМ ЗАЯВОК НА УЧАСТИЕ В МЕЖДУНАРОДНОЙ ПРЕМИИ

ЗАЯВКИ ПРИНИМАЮТСЯ
до 24 июня 2024


ТАЛАНТЛИВАЯ
ЖЕНЩИНА
В СОВРЕМЕННОЙ ИНДУСТРИИ

2024

ОКРЫЛЕННЫЕ
УСПЕХОМ



Организатор

WOMEN IN
MINING
RUSSIA

womeninmining.ru

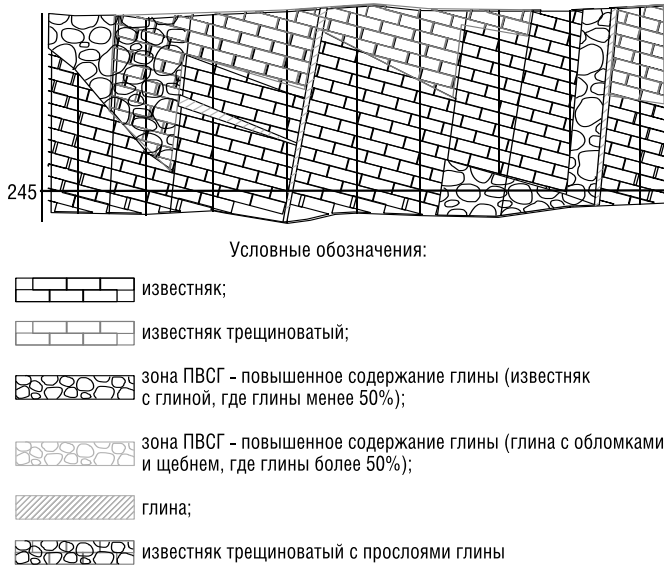


Рис. 1. Характерное геологическое строение взрывного блока в карьере Чаньвинского месторождения

Fig. 1. The characteristic geological structure of the explosive block in the quarry of the Chanvinskoye field

$$\Pi_{\text{из}} = \left[\left(\frac{K_{\text{из}}}{100} \times \frac{K_r}{100} \right) \times B_{\text{в}} \gamma_{\text{и}} \right] + Q_{\text{п}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{из}}$ — теряемый известняк, приуроченный к участкам зон ПВСГ, дробленного «заглинизированного» известняка, %; K_r — засоренность выемочного участка глинистыми породами зон ПВСГ и некондиционным известняком по данным детальной разведки (проекта), %; $B_{\text{в}}$ — погашаемые балансовые запасы известняка в границах обрабатываемого участка (блока), м³; $\gamma_{\text{и}}$ — среднее значение объемного веса известняка (установлено проектом 2,54 т/м³), т/м³; $Q_{\text{п}}$ — потери при отработке приконтактных зон с засоряющими породами и некондиционным известняком, известняк — ПВСГ, т.

Потери известняка, приуроченного к добычному участку в зоне ПВСГ, можно записать в следующем виде, %:

$$K_{\text{из}} = \left(\frac{\Pi_{\text{из}}}{B_{\text{в}}} K_r \right) 100 = 1 - \frac{Q_{\text{п}}}{100}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{п}}$ — количество глины в границах зоны ПВСГ (определяется на основании опыта разработки месторождения), %.

Балансовые запасы $B_{\text{в}}$ в границах обрабатываемого участка с учетом несоответствия проектной закарстованности ее фактической величине определяются из следующего выражения, т:

$$B_{\text{в}} = V_{\text{т}} - V_{\text{к}} = V_{\text{т}} - \left(V_{\text{т}} \frac{K_3}{100} k_3 \right), \quad (4)$$

где $V_{\text{т}}$ — объем продуктивной толщи в границах участка отработки, м³; $V_{\text{к}}$ — объем карста (глины) в границах участка отработки, м³; K_3 — закарстованность участка отработки, установленная по данным детальной разведки (проекта), %; k_3 — коэффициент учета закарстованности участка отработки, дол. ед.

Для учета имеющегося расхождения фактической закарстованности и засоренности массива ПИ от проектной предложено ввести в расчетные формулы поправочные коэффициенты, предусматривающие приведение проектных значений к эксплуатационным:

✧ коэффициент учета закарстованности (k_3):

$$k_3 = \frac{K_3 \pm \Delta K_3}{K_3} = \frac{K_{\text{фз}}}{K_3}, \quad (5)$$

✧ коэффициент учета заглинизованности (k_2):

$$k_r = \frac{K_r \pm \Delta K_r}{K_r} = \frac{K_{\text{фг}}}{K_r}, \quad (6)$$

где ΔK_3 — прирост (убыль) закарстованности известняка для выемочного участка по итогам ее отработки, %; $K_{\text{фз}}$ — фактическая закарстованность выемочного участка, %; ΔK_r — прирост (убыль) засоренности известняка глинистыми породами для выемочного участка по итогам ее отработки, %; $K_{\text{фг}}$ — фактическая засоренность выемочного участка глинистыми породами, %.

Коэффициенты k_3 и k_2 определяются для каждого выемочного участка отдельно.

Потери, возникающие при добычных работах фронтальным забоем в приконтактных зонах известняка с засоряющими породами и некондиционным известняком с крутыми контактами известняк — ПВСГ («треугольники» потерь, рис. 2), рекомендуется определять следующими образом:

✧ потери при отработке приконтактных зон с засоряющими породами и некондиционным известняком определяются формулой, т:

$$Q_{\text{п}} = \left(\frac{K_{\text{из}}}{100} \right) B_{\text{в}} \gamma_{\text{и}}, \quad (7)$$

✧ коэффициент количественных потерь при разработке известняка в приконтактной зоне известняк — ПВСГ определяется формулой, %:

$$K_{\text{из}} = \left[\frac{h^2 \sin \delta L_{\text{к}} \gamma_{\text{и}}}{2 B_{\text{в}} \gamma_{\text{и}} \sin \beta \sin \alpha} \right] 100, \quad (8)$$

где h — высота «треугольника» теряемого известняка, м; α — угол падения залежи, град; β — угол откоса рабочего уступа, град; $L_{\text{к}}$ — длина всех погашаемых контактов известняка с засоряющими породами в границах обрабатываемого участка (блока), м; δ — угол, который при $\beta > \alpha$ равен $(\beta - \alpha)$, при $\alpha > \beta$ равен $(\alpha - \beta)$ и при несогласном падении контакта рудного тела с линией откоса уступа — $(\beta + \alpha)$, град.

С учетом вышеизложенного выражение для определения потерь известняка при отработке участков с засоряющими породами Пзп будет иметь следующий вид, т:

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{из}} = & \left(1 - \frac{Q_{\text{п}}}{100} \right) \left(\frac{K_r}{100} k_r \right) \left[\left(V_{\text{т}} - V_{\text{т}} \frac{K_3}{100} k_3 \right) \gamma_{\text{и}} \right] + \\ & + Q_{\text{п}} = B_{\text{в}} \gamma_{\text{и}} \left[\left(1 - \frac{Q_{\text{п}}}{100} \right) \left(\frac{K_r}{100} k_r \right) + \left(\frac{K_{\text{из}}}{100} \right) \right], \end{aligned} \quad (9)$$



Рис. 2. Схема к расчету потерь известняка при разработке приконтактных зон с четкими плоскими контактами

Fig. 2. A scheme for calculating limestone losses in the development of contact zones with clear flat contacts

Необходимо также учитывать потери, образующиеся в процессе производства БВР и при транспортных работах:

$$\Pi_{то} = \left(\frac{0,25B_b}{100} + \frac{0,3B_b}{100} \right) \gamma_n, \quad (10)$$

где 0,25 и 0,3 – потери, возникающие соответственно при производстве БВР и транспортировании известняка (приняты по рекомендациям «Общесоюзных норм технологического проектирования предприятий нерудных строительных материалов»), %.

Потери известняка при зачистке кровли от покрывающих пород в границах обрабатываемого участка (блока) определяются по формуле

$$\Pi_{зк} = \left[L_b \left(m_{pm} - \left(\frac{Q_z}{100} \sum_{i=1}^n m_{gi} \right) \right) \right] h_{cm} \gamma_n = S_z h_{cm} \gamma_n, \quad (11)$$

где h_{cm} – средняя высота слоя теряемого известняка (зависит от типа, модели применяемого при зачистке механизма), м; L_b – средняя ширина зачищаемого тела полезного ископаемого в границах обрабатываемого участка (блока), м; m_{pm} – средняя мощность зачищаемого тела полезного ископаемого (известняка) в границах обрабатываемого участка (блока), м; m_{gi} – мощность i -го включения засоряющих пород (зон ПВСГ) в границах обрабатываемого участка (блока), попадающего в срезаемый слой h_{cm} , м; n – число засоряющих включений, ед.; Q_z – количество глины в границах зоны ПВСГ, %; S_z – площадь зачистки, м².

Схема к определению исходных данных для расчета потерь известняка при зачистке кровли полезной толщи в границах взрывного блока (участка) представлена на рисунке 3.

Коэффициент потерь ПИ обрабатываемого участка:

$$K_{\pi} = \left[\frac{\Pi_{об}}{B_b \gamma_n} \right] 100, \quad (12)$$

где $\Pi_{об}$ – суммарные потери известняка по выемочной единице, т; B_b – балансовые запасы в границах выемочной единицы, т; γ_n – среднее значение объемного веса известняка, т/м³.

Полученные таким образом расчетные показатели могут быть использованы при составлении сводных балансовых отчетных материалов по учету количественных и качественных потерь добываемого известняка на Чаньвинском карьере.

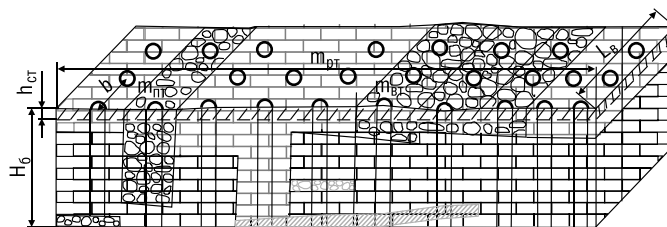


Рис. 3. Схема к определению параметров залегания геологических тел в границах взрывного блока

Fig. 3. A scheme for determining the parameters of the occurrence of geological bodies within the boundaries of the explosive block

Результаты исследований

Расчет потерь известняка производился за определенный период для каждого подготовленного к отработке за период блока (I квартал 2021 года – в примере на рис. 4). Расчет производился по разработанному алгоритму (формулы 1-12).

Результаты расчета потерь за I квартал 2021 года представлены в таблице 1 и на рисунке 4.

Таблица 1 / Table 1

Расчетные потери известняка по взрывным блокам на Чаньвинском карьере за I квартал 2021 года
Estimated limestone losses from explosive blocks at the Chanvin quarry for the first quarter of 2021

№ nn / Item no	№ блока / Block number	Потери, тыс. т / Losses, thousand tons	Коэффициент потерь, K_{π} / Loss coefficient, K_p	Объем продуктивной толщи в границах блока, тыс. т / The volume of productive thickness within the boundaries of the block, thousand tons	Объем засоряющих пород (ПВСГ - глина) в блоке, тыс. т (PVSg - clay) in the block, thousand tons
1	1644-1647	12,81	14,7	91,4	4,19
2	1672	27,28	53,9	60,6	10,53
3	1698	1,83	9,1	20,3	0,33
4	1704	22,86	22,3	105,5	3,28
5	1705	16,02	55,9	30,5	1,98
6	1709	7,12	24,6	29,1	0,37
7	1710	3,64	8,0	45,7	0,36
8	1711	8,43	20,8	40,6	0,33
9	1715	5,12	22,9	22,9	0,45
10	1717	8,32	32,0	26,2	0,14
11	1718	1,75	9,4	19,1	0,38
12	1721	2,98	11,5	26,7	0,65
По серии блоков / By a series of blocks		118,16	23,8	518,5	22,99

Заключение

Для сложноструктурных месторождений со сложными горно-геологическими условиями разработки и повышенным засорением массива ПИ сопутствующими породами в виде пропластков и карстовых зон, отличающихся неболь-

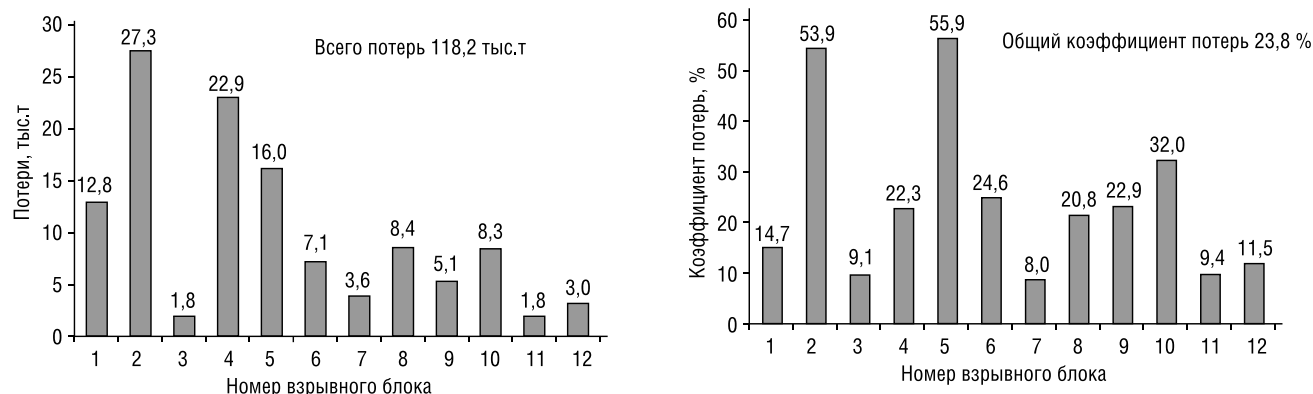


Рис. 4. Гистограмма изменения объемов потерь и коэффициента потерь известняка по взрывным блокам. Номера взрывных блоков: 1 - № блока 1644-1647; 2 - 1672; 3 - 1698; 4 - 1704; 5 - 1705; 6 - 1709; 7 - 1710; 8 - 1711; 9 - 1715; 10 - 1717; 11 - 1718; 12 - 1721

Fig. 4. Histogram of the change in the volume of losses and the coefficient of limestone losses by explosive blocks. Explosive block numbers: 1 - Block number 1644-1647; 2 - 1672; 3 - 1698; 4 - 1704; 5 - 1705; 6 - 1709; 7 - 1710; 8 - 1711; 9 - 1715; 10 - 1717; 11 - 1718; 12 - 1721

шой глубиной обработки и объемом добычи ПИ, является прямой метод расчетов потерь.

Прямой метод, основанный на непосредственных измерениях в натуре или по маркшейдерским планам и разрезам установленных контуров потеряннного ПИ при обработке зон с нечеткими контактами ПИ и засоряющих пород, является наиболее эффективным, но в большинстве случаев трудно-реализуемым.

Одним из современных методов оперативного и эффективного изучения участков месторождения с закарстованными зонами является геофизическое картирование (электрометрия и др.) массива ПИ, предназначенного к обработке, в комплексе с геоинформационными технологиями (ГИС). Этот метод позволяет своевременно обнаружить участки с повышенным засорением и предварительно оценить площадь и длину контактов ПИ – глина (карст), ПВСГ для учета потерь и планирования горных работ. Координаты и объемно-качественные характеристики обнаруженных засоренных участков заносятся в компьютерную базу данных соответствующих программных комплексов ГИС (Surpac и др.), с помощью которых моделируются зоны ПВСГ месторождения. На основе полученных моделей строятся планы и геологические разрезы обрабатываемого участка с контактами между зонами чистого и закарстованного ПИ (зоны

ПВСГ), далее по предложенной методике производится оценка потерь ПИ.

Для повышения достоверности контроля и анализа потерь на предприятии необходимо вести систематический учет фактических исходных данных, накапливать статистическую информацию об объемах потерь и разубоживания ПИ, длине контактов ПИ – глина (карст), ПВСГ, которая позволит определить (и постоянно уточнять) погрешность вычислений (измерений) для каждой выемочной единицы и более точно планировать потери ПИ [9-16].

Представленные в статье методологические положения по оценке сверхнормативных потерь полезного ископаемого при открытой разработке месторождений со сложными горно-геологическими условиями позволяют объективно оценить и спрогнозировать уровень потерь при обработке сложных забоев.

Методические положения реализованы в проекте АО «Институт «УРАЛГИПРОРУДА» по обработке Костанокского участка Чаньвинского месторождения известняков при оценке потерь известняка на верхних горизонтах карьера.

Совершенствование методов оценки фактических потерь ПИ при разработке сложноструктурных месторождений способствует повышению достоверности расчетных проектных потерь и большей объективности при списании балансовых запасов. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Федотова, Н. В. Изучение практики нормирования потерь и разубоживания / Н. В. Федотов, Л. М. Щербакова // Вестник Иркутского государственного технического университета. - 2010. - № 6 (46). - С. 95-98.
2. Голик, В. И. Влияние потерь и разубоживания на показатели эксплуатации месторождения / В. И. Голик, В. И. Камашенко, С. Г. Страданченко // Маркшейдерия и недропользование. - 2011. - № 5 (55). - С. 17-20.
3. Мечиков, О. С. Управление потерями и разубоживанием в сложноструктурных приконтактных зонах рудных залежей / О. С. Мечиков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2011. - № 9. - С. 52-57.
4. Шеховцов, В. С. Методика расчета проектных потерь и разубоживания руды при обработке слепых залежей / В. С. Шеховцов, В. О. Шеховцова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2012. - № 9. - С. 329-332.
5. Фомин, С. И. Анализ горно-геологических условий карьера и формирование выемочной единицы при определении нормативных потерь и разубоживания руды / С. И. Фомин, П. Б. Кава, М. А. Мариние // Записки Горного института. - 2014. - Т. 207. - С. 74-77.
6. Фомин, С. И. Оптимизация потерь и разубоживания руды при открытой разработке сложноструктурных карбонатных месторождений / С. И. Фомин, Чан Динб Бао // Маркшейдерия и недропользование. - 2016. - № 2 (82). - С. 58-60.
7. Лапшин, Н. С. Пути снижения потерь и разубоживания руды при открытой разработке рудных тел / Н. С. Лапшин // Новая наука: Стратегии и векторы развития. - 2016. - № 6-1 (88). - С. 31-34.

8. Кушнарев, П. И. Скрытые потери и разубоживание / П. И. Кушнарев // Золото и технологии. - 2017. - № 3 (37). - С. 82-87.
9. Методические основы нормирования потерь и разубоживания при добыче с учетом влияния на технологические показатели при обогащении / Г. С. Курчин, К. Е. Ананенко, И. В. Прокопьев [и др.] // Маркшейдерия и недропользование. - 2017. - № 6 (92). - С. 55-59.
10. Баракаева, И. Д. Совершенствование методов оценки разубоживания руд: дис. ... канд. техн. наук / И. Д. Баракаева. - Якутск: Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, 2011. - 160 с.
11. Квитка, В. В. Способ оптимальной отработки контактной зоны «руда - порода» / В. В. Квитка, С. И. Фомин, П. Б. Кава // Записки Горного института. - 2012. - Т. 197. - С. 165-168.
12. Hyongdoo, J. Decision support system of unplanned dilution and ore-loss in underground stoping operations using a neurofuzzy system / J. Hyongdoo // Journal Applied Soft Computing archive. - 2015. - Vol. 32. - P. 1-12.
13. Frank, U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges / U. Frank // Software & Systems Modeling. - 2014. - Vol. 13, № 3. - P. 941-962.
14. Matthews, T. Impoverishment and ore loss projections: Strategies and considerations / T. Matthews // SME Annual Conference and Expo and CMA 117th National Western Mining Conference. Mining: Navigating the Global Waters. - Denver., United States., 2015. - P. 529-532.
15. Leuangthong, O. Y. Deutsch Solved Problems in Geostatistics / O. Y. Leuangthong, K. D. Khan, V. Clayton. - Wiley, 2008. - 208 p.
16. Shatov, A. A. Potential Utilizations of Soda Production Wastes / A. A. Shatov, M. A. Dryamina, R. N. Badertdinov // Chemistry for Sustainable Development. - 2004. - Vol. 12. - P. 565-571.

REFERENCES

1. Fedotova NV., Shcherbakova LM. Study of the practice of rationing of losses and dilution. *Vestnik of Irkutsk state technical University*. 2010;6(46):95-98 (In Russ).
2. Golik VI, Kamashchenko VI, Stradanchenko SG. The Impact of losses and depletion on the performance of the field. *Surveying and subsoil use*. 2011;5(55):17-20 (In Russ).
3. Mechikov OS. Management of losses and dilution in complex structural contact zones of ore deposits. *Mining information and analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2011;(9):52-7 (In Russ).
4. Shekhovtsov VS, Shekhovtsova VO. Method of calculation of design losses and ore separation at working off of blind deposits. *Mining information and analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2012;(9):329-32 (In Russ).
5. Fomin SI, Kava PB, Marinie MA. Analysis of mining and geological conditions of the quarry and the formation of the dredging unit in determining the normative losses and dilution of ore. *Notes of the Mining Institute*. 2014;207:74-7 (In Russ).
6. Fomin SI, Chan Dingb Bao. Optimization of ore loss and dilution in open-pit development of complex carbonate deposits. *Surveying and subsoil use*. 2016;2(82):58-60 (In Russ).
7. Lapshin NS. Ways to reduce losses and dilution of ore in the open development of ore bodies. *New science: Strategies and vectors of development*. 2016;6-1(88):31-4 (In Russ).
8. Kushnarev PI. Hidden losses and dilution. *Gold and technology*. 2017;3(37):82-7 (In Russ).
9. Kurchin GS, Ananenko KE, Prokopyev IV, et al. Methodical bases of rationing of losses and dilution at production taking into account influence on technical and logical indicators at enrichment. *surveying and subsoil use*. 2017;6(92):55-9 (In Russ).
10. Barakaeva ID. Improvement of methods of ore dilution estimation. Yakutsk.: Institute of mining of the North. N. V. Chersky SB RAS, 2011.
11. Kvitka VV, Fomin SI, Kava PB. The method of optimal working out of the contact zone «ore - rock». *Notes of the Mining Institute*. 2012;197:165-68 (In Russ).
12. Hyongdoo J. Decision support system of unplanned dilution and ore-loss in underground stoping operations using a neurofuzzy system. *Journal Applied Soft Computing archive*. 2015;32:1-12.
13. Frank U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges. *Software & Systems Modeling*. 2014;13(3):941-62.
14. Matthews T. Impoverishment and ore loss projections: Strategies and considerations. SME Annual Conference and Expo and CMA 117th National Western Mining Conference. *Mining: Navigating the Global Waters. Denver, United States*. 2015:529-32.
15. Leuangthong OY, Daniel Khan KD., Clayton V. Deutsch Solved Problems in Geostatistics. Wiley, 2008.
16. Shatov AA, Dryamina MA, Badertdinov RN. Potential Utilizations of Soda Production Wastes. *Chemistryfor Sustainable Development*. 2004;(12):565-71.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ



Кантемиров Валерий Данилович:
кандидат технических наук,
заведующий,
лаборатория управления качеством минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН,
г. Екатеринбург, Россия,
e-mail: ukrkant@mail.ru,
ORCID 0000-0001-6486-2740

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kantemirov Valery Danilovich:
Ph.D.,
Quality management laboratory chief,
Institute of Mining of Ural branch of RAS.
Yekaterinburg city, Russia,
e-mail: ukrkant@mail.ru,
ORCID 0000-0001-6486-2740



Титов Роман Сергеевич:
старший научный сотрудник,
лаборатория управления качеством минерального
сырья,
Институт горного дела УрО РАН,
г. Екатеринбург, Россия,
e-mail: ukr07@mail.ru,
ORCID 0000-0002-3569-2743

Titov Roman Sergeevich:
senior researcher,
Quality management laboratory, Institute of Mining
of Ural branch of RAS,
Yekaterinburg city, Russia,
e-mail: ukr07@mail.ru,
ORCID 0000-0002-3569-2743



Яковлев Андрей Михайлович:
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория управления качеством минерального
сырья,
Институт горного дела УрО РАН,
г. Екатеринбург, Россия,
e-mail: quality@igduran.ru,
ORCID 0000-0001-8285-6387

Yakovlev Andrei Michailovich:
Ph.D.,
senior researcher,
Quality management laboratory,
Institute of Mining of Ural branch of RAS,
Yekaterinburg city, Russia,
e-mail: quality@igduran.ru,
ORCID 0000-0001-8285-6387

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.



ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Начало подготовки геологических кадров в городе Иркутске относится к 1919 году, когда был открыт кабинет геологии. Самостоятельно геологический факультет был открыт в 1949 г. Выпускники факультета работают в геологических организациях, вузах и академических институтах, выполняя обязанности начальников геологических управлений, главных геологов, начальников отделов, экспедиций и партий, директоров, руководителей секторов и лабораторий научно-исследовательских институтов. Студенты факультета имеют возможность посещать спортивные залы, участвовать в общественной жизни, заниматься искусством, принимать участие в конкурсах, олимпиадах, КВН, студенческих вечерах отдыха.

КАФЕДРЫ

- динамической геологии
- полезных ископаемых
- геологии нефти и газа

ЛАБОРАТОРИИ

- нефтегазопроисковой геохимии
- геоинформационных технологий
- физики нефтяного и газового пласта
- учебная лаборатория бурения скважин
- камнерезная мастерская
- петрографический кабинет
- современных лабораторных методов исследований в динамической и инженерной геологии



Адрес: 664003, г. Иркутск, ул. К.Маркса, 1, Иркутский государственный университет Геологический факультет.
Приёмная комиссия: тел. (3952) 521-564, e-mail: masha-po2010@mail.ru

WWW.N-GN.RU

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЙТИНГОВЫХ КЛАССИФИКАЦИЙ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ПЛАТО РАСВУМЧОРР» (РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ)

Н. М. Яковлев,

КФ АО «Апатит», г. Кировск, Россия;

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Россия

Аннотация: Приведены основные системы классификаций горного массива, разработанные для решения задач горнодобывающей отрасли. Отдельно отмечены наиболее применяемые в классификациях параметры горного массива. На основании произведенного анализа выбрана и описана методика определения рейтинга массива горных пород по классификации профессора Д. Лобшира (MRMR) в условиях применения системы разработки подэтажного принудительного обрушения с торцевым выпуском руды при отработке запасов месторождения «Плато Расвумчорр». Показано, что для успешного применения системы разработки подэтажного принудительного обрушения требуется комплексный учет всех горно-геологических факторов и корректный расчет достаточной площади подреза для обеспечения плавного протекания процесса обрушения вышележащего массива с образованием полости для высвобождения горной массы, а увеличение отрезных секций будет способствовать развитию процесса обрушения.

Ключевые слова: классификация, Rock mass rating (RMR), Mining Rock Mass Rating (MRMR), массив горных пород, обрушаемость, подэтажное обрушение, геомеханика, гидравлический радиус, устойчивость.

Благодарности: Автор выражает благодарность коллективу сотрудников УРГР и УГИ КФ АО «Апатит» за проявленный интерес к теме исследования. Отдельно автор выражает особую благодарность своему научному руководителю — руководителю отдела «Геомеханики» Горного института КНЦ РАН кандидату технических наук Инне Эриковне Семеновой за значимые замечания и ценные советы при проведении исследования и оформлении статьи.

Для цитирования: Яковлев Н. М. Применение рейтинговых классификаций для обоснования системы разработки месторождения «Плато Расвумчорр» (Российская Федерация) // Маркшейдерия и недропользование. 2024. № 3. С. 34–41. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_34_41.

APPLICATION OF RATING CLASSIFICATIONS TO SUBSTANTIATE THE DEVELOPMENT SYSTEM OF THE PLATO RASVUMCHORR DEPOSIT (RUSSIA)

N. M. Yakovlev,

Kirovsk branch of «Apatit», Kirovsk, Russia

Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract: The article presents the main classification systems of the rock massif, developed to solve the problems of the mining industry. The parameters of the rock massif that are most used in classifications are marked separately. Based on the analysis performed, a method for determining the rating of a rock mass according to the classification of Professor Dennis Laubscher (MRMR) was selected and described under the conditions of using a sublevel caving method during the development of reserves of the Plato Rasvumchorr deposit. It is shown that for the successful application of the sublevel caving method, a comprehensive account of all mining and geological factors is required and a correct calculation of a sufficient undercut area to ensure a smooth flow of the process of collapse of the overlying massif with the formation of a cavity for the release of rock mass, and an increase in the cutting sections will contribute to the development of the collapse process.

Keywords: classification, Rock mass rating (RMR), Mining Rock Mass Rating (MRMR), rock massif, collapsibility, sublevel caving, geomechanics, hydraulic radius, stability.

Acknowledgments: The author expresses gratitude to the staff of the URGR and UGI Kirovsk branch of «Apatit» for their interest in the research topic. Separately, the author expresses special gratitude to his scientific supervisor, Candidate of Technical Sciences, head of the Geomechanics Department of the Mining Institute of the KSC RAS Semenova Inna Erikovna for significant comments and valuable advice during the research and design of the article.

For citation: Yakovlev N. M. Application of rating classifications to substantiate the development system of the Plato Rasvumchorr deposit (Russia). Surveying and subsoil use. 2024;(3):34–41. (In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_3_34_41.

Массив горных пород как объект исследования характеризуется определенным набором физико-механических свойств, различных по качественным и количественным характеристикам. Для того чтобы систематизировать и обобщить имеющиеся сведения о строении массива, разработаны системы рейтинговых классификаций

массивов горных пород, позволяющие решать актуальные геотехнологические и геомеханические задачи горнодобывающей отрасли.

Основные системы классификаций горного массива, разработанные для проектирования подземных горных работ и подземных сооружений, представлены в *таблице 1*.

Таблица 1 / Table 1

Системы классификаций массива горных пород
Rock mass classification systems

Классификация / Classification	Автор, год создания [17] / Author, year of creation	Страна / Country	Область применения / Area of application	Используемые параметры / Used parameters
Теория горных пород	Терцаги, 1946	США	Тоннелестроение	H_p - коэффициент нагрузки горных пород, B - ширина тоннеля, H_t - высота разрыхленной горной массы над сводом выработки
Время простоя	Лофер, 1958	Австрия	Тоннелестроение	L - активный пролет, t - время простоя, u_f - допустимое смещение и механические характеристики горных пород (модуль Юнга, коэффициент Пуассона)
Показатель качества породы (RQD)	Дир, 1964	США	Описание качества керна, извлеченного из скважины	$\sum$ sum of length of core pieces >100 mm - сумма длин частей керна больше 100 мм, I_{tot} core run - общая длина керна
Рейтинг структуры горных пород (RSR)	Викхем, 1972	США	Описание качества горной массы и соответствующей крепи, в частности, стально-реберной крепи, разработанной Викхемом	A - параметр геологии, B - параметр влияния трещин по отношению к их направлению, C - параметр влияния притока грунтовых вод
Новоавстрийский тоннельный метод (NATM)	Рабцевич, 1964/65 и 1975	Австрия	Проходка тоннелей в избыточно напряженных породах	NATM состоит из 7 элементов: 1. Использование прочности естественного скального массива. 2. Набрызгбетонная защита. 3. Измерение и мониторинг. 4. Гибкая опора. 5. Закрытие обратного свода. 6. Конструкции системы поддержки. 7. Классификация горных пород от очень твердых до очень мягких.
Геомеханическая классификация Бенявского (RMR)	Бенявский, 1974	ЮАР	Тоннели, шахты, фундаменты и т. д.	1. Прочность массива на одноосное сжатие ($\sigma_{сж}$). 2. Показатель качества породы (RQD). 3. Расстояние между трещинами. 4. Состояние трещин. 5. Состояние грунтовых вод. 6. Ориентация трещин
Классификация Бартон (Q-system или NGI)	Бартон (Норвежский геофизический институт), 1974	Норвегия	Тоннели, камеры большого пролета	1. Показатель качества породы (RQD). 2. J_n - показатель количества систем трещин. 3. J_f - показатель шероховатости поверхности трещин. 4. J_a - показатель измененности трещин. 5. J_w - показатель обводненности пород. 6. SRF - фактор снижения напряжений
Классификация Лобшира и Тейлора (MRMR)	Лобшир и Тейлор, 1976	ЮАР	Горная инженерия	1. RMR. 2. K - коэффициенты, учитывающие выветривание, ориентацию трещин, напряжения в массиве, воздействие взрывных работ, наличие подземных водоприитоков
Основное геотехническое описание (BGD)	ISRM, 1981		Для общего использования	1. Название породы с упрощенным геологическим описанием. 2. Предел прочности на сжатие угол трения трещин ($\sigma_{сж}$ и τ). 3. Мощность слоя и пересечение трещин в массиве горных пород
Прочность скального массива (RMS)	Стиле и другие, 1982	Швеция	Для общего использования (модифицированный RMR)	Включает в себя первые пять параметров RMR. Условия нагружения и поле начальных напряжений не учитываются, что означает, что RMS является классификацией по прочности
Индекс геологической прочности (GSI)	Хок и другие, 1995	ЮАР	Шахты, тоннели	σ_1' - максимальная компонента главных напряжений; σ_3 - минимальная компонента главных напряжений; $\sigma_{сж}$ - предел прочности породы в образце при испытании на одноосное сжатие; mb, s, a - эмпирические параметры критерия прочности Хока - Брауна, зависящие от геологической структуры породного массива
Количество горной породы (N)	Гозль и другие, 1995	Индия	Для общего использования (Q-system без напряжений)	1. Показатель качества породы (RQD). 2. J_n - показатель количества систем трещин. 3. J_f - показатель шероховатости поверхности трещин. 4. J_a - показатель измененности трещин. 5. J_w - показатель обводненности пород
Индекс горной массы (Rmi)	Палмстрем, 1995	Норвегия	Горная инженерия	$\sigma_{сж}$ - прочность на одноосное сжатие неповрежденной породы, измеренная на образцах диаметром 50 мм, JP - параметр трещиноватости

По частоте применения в классификационных системах горного массива можно выделить следующие параметры: предел прочности породы на одноосное сжатие, параметры трещиноватости массива (расстояние между трещинами, ориентация трещин), показатель качества породы RQD [18]. Реже классификации включают параметры, характеризующие: выветривание пород, наличие водопритоков, нарушенные и ослабленные зоны (табл. 1).

Следует отметить, что приведенные системы классификаций делают различный акцент на определенных параметрах, поскольку цель и область применения у каждой классификации различны. Например, геомеханическая классификация проф. З. Т. Бенявского RMR (Rock mass rating) является одной из наиболее известных и общепризнанных геомеханических классификаций в мире (она также известна как CSIR (Южноафриканский совет научных и промышленных исследований) [17]. Идеи проф. З. Т. Бенявского получили дальнейшее развитие в работах Е. Хока, Е. Брауна, А. Палмстрема [9, 10, 12, 13, 17], а также при разработке геомеханической классификации проф. Д. Лобшира (Mining Rock Mass Rating или MRMR) [1, 2, 14-16].

Параметры для расчета значения MRMR аналогичны тем, которые используются в системе RMR проф. Бенявского. Это может сбивать с толку, поскольку некоторые параметры в системе MRMR изменены, например, параметр состояния, который включает наличие и давление подземных вод в системе MRMR, тогда как подземные воды являются отдельным параметром в системе RMR проф. Бенявского. Количество классов для параметров и детализация описания параметров также более обширны, чем в системе RMR проф. З. Т. Бенявского [16].

Также стоит обратить внимание на предложенный Диром в 1964 году критерий устойчивости массива RQD (Rock quality designation), который используется при подсчете рейтинговых показателей в вышеперечисленных геомеханических классификациях. Таким образом, RQD образует базовый элемент в некоторых из наиболее часто используемых систем классификации массивов горных пород: рейтинговой системе горных пород (RMR), горном рейтинге массива горных пород (MRMR) и Q-system Бартон.

Материал и методы исследования

На сегодняшний день для определения рейтинга массива горных пород и выявления склонности горных пород к обрушению наиболее используемой является геомеханическая классификация проф. Д. Лобшира — MRMR (Mining Rock Mass Rating), которая используется при составлении проектов крепления, диаграмм зон обрушения, расчета устойчивости целиков, обосновании порядка ведения горных работ, определения степени обрушаемости и дробимости и т. д. [1-3].

По мнению автора статьи, определение рейтинга массива горных пород по классификации проф. Д. Лобшира может помочь в оценке эффективности применения системы разработки с обрушением апатит-нефелиновых руд на месторождениях Хибинской апатит-нефелиновой дуги, а именно выявить склонность пород к обрушению на разных участках месторождений.

Применение системы разработки подэтажного принудительного обрушения зависит от физико-механических свойств горных пород, а также показателей трещиноватости массива и параметров рудных тел, глубины ведения горных работ (рис. 1). Определяющим фактором является и уровень действующих напряжений, что особенно важно в условиях выраженного тектонического сжатия пород на Хибинских месторождениях.

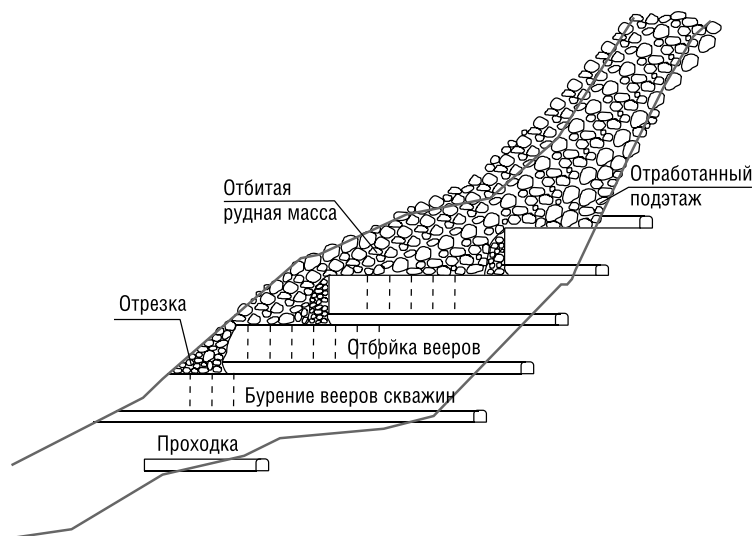


Рис. 1. Система разработки подэтажного принудительного обрушения с торцевым выпуском руды

Fig. 1. Sublevel caving mining method

С учетом вышеизложенного, для определения рейтинга массива горных пород используется геомеханическая классификация «Горный рейтинг массива горных пород» (Д. Лобшир), которая основывается на рейтинговой системе Бенявского (RMR) с использованием дополнительных параметров, таких как исходный уровень напряжений в нетронутом массиве, техногенный уровень напряжений, а также влияние БВР, смерзаемости пород, водопритоков и выветривания. Схема к определению рейтингового показателя массива на основе этой геомеханической классификации показана на рисунке 2.

Определение рейтинга MRMR выражается формулой

$$MRMR = RMR \times K, \quad (1)$$

$$RMR = R_{RBS} + J_s + J_c, \quad (2)$$

где R_{RBS} — прочность породного блока; J_s — рейтинг по количеству трещин; J_c — рейтинг условий трещиноватости; K — коэффициенты, учитывающие выветривание, ориентацию трещин, напряжения в массиве, взрывание, наличие подземных водопритоков.

Составляющая рейтинга RBS в породном массиве для условий месторождения «Плато Расвумчорр» (в строении массива присутствуют крутопадающие и наклонные дайки, зоны гипергенных изменений и разуплотнений пород и другие элементы нарушения однородности массива пород.)

$$RBS = IRS \times 0,8 \times K, \quad (3)$$

где K — коэффициент корректировки IRS, доли единиц.

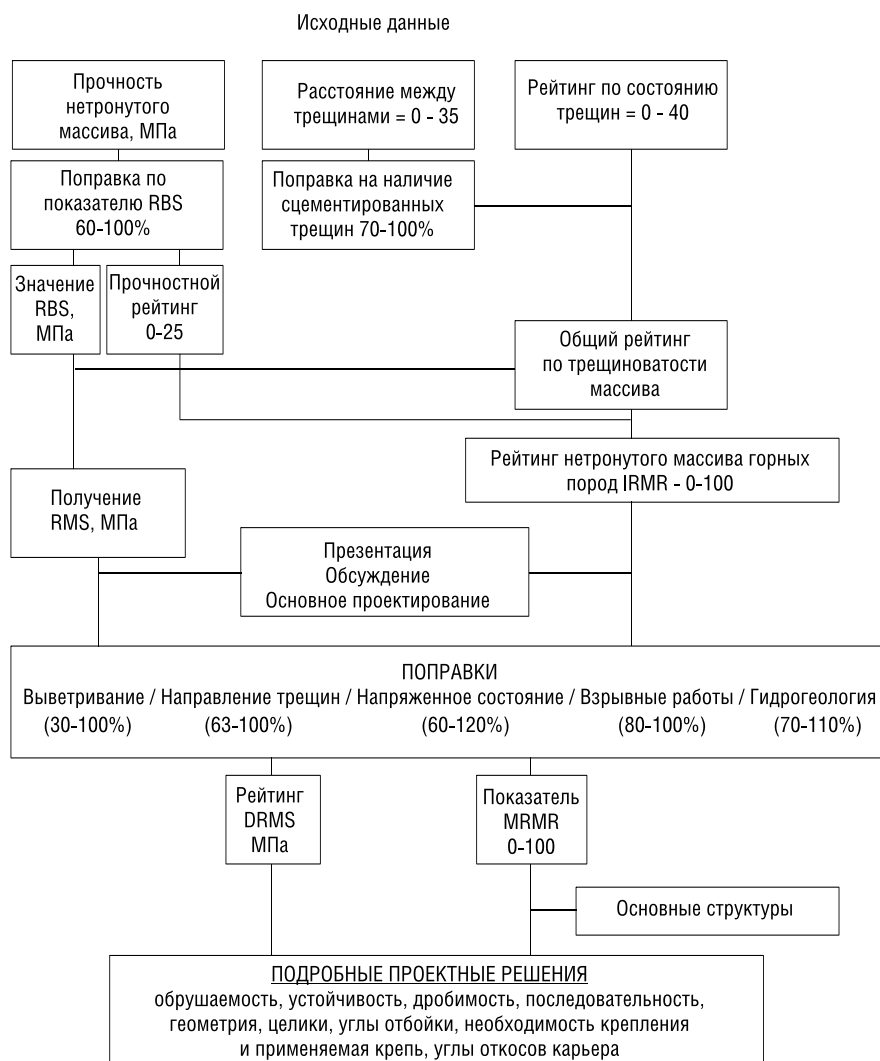


Рис. 2. Блок-схема к определению показателя MRMR согласно классификации проф. Д. Лобшира [2, 3, 8]

Fig. 2. Block diagram for determining the MRMR according to the classification of prof. D. Laubscher [2, 3, 8]

Согласно используемым в классификации поправкам на состояние массива (выветривание, ориентация трещин, напряжения, методы взрывных работ, гидрогеология) являются более важными характеристиками, которые отличают MRMR от других геомеханических классификаций, приведенных в *таблице 1*: RMR, R_{Mi}, GSI.

Результаты

Для оценки геомеханического состояния массива горных пород и применимости системы разработки с обрушением руды и вмещающих пород на месторождении «Плато Расвумчорр» (РФ) использованы следующие данные.

Согласно В. Н. Титову, на месторождении выявлено четыре системы трещин [6].

По имеющимся геомеханическим характеристикам керна [5, 6] можно разделить горные породы на три преобладающих литотипа:

1) рисчорриты и ийолит-уртиты-малиньиты-луявриты; $RQD = 81-100$, $RQD_{cp} = 87$;

2) нефелиновые руды, рудная брекчия, сфен-апатитовые руды и апатит, содержащие ийолит-уртиты, залегающие в руде и вблизи нее: $RQD = 48-70$, $RQD_{cp} = 51$;

3) массивные уртиты и позднемагматические неравномернозернистые и сред-незернистые полевошпатовые уртиты, $RQD = 90-100$, $RQD_{cp} = 96$.

Процедура определения числового показателя RQD приведена в *таблице 2*.

Таблица 2 / Table 2

Взаимосвязь между RQD и качеством горной породы (Дир, 1964) Correlation between RQD and rock mass quality (Deere, 1964)

Значение RQD , % / RQD value, %	Качество горной породы / Rock quality
<25	Очень слабая
25-50	Слабая
50-75	Средняя
75-90	Крепкая
90-100	Очень крепкая

Таким образом, на основании имеющихся геомеханических данных по керну, можно сделать вывод, что уровень RQD для апатит-нефелиновых руд месторождения Плато

Расвумчорр составляет в среднем 51, для вмещающих пород – 87-96, что соответствует среднему и крепкому (очень крепкому) показателю крепости горной породы.

Средняя прочность пород на сжатие для определения рейтинга $MRMR$ принята в 150 МПа. Этот показатель соответствует обобщенному показателю предела прочности вмещающих пород и руд по имеющимся инженерно-геологическим данным [6]. Таким образом, $IRS = 150$ МПа – прочность нетронутого массива (Intact Rock Strength).

Трещины заполнены материалом с крепостью по шкале Мооса 3. Следовательно, инверсия – 0,33 (табл. 3). $FF/m = M_{mp} = 2$. Получаем значение «инверсия крепости $\times FF/m$ » = $0,2 \times 2 \approx 0,4$.

Таблица 3 / Table 3

Таблица к определению показателя инверсии по шкале Мооса / Table for determining the inversion index on the Mohs scale

Заполнитель / Filler	Тальк, молибден / Talc, molybdenum	Гипс, хлорит / Gypsum, chlorite	Кальцит, ангидрид / Calcite, anhydrite	Флюорит, халькопирит / Fluorite, chalcopyrite	Апатит / Apatite
Коэффициент крепости наполнителя / Filler strength coefficient	1	2	3	4	5
Инверсия / Inversion	1,0	0,5	0,33	0,25	0,2

По номограмме корректировки прочности (рис. 3) имеем $k \approx 0,9$.

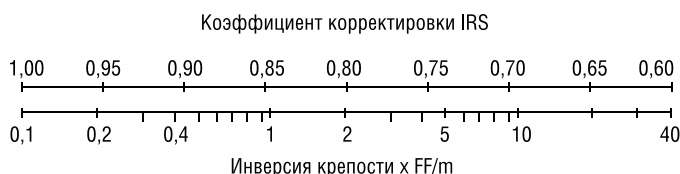


Рис. 3. Номограмма корректировки прочности нетронутого массива с учетом крепости руды и густоты трещин [1, 2]

Fig. 3. Nomogram for adjusting the strength of an intact massif, taking into account the strength of the ore and the density of joints

Таким образом, прочность породного блока составляет:

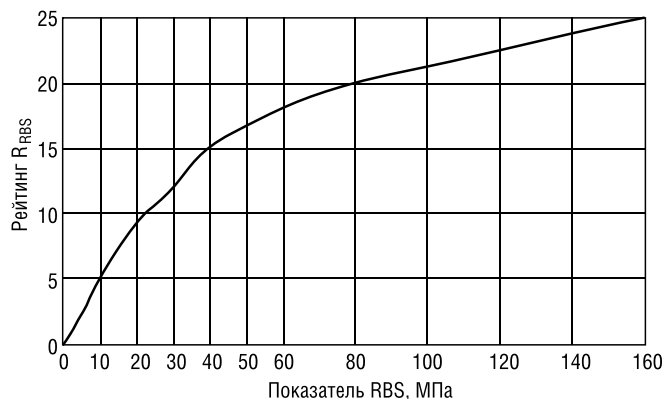
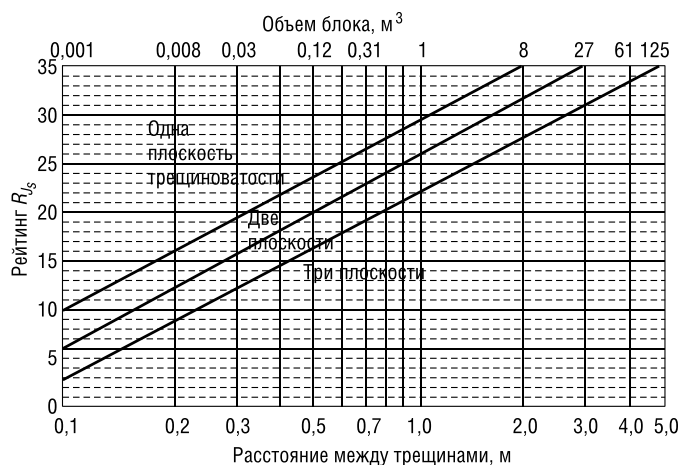
$$RBS = IRS \times 0,8 \times K, RBS = 150 \times 0,8 \times 0,9 = 108 \text{ МПа.} \quad (4)$$

Далее по графику на рисунке 4 находится составляющая рейтинга $RMR - R_{RBS}$.

J_S – рейтинг по количеству трещин, определяется по графику на рисунке 5. Среднее расстояние между трещинами составляет 0,5 м. Массив горных пород представлен трещинами, включающими четыре системы трещин. Согласно рисунку 5, рейтинг J_S составляет 16.

J_S – рейтинг условий трещиноватости, который определяется по формуле

$$J_c = 40 \times \frac{A}{100} \times \frac{B}{100} \times \frac{C}{100} \times \frac{D}{100} \times \frac{E}{100}. \quad (5)$$

Рис. 4. Определение рейтинга R_{RBS} прочности породного блока [2, 3, 8]Fig. 4. Determination of the strength rating of the rock block (R_{RBS})Рис. 5. Рейтинг трещиноватости массива J_S [2, 3, 8]Fig. 5. Joint spacing rating (J_S)

Согласно приведенной формуле (5), максимальное значение J_c равно 40, но оно подлежит корректировке с помощью поправочных коэффициентов AE , представленных в таблице 4. При сопоставлении табличной информации и горно-геологических условий рассматриваемого участка рассчитывается итоговый рейтинг условий трещиноватости, представленный в формуле (6).

Трещины – кривые ($A = 90\%$), стенки – шероховатые волнистые ($B = 80\%$), заполнены мелкокусковым материалом, крепостью заполнителя 1 (по шкале Мооса).

$$J_c = 40 \times \frac{100}{100} \times \frac{80}{100} \times \frac{75}{100} \times \frac{60}{100} \times \frac{95}{100} = 40 \times 1 \times 0,8 \times 0,75 \times 0,6 \times 0,95 = 13,7. \quad (6)$$

Для вычисления рейтинга $MRMR$ необходимо умножить рейтинг RMR на соответствующие коэффициенты. Таким образом, получив данные по прочности и трещиноватости массива, можно вычислить Rock mass rating:

$$RMR = 22 + 16 + 13,7 = 51,7\%. \quad (7)$$

Гидрогеология – 0,95, метод отбойки – 0,94, выветривание – 1, общая поправка 0,89 вычисляются согласно [1, 2], таким образом, исходя от горно-геологической обстановки месторождения, показатель $K = 0,89$.

Таблица 4 / Table 4

Поправочные коэффициенты по показателю JC [1, 2]
Adjustment coefficients for the JC index

А. Крупномасштабное влияние трещин/ Large-scale joint expression					100
Разнонаправленные волнообразные/ Wavy-multidirectional					95
Однонаправленные волнообразные/ Wavy-unidirectional					90
Кривые / Curved					85
Слегка волнообразные или прямые/ Straight, slight undulation					85
В. Небольшие расстояния между трещинами 200 × 200 мм / Small-scale joint expression (200 mm × 200 mm)					95
Неровные выступы/нерегулярные / Rough stepped/irregular					90
Плавные выступы / Slickensided stepped					85
Гладкие выступы / Smooth stepped					80
Шероховатые волнистые / Rough undulating					75
Гладкие и шероховатые / Smooth undulating					70
Плавные шероховатые / Slickensided undulating					65
Шероховатые плоские/ Rough planar					60
Плавные плоские / Smooth planar					55
Гладкие / Polished					55
С. Стенки трещин деформированы и слабее, чем породы и заполнитель / Joint wall alteration weaker than sidewall and filling					75
D. Раздувы / Gouge					60
Толщина < протяженности/ Thickness < amplitudes					30
Толщина > протяженности/ Thickness > amplitudes					30
Е. Цементированные наполненные трещины (порода прочнее заполнителя трещин) / Cemented/filled joints - cement weaker than wall rock:					
Крепость заполнителя	5	4	3	2	1
Значение коэффициента	95	90	85	80	75

Таблица 5 / Table 5

Классификация пород по методике проф. Д. Лобшира/
Classification of rock mass according to the method of prof. D.Laubscher

Класс/рейтинг MRMR / MRMR class/rating	5/5-20	4/21-40	3/41-60	2/61-80	1/81-100
Устойчивость (обрушаемость)/ Sustainability(cavability)	Очень низкая (очень высокая)/ Very low (very high)	Низкая (высокая) / Low (high)	Средняя (средняя) / Average (average)	Высокая (низкая) / High (low)	Очень высокая (очень низкая) / Very high (very low)

Следовательно, получаем значение *MRMR*:

$$MRMR=51,7 \times 0,89=41,16. \quad (8)$$

В таблице 5 приведена классификация пород по устойчивости согласно методике проф. Д. Лобшира.

Исходя из выполненных расчетов выясняется, что горные породы месторождения «Плато Расвумчорр» принадлежат к третьему классу по методике проф. Д. Лобшира и имеют среднюю устойчивость (среднюю обрушаемость). Средняя устойчивость подтверждается наличием в массиве зон тектонических нарушений и геологических ослаблений (массив не монолитный).

Успешное применение системы разработки подэтажного принудительного обрушения при отработке запасов месторождения «Плато Расвумчорр» подземным способом зависит от способности вышележащего массива горных пород обрушаться, когда выемка руды создает подрез. По мнению проф. Д. Лобшира, все горные массивы обрушаются, но способ обрушения горных пород и результирующее распределение размеров отделяемых фрагментов необходимо предсказать, если мы хотим успешно реализовать подземную разработку. Полость зависит от состояния горного массива и связанного с ним гидравлического радиуса [16].

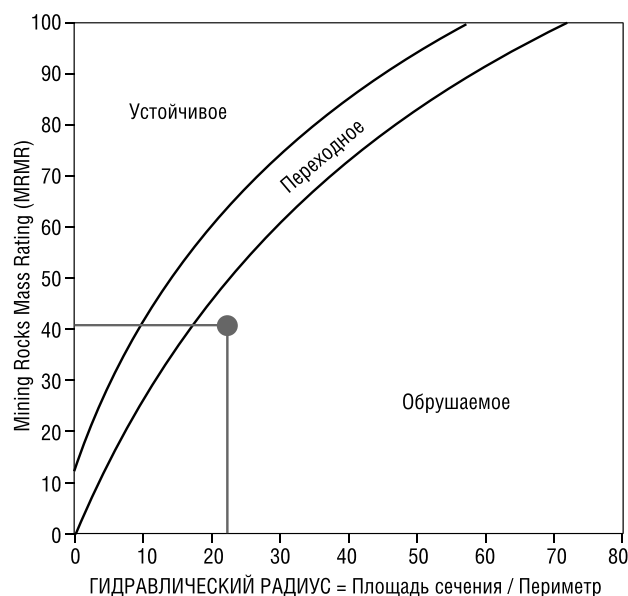


Рис. 6. График к определению гидравлического радиуса по показателям MRMR проф. Д. Лобшира (1994 г.)

Fig. 6. Graph for the determination of the hydraulic radius according to the MRMR indicators by prof. D. Laubscher (1994)

Гидравлический радиус определяется соотношением площади сечения ($S_{o.n.}$) очистного пространства к его периметру ($P_{o.n.}$), то есть:

$$HR = \frac{S_{o.n.}}{P_{o.n.}}, \text{ м.} \quad (9)$$

$$S_{o.n.} = 0,5 \times 20 (4,4 + 16) = 164,4 \times 4 = 657,6 \text{ м}^2. \quad (10)$$

$$P_{o.n.} = 2 \times (4,4 + 20) = 28,8 \text{ м.} \quad (11)$$

Таким образом, для одной ромбовидной секции:

$$HR = \frac{657,6}{28,8} = 22,8, \text{ м.} \quad (12)$$

Как видно из рисунка 6, очистное пространство в условиях месторождения «Плато Расвумчорр» находится в обрушаемом состоянии, что должно обеспечить эффективность применения системы разработки подэтажного принудительного обрушения.

Заключение

Использование классификации профессора Д. Лобшира показало склонность к обрушаемости пород для условий месторождения «Плато Расвумчорр» (3-й класс – средняя обрушаемость).

Обоснование эффективного применения системы разработки подэтажного принудительного обрушения требует комплексного учета основных горно-геологических факторов и корректный расчет достаточной площади подреза для обеспечения плавного протекания процесса обрушения вышележащего массива с образованием полости для высвобождения горной массы, при этом увеличение отрезных секций будет способствовать развитию процесса обрушения.

Одним из направлений дальнейших исследований автора является учет действующих на месторождении напряжений и скоростей их изменения, которые влияют на развитие деформаций, особенно при интенсификации ведения очистных работ. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. *Jacubec, J.* The MRMR rock mass rating classification system in mining practice / J. Jacubec, D. H. Laubscher. - Brisbane, 2000. - P. 413-421.
2. *Laubscher, D. H.* The MRMR Rock Mass Classification for jointed rock masses. Foundations for Design / D. H. Laubscher, J. Jacubec. - Brisbane, 2000. - P. 475-481.
3. *Кузьмин, Е. В.* Рейтинговые классификации массивов скальных пород: предпосылки создания, развитие и область применения / Е. В. Кузьмин, А. Р. Узбекова // ГИАБ. - 2004. - № 4. - С. 201-202.
4. *Кузьмин, Е. В.* Рейтинговые классификации массивов горных пород и их практическое применение / Е. В. Кузьмин, А. Р. Узбекова // ГИАБ. - 2005. - № 5. - С. 181-185.
5. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения) / КФ АО «Апатит». - Апатиты-Кировск, 2021. - 96 с.
6. Отчёт о результатах выполненных работ по объекту «АО «Апатит»: месторождение «Плато Расвумчорр». Изучение геолого-структурного строения и инженерно-геологических условий массива горных пород в разрезах 21-12В" / АО «Апатит», АО «МГРЭ». - Апатиты, 2016. - 181 с.
7. *Суханова, А. А.* Определение рейтинга массива горных пород по геомеханической классификации MRMR для условий месторождения Жолымбет / А. А. Суханова, Г.Т. Камбетова // Молодой ученый. - 2020. - № 14. - С. 130-133.
8. *Губинский, Н. О.* Определение рейтинга массива горных пород по геомеханической классификации Д. Лобшира для условий алмазного месторождения / Н. О. Губинский // Вестник МГТУ. - 2009. - Т. 12, № 4. - С. 694-701.
9. *Кузьмин, Е. В.* Опыт использования геомеханических классификаций в зарубежной практике / Е. В. Кузьмин, А. Р. Узбекова // ГИАБ. - 2003. - С. 94-95.
10. *Aksoy, C. O.* Review of rock mass rating classification: historical developments, applications, and restrictions / C. O. Aksoy // Journal of Mining Science. - 2008. - Vol. 44, № 1. - P. 51-63.
11. *Hoek, E.* Rock Slope Engineering / E. Hoek, J. W. Bray. - 3rd ed. - London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981. - 358 p.
12. *Brady B.* Rock Mechanics for Underground mining / B. Brady, E. Brown. - 3rd ed. - Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004. - 688 p.
13. *Казак, О. О.* Обоснование принципов районирования (классификации) породных массивов по трудности их разработки / О. О. Казак, О. Г. Латышев // Известия УГТУ. - 2022. - Вып. 1 (65). - С. 81-85.
14. *Laubscher, D. H.* Geomechanics classification of jointed rock masses - mining applications / D. H. Laubscher // Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A, Mining industry. - London. 1977. - P. 1-8.
15. *Laubscher, D. H.* A geomechanics classification system for rating of rock mass in mine design / D. H. Laubscher // Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. - 1990. - Vol. 90, № 10. - P. 257-273.
16. *Laubscher, D. H.* Cave mining - the state of art / D. H. Laubscher // Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. - 1994. - 94(10). - P. 279-293.
17. *Palmström, A.* On classification systems / A. Palmström // Proceedings of Workshop on Reliability of Classification Systems a Part of the International Conference «GeoEng-2000». - Melbourne, 2000. - P. 1-4.
18. *Deere, D. U.* The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice / D. U. Deere, D. W. Deere // Rock Classification Systems for Engineering Purposes, ASTM STP 984, Louis Kirkaldie, Ed., American Society for Testing and Materials. - Philadelphia, 1988. - P. 91-101.

REFERENCES

1. Jucubec J, Laubscher DH. The MRMR rock mass rating classification system in mining practice. Brisbane;2000.
2. Laubscher DH, Jucubec J. The MRMR Rock Mass Classification for jointed rock masses. Foundations for Design. Brisbane; 2000.
3. Kuzmin EV, Uzbekova AR. Rating classifications of rock massifs: prerequisites for creation, development and field of application. *GIAB*. 2004;4:201-202 (In Russ.).
4. Kuzmin EV, Uzbekova AR. Rating classifications of rock massifs and their practical use. *GIAB*. 2005;5:181-185 (In Russ.).
5. Kirovsk branch of «Apatit». Instructions on the safe conduct of mining operations in deposits prone and dangerous to rock bursts (Khibiny apatite-nepheline deposits). Apatity-Kirovsk; 2021 (In Russ.).
6. JSC «Apatit», JSC «MGRE». Report on the results of work performed on the object «JSC «Apatit»: Plato Rasvumchorr deposit. Study of the geological and structural structure and engineering-geological conditions of the rock mass in sections 21-12B. Apatity; 2016 (In Russ.).
7. Sukhanova AA, Kambetova GT. Determination of the rating of the rock mass according to the geomechanical classification MRMR for the conditions of the Zholymbet deposit. *Young Scientist*. 2020;14:130-133 (In Russ.).
8. Gubinskiy NO. Determination of the rating of the rock mass according to the geomechanical classification of D. Laubscher for the conditions of the diamond deposit. *Bulletin of MSTU*. 2009;12(4): 694-701 (In Russ.).
9. Kuzmin EV, Uzbekova AR. The experience of using geomechanical classifications in foreign practice. *GIAB*. 2003. 94-95. (In Russ.).
10. Aksoy CO. Review of rock mass rating classification: historical developments, applications, and restrictions. *Journal of Mining Science*. 2008;44(1):51-63.
11. Hoek E, Bray JW. Rock Slope Engineering. 3rd ed. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981.
12. Brady B, Brown E. Rock Mechanics for Underground mining. 3rd ed. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004.
13. Kazak OO, Latyshev OG. Substantiation of the principles of zoning (classification) of rock massifs according to the difficulty of their development. *News of the UGSU*. 2022;1(65):81-85. (In Russ.).
14. Laubscher DH. Geomechanics classification of jointed rock masses - mining applications. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A, Mining industry. London. 1977.
15. Laubscher DH. A geomechanics classification system for rating of rock mass in mine design. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 1990;90(10):257-273.
16. Laubscher DH. Cave mining - the state of art. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*. 1994;94(10):279-293.
17. Palmström A. On classification systems. *Proceedings of Workshop on Reliability of Classification Systems a Part of the International Conference «GeoEng-2000»*. Melbourne; 2000.
18. Deere DU, Deere DW. The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice, Rock Classification Systems for Engineering Purposes, ASTM STP 984, Louis Kirkaldie, Ed., American Society for Testing and Materials. Philadelphia; 1988.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Яковлев Никита Михайлович:

аспирант,

Горный институт Кольского научного центра РАН,
Мурманская обл., г. Апатиты, Россия.

e-mail: NYakovlev@phosagro.ru,

ORCID ID 0009-0008-7264-6616,

SPIN-код 7230-0787.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yakovlev Nikita:

postgraduate,

Mining Institute of the Kola Scientific Center of the RAS,
Murmansk region, Apatity, Russia.

e-mail: NYakovlev@phosagro.ru,

ORCID ID 0009-0008-7264-6616,

SPIN-code 7230-0787



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Санкт-Петербургский горный университет. Основан в 1773 году.
Первое высшее техническое учебное заведение в России.

Факультеты:

- ◆ Геологоразведочный факультет,
- ◆ Горный факультет,
- ◆ Механико-машиностроительный факультет,
- ◆ Нефтегазовый факультет,
- ◆ Строительный факультет,
- ◆ Факультет переработки минерального сырья,
- ◆ Факультет фундаментальных и гуманитарных дисциплин,
- ◆ Экономический факультет,
- ◆ Энергетический факультет,
- ◆ Факультет аспирантуры и докторантуры.

Контакты : Санкт-Петербург, В.О., наб. Лейтенанта Шмидта, д. 45, Главный пост.
Тел.: 800 550 14 34; (812) 328 8201; (812) 328 89 02 e-mail: priem@mgri.ru, <https://www.mgri.ru/commission/poryadok-postupleniya/>

WWW.N-GN.RU



ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ОСНОВНЫХ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ ОТРАБОТКИ ЗАПАСОВ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ

Ю. С. Щегольков,
ПАО «Уралкалий», г. Березники, Россия

Аннотация: В условиях отработки запасов Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей изучение особенностей и выявление закономерностей развития процесса сдвижения базируются главным образом на данных инструментальных наблюдений по профильным линиям грунтовых реперов. Одними из важнейших составляющих исследования процесса сдвижения земной поверхности от влияния горных работ являются угловые параметры, которые в обобщенной интерпретации являются комплексными показателями физико-механических свойств всей сдвигающейся породной толщи. В вопросе установления и уточнения как численных значений отдельных угловых параметров процесса сдвижения, так и зависимостей, их определяющих, особую актуальность имеют критерии, позволяющие определить местоположение точек, характерных для отдельных углов. Вопрос обоснования величин вышеупомянутых критериев имеет высокую значимость для условий отработки запасов на рассматриваемом месторождении вследствие их недостаточной изученности и освещенности. В статье приведены результаты исследований обозначенного вопроса. Обоснованы и актуализированы значения критериев основных угловых параметров процесса сдвижения. Результаты исследований могут быть полезными при обосновании величин основных угловых параметров процесса сдвижения.

Ключевые слова: угловые параметры, критерии, сдвижение, оседание, наклон, горизонтальная деформация, кривизна, безопасность подрабатываемых объектов.

Благодарности: Автор выражает глубокую признательность академику РАН, доктору технических наук А. А. Баряху и кандидату технических наук Л. О. Тенисон за ценные советы и рекомендации.

Для цитирования: Щегольков Ю. С. Обоснование критериев основных угловых параметров процесса сдвижения для условий отработки запасов Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Маркшейдерия и недропользование. 2024. № 3. С. 42–54. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_42_54.

SUBSTANTIATION OF THE CRITERIA OF THE MAIN ANGULAR PARAMETERS OF THE SHEAR PROCESS FOR THE CONDITIONS OF MINING THE VERKHNEKAMSKOYE POTASSIUM-MAGNESIUM SALT DEPOSIT

Y. S. Shchegolkov,
PJSC «Uralkaliy», Berezniki, Russia

Abstract: Under the conditions of development of the reserves of the Verkhnekamskoye potassium-magnesium salt deposit, the study of the features and identification of the patterns of the development of the displacement process is based mainly on the data of instrumental observations along the profile lines of ground benchmarks. One of the most important components of the study of the process of displacement of the earth's surface from the influence of mining are the angular parameters, which in a generalized interpretation are complex indicators of the physical and mechanical properties of the entire shearing rock mass. In the issue of establishing and refining both the numerical values of the individual angular parameters of the displacement process, and the dependencies that determine them, criteria that allow determining the location of points characteristic of individual angles are of particular relevance. The issue of substantiating the values of the mentioned criteria is of high importance for the conditions of development of reserves at the deposit under consideration due to their insufficient knowledge and illumination. The article presents research results designated issue. The values of the criteria for the main angular parameters of the displacement process are justified and updated. The research results can be useful in justifying the values of the main angular parameters of the displacement process.

Keywords: criteria for angular parameters of the displacement process, angular parameters of the displacement process, displacement, subsidence, inclination, horizontal deformation, curvature, safety of undermined objects.

Acknowledgments: The author expresses deep gratitude to Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences Baryakh A. A. and to Candidate of Technical Sciences Tenison L. O. for valuable advice and recommendations.

For citation: Shchegolkov Y. S. Substantiation of the criteria of the main angular parameters of the shear process for the conditions of mining the Verkhnekamskoye potassium-magnesium salt deposit. Surveying and subsoil use. 2024;(3):42-54. (In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_3_42_54.

Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей (ВКМКС) является одним из крупнейших разрабатываемых в мире. Оно открыто в 1925 году и с 1934 года разрабатывается подземным способом. ВКМКС расположено на северо-востоке Пермского края, в районе Камского водохранилища, преимущественно на его левобережье.

Ввиду наличия над соляной толщей водоносных горизонтов и легкой растворимости солей отработка запасов месторождения ведется способами, исключающими возможность проникновения воды в выработанное пространство, что главным образом сопряжено с необходимостью сохранения водонепроницаемости пачки пород, расположенной между кровлей верхнего отработываемого пласта и подошвой первого снизу водоносного горизонта, называемой водозащитной толщей (ВЗТ) [1-2].

Нарушение сплошности ВЗТ может привести к затоплению рудника с сопутствующим комплексом негативных последствий для подработанных территорий [3-6] вплоть до образования провалов значительных размеров [7-10]. Во избежание этого на месторождении применяют камерную систему разработки с поддержанием кровли ленточными целиками. Геомеханическую систему, формируемую при отработке запасов ВКМКС, в обобщенной интерпретации нельзя назвать однородной. Это обусловлено необходимостью применения, даже в пределах отработываемых блоков, различных параметров, таких как количество отработываемых пластов, вид слагающей их соли, вынимаемая мощность, ширины камер и целиков, наличие, тип и объем вносимого закладочного материала в камеры и пр. Ввиду этого деление блоков осуществляется на отдельные зоны, в которые заключаются камеры с похожими параметрами отработки и степенью заполнения закладкой выработанного пространства.

Подземная отработка запасов сопровождается нарушением естественного равновесного состояния породного массива, в результате чего происходит перемещение (сдвижение) толщи горных пород в сторону выработанного пространства [11, 12]. Сам процесс сдвижения имеет характерные особенности для каждого конкретного месторождения и представляет собой сложное физическое явление, находящееся в зависимости от большого числа факторов [13]. Изучение особенностей и выявление закономерностей развития процесса сдвижения в условиях отработки запасов рассматриваемого месторождения базируется главным образом на данных инструментальных наблюдений. Последние получили активное развитие в середине прошлого века, что можно связать с планомерным вводом в эксплуатацию новых мощностей и увеличением площадей отработки запасов, прежде всего под промышленной и жилой застройкой городов Березники и Соликамска. Постепенное накопление данных инструментальных наблюдений положило начало проведению исследований процесса сдвижения, значимые

результаты которых находили отражение в периодически издаваемых (начиная с 1960 г.) нормативных документах — «Указаниях...» и «Инструкциях...», регламентирующих меры защиты рудников от затопления и охрану подработываемых объектов [18, 20].

Цель исследований. Обоснование критериев основных угловых параметров процесса сдвижения для условий отработки запасов Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей.

Материал и методы исследований

В работе использован комплексный метод исследований, включающий анализ литературных данных и нормативной документации по рассматриваемой проблеме, отбор и анализ данных инструментальных наблюдений за сдвижением земной поверхности, аналитическую обработку исходной информации.

Теоретические основы разработки вопроса исследований

Изучение процесса сдвижения носит несомненную актуальность для обеспечения безопасности подработки зданий и сооружений на земной поверхности, а также при планировании строительства на подработываемых территориях. В данном случае оцениваются величины возникающих после проведения горных работ деформаций земной поверхности, к которым относятся наклон i , кривизна K , радиус кривизны R и горизонтальная деформация ε .

Для условий ВКМКС ожидаемые значения обозначенных величин $i(z)$, $K(z)$, $R(z)$, $\varepsilon(z)$ в случае наличия данных инструментальных наблюдений на рассматриваемом участке шахтного поля рассчитываются из выражений:

$$I(z)_n = \frac{\eta(t)_n - \eta(t)_{n-1}}{l_n} q_i, \quad (1)$$

$$K(z)_{n,n-1} = \frac{i(z)_n - i(z)_{n-1}}{0,5(l_n + l_{n-1})} q_k, \quad (2)$$

$$(z) = K(z)^{-1}, \quad (3)$$

$$\varepsilon(z) = (1 - \frac{l_p}{l}) q_\varepsilon, \quad (4)$$

где $\eta(t)_n$ и $\eta(t)_{n-1}$ — величины оседания земной поверхности по реперам n и $n-1$ в рассматриваемый период наблюдений, мм; $i(z)_n$ и $i(z)_{n-1}$ — ожидаемые значения наклона в предыдущем и последующем интервалах, мм/м; l_n и l_{n-1} — длины интервалов, соответствующие начальным измерениям между реперами n и $n-1$ и реперами $n-1$ и $n-2$, м; l_p и l — длины интервалов между реперами n и $n-1$, измеренные соответственно в рассматриваемый период наблюдений и начале наблюдений, м; q_i , q_k и q_ε — коэффициенты приведения значений наклона, кривизны и горизонтальной деформации к 15-метровому интервалу, вводимые для уменьшения ошибок определения указанных деформаций.

В общем случае расчет коэффициентов q_i , q_k и q_ε можно выполнить по формуле

$$q = 1 + \beta \sqrt{\frac{l_o}{15}} - 1, \quad (5)$$

где l_o — расстояние между двумя смежными реперами при расчете наклона и горизонтальной деформации или среднее расстояние между двумя парами смежных реперов при расчете кривизны, м; β — коэффициент аппроксимации, принимаемый равным 0,1414 для наклона, 0,1768 — для кривизны и 0,3535 — для горизонтальной деформации.

При расстоянии $l_o \leq 15$ м коэффициенты q_i , q_k и q_e принимаются равными 1, а при $l_o \geq 45$ м их значения соответственно равны 1,20, 1,25 и 1,50.

В случае отсутствия данных инструментальных наблюдений на рассматриваемом участке шахтного поля ожидаемые значения $\eta(z)$, $i(z)$, $K(z)$, $R(z)$ и $\varepsilon(z)$ определяются на период окончания процесса сдвижения в точках главных сечений мульды с использованием безразмерных функций распределения по формулам:

$$\eta(z) = \eta_m S(z), \quad (6)$$

$$i(z) = \frac{\eta_m S'(z) q_i}{L}, \quad (7)$$

$$K(z) = \frac{\eta_m S''(z) q_k}{L^2}, \quad (8)$$

$$R(z) = K(z)^{-1}, \quad (9)$$

$$\varepsilon(z) = m_e K(z) L, \quad (10)$$

где η_m — максимальное оседание на период окончания процесса сдвижения, м; $S(z)$, $S'(z)$ и $S''(z)$ — значения функций распределения относительных оседаний, наклонов и кривизны в краевой части мульды сдвижения; z — относительная координата рассматриваемой точки в краевой части мульды сдвижения, равная отношению расстояния от точки с максимальным оседанием земной поверхности до рассматриваемой точки к расчетной длине полумульды сдвижения; q_i и q_k — коэффициенты приведения значений наклона и кривизны к 15-метровому интервалу, вычисляемые из выражения 5, при расстоянии l_o , равному произведению расчетной длины полумульды сдвижения и интервала между относительными координатами в типовой функции распределения; L — длина полумульды сдвижения, значение которой определяется глубиной разработки H на рассматриваемом участке и величинами граничных углов и углов полных сдвижений, м; m_e — коэффициент перехода от $K(z)$ к $\varepsilon(z)$, принимается равным 0,05 при $K(z) \cdot 10^4 \geq 1$ или вычисляется как $0,05 + 0,09 (1 - K(z) \cdot 10^4)^{3,8}$ при $K(z) \cdot 10^4 < 1$.

Погрешность расчета значений ожидаемых сдвижений и деформаций учитывается посредством введения в полученные величины коэффициентов запаса (перегрузки), т. е. ожидаемые величины умножаются на эти коэффициенты и в дальнейшем при выборе мер охраны подрабатываемых объектов принимаются полученные таким образом расчетные величины.

Опираясь на вышеизложенное, можно отметить, что местоположение и численное значение вычисляемых деформаций при отсутствии данных инструментальных наблюдений тесно связано с величинами граничных углов и углов полных сдвижений. Так, если граничные точки, определяющие дли-

ну формируемой полумульды сдвижения, смещаются в пределах какого-то интервала, то происходит смещение и изменение численного значения ожидаемых деформаций. Граничные углы также используются при построении целиков под вертикальные стволы, а углы полных сдвижений определяют размеры плоского дна мульды.

Помимо вышерассмотренных угловых параметров в инженерной практике часто используются углы сдвижения и угол максимального оседания, при этом немаловажно отметить принятое для ВКМКС допущение о равенстве во всех направлениях отдельных угловых параметров, основанное главным образом на малых величинах углов падения промышленных пластов. Практическое назначение углов сдвижения состоит в определении границы зоны опасных сдвижений и построении предохранительных целиков под объекты на земной поверхности, а углы максимальных оседаний в условиях неполной подработки позволяют установить в мульде сдвижения местоположение точки, получившей наибольшее оседание.

Особую актуальность в вопросе установления и уточнения как численных значений отдельных угловых параметров процесса сдвижения, так и зависимостей, их определяющих, имеют критерии, позволяющие определить местоположение точек, характерных для отдельных углов. Вопрос обоснования величин упомянутых критериев имеет высокую значимость для условий отработки запасов на рассматриваемом месторождении вследствие их недостаточной изученности и освещенности. Ниже рассмотрено решение обозначенного вопроса для основных угловых параметров процесса сдвижения, наиболее часто используемых в инженерной практике ВКМКС.

Результаты исследований и их обсуждение

Граничные углы

Фактической границей мульды считается точка в ее краевой части, характеризующая нулевыми величинами сдвижений и деформаций. Определение истинного местоположения такой точки является невыполнимой задачей вследствие неизбежного наличия погрешностей инструментальных наблюдений, поэтому на практике в качестве граничных критериев используются некоторые условные значения сдвижений или деформаций, соответствующие возможным ошибкам их определения [14]. На ВКМКС в нормативных документах «Указания...», изданных с 1994 по 2008 год, в качестве граничных величин деформаций приняты значения $i = 0,3 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3}$, а в последующих версиях упомянутого документа, изданных после 2013 года, информация о регламентируемых граничных критериях отсутствует. Обозначенные величины достаточно продолжительное время сохраняли актуальность и близки к регламентируемым «Указаниями...» 1985 года значениям $i = 0,4 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3}$, что формирует необходимость их пересмотра с учетом накопленного опыта, технологического совершенствования измерительного оборудования и области применения (натурные инструментальные наблюдения или математическое моделирование процесса сдвижения).

Принимая во внимание вышеобозначенные интервальные граничные критерии i и ε , справедливо заметить невозможность независимого достоверного их использования на начальной стадии и в условиях медленного развития процесса сдвижения, когда между смежными реперами в крае-

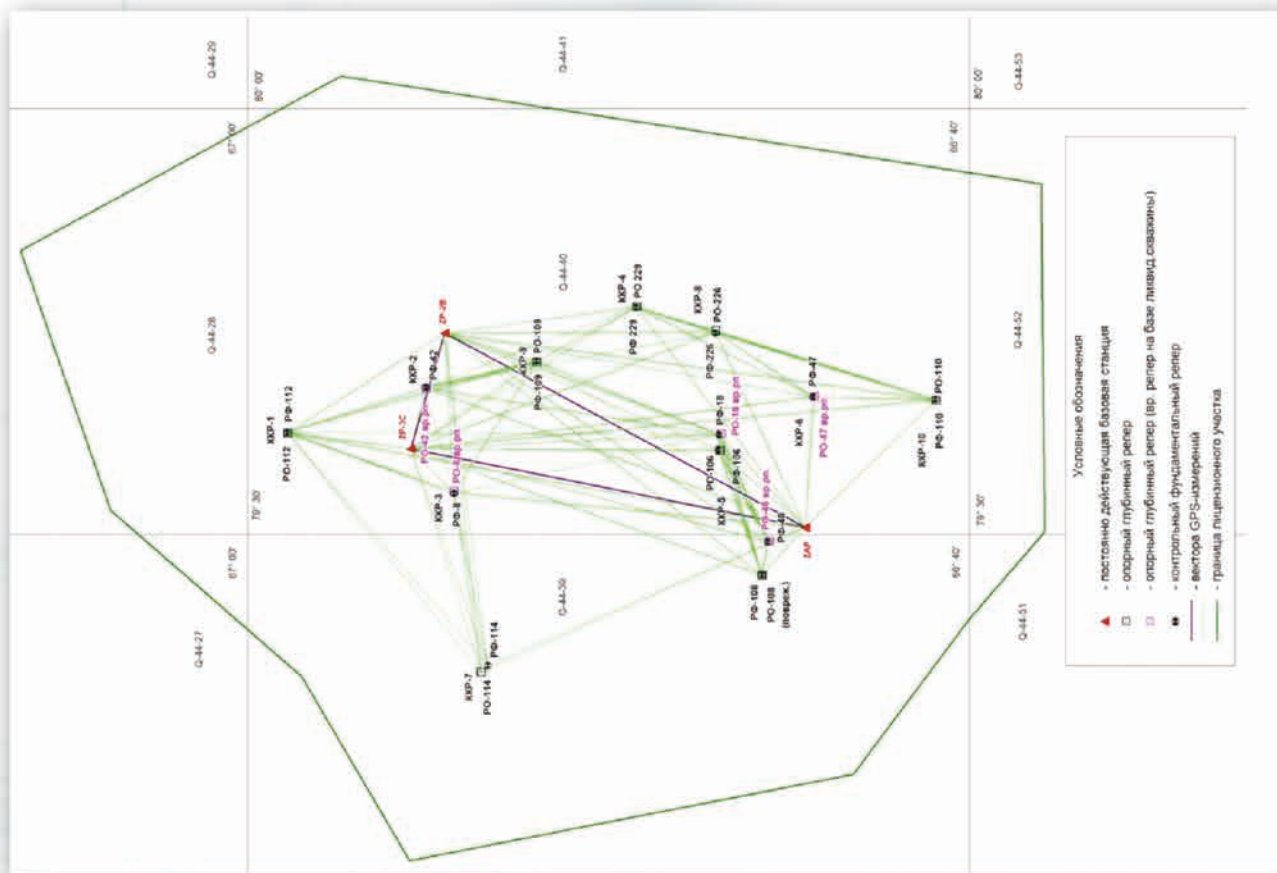


Рис. 1. Схема сети спутниковых наблюдений на пунктах геодинамического полигона Западного нефтегазоконденсатного месторождения
Fig. 1. The scheme of the network of satellite observations at the points of the geodynamic polygon of the Polar NGKM

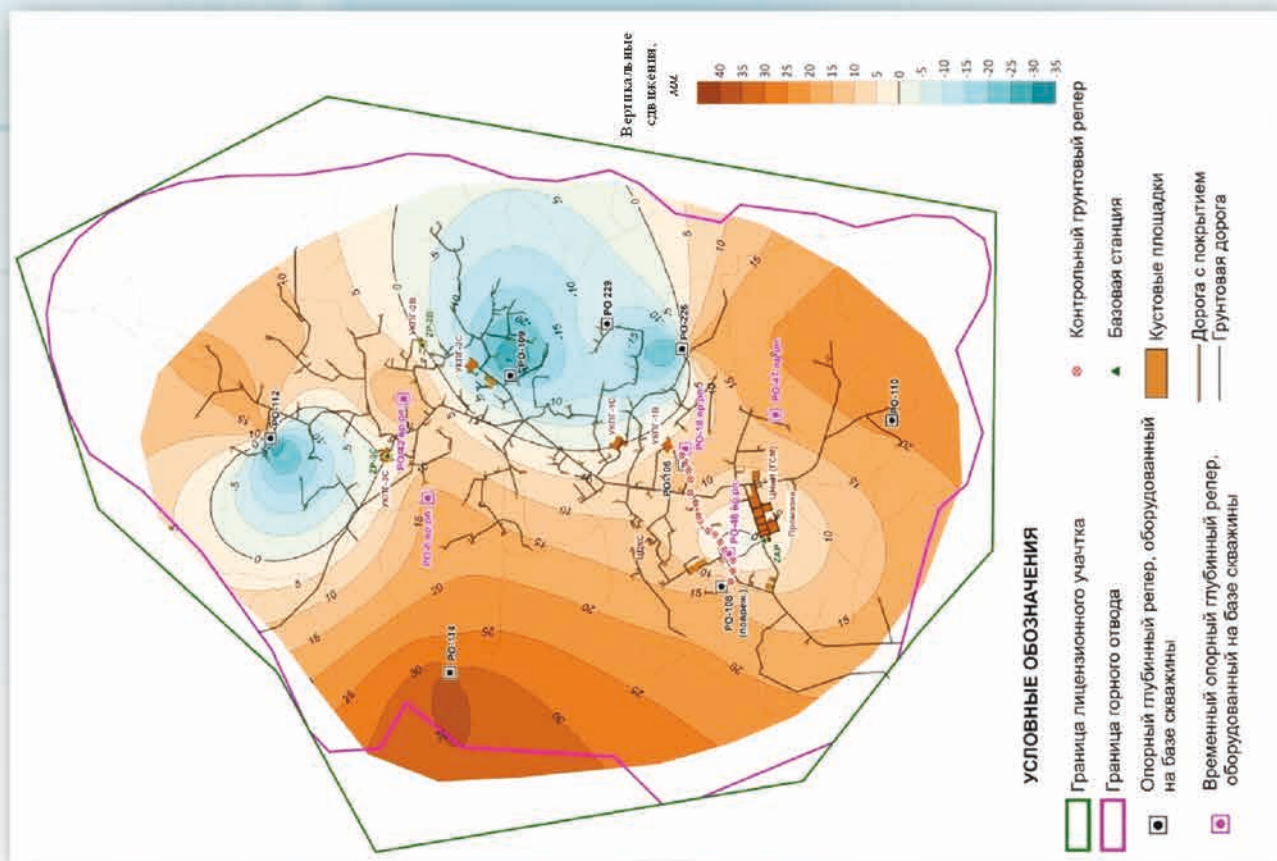


Рис. 2. Карта-схема вертикальных сдвижений земной поверхности по результатам спутниковых геодезических наблюдений за период 2022–2023 годов
Fig. 2. A schematic map of vertical movements of the Earth's surface based on the results of satellite geodetic observations the period 2022–2023

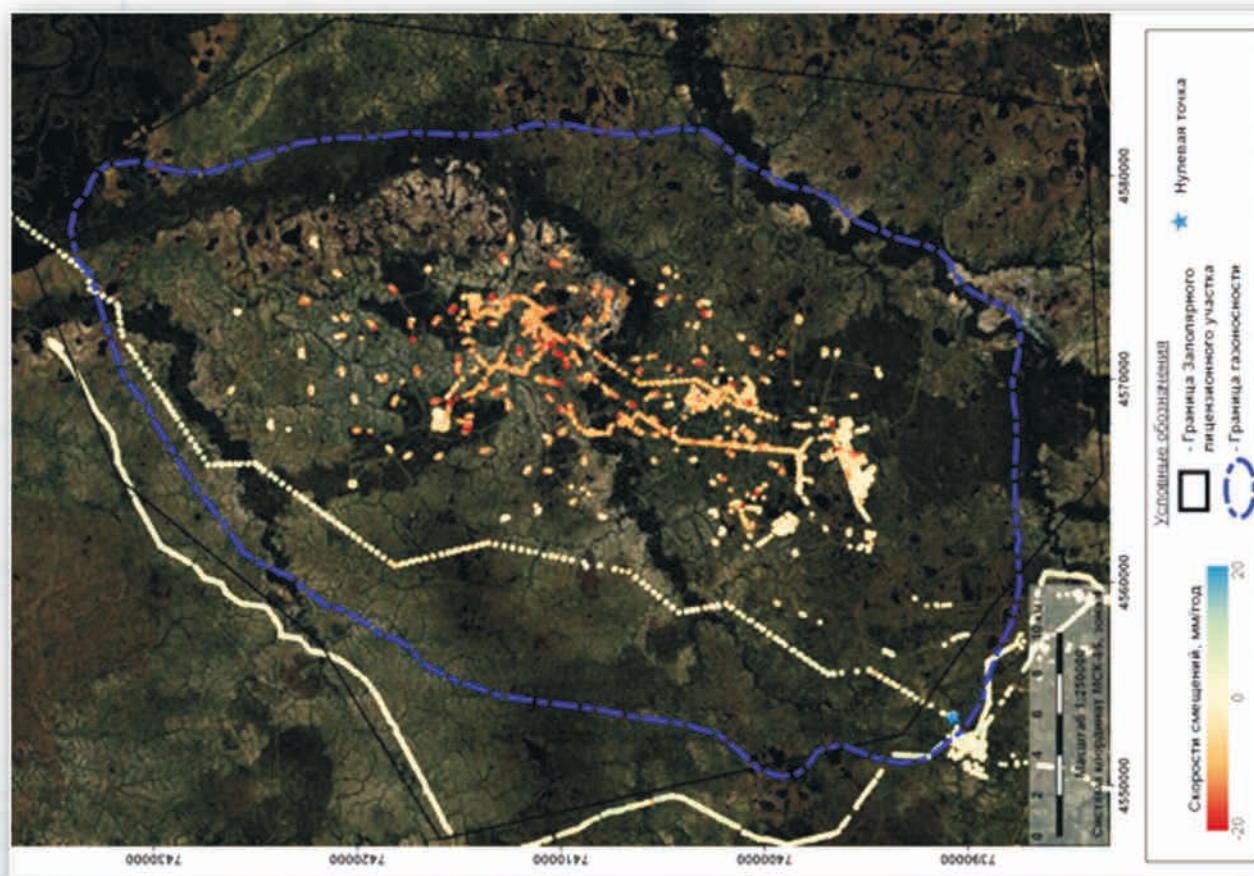


Рис. 4. Скорости сдвижений техногенных объектов на территории Заполярного месторождения по данным Sentinel-1A/B за 2017–2023 года (17 689 точек)
 Fig. 4. Velocities of movements of man-made objects in the territory of the Polar field according to Sentinel-1A/B 2016-2023 (17 689 points)

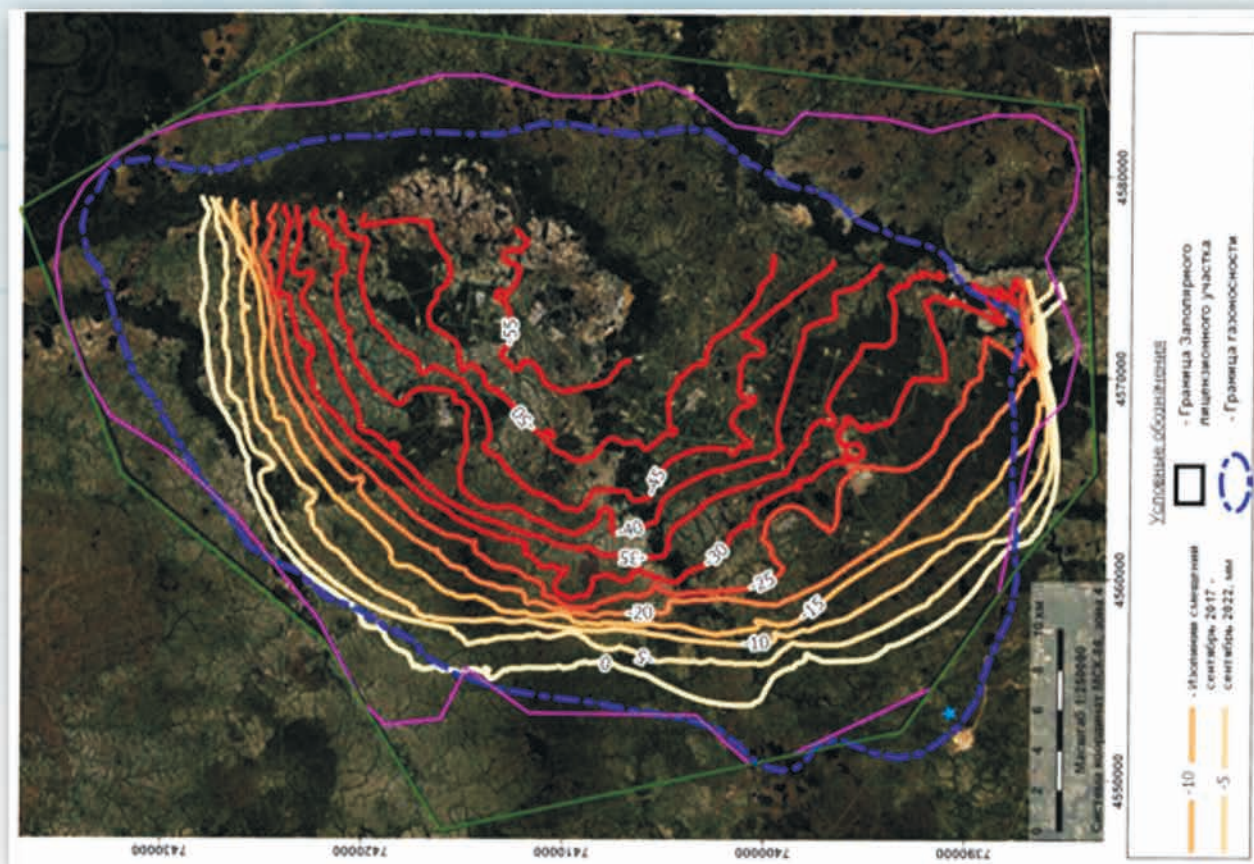


Рис. 5. Изолинии оседания земной поверхности на территории Заполярного месторождения за период сентябрь 2017-го – сентябрь 2023 года
 Fig. 5. Isolines of the subsidence of the Earth's surface in the territory of the Polar deposit for the period September 2017 – September 2023

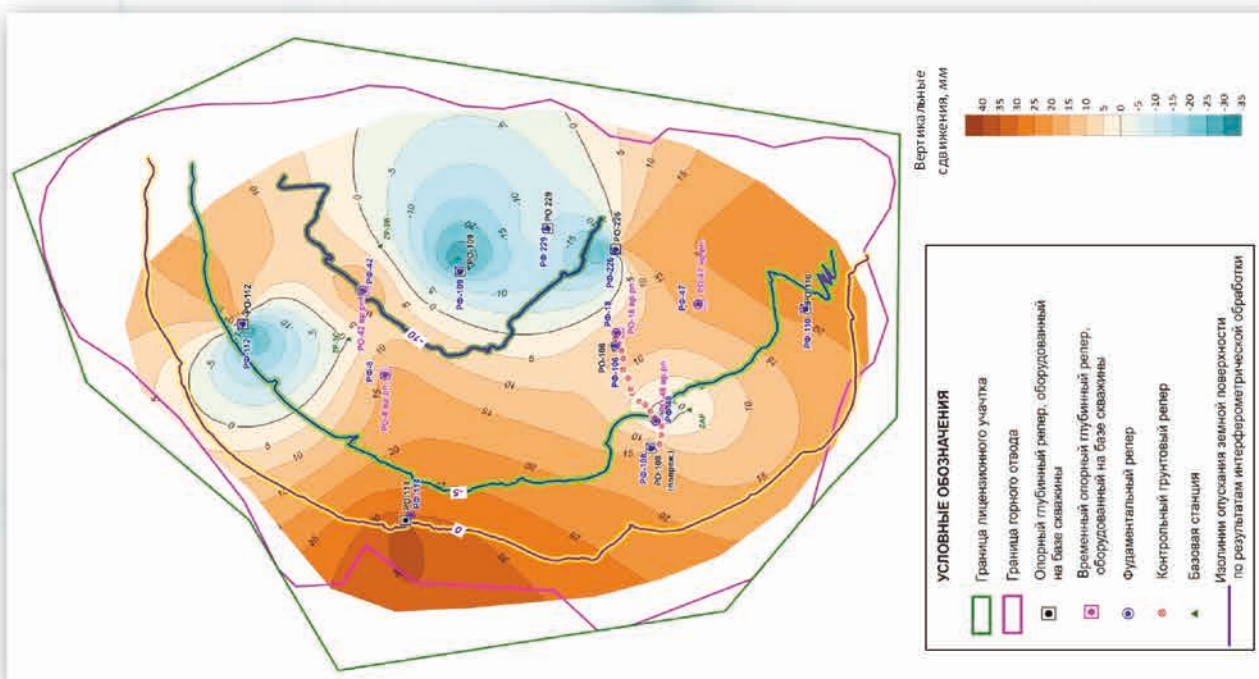


Рис. 6. Схема изолиний опускания земной поверхности по результатам интерферометрической обработки, совмещенная с вертикальными сдвигами по данным спутниковых геодезических наблюдений за период 2022–2023 годов
 Fig. 6. The scheme of isolines of lowering of the Earth's surface according to the results of interferometric processing combined with vertical movements according to satellite geodetic observations for the period 2022–2023

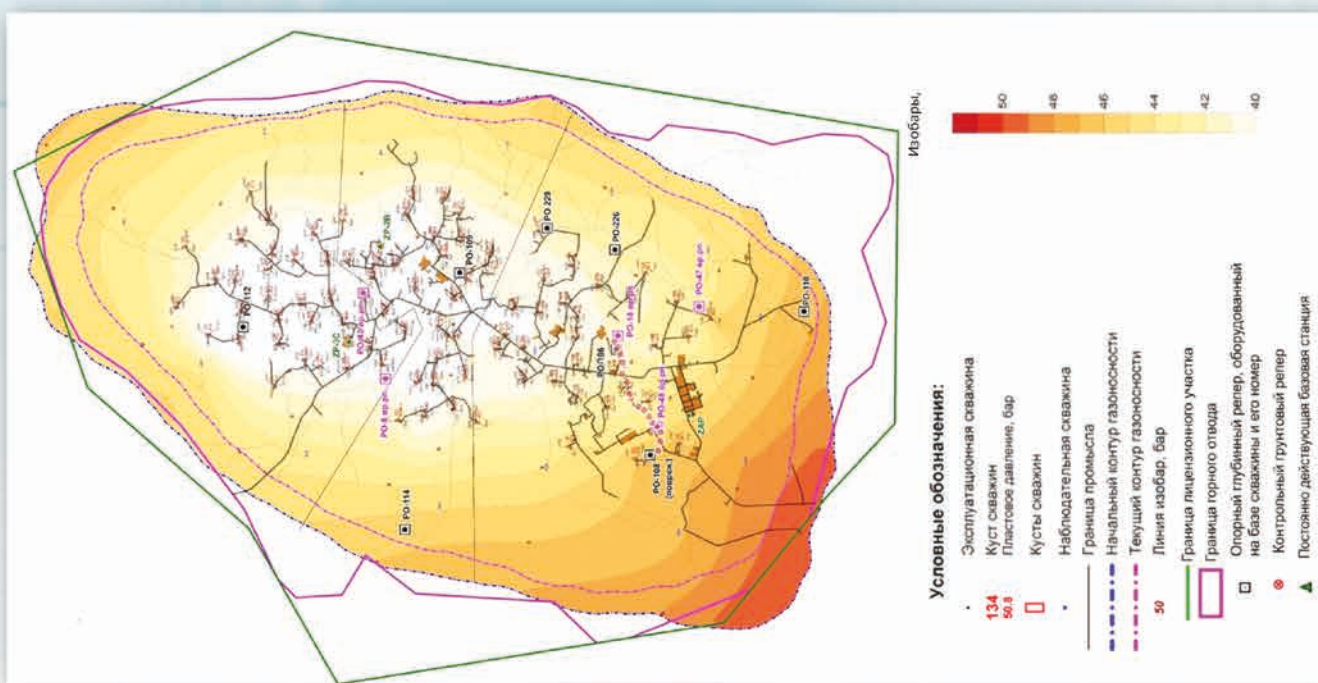


Рис. 7. Схематическая карта изобар сеноманской залежи по состоянию на 1 октября 2023 года
 Fig. 7. Isobar map of the Cenomanian deposit as of 01.10.2023

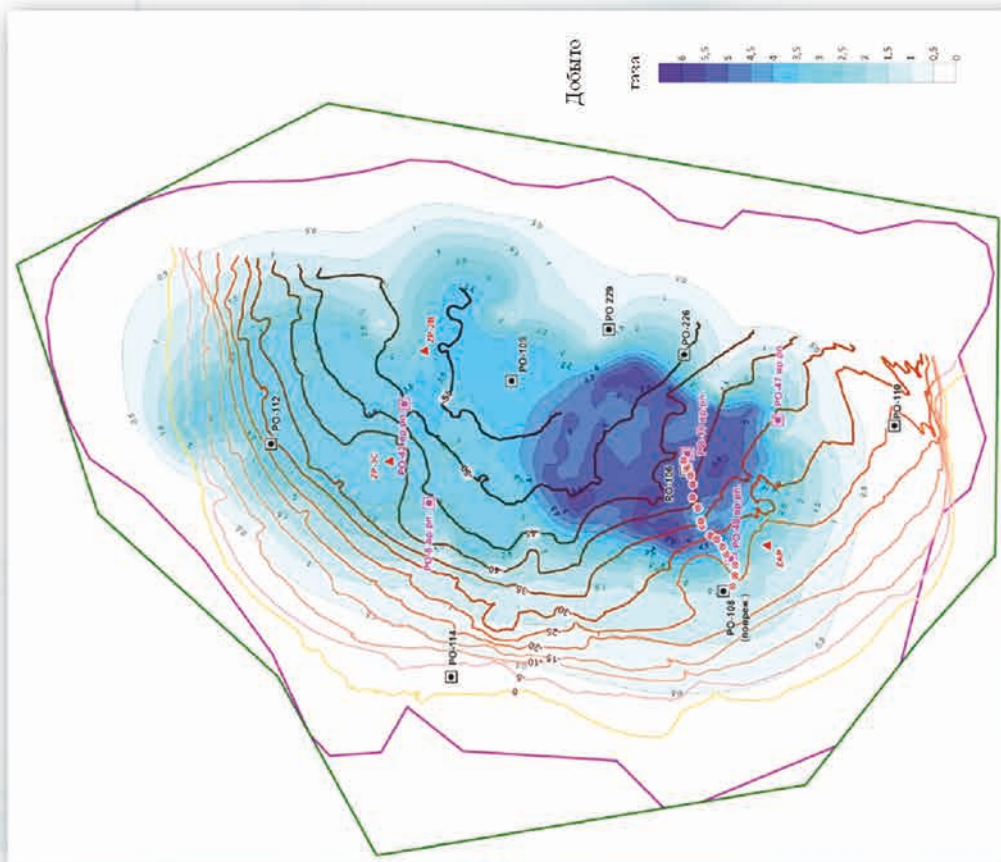


Рис. 8. Карта сдвижений земной поверхности по интерферометрической обработке спутниковых радиолокационных данных Sentinel-1A/B за период сентябрь 2017-го – сентябрь 2023 года, совмещенная с картой накопленных отборов газа из сеноманской залежи по состоянию на 1 октября 2023 года

Fig. 8. Map of the Earth's surface movements by interferometric processing of Sentinel-1A/B satellite radar data for the period September 2017 – September 2023, combined with a map of accumulated gas withdrawals from the Cenomanian deposit as of 01.10.2023

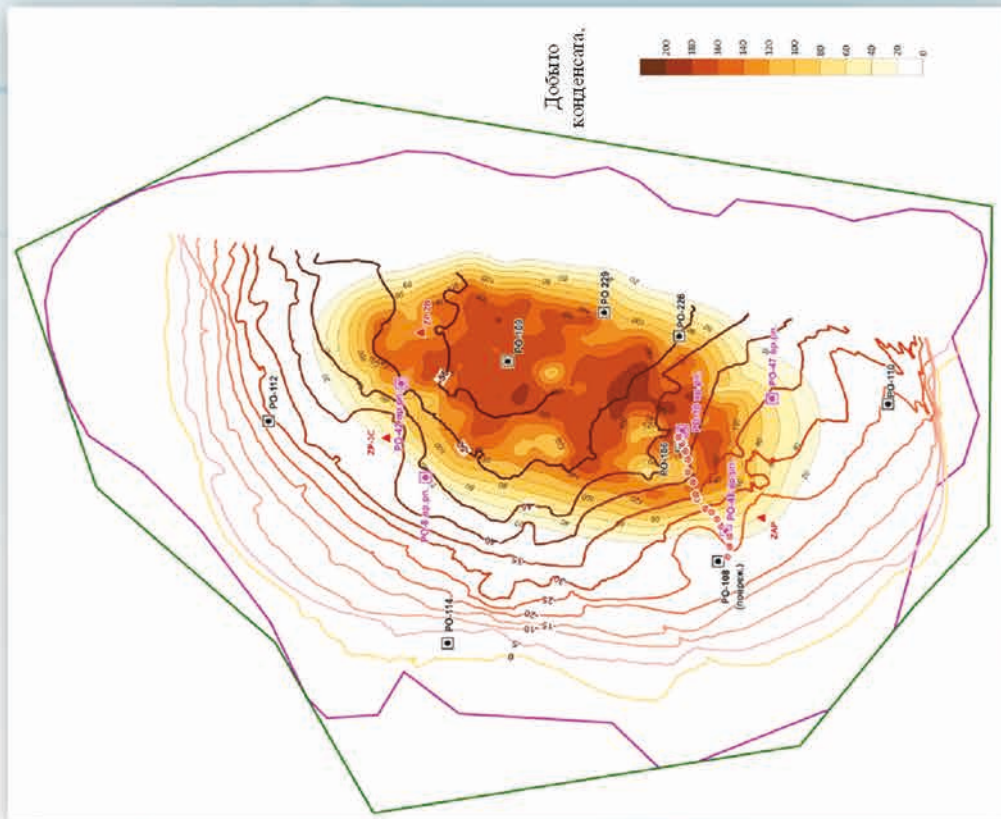


Рис. 9. Карта сдвижений земной поверхности по интерферометрической обработке спутниковых радиолокационных данных Sentinel-1A/B за период сентябрь 2017-го – сентябрь 2023 года, совмещенная с картой накопленных отборов конденсата из неомской залежи по состоянию на 1 октября 2023 года

Fig. 9. Map of the Earth's surface movements by interferometric processing of Sentinel-1A/B satellite radar data for the period September 2017 – September 2023, combined with a map of accumulated condensate withdrawals from the Neocomian deposit as of 01.10.2023

Условные обозначения

Изолинии оседания земной поверхности за период
сентябрь 2017 - сентябрь 2023

-45	-35	-25	-15	-5
-40	-30	-20	-10	0

Граница лицензионного участка	Опорный глубинный репер, оборудованный на базе скважины и его номер
Граница горного отвода	Постоянно действующая базовая станция
Контрольный репер	

вой части мульды наблюдаются небольшие разности оседаний или не происходит значимого изменения длин интервалов. С другой стороны, интервальные критерии i и ε характеризуются большей однозначностью использования их на практике по сравнению с точечным критерием оседания η . Для численного подтверждения сказанному уместно оценить вычисляемые по результатам натурных инструментальных наблюдений погрешности наклона, горизонтальной деформации и оседания, которые, в свою очередь, можно найти как погрешности функции общего вида.

Для функции общего вида $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, согласно [15, 16], математическое выражение погрешности будет выглядеть следующим образом:

$$m_y = \pm \sqrt{\sum_1^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} m_{x_i} \right)^2}, \quad (11)$$

где $\partial f / \partial x_i$ — частные производные данной функции, вычисленные для соответствующих значений аргументов; m_{x_i} — средние квадратические погрешности соответствующих аргументов.

Погрешность определения наклона i возможно определить применяя формулу 11 к выражению 1, заменив разность $\eta(t)_n - \eta(t)_{n-1}$ превышением h и игнорируя эмпирический коэффициент q_i , не определяющий погрешность инструментальных наблюдений:

$$m_i = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial i(z)_n}{\partial l_n} \right)^2 m_{l_n}^2 + \left(\frac{\partial i(z)_n}{\partial h} \right)^2 m_h^2}, \quad (12)$$

Учитывая, что

$$\frac{\partial i(z)_n}{\partial l_n} = \frac{h}{l_n^2} \approx 0, \text{ т.к. } l_n^2 \gg h, \\ \frac{\partial i(z)_n}{\partial l_n} = \frac{1}{l_n},$$

тогда выражение 12 можно представить в виде

$$m_i = \pm \frac{m_h}{l_n}. \quad (13)$$

Если учесть в выражении 13, что погрешность определения превышения mh на станции в соответствии с ЕППМР [17] составляет $\pm 0,7$ мм, а расстояние l_n в условиях наблюдений за процессом сдвижения на ВКМКС варьируется от 15 до 60 м, то погрешность определения наклона m_i не превысит $\pm 0,05 \cdot 10^{-3}$. Полученное значение обусловлено влиянием лишь инструментальных ошибок измерения, и при рассмотрении других влияющих факторов величина погрешности возрастет. Принимая за предельную ошибку определения превышения $mh_{пр}$ тройную среднюю квадратическую [16], предельная ошибка определения наклона m_i^{np} составит $\pm 0,15 \cdot 10^{-3}$. Эта величина в два раза меньше ранее регламентированного критерия по наклону и может быть использована как актуализированное его значение применительно к стадии активного развития процесса сдвижения, а также после нее.

Рассматривая критерий горизонтальной деформации ε , можно отметить некоторую органичность его использования

на практике, обусловленную прежде всего малым количеством профильных линий, где ведутся интервальные наблюдения длин с момента начала ведения горных работ.

В случае наличия своевременных систематических интервальных наблюдений в краевой части мульды сдвижения погрешность определения горизонтальной деформации m_ε можно найти аналогично ранее выполненным расчетам с использованием (11) применительно к (4), игнорируя при этом эмпирический коэффициент q_ε , не определяющий погрешность инструментальных наблюдений:

$$m_\varepsilon = \pm \frac{\sqrt{2} m_l}{l}. \quad (14)$$

Если учесть, что относительная погрешность определения длины интервала ml / l в соответствии с ЕППМР [17] не должна превышать $1/10000$, тогда значение m_ε составит $\pm 0,14 \cdot 10^{-3}$.

В этом случае используемый в настоящее время граничный критерий горизонтальной деформации $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3}$ будет приблизительно соответствовать двойной среднеквадратической ошибке m_ε , что позволяет учесть большую часть случайных ошибок при определении длины интервала. Наиболее достоверное определение границы мульды с использованием рассмотренного критерия может быть реализовано только на стадии активного развития процесса сдвижения и после нее.

В случае отсутствия результатов фактических наблюдений длин интервалов возможно лишь вычислить ожидаемое значение горизонтальной деформации в краевой части мульды по (10), которое можно также связать и с ожидаемым наклоном $i(z)$. Для этого параметр $K(z)$ с учетом (8) и (7) можно преобразовать к виду

$$K(z) = \frac{S''(z) q_k i(z)}{S'(z) q_i L}. \quad (15)$$

Значения функций распределения относительных наклонов $S'(z)$ и кривизны $S''(z)$ [18] отражены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Значения типовых функций распределения относительных оседаний $S(z)$, наклона $S'(z)$ и кривизны $S''(z)$ в полумульде сдвижения

Values of typical distribution functions of relative settlements $S(z)$, slope $S'(z)$ and curvature $S''(z)$ in the displacement half-trough

z	$S(z)$	$S'(z)$	$S''(z)$
0,0	1,000	1,00	0,0
0,1	0,950	0,80	-7,5
0,2	0,840	1,50	-6,7
0,3	0,655	2,00	0,0
0,4	0,440	1,75	+4,5
0,5	0,290	1,25	+5,5
0,6	0,188	0,85	+2,8
0,7	0,120	0,60	+2,0
0,8	0,072	0,45	+1,5
0,9	0,034	0,30	+1,0
1,0	0,000	0,00	0,0

Как видно из таблицы 1, каждая последующая точка в краевой части мульды (по направлению к ее границе) характеризуется меньшими сдвигами и деформациями относительно предыдущей. При линейной интерполяции значений $S'(z)$ и $S''(z)$ на участке z от 0,9 до 1,0 отношение $S''(z_{0,9-1,0}) / S'(z_{0,9-1,0})$ будет соответствовать величине 10/3, а отношение q_k / q_i на интервалах длиной 15-60 м не превысит величины 1,05.

При подстановке обозначенных величин в (15), а итогового результата в (10) получаем

$$\varepsilon(z_{0,9-1,0}) = 3,5 m_e i(z_{0,9-1,0}). \quad (16)$$

Если учесть, что кривизна $K(z)$ в краевой части мульды сдвигания стремится к нулю, тогда коэффициент m_e составит

$$m_e = \lim_{K(z) \rightarrow 0} (0,05 + 0,09 (1 - K(z) \times 10^4)^{3,8}) = 0,14.$$

Подставляя значение коэффициента m_e в (16) и выражая параметр $i(z)$, получаем

$$i(z_{0,9-1,0}) \approx 2 \varepsilon(z_{0,9-1,0}). \quad (17)$$

Учитывая величину вышерассмотренного критерия ε , несложно определить соответствующее ему расчетное значение наклона $i_r \approx 0,6 \cdot 10^{-3}$, которое значительно больше вышеопределенного критериального $i = 0,15 \cdot 10^{-3}$, следовательно, расчетные горизонтальные деформации не позволяют найти границу мульды сдвигания с достаточной точностью, характерной для инструментальных наблюдений. Таким образом, в случае отсутствия систематических своевременных интервальных наблюдений по профильной линии наиболее достоверное определение границы мульды будет соответствовать использованию критерия наклона i .

Рассматривая погрешность определения оседания $\eta(t)$, уместно заметить, что последнее вычисляется как разность высотных отметок, полученных в результате первоначального нивелирования H_0 и нивелирования на рассматриваемую дату H_i , тогда погрешность $m_{\eta(t)}$ можно с учетом (11) представить в виде

$$m_{\eta(t)} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \eta(t)}{\partial H_0}\right)^2 m_{H_0}^2 + \left(\frac{\partial \eta(t)}{\partial H_i}\right)^2 m_{H_i}^2}, \quad (18)$$

Учитывая, что

$$\frac{\partial \eta(t)}{\partial H_0} = \frac{\partial \eta(t)}{\partial H_i} = 1, \\ m_{H_i} \approx m_{H_0} = m_H,$$

тогда (18) можно привести к виду

$$m_{\eta(t)} = \pm \sqrt{2} m_H. \quad (19)$$

Численное значение погрешности m_H в (19) невозможно определить однозначно ввиду наличия различных влияющих на ее величину факторов, таких как тип хода (замкнутый по-

лигон, замкнутый или висячий ходы), его длина, местоположение в нем исследуемых реперов и т. д. Для примера можно рассмотреть одиночный замкнутый ход геометрического нивелирования, погрешность m_H для которого выражается формулой

$$m_H = \pm f \sqrt{\frac{N}{n}}. \quad (20)$$

где f — величина невязки в замкнутом полигоне, мм; N — число наблюдательных станций до рассматриваемого пункта; n — общее число наблюдательных станций в полигоне.

В качестве величины невязки f уместно ограничиться допустимым ее значением, которое для условий производства наблюдений за процессом сдвигания на ВКМКС (при числе станций на 1 км хода меньше 15) составляет $5\sqrt{L}$, мм, или (при числе станций на 1 км хода больше 15) $6\sqrt{L}$, мм [17]. Опираясь на изложенное, (19) можно привести к виду

$$m_{\eta(t)} = \pm 8,5 \sqrt{\frac{L \times N}{n}}. \quad (21)$$

где L — длина хода, км.

Как видно из (21), значение погрешности $m_{\eta(t)}$ может в значительной степени изменяться в зависимости от величин слагающих ее параметров, следовательно, для каждой исследуемой границы мульды необходим отдельный подсчет показателя $m_{\eta(t)}$, что на практике формирует некоторую неоднозначность и усложняет независимое использование точечного критерия оседания η . С другой стороны, если учесть преимущественное наличие опорных реперов в краевой части профильной линии, выходящей на постоянную границу выработанного пространства, то несложно оценить наибольшую возможную погрешность на интервале реперов от границы отработки до ближайшего опорного репера.

При этом погрешность m_H можно определить из выражения

$$m_H = \pm m_h \sqrt{K} = \pm m_h \sqrt{\frac{L_u}{l_n}}. \quad (22)$$

где K — количество станций до рассматриваемого пункта от ближайшего исходного опорного пункта; L_u — длина участка профильной линии от рассматриваемого пункта до ближайшего исходного опорного пункта, м.

На участке профильной линии от границы отработки до ближайшего опорного репера величина L_u будет приблизительно соответствовать выражению

$$L_{u(зр.от.-оп.пн.)} \approx 100 + H \operatorname{ctg} \delta, \quad (23)$$

где H — глубина разработки до подошвы нижнего отрабатываемого пласта, м; $\delta = 50^\circ$ — величина граничного угла, принимаемая для расчета рабочей длины профильной линии в [17].

Подставляя выражение 23 в 22, а результат в формулу 19 и учитывая вышеобозначенное значение погрешности $m_h = \pm 0,7$ мм, получаем

$$m_{\eta(t)(зр.от.-оп.пн.)} \approx \pm \sqrt{\frac{100 + 0,84H}{l_n}}. \quad (24)$$

Учитывая, что среди имеющихся лицензионных участков месторождения наибольшая глубина отработки запасов нижнего пласта КрП достигает величины, близкой к 450 м, а наименьшая длина интервала $l_n = 15$ м, тогда наибольшее значение погрешности $m_{\eta(t)}$ (зр.от.-оп.пн.) в (24) составит 6 мм. На практике вследствие того, что местоположение границы мульды тяготеют к опорным реперам, расстояние между смежными реперами в большинстве случаев больше 15 м, фактическое значение $m_{\eta(t)}$ (зр.от.-оп.пн.) будет кратно меньше 6 мм, таким образом, в обозначенной величине погрешности имеется некоторый запас, позволяющий компенсировать влияние ряда факторов, не связанных с инструментальными ошибками измерения. Опираясь на сказанное, можно заключить, что при наличии опорных реперов в краевой части исследуемого участка профильной линии граничным критерием оседания η может служить величина 6 мм.

Полученное значение наиболее целесообразно использовать для определения области возможного применения критериев i и ε . Учитывая ранее сделанный вывод об уменьшении оседания по направлению к краевой части мульды, несложно заметить, что при применении на практике пары критериев η - i в большинстве случаев определяющим будет являться первый из них, что отражено на рисунке 1.

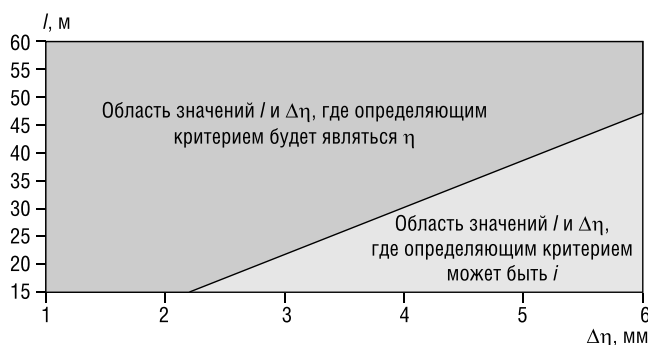


Рис. 1. Анализ использования пары критериев η - i при возможных значениях l и $\Delta\eta$ на границе мульды

Fig. 1. Analysis of the use of a pair of criteria η - i for possible values of l and $\Delta\eta$ at the displacement trough boundary

Из рисунка 1 видно, что критерий i может быть определяющим при разности оседаний двух смежных реперов в краевой части $\Delta\eta$ от 3 до 6 мм и длинах интервалов l от 15 до 47 м соответственно. Обозначенное обстоятельство в условиях наличия опорных реперов в краевой части исследуемого участка профильной линии позволяет считать критерий η основным.

Для сравнительной проверки «старых» и «новых» критериев уместно ограничиться использованием i и η - i соответственно. Такой выбор объясняется прежде всего отсутствием возможности практического применения критерия η и неизменившимся его значением. По результатам обработки данных инструментальных наблюдений по 15 профильным линиям на шахтных полях рудников СКРУ-1, БКПРУ-2, БКПРУ-4 можно отметить что «новые» критерии η - i по сравнению со «старым» критерием i определяют ожидаемо меньшие величины граничных углов δ . Разности между последними $\Delta\delta$ имеют значительный разброс в диапазоне от 1 до 23°, при этом прослеживается общая тенденция к их снижению с увеличением достигнутого оседания $\eta(t)$ по отноше-

нию к максимальному расчетному η_m , что наглядно видно из рисунка 2.

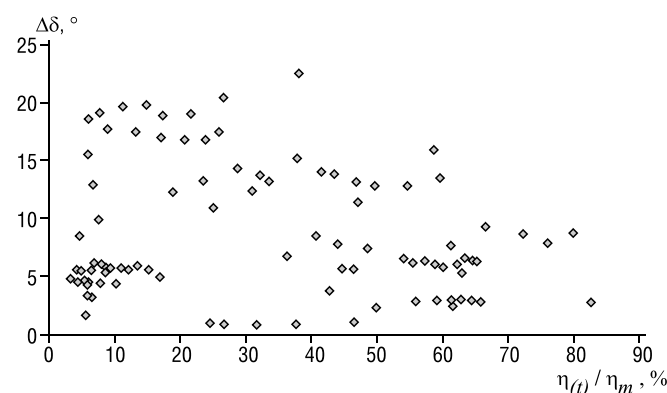


Рис. 2. Распределение величин разностей граничных углов $\Delta\delta$, получаемых при использовании старого i и новых критериев η - i

Fig. 2. Distribution of the values of the differences between the boundary angles $\Delta\delta$ obtained using the old i and new criteria η - i

Также нельзя не отметить, что «старый» критерий i в отличие от новых η - i не позволяет определять границу мульды при отношении $\eta(t) / \eta_m$ до 5 %, т. е. на начальном этапе процесса сдвижения.

Учитывая изложенное, можно сделать следующий вывод: пара критериев η - i позволяет идентифицировать местоположение границы мульды на большем удалении от площадей ведения горных работ и применима на начальной стадии, а также в условиях медленного развития процесса сдвижения.

В способах исследования процесса сдвижения, где отсутствуют характерные для нивелирных ходов погрешности, например при математическом моделировании, также уместно использовать критерий η . Параметр $m_{\eta(t)}$ в этом случае несложно выразить через погрешность определения превышения m_h , найденную аналогично вышеприведенным расчетам способом с учетом (11):

$$m_{\eta(t)} = \pm \frac{m_h}{\sqrt{2}}. \quad (25)$$

Подставляя в (25) вышеобозначенную величину погрешности $m_h = \pm 0,7$ мм, получаем $m_{\eta(t)} = \pm 0,5$ мм. Если принимать за предельную ошибку определения превышения m_{hnp} тройную среднюю квадратическую [16], предельная ошибка определения оседания $m_{\eta(t)}^{np}$ составит $\pm 1,5$ мм, а с учетом округления до целого значения — ± 2 мм. Полученное значение можно считать точечной альтернативой интервального критерия наклона при определении границ мульды способами, исключаяющими характерные для нивелирных ходов погрешности, например в условиях математического моделирования.

Углы сдвижения

С целью охраны различных объектов на земной поверхности от вредного воздействия подземной разработки на ВКМКС «Указаниями...» 1976–2008 годов установлены следующие опасные величины деформаций при среднем интервале 15–20 м между наблюдаемыми реперами: наклон $i = 4 \cdot 10^{-3}$, кривизна $K = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$, деформация растяжения

$\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$. За искомую границу зоны опасных сдвижений принимают ближайшую к границе мульды точку, соответствующую одной из вышеприведенных величин деформаций. В последних версиях «Указаний...» 2014 и 2022 годов аналогичных величин не приводилось.

Использование подобных величин опасных деформаций прослеживается и в других действующих нормативных документах, не относящихся к рассматриваемому месторождению, например в [19] или [20], что в свою очередь свидетельствует об их высокой распространенности. Учитывая также, что рассматриваемые значения критических деформаций получены с учетом конструктивных особенностей различных сооружений и их пересмотр подразумевает проведение обширных практических и научно-исследовательских работ, можно заключить об отсутствии целесообразности их актуализации в рамках настоящей работы. Для практического использования уместно ограничиться ранее установленными величинами опасных деформаций.

Углы полных сдвижений

Выбор критериев для определения углов полных сдвижений неразрывно связан с установлением границы плоского дна мульды. Как правило, за границу плоского дна принимают ближайшую к границе мульды сдвижения точку с максимальным оседанием, деформации в которой близки к нулю [21].

Для условий отработки запасов ВКМКС в «Указаниях...» 1976 года в качестве критериев определения границы плоского дна мульды предложены значения деформаций: $i = 1,6 \cdot 10^{-3}$, $K = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$, $\varepsilon = 2,5 \cdot 10^{-3}$. В других версиях обозначенного нормативного документа аналогичных значений не приводилось, что отчасти можно связать с некоторой сложностью применения их на практике, обусловленной частым отсутствием выраженного плоского дна мульды вследствие неоднородности сформированной геомеханической системы. Последнее определяется прежде всего различиями в величинах максимально возможных оседаний, продолжительностях и скоростях развития процесса сдвижения в отдельных геомеханических зонах отработки запасов.

Учитывая сказанное, нельзя сделать вывод о неактуальности граничных критериев для определения углов полных сдвижений на ВКМКС. Опираясь на данные инструментальных наблюдений за сдвижением земной поверхности в условиях рассматриваемого месторождения, можно отметить, что наиболее выраженное плоское дно мульды встречается на руднике БКПРУ-2 на участках, где у части зон вблизи к постоянной границы выработанного пространства велась отработка запасов с применением податливых целиков (рис. 3 и 4, см. вклейку на стр. 25).

Принимая во внимание ранее упомянутую информацию о нулевых деформациях на границе плоского дна мульды и учитывая равенство предельных ошибок определения наклона i и горизонтальной деформации ε как на границе плоского дна мульды, так и в ее краевой части, можно сделать вывод о возможности использования ранее определенных критериев для граничных углов $i = 0,15 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3}$ применительно к углам полных сдвижений. Здесь немало важно отметить, что критерий ε также будет являться дополнительным и его использование возможно лишь в отдельных случаях при наличии своевременных систематических ин-

тервальных наблюдений на исследуемом участке профильной линии.

Анализируя ранее используемый критерий K , можно отметить, что близость кривизны к нулевому значению в районе плоского дна мульды отражает близость величин наклонов двух смежных интервалов. Если при этом принять во внимание то, что величина наклона на границе плоского дна мульды стремится к нулю, тогда для использования критерия кривизны наклон на смежном интервале также должен стремиться к нулю, следовательно, в рассматриваемом случае необходимо наличие относительного постоянства оседаний у трех смежных реперов на границе плоского дна мульды. Учитывая неоднородность геомеханической системы, формируемой при отработке запасов ВКМКС, наличие вышеупомянутого постоянства оседаний на границе плоского дна мульды является малораспространенным случаем, поэтому использование критерия K применительно к углам полных сдвижений неуместно.

Аналогичные размышления справедливо экстраполировать и на критерий максимального оседания, который при независимом применении в условиях рассматриваемого месторождения не отражает истинного местоположения границы плоского дна мульды вследствие слабой выраженности постоянства численных значений ηm . Подтверждением сказанному на практике является высокая изменчивость относительно нуля наклонов и кривизны в плоском дне мульды, что наглядно видно из рисунков 3 и 4. С другой стороны, максимальное оседание является неотъемлемой характеристикой плоского дна мульды и должно быть задействовано для идентификации местоположения его границы. С учетом вышеизложенного наиболее уместным в рассматриваемом случае будет применение вышерассмотренных критериев i и ε в некой «области максимальных оседаний», характеризующей наличие плоского дна мульды. При этом «областью максимальных оседаний» можно считать визуально определяемый из разреза сдвижений и деформаций профильной линии участок мульды, где наблюдается тенденция к сохранению относительного постоянства максимальных оседаний, минимальных наклонов и горизонтальных деформаций среди группы смежных реперов.

Сравнивая углы полных сдвижений, полученные с использованием «старых» (1976 г.) и «новых» критериев применительно к данным инструментальных наблюдений по трем профильным линиям на руднике БКПРУ-2, можно отметить некоторое постоянство во времени численных величин определяемых углов, которое особенно выражено для «новых» критериев. «Старые» критерии определяют величины рассматриваемых углов, составляющих в среднем $55,4^\circ$, что близко к значению 55° , приведенному во всех версиях «Указаний...». «Новые» критерии по сравнению со «старыми» определяют аналогичные углы в среднем на $4,5^\circ$ меньше, т. е. около $50,9^\circ$.

Углы максимальных оседаний

В условиях неполной подработки земной поверхности, когда в мульде сдвижения отсутствует плоское дно, точка, характеризующая максимальным оседанием, является главным критерием для определения соответствующего угла. С другой стороны, для условий отработки запасов ВКМКС вследствие разнообразия геомеханических зон с различными параметрами отработки запасов характерно

формирование сложных форм мульд сдвижения, что не дает возможности непосредственного использования критерия максимального оседания. Подобные размышления справедливы и для критериев границы плоского дна мульды в условиях полной подработки. В описанных условиях отсутствует возможность непосредственно устанавливать величины отдельных существующих угловых параметров процесса сдвижения, а также при отсутствии инструментальных наблюдений выполнять достоверное определение деформаций на анализируемом участке шахтного поля. Решение описанной проблематики возможно с применением сочетательного подхода результирующей формы проявления сдвижений из отдельных мульд, образованных от каждой геомеханической зоны отработки запасов. Для реализации изложенного особую важность приобретает выделение вспомогательных угловых параметров процесса сдвижения и соответствующих им критериев, позволяющих установить виртуальные границы сочетаемых мульд, что можно отнести к последующим целям исследования.

Заключение

1. При наличии опорных реперов в краевой части исследуемого участка профильной линии в качестве основного граничного критерия уместно принять величину оседания $\eta = 6$ мм. Дополнительными уточняющими критериями в области оседаний до 6 мм могут служить наклон $i = 0,15 \cdot 10^{-3}$ и горизонтальная деформация $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3}$, последний из которых применим лишь в случае наличия своевременных систематических интервальных наблюдений. При отсутствии опорных реперов в краевой части исследуемого участка профильной линии необходим дополнительный расчет критерия η , который можно осуществить путем нахождения погрешности определения оседания последнего, наиболее удаленного от границы ведения горных работ репера. В случае невозможности осуществления вышеобозначенного расчета критерия η определение местоположения границы мульды следует выполнять с использованием критериев i и ε . При определении границы мульды способами, исключающими

характерные для нивелирных ходов погрешности, например в условиях математического моделирования, основным критерием является оседание $\eta = 2$ мм.

2. За границу зоны опасных сдвижений уместно принимать ближайшую к границе мульды точку, соответствующую одной из следующих величин деформаций: $i = 4 \cdot 10^{-3}$, $K = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$, $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$.

3. Для определения границы плоского дна мульды при полной подработке земной поверхности основным критерием в «области максимальных оседаний» является величина наклона $i = 0,15 \cdot 10^{-3}$, а дополнительным при наличии своевременных систематических интервальных наблюдений по профильной линии значение горизонтальной деформации $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3}$.

4. Для определения угла максимальных оседаний в условиях неполной подработки уместно ограничиться точкой, получившей развитие наибольшего оседания.

5. Неоднородность сформированной на шахтных полях рудников геомеханической системы способна приводить к образованию мульд со сложной формой краевых частей и отсутствием выраженного плоского дна, что не дает возможности непосредственно устанавливать величины отдельных существующих угловых параметров процесса сдвижения, а также при отсутствии инструментальных наблюдений выполнять достоверное определение деформаций на анализируемом участке шахтного поля.

Решение описанной проблематики возможно с применением подхода сочетания отдельных мульд сдвижения, образованных от каждой геомеханической зоны отработки запасов, в результирующую суммарную форму проявления сдвижений, что в свою очередь формирует необходимость рассмотрения вопроса о выделении вспомогательных угловых параметров процесса сдвижения и соответствующих им критериев, позволяющих установить виртуальные границы сочетаемых мульд. Решение описанной проблемы можно отнести к последующим целям исследования. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Барях, А. А. Обоснование инженерных критериев безопасной подработки водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении солей / А. А. Барях, Л. О. Тенисон // Горный журнал. - 2021. - № 4. - С. 57-63.
2. Кудряшов, А. И. Верхнекамское месторождение солей / А. И. Кудряшов. - 2-е изд., перераб. - М.: Эпсилон Плюс, 2013. - 368 с.
3. Барях, А. А. Горнотехнические аварии: затопление Первого Березниковского калийного рудника / А. А. Барях, А. Е. Красноштейн, И. А. Санфиоров // Вестник Пермского научного центра УрО РАН. - 2009. - № 2. - С. 40-49.
4. Шиман, М. И. Предотвращение затопления калийных рудников. - М.: Недра, 1992. - 176 с.
5. Тенисон, Л. О. Прогнозирование вертикальных деформаций земной поверхности в условиях затопленного рудника БКПРУ-1 // ГИАБ. - 2016. - № 1. - С. 230-242.
6. Ковалев, О. В. Некоторые подходы к обеспечению безопасной отработки калийных месторождений / О. В. Ковалев, С. П. Мозер // Записки Горного института. - 2014. - Т. 207. - С. 55-59.
7. Борзаковский, Б. А. О возможности образования новых провалов на затопленном руднике БКПРУ-1 / Б. А. Борзаковский, В. Н. Аптуков, Л. О. Тенисон // ГИАБ. - 2015. - № 10. - С. 5-13.
8. Whyatt, J. Catastrophic Failures of Underground Evaporite Mines / J. Whyatt, F. Varley // Proceedings of the 27th International Conference on Ground Control in Mining. - West Virginia: National Institute for Occupational Safety and Health, 2008. - P. 113-122.
9. Time Series Effect on Surface Deformation above Goaf Area with Multiple-Seam Mining / Z. Shi, Q. Wang, P. Wang [et al.] // Symmetry. - 2020. - Vol. 12. - P. 1428.
10. Engineering geology and ground collapse mechanism in the Chengchao Iron-ore Mine in China / K. Xia, C. Chen, Y. Zheng, H. Zhang // Engineering Geology. - 2019. - Vol. 249. - P. 129-147.
11. Investigation of processes of rocks deformation and the earth's surface subsidence during underground coal mining / V. Buzlyo, A. Pavlychenko, O. Borysovskaya, D. Saveliev // E3S Web of Conferences. - 2019. - Vol. 123. - P. 01050.

12. Luan, Y. Surface and New Building Deformation Analysis of Deep Well Strip Mining / Y. Luan, Y. Dong, Y. Ma // *Advances in Materials Science and Engineering*. - 2020. - Vol. 2. P. 1-14.
13. Harms, S. Overburden Subsidence and Sinkholes / S. Harms, H. Konietzky. - TU Bergakademie FREIBERG, Institut für Geotechnik, 2020.
14. Казаковский, Д. А. Сдвигение земной поверхности под влиянием горных разработок / Д. А. Казаковский. - М.: Углетехиздат, 1953. - 228 с.
15. Гудков, В. М. Математическая обработка маркшейдерско-геодезических измерений: учебник для вузов / В. М. Гудков, А. В. Хлебников. - М.: Недра, 1990. - 335 с.
16. Азаров, Б. Ф. Решение задач по теории ошибок геодезических измерений / Б. Ф. Азаров, И. В. Карелина; Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013. - 29 с.
17. Единый проект производства маркшейдерских работ на объектах ПАО «Уралкалий». 3-я редакция. - Березники, 2018.
18. Указания (мероприятия) по защите рудников ПАО «Уралкалий» от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных разработок на ВКМКС: Методические рекомендации: в двух частях / ГИ УрО РАН. - Пермь, 2022.
19. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. - СПб., 1998. - 291 с.
20. РД 07-166-97: Инструкция по наблюдениям за сдвигениями земной поверхности и расположенными на ней объектами при строительстве в Москве подземных сооружений [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200029700> (дата обращения: 11.04.2024).
21. Михайлова, Т. В. Сдвигение и деформации пород и земной поверхности при ведении горных работ / Т. В. Михайлова, Т. Б. Рогова. - Кемерово: КузГТУ, 2017. - 110 с.

REFERENCES

1. Baryakh AA, Tenison LO. Justification of engineering safety criteria for undermining of water-proof layer in the Upper Kama Salt Deposit. *Mining magazine*. 2021;4:57-63 (In Russ.).
2. Kudryashov AI. Verkhnekamsk salt deposit. 2nd ed., revised. Moscow, 2013 (In Russ.).
3. Baryakh AA, Krasnoshtein AE, Sanfirov IA/ Mining accidents: flooding of the First Berezniki potash mine. *Bulletin of the Perm Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2009;2:40-9 (In Russ.).
4. Shiman MI. Avoiding of flooding of potassium mines. Moscow: Nedra, 1992 (In Russ.).
5. Tenison LO. Prediction of vertical deformations of ground surface in conditions of flooded mine Berezniki 1. *GIAB*. 2016;1:230-42 (In Russ.).
6. Kovalev OV, Mozer SP. Some approaches to secure mining of potash deposits. *Journal of Mining Institute*. 2014;207:55-9 (In Russ.).
7. Borzakovskiy BA, Aptukov VN, Tenison LO. On possibility of new sink holes in the flooded mine Berezniki 1. *GIAB*. 2015;10:5-13 (In Russ.).
8. Whyatt J, Varley F. Catastrophic Failures of Underground Evaporite Mines. *Proceedings of the 27th International Conference on Ground Control in Mining. West Virginia: National Institute for Occupational Safety and Health*, 2008.
9. Shi Z, Wang Q, Wang P, et al. Time Series Effect on Surface Deformation above Goaf Area with Multiple-Seam Mining. *Symmetry*. 2020;12:1428.
10. Xia K, Chen C, Zheng Y, et al. Engineering geology and ground collapse mechanism in the Chengchao Iron-ore Mine in China. *Engineering Geology*. 2019;249:129-47.
11. Buzlyo V, Pavlychenko A, Borysovska O, et al. Investigation of processes of rocks deformation and the earth's surface subsidence during underground coal mining. *E3S Web of Conferences*. 2019;123:01050.
12. Luan Y, Dong Y, Ma Y. Surface and New Building Deformation Analysis of Deep Well Strip Mining. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020;(2):1-14.
13. Harms S, Konietzky H. Overburden Subsidence and Sinkholes. TU Bergakademie FREIBERG, Institut für Geotechnik, Updated: 26 October 2020.
14. Kazakovskiy DA. The displacement of the earth's surface under the influence of mining. Moscow:Ugletekhizdat, 1953 (In Russ.).
15. Gudkov VM, Khlebnikov AV. Mathematical processing of mine surveying and geodetic measurements: Proc. for universities. Moscow: Nedra, 1990 (In Russ.).
16. Azarov BF, Karelina IV. Solving problems in the theory of errors of geodetic measurements / Alt. state tech. un-t im. I.I. Polzunov. Barnaul, 2013 (In Russ.).
17. A single project for the production of surveying work at the facilities of PJSC «Uralkali». 3rd edition. Berezniki, 2018 (In Russ.).
18. Regulations for the protection of the mines of PJSC «Uralkali» from flooding and the protection of objects on the earth's surface from the harmful effects of underground mining on the VDPMS. 2 Part. Perm, 2022 (In Russ.).
19. Rules for the protection of structures and natural objects from the harmful effects of underground mining in coal deposits. St. Petersburg, 1998 (In Russ.).
20. GD 07-166-97: Instructions for observing the movements of the earth's surface and objects located on it during the construction of underground structures in Moscow. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200029700> (In Russ.).
21. Mikhailova TV, Rogova TB. Movement and deformation of rocks and earth surface during mining. Kemerovo: KuzGTU, 2017 (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Щегольков Юрий Сергеевич:

главный специалист,
аналитический отдел проектно-аналитического управления,
ПАО «Уралкалий»,
г. Березники, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shchegolkov Yuri Sergeevich:

main specialist,
analytical department of design and analytical management,
PJSC «Uralkali»,
Berezniki, Russia

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ МАССИВА В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Е. Е. Одинцов, В. Н. Гусев,

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Существующие гидрогеологические, инструментальные и аналитические способы определения местоположения верхней границы зоны техногенных водопроводящих трещин не позволяют спрогнозировать ее изменение во времени в сложных горно-геологических условиях и с учетом высоких темпов добычи твердых полезных ископаемых. Их применение влечет за собой высокие риски возникновения техногенных аварий. В работе рассмотрен разработанный метод прогноза состояния горного массива на основе закономерностей распределения деформаций в подработанном массиве на примере месторождения твердых полезных ископаемых. Полученные по результатам обработки натурных данных закономерности адаптированы и позволяют выполнить прогноз развития геомеханических параметров с учетом утвержденных планов ведения горных работ, что обеспечивает безопасность работы рудника.

Ключевые слова: горный массив, зона техногенных трещин, геомеханика, безопасность горных работ, сложные горно-геологические условия.

Для цитирования: Одинцов Е. Е., Гусев В. Н. Применение метода прогнозирования состояния массива в сложных горно-геологических условиях // Маркшейдерия и недропользование. 2024. № 3. С. 55-60. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_55_60.

APPLICATION OF THE METHOD OF MASSIF CONDITION FORECASTING IN COMPLEX MINING AND GEOLOGICAL CONDITIONS

E. E. Odintsov, V. N. Gusev,

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

Abstract: The existing hydrogeological, instrumental and analytical methods of determining the location of the upper boundary of the zone of technogenic water-conducting cracks do not allow to predict its change in time in complex mining and geological conditions and taking into account the high rates of solid minerals extraction. Their application involves high risks of technogenic accidents. The developed method of predicting the condition of the rock massif on the basis of regularities of distribution of deformations in the developed massif on the example of solid minerals deposit is considered in the paper. The regularities obtained from the results of processing of field measurements are adapted and make it possible to forecast the development of geomechanical parameters taking into account the approved plans of mining operations, which provides the safety of the mine.

Keywords: rock massif, technogenic cracks zone, geomechanics, mining safety, complicated mining and geological conditions.

For citation: Odintsov E. E., Gusev V. N. Application of the method of massif condition forecasting in complex mining and geological conditions. Surveying and subsoil use. 2024;(3):55-60. (In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_3_55_60.

Актуальность темы основывается на произошедших в последние десятилетия крупных авариях на ряде отечественных и зарубежных горных предприятий, связанных с частичным или полным затоплением горных выработок, разрывом сплошности массива горных пород, а также другими техногенными авариями с большим экономическим ущербом [1].

Геологические и гидрогеологические особенности рассматриваемого месторождения богатых железных руд представляют собой сложный комплекс из семи высоконапорных водоносных горизонтов. Данные горизонты условно разделены на два водоносных комплекса: нижний и верхний, гидравлическая связь между ними значительно затруднена [2, 3]. Это обусловлено наличием мощной толщи аргиллитовид-

ных глин, которая в случае отсутствия нормальносекущих водопроводящих трещин представляет собой надежный водоупор. Защита горных выработок первого слоя обеспечивается сохранением над очистным пространством предохранительного целика, мощностью 65 метров и более.

В качестве утвержденной на предприятии технологической системы разработки применяется слоевая нисходящая с полной закладкой выработанного пространства твердеющим веществом [3]. В данной системе отработанный слой является защитной потолочиной для последующего. Однако ввиду частичной недозакладки выемочного пространства, а также низких крепостных свойств пород в предохранительном целике образуется зона водопроводящих техногенных трещин.

Оценка высоты зоны трещин, а также степени нарушенности массива в операционном режиме позволит создать безопасные условия для отработки рудного тела, а также предупредит обильное попадание воды в горные выработки. В связи с этим разработка способа прогноза и управления развитием техногенных трещин с учетом закономерностей распределения деформаций и планов развития горных работ в подработанном массиве горных пород является весьма актуальной [4, 5].

Цель исследований. Повышение безопасности горных работ, снижение рисков прорывов воды и возникновения аварий при подработке водных объектов на месторождениях твердых полезных ископаемых со сложными горно-геологическими условиями.

Метод прогноза высоты зоны водопродводящих трещин

В разных горно-геологических условиях на месторождениях твердых полезных ископаемых одна из ключевых задач состоит в определении параметра граничной кривизны для данных условий, что включает в себя выявление слоев в отработываемом горном массиве, имеющих кривизну, соответствующую предельной. Данная кривизна слоев характерна для верхней границы зоны проницаемых водой толщ. Определение данного параметра в качестве исходного необходимо для проведения расчетов геометрии техногенной трещиноватости в массиве, включающем водоносные горизонты [6, 7]. Изучения, проведенные для эмпирического определения высоты зоны техногенных нормальносекущих трещин, выявили функциональную зависимость между граничной кривизной и наличием глинистых пород, а также расположением слоев в зависимости от их толщины в эксплуатируемом горном массиве [8]:

$$K_T = c \times K_{T0} \times 10^{-3}, \quad (1)$$

где c — относительный центр распределения слоев по их мощности в подработываемой толще; K_T — граничная кривизна, являющаяся максимальной кривизной на верхней границе зоны водопродводящих трещин; K_{T0} — граничная кривизна, зависящая от содержания глинистых пород.

Исходя из анализа статистических данных зависимость слоя граничной кривизны от наличия в нем глинистых пород представляет собой следующую взаимосвязь:

$$K_{T0} = 0,8 \times e^A \times 10^{-3}, \quad (2)$$

где A — содержание глинистых пород в подработываемой толще; e — основание натурального логарифма.

Из прогнозного метода, основанного на функциях типовых кривых распределения сдвижений и деформаций, и эмпирических данных получена зависимость высоты зоны водопродводящих трещин от кривизны граничного слоя [8]:

$$H_T = 2 \sqrt{\frac{m}{K_2}}, \quad (3)$$

где H_T — высота зоны водопродводящих трещин (ЗВТ); m — вынимаемая мощность пласта; K_2 — граничная кривизна.

Данная методика расчета принята в качестве основной в организациях, выполняющих геомеханическое научное со-

провождение ведения горных работ на месторождениях твердых полезных ископаемых.

Главным преимуществом данного аналитического подхода является возможность оперативного прогнозирования геометрического параметра высоты зоны техногенных водопродводящих трещин на основе имеющихся данных геомеханического мониторинга, а также геологических данных [9]. Недостатком метода является малое число параметров, учитываемых при определении величины граничной кривизны.

Результаты

В результате расчетов данных о сдвигении подработываемых горных пород выявлена взаимная зависимость между параметрами кривизны, наклонов и оседаний в составе массива пород и на поверхности в зоне ведения горных работ [8].

Установлено обратно пропорциональное отношение следующих геометрических величин [8]:

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}, \quad (4)$$

где H_1 — расстояние по вертикали от земной поверхности до наблюдаемой горной выработки; H_2 — расстояние от слоя породы в массиве до соответственно кровли наблюдаемой выработки; η_1 — значение наибольшего оседания на земной поверхности; η_2 — наибольшее оседание слоя породы в массиве под землей.

Схема распределения значений максимальных оседаний на поверхности и в массиве представлена на рисунке 1.

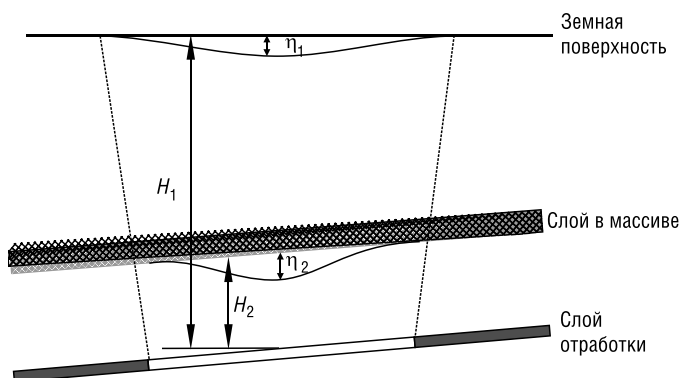


Рис. 1. Схема распределения значений максимальных оседаний на земной поверхности и некоторого слоя в массиве подработанных горных пород (составлено авторами)

Fig. 1. Scheme of distribution of values of maximum subsidence on the ground surface and some layer in the mass of mined rocks [compiled by the authors]

Первая производная от оседаний η_1 и η_2 — наклон в точках η'_1 и η'_2 [8]:

$$\frac{\eta'_1}{\eta'_2} = \frac{H_2}{H_1}. \quad (5)$$

Вторая производная от оседаний η_1 и η_2 — кривизна в точках η''_1 и η''_2 [8]:

$$\frac{\eta''_1}{\eta''_2} = \frac{H_2^2}{H_1^2}. \quad (6)$$

Данные закономерности в совокупности при условии адаптации приведенных выражений (1), (2), (3) к горно-геологическим условиям месторождения позволяют производить оперативный прогноз геомеханических параметров, в том числе рассчитать местоположение ЗВТ.

Известно, что кривизна кривой оседания уменьшается при увеличении расстояния от разрабатываемого пласта. Этот факт хорошо подтверждается зависимостями С. Г. Авершина, которые применимы к некоторым месторождениям твердых полезных ископаемых. Данные геомеханического мониторинга месторождения помогают произвести расчет эмпирического коэффициента, позволяющего рассчитать и прогнозировать высоту ЗВТ с учетом утвержденных планов развития горных работ.

Для дальнейших расчетов за расстояние от поверхности до горизонта -370 м, где проводится отработка, примем среднее значение 605 м (H_1), а за расстояние от слоя отработки до слоя в массиве принято расстояние от кровли горизонта отработки до местоположения подземных реперов, закрепленных на глубине 9 м относительно кровли (H_2).

Рассмотрим данные мониторинга наблюдательных станций на поверхности и под землей, заложенных на удалении 9 м от кровли горизонта -370 м. Их взаимовлияние определя-

лось исходя из принятого положения о том, что сдвигение горных пород происходит по направлению к центру тяжести, отмеченному на рисунке 2 [3].

Данные геодезического мониторинга при первичной подработке представлены в таблице. Значения по подземной наблюдательной станции приведены с отставанием в 19 месяцев от поверхностных, что позволяет говорить о завершенности геомеханических процессов, вызванных первичной выемкой руды.

Таблица 1 / Table 1

Результаты геодезического мониторинга реперов Rp30 и Rp22
Results of geodetic monitoring of Rp30 and Rp22

Дата мониторинга / Monitoring date	Репер / Marker
Репер на поверхности Rp30/ Surface marker	
23.05.2012	231,408
23.07.2012	231,396
23.09.2012	231,375
Подземный репер Rp22/ Underground surveyor	
21.10.2010	-366,985
24.01.2011	-367,024
04.03.2011	-367,068

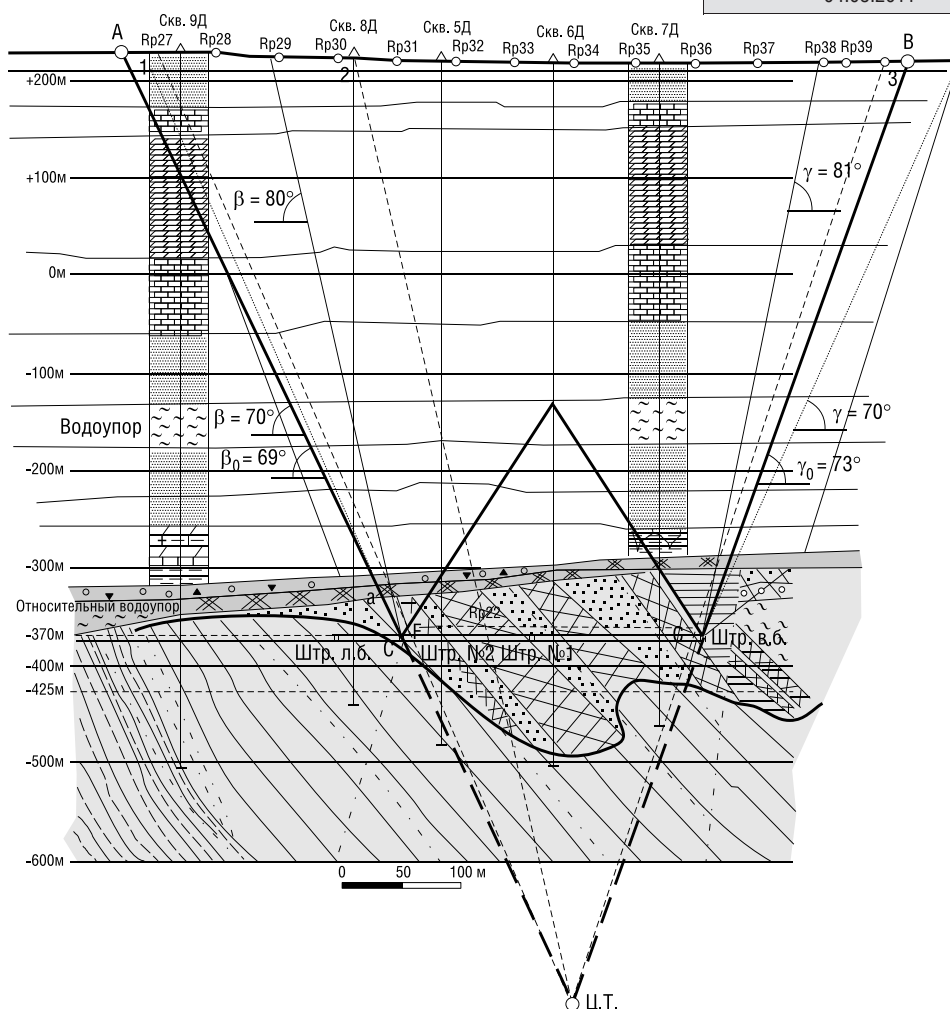


Рис. 2. Схема определения влияния сдвижения подземных реперов по отношению к поверхностным наблюдательным станциям [3]

Fig. 2. Scheme for determining the influence of the displacement of subsurface benchmarks in relation to surface observation stations [3]

Рассчитаем значение степени для репера Rp22, при которой выполняется значение закономерности (3):

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^{0,15}. \quad (7)$$

Аналогично выполним расчет для реперов Rp16, Rp17 и Rp18, расположенных в плоскости разреза по профильной линии II. Здесь значения степени варьируются от 0,05 до 0,15. Это обусловлено различием физико-механических свойств пород перекрывающей и рудовмещающей толщи, а также наличием различной степени недозакладки выемочного пространства.

В общем виде закономерность (7) позволяет оценить значения геомеханических параметров в подработанном массиве горных пород рассмотренного месторождения богатых железных руд, а также достаточно точно в условиях непрерывного производства установить местоположение верхней границы зоны водопроводящих трещин.

Обсуждение

В качестве основных трудов в части создания методов оценки параметров зоны водопроводя-

ших трещин, водозащитной толщи, а также создания аналитического подхода и развития представлений процесса сдвижений и деформаций горных пород выделяются работы ученых: С. Г. Авершина, И. М. Бахурина, Б. Я. Гвирицмана, В. Н. Дешковского, Ю. А. Норватова и многих других.

Кроме того, работы [10-12] показывают, что качественное изучение вариаций образований зоны техногенных водопроводящих трещин на протяжении долгих лет является весьма актуальной задачей для повышения безопасности отработки полезного ископаемого [13]. При этом в данном направлении используются разные подходы и методы, позволяющие напрямую или косвенно определить параметры зоны трещиноватости. Используются физические модели месторождения, а также модели механики сплошных и дискретных сред [14-16]. На основе физико-механических свойств горного массива [17], определенных путем проведения лабораторных испытаний, натурных наблюдений и численного моделирования [18], выполняется обоснование модели среды и ее параметров для рассматриваемых горно-геологических условий.

В части эффективности способов определения высоты зоны водопроводящих трещин следует выделить достоверность и точность применения гидрогеологических способов [19-21], получивших широкое применение на месторождениях твердых полезных ископаемых, которые отличаются обилием подрабатываемых водных объектов [22] и высокой

сложностью гидрогеологических условий залегания [23-25]. Однако проведение наблюдений данными способами требует существенных трудозатрат. Кроме того, отрицательным фактором является отсутствие возможности прогнозирования развития высоты зоны водопроводящих трещин в условиях высоких темпов добычи богатых железных руд. Применение существующих способов влечет за собой высокие риски возникновения техногенных аварий.

В связи с этим разработанный способ прогноза развития зон водопроводящих трещин для сложных горно-геологических и гидрогеологических условий месторождений твердых полезных ископаемых является актуальным.

Заключение

В статье представлен метод геомеханического прогноза деформационных параметров массива аналитическим методом, на основе данных мониторинга профильных линий.

Для сложных горно-геологических условий рудника адаптирована закономерность, на основе которой возможно выполнить оперативные расчеты ряда ключевых геомеханических параметров и спрогнозировать параметры высоты зоны водопроводящих трещин в режиме реального времени через установленную закономерность. В совокупности с инструментальными наблюдениями разработанный метод позволит непрерывно получать данные о местоположении верхней границы зоны водопроводящих трещин. Данные позволят обеспечить безопасность ведения горных работ в тяжелых горно-геологических условиях. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору [Сайт]. - URL: <https://www.gosnadzor.ru/> (дата обращения: 21.03.2024).
2. Илюхин, Д. А. Зависимость параметров зон водопроводящих трещин от геологического строения подрабатываемой толщи / Д. А. Илюхин // Маркшейдерско-геодезическое обеспечение рационального использования, охраны недр и строительства сооружений: межвуз. сб. науч. тр. Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). - Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2012. - С. 41-46.
3. Малюхина, Е. М. Исследование процессов сдвижения и деформаций горных пород по данным геомеханического мониторинга на Яковлевском руднике / Е. М. Малюхина, В. Н. Гусев // Маркшейдерский вестник. - 2017. - № 5. - С. 64-70.
4. Зубов, В. П. Технологии интенсивной разработки калийных пластов длинными очистными забоями на больших глубинах: актуальные проблемы, направления совершенствования / В. П. Зубов, Д. Г. Сокол // Записки Горного института. - 2023. - Т. 264. - С. 874-885.
5. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами / В. С. Литвиненко, Е. И. Петров, Д. В. Василевская [и др.] // Записки Горного института. - 2023. - Т. 259. - С. 95-111.
6. Esteves Motta, G. New constitutive equation for salt rock creep / G. Esteves Motta, C. L. Lopes Pinto // REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto. - 2014. - Vol. 67, № 4. - 2014. - P. 397-403.
7. ISRM Suggested Methods for Determining the Creep Characteristics of Rock / O. Aydan, T. Ito, U. Ozba [et al.] // Rock Mech Rock Eng. - 2013. - Vol. 47, № 1. - P. 275-290.
8. Гусев, В. Н. Прогноз безопасных условий разработки свиты угольных пластов под водными объектами на основе геомеханики техногенных водопроводящих трещин / В. Н. Гусев // Записки Горного института. - 2016. - Т. 221. - С. 638-643.
9. Шабаров, А. Н. Основные направления развития горнодобывающей отрасли в усложняющихся горнотехнических условиях ведения горных работ / А. Н. Шабаров, А. Д. Куранов // Горный журнал. - 2023. - № 5. - С. 5-10.
10. Physical and numerical investigations of bedding adhesion strength on stratified rock roof fracture with longwall coal mining / Minghe Ju, Dapeng Wang, Jingcheng Shi [et al.] // Geomech. Geophys. Geoenerg. Georesour. - 2021. - Vol. 7. - P. 24.
11. Протосеня, А. Г. Оценка концентрации напряжений вблизи карстовых полостей при разработке рудных месторождений / А. Г. Протосеня, А. В. Веселова, Д. А. Котиков // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2024. - № 2. - С. 5-22.
12. Барях, А. А. Математическое моделирование развития процесса сдвижения при отработке калийных руд длинными очистными забоями / А. А. Барях, С. Ю. Девятков, Э. Т. Денкевич // Записки Горного института. - 2023. - Т. 259. - С. 13-20.
13. The hight of fractured water-conducting zone in undermined rock strata / Xiexing Miao, Ximin Cui, Jin'an Wang, Jialin Xu // Engineering Geology. - 2011. - Vol. 120. - P. 32-39.
14. Холмский, А. В. Мероприятия по повышению эффективности горных работ на глубоких рудниках / А. В. Холмский, Д. В. Сидоров // Научно-практические исследования сырьевых проблем: Материалы российско-германского сырьевого диалога: Сборник докладов и дискуссионных молодых ученых. - Лондон: CRC Press, 2019. - С. 71-74.

15. Liu, B. Centrifuge investigation of soil - foundation - superstructure interaction under static loading / B. Liu, J. Xue, B. M. Lehane // *Engineering Structures*. - 2023. - Vol. 281. - P. 115779.
16. Investigation of rock salt layer creep and its effects on casing collapse / S. R. Taheri, A. Pak, S. Shad [et al.] // *International Journal of Mining Science and Technology*. - 2020. - Vol. 30. - P. 357-365.
17. Wan-rong, L. Experimental and numerical study of rock stratum movement characteristics in longwall mining [Электронный ресурс] / L. Wan-rong // *Shock and Vibration*. - 2019. - URL: <https://www.hindawi.com/journals/sv/2019/5041536/> (режим доступа: 21.04.2024).
18. Комплексный подход к обеспечению устойчивости предохранительных столбов при отработке нарезных пластов на Яковлевском месторождении / А. Д. Куранов, И. И. Багаутдинов, Д. А. Котиков [и др.] // *Горный журнал*. - 2020. - № 1. - С. 115-119.
19. Influence of tunnel shape on tunnel lining behavior / T. T. Nguyen, N. A. Do, M. A. Karasev [et al.] // *ICE Proceedings Geotechnical Engineering*. - 2021. - Vol. 174, N 4. - P. 355-371.
20. An analytical solution for the dynamic tunnel-soil-shallow foundation interaction under a harmonic point load / Z. Cao, X. Ba, Z. Yuan [et al.] // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. - 2023. - Vol. 164. - P. 107647.
21. Theoretical analysis on safety thickness of the waterresistant rock mass of karst tunnel face taking into account seepage effect / J. Guo, W. Wu, X. Liu [et al.] // *Geotechnical and Geological Engineering*. - 2022. - Vol. 40. - P. 697-709.
22. Rock mass collapse mechanism of concealed karst cave beneath deep tunnel / F. Huang, L. Zhao, T. Ling [et al.] // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. - 2017. - Vol. 91. - P. 133-138.
23. Zhang, Q. Mechanical mechanism of hydraulic fracturing effect caused by water inrush in tunnel excavation by blasting [Электронный ресурс] / Q. Zhang, J. Wang, L. Feng // *Mathematical Problems in Engineering*. - 2021. - URL: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2021/9919260/> (дата обращения: 21.04.2024).
24. Response of building to shallow tunnel excavation in different types of soil / C. Zhao, C. Schmüdderich, N. Barciaga, R. Röchter // *Computers and Geotechnics*. - 2019. - Vol. 115. - P. 103165.
25. Assessment of settlement-based strain in masonry building facade due to tunneling / Y. Jian, C. F. Leung, H. Maosong [et al.] // *Computers and Geotechnics*. - 2022. - Vol. 144. - P. 104658.

REFERENCES

1. Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision. Available from: <https://www.gosnadzor.ru/>.
2. Ilyukhin DA. Dependence of parameters of water-conducting crack zones on the geological structure of the mined strata. *Surveyor-geodesic support of rational use, subsoil protection and construction of structures: intergraduate collection of scientific articles*. Novocherkassk, 2012:41-46 (In Russ.).
3. Malyukhina EM, Gusev VN. Investigation of rock shear and deformation processes according to the geomechanical monitoring data at Yakovlevsky mine *Mine Surveyor's Bulletin*. 2017;5:64-70 (In Russ.).
4. Zubov VP, Sokol DG. Technologies of intensive development of potash seams by longwall faces at great depths: current problems, areas of improvement. *Journal of Mining Institute*. 2023;264:874-85 (In Russ.).
5. Litvinenko VS, Petrov EI, Vasilevskaya DV, et al. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:95-111 (In Russ.).
6. Esteves Motta G., Lopes Pinto CL. New constitutive equation for salt rock creep. *REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto*. 2014;67(4):397-403.
7. Aydan O, Ito T, Ozbay U, et al. ISRM Suggested Methods for Determining the Creep Characteristics of Rock. *Rock Mech Rock Eng*. 2013;47(1): 275-90.
8. Gusev VN. Prediction of safe conditions for the development of coal seams under water bodies on the basis of geomechanics of technogenic water-conducting fractures. *Journal of mining institute*. 2016;221:638-43 (In Russ.).
9. Shabarov AN, Kuranov AD. Basic development trends in mining sector in complicating geotechnical conditions. *Mining Magazine*. 2023;(5):5-10. (In Russ.).
10. Minghe Ju, Dapeng Wang, Jingcheng Shi, et al. Physical and numerical investigations of bedding adhesion strength on stratified rock roof fracture with longwall coal mining. *Geomech. Geophys. Geoenerg. Georesour*. 2021;7:24.
11. Protosenya AG, Veselova AV, Kotikov DA. Assessment of stress concentration in neighborhood of karst voids during ore mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2024;(2):5-22. (In Russ.).
12. Baryakh AA, Devyatkov SY, Denkevich ET. Mathematical modelling of displacement during the potash ores mining by longwall faces. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:13-20 (In Russ.).
13. Xiexing Miao, Ximin Cui, Jin'an Wang et al. The hight of fractured water-conducting zone in undermined rock strata. *Engineering Geology*. 2011;120:32-9.
14. Kholmiskiy AV, Sidorov DV. Measures to improve the efficiency of mining operations at deep mines. Scientific and practical research of raw material problems. Materials of the Russian-German raw material dialog: Collection of reports and discussions of young scientists. London, 2019: 71-4 (In Russ.).
15. Liu B, Xue J, Lehane BM. Centrifuge investigation of soil - foundation - superstruc-ture interaction under static loading. *Engineering Structures*. 2023;281:115779.
16. Taheri SR, Pak A, Shad S, et al. Investigation of rock salt layer creep and its effects on casing collapse. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020;30:357-65.
17. Wan-rong L. Experimental and numerical study of rock stratum movement characteristics in longwall mining. *Shock and Vibration*. 2019. Available from: <https://www.hindawi.com/journals/sv/2019/5041536/>
18. Kuranov AD, Bagautdinov II, Kotikov DA, et al. Integrated approach to ensuring the stability of safety pillars during the development of rifled formations at the Yakovlevskoye field. *Mining Journal*. 2020;1:115-19 (In Russ.).

19. Nguyen TT, Do NA, Karasev MA, et al. Influence of tunnel shape on tunnel lining behavior. *ICE Proceedings Geotechnical Engineering*. 2021;174(4):355-71.
20. Cao Z, Ba X, Yuan Z, et al. An analytical solution for the dynamic tunnel-soil-shallow foundation interaction under a harmonic point load. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2023;164:107647.
21. Guo J, Wu W, Liu X, et al. Theoretical analysis on safety thickness of the waterresistant rock mass of karst tunnel face taking into account seepage effect. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2022;40:697-709.
22. Huang F, Zhao L, Ling T, et al. Rock mass collapse mechanism of concealed karst cave beneath deep tunnel. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017;91:133-38.
23. Zhang Q, Wang J, Feng L. Mechanical mechanism of hydraulic fracturing effect caused by water inrush in tunnel excavation by blasting. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. Available from: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2021/9919260/>
24. Zhao C, SchmSchmüderich C, Barciaga N, et al. Response of building to shallow tunnel excavation in different types of soil. *Computers and Geotechnics*. 2019;115:103165.
25. Jian Y, Leung CF, Maosong H, et al. Assessment of settlement-based strain in masonry building facade due to tunneling. *Computers and Geotechnics*. 2022;144:104658.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Одинцов Егор Евгеньевич:

аспирант,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: odintsovgeorge@gmail.com,
ORCID ID: 0009-0008-3424-0148

Гусев Владимир Николаевич:

доктор технических наук,
профессор,
заведующий кафедрой маркшейдерского дела,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: kmd@spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3148-9729

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Odintsov Egor Evgenievich:

PhD student,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: odintsovgeorge@gmail.com,
ORCID ID: 0009-0008-3424-0148

Gusev Vladimir Nikolaevich:

Doctor of Technical Sciences,
Professor,
Head of the Department of Mine Surveying,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: kmd@spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3148-9729

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION:

Е. Е. Одинцов — выполнение научного обзора методов оценки параметров зоны водопроводящих трещин, проведение мониторинга и анализ натурных данных, адаптация аппроксимированных закономерностей к сложным горно-геологическим условиям месторождения, написание и редактирование текста статьи; В. Н. Гусев — постановка задачи исследования, аппроксимация полученных закономерностей.

Е. Е. Odintsov — scientific review of methods for estimation of water-conducting crack zone parameters, monitoring and analysis of field measurements, adaptation of approximated regularities to complicated mining and geological conditions of the deposit, writing and editing the text of the article; V. N. Gusev — formulation of the research problem, approximation of the obtained regularities.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.



УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»
был создан 3(16) июля 1914 г. в Екатеринбурге.

Факультеты: ГОРНО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ (ГМФ),
ГОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ (ГТФ),
ИНЖЕНЕРНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ (ИЭФ), ФАКУЛЬТЕТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ (ФГиГ).

Контакты : +7 (343) 257-25-47, +7 (343) 283-06-06, e-mail: office@ursmu.ru; rector@ursmu.ru, <http://www.ursmu.ru/sveden/common>



WWW.N-GN.RU

СОХРАНЕНИЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ДЛЯ ПОВТОРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

Б. Б. Луганцев, А. И. Чавкин,

Общество с ограниченной ответственностью «Шахтинский научно-исследовательский и проектно-конструкторский угольный институт» (ООО «ШахтНИУИ»), г. Шахты, Россия;

Ю. В. Турук, Е. А. Гревцева, Н. Б. Афонина,

Шахтинский институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова», г. Шахты, Россия

Аннотация: Выбор параметров анкерной крепи и крепи усиления для повторно используемых выемочных выработок на шахтах России регламентируется «Инструкцией по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах». Для крепи усиления она не всегда дает адекватные результаты. Исследования, проведенные на одной из шахт российского Донбасса, показали, что до глубины 630 м указанная инструкция дает параметры, в целом соответствующие условиям эксплуатации выработки, а далее, с увеличением глубины ведения горных работ, сопротивление крепи усиления, определенное по инструкции, оказывается явно недостаточным. В связи с этим на указанной шахте в качестве крепи усиления стала применяться тумбовая крепь, состоящая из деревянно-бетонных блоков (БДБ), не предусмотренная инструкцией. По мере углубления горных работ происходило увеличение доли тумбовой крепи в общем сопротивлении крепи усиления. Тумбовая крепь усиления из БДБ обладает высоким сопротивлением и позволяет эффективно поддерживать выемочные выработки в сложных условиях эксплуатации. Кроме того, она значительно дешевле металлических стоек того же сопротивления. В инструкцию рекомендуется внести изменения: в алгоритме определения сопротивления крепи следует учесть глубину ведения горных работ и предусмотреть применение тумбовой крепи из БДБ в качестве крепи усиления.

Ключевые слова: анкерная крепь, крепь усиления, тумбовая крепь, блок деревянно-бетонный, зона влияния очистных работ, инструкция по применению анкерной крепи.

Для цитирования: Луганцев Б. Б., Чавкин А. И., Турук Ю. В., Гревцева Е. А., Афонина Н. Б. Сохранение горных выработок для повторного использования на больших глубинах // Маркшейдерия и недропользование. 2024. №3. С. 61-66. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_61_66.

CONSERVATION OF MINE WORKINGS FOR REUSE AT GREAT DEPTHS

B. B. Lugancev, A. I. Chavkin,

Limited Liability Company «Shakhty Research and design and engineering Coal Institute» (LLC «Shakhtniui»), Shakhty, Russia;

J. V. Turuk, E. A. Grevtseva, N. B. Afonina,

Shakhty Institute (branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov», Russia

Abstract: The choice of anchorage and strengthen support parameters for again use workings in Russian mines is regulated by the «Instructions for the calculation and application of anchorage in coal mines». As for strengthens support, it does not always give adequate results. Studies conducted at one of the mines of the Russian Donbass have shown that up to a depth of 630 m, the specified instruction gives parameters generally corresponding to the operating conditions of the mine. And further, with an increase in the depth of mining operations, the resistance of the strengthens support, determined according to the instructions, turns out to be clearly insufficient. In this regard, at the specified mine, a strengthen pedestal made of wooden-concrete blocks (BDB), not provided for in the instructions, began to be used as a strengthen support. As mining operations deepened, the share of the pedestal support in the total resistance of the strengthen support increased. The pedestal reinforcement support made of BDB has a high resistance and allows you to effectively maintain workings in difficult operating conditions. In addition, it is much cheaper than metal support of the same resistance. Changes must be made to the instruction: the algorithm for determining the resistance of the support must take into account the depth of mining operations, to provide for the use of a pedestal support made of BDB as a reinforcement support.

Keywords: anchor support, reinforcement support, pedestal support, wooden-concrete block, zone of influence of cleaning works, instructions for the use of anchor support.

For citation: Lugancev B. B., Chavkin A. I., Turuk J. V., Grevtseva E. A., Afonina N. B. Conservation of mine workings for reuse at great depths. Surveying and subsoil use. 2024;(3):61-66. (In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_3_61_66.

На угольных шахтах России распространена система разработки длинными столбами по простиранию, при которой нижний штрек сохраняется за линией первого очистного забоя, а потом используется в качестве вентиляционного при отработке нижерасположенного выемочного поля.

Большинство выемочных штреков на угольных шахтах Российской Федерации при проведении крепится анкерами. Выбор параметров анкерной крепи, крепи усиления и охранных конструкций в настоящее время регламентируется «Инструкцией по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах» (далее по тексту – Инструкция) [1].

В соответствии с п. 33 Приложения № 1 Инструкции анкерная крепь может применяться в трех вариантах:

1) с параметрами, определяемыми расчетными смещениями кровли до влияния первой лавы, перед входом в зону влияния очистных работ анкерная крепь усиливается установкой податливых стоек;

2) с параметрами, определяемыми расчетными смещениями кровли до влияния первой лавы, перед входом в зону влияния очистных работ анкерная крепь усиливается дополнительной анкерной крепью с параметрами, определяемыми максимальным смещением кровли перед погашением выработки смежной лавой, равным 300 мм;

3) с установкой анкерной крепи в два уровня с параметрами, учитывающими эксплуатацию анкерной крепи в зоне влияния очистных работ.

Последний вариант находит все большее применение на угольных шахтах России и СНГ [2-5], хотя он и не всегда дает положительные результаты [6, 7].

Опыт применения крепи усиления

На одной из шахт российского Донбасса до глубин 550 м анкерная крепь применялась по первому варианту (рис. 1а).

Но довольно часто вместо податливых металлических стоек использовалась рамная металлическая крепь трапецевидной формы.

Второй вариант оказался сложным и технически неприемлемым в связи с необходимостью бурить анкеры в уже действующей выработке, чему препятствовали транспортные коммуникации и оборудование.

Испытания третьего варианта не дали желаемого результата. Помимо большой трудоемкости установки канатных анкеров, их применение не позволяло снижать смещения пород кровли до значений, требуемых Инструкцией (не более 300 мм).

С глубины 550 м крепление и охрана выемочных выработок производилась по варианту, не предусмотренному Инструкцией. В качестве крепи усиления вместе с податливыми стойками и (или) рамной металлической крепью использовались тумбы из блоков деревянно-бетонных (рис. 1б) [8].

Переход на новую схему крепления был обусловлен тем, что рассчитанные по Инструкции параметры крепи усиления оказывались недостаточными для эффективного безремонтного поддержания выемочных выработок, сохраняемых для повторного использования.

Шахтой отрабатывается пласт антрацита мощностью 1,0-1,4 м. Непосредственная кровля пласта представлена сланцевыми породами от глинистого до песчаного сланца различной прочности (30-90 МПа) и мощности (0,5-15 м). В основной кровле залегает песчаник прочностью не менее 120 МПа и мощностью не менее 3,0 м.

В таблице 1 приведены сведения о применявшейся в выемочных штреках шахты крепи усиления и ее фактическом сопротивлении.

Анализ данных таблицы позволяет сделать следующие выводы.

1. По мере углубления горных работ необходимо увеличивать сопротивление крепи усиления выемочных штреков для обеспечения их безремонтного поддержания на границе с выработанным пространством.

2. Тумбовую крепь усиления из БДБ начали применять с глубины отработки 630 м.

3. По мере углубления горных работ происходило увеличение доли тумбовой крепи в общем сопротивлении крепи усиления (с 57 до 86 %).

4. Сопротивление крепи усиления, рассчитанное по Инструкции, значительно меньше необходимого начиная с глубины 630 м.

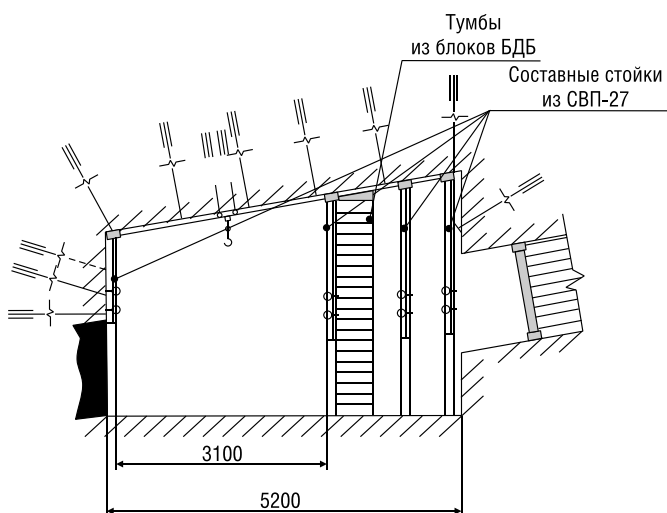
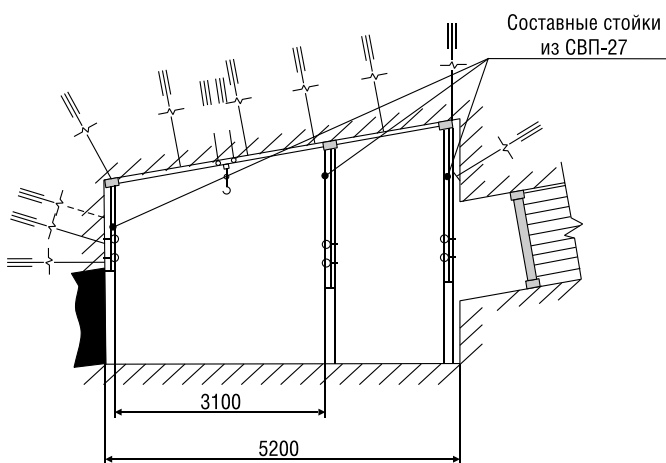


Рис. 1. Примеры усиления выемочных штреков на границе с выработанным пространством:

а - податливыми стойками; б - податливыми стойками и тумбами из блоков деревянно-бетонных

Fig. 1. Examples of reinforcement of excavation drifts at the boundary with the goaf space: a - malleable prop; b - malleable prop and support made of BDB

Таблица 1 / Table 1

Параметры применяемых средств усиления крепи выемочных штреков в зоне влияния очистных работ

Parameters of the applied means of strengthening the support of dredging drifts in the zone of influence of cleaning works

Средняя глубина расположения выработки, м / The average depth of the working location, m	Сопротивление крепи усиления, кН/м Resistance of the strengthening the support, kN/m					Отношение фактического сопротивления крепи усиления к сопротивлению по Инструкции / The ratio of the actual resistance of the support to the resistance specified in the instruction	Сопротивление тумбовой крепи в общем сопротивлении крепи, % / The resistance of the pedestal support in the total resistance of the support, %
	по Инструкции / according to the instructions	Фактическое / the actual					
		рамной металлической / metal frame	металлической стоечной / metal prop	тумбовой из БДБ / pedestal from the BDB	Суммарно / total		
206	600	633	-	-	633	1,06	0
328	592	633	-	-	633	1,07	0
395	590	633	-	-	633	1,07	0
463	590	633	-	-	633	1,07	0
538	590	-	667	-	667	1,13	0
630	580	633	-	833	1467	2,53	57
693	405	633	-	833	1467	3,62	57
758	519	-	920	862	1782	3,43	48
801	548	-	930	1744	2674	4,88	65
819	506	-	952	1786	2738	5,41	65
886	510	333	230	2874	3437	6,74	84
905	517	330	227	3409	3966	7,67	86

На основании данных таблицы 1 была построена зависимость сопротивления крепи усиления от глубины ведения работ (рис. 2). Она хорошо описывается полиномиальной функцией шестой степени (коэффициент аппроксимации $R^2 = 0,99$). За счет увеличения сопротивления крепи усиления при увеличении глубины ведения горных работ смещения пород кровли в выемочных выработках удавалось выдерживать в допустимых пределах (рис. 3).

В соответствии с Инструкцией величина смещений кровли в выемочных выработках за весь период их поддержания не должна превышать 300 мм. В условиях рассматриваемой шахты максимально допустимые значения смещений пород кровли достигают 400–450 мм.

Следует отметить, что по Инструкции исходными данными для определения сопротивления крепи усиления являются всего два параметра: тип кровли и ширина выработки (таблица 10 Приложения № 1 Инструкции). Глубина ведения работ при определении сопротивления крепи усиления по Инструкции не учитывается.

На сопротивление крепи усиления помимо типа кровли и ширины выработки оказывает влияние множество других факторов, степень влияния которых является предметом многочисленных исследований российских и зарубежных исследователей [9–21].

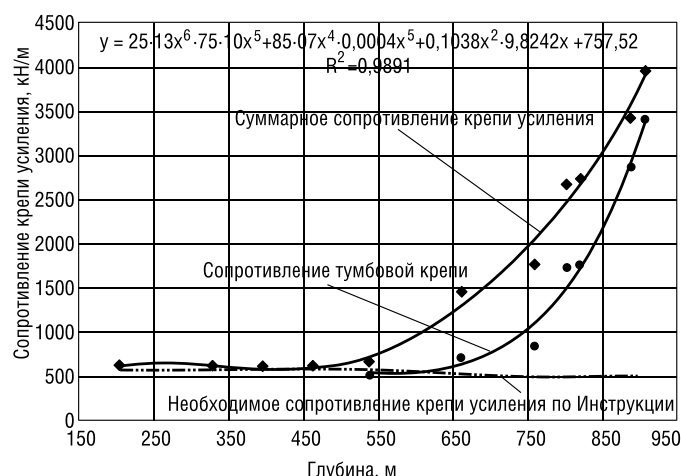


Рис. 2. Зависимость сопротивления крепи усиления в выемочных выработках шахты от глубины ведения горных работ

Fig. 2. Dependence of the resistance of the strengthening the support in the workings of the mine on the depth of mining operations

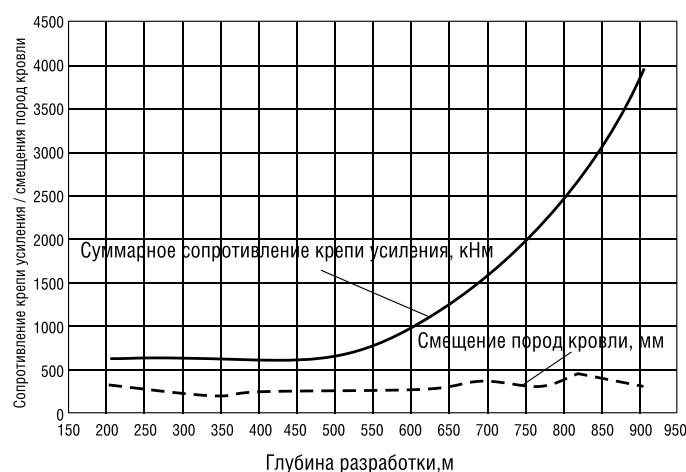


Рис. 3. Изменение сопротивления крепи усиления и смещений пород кровли по мере углубления горных работ

Fig. 3. Changes in the resistance of the strengthening the support and displacements of the roof rocks as mining operations deepen

Для выемочных выработок на указанной шахте рассчитанное по Инструкции сопротивление крепи усиления находится в пределах от 405 до 600 кН/м. Такие значения сопротивления крепи усиления в выемочных штреках могут быть допустимы на глубинах не более 630 м.

Необходимое сопротивление крепи усиления при глубине заложения выработки 630–905 м превышает рассчитанные по Инструкции значения в 2,5–7,7 раза, то есть на больших глубинах (более 600 м) Инструкция неприменима.

Инструкция предусматривает применение в качестве крепи усиления только податливые стойки. Опыт показывает, что применение тумбовой крепи из БДБ, обеспечивающей большее сопротивление, более эффективно.

Исходя из среднего уровня цен по состоянию на январь 2024 года стоимость одной металлической податливой стойки из СВП27 для рассматриваемых условий составляет около 7600 рублей. Стоимость блоков БДБ для возведения одной тумбы крепи усиления составляет около 8400 рублей. Несущая способность стойки составляет 250 кН, а тумбы — 3 тыс. кН. По отношению стоимость — несущая способность тумбы

из БДБ дешевле металлических податливых стоек более чем в 10 раз.

Заключение

1. Действующая Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах России не позволяет достоверно определять параметры крепи усиления выемочных выработок, сохраняемых для повторного использования на больших глубинах (более 600 м). В ней также не предусматривается использование тумб из БДБ в качестве крепи усиления.

2. Тумбовая крепь усиления из БДБ обладает высоким сопротивлением и позволяет эффективно поддерживать выемочные выработки в сложных условиях эксплуатации. Кроме того, тумбовая крепь из БДБ дешевле металлических стоек того сопротивления.

3. В Инструкцию рекомендуется внести изменения: в алгоритме определения сопротивления крепи следует учесть глубину ведения горных работ и предусмотреть применение тумбовой крепи из БДБ в качестве крепи усиления. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах: Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности [Электронный ресурс] / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, приказ от 19 ноября 2020 года № 448. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/573264130> (режим доступа: 01.03.2024).
2. Опыт усиления крепи подземных горных выработок неподатливыми канатными анкерами АК01-21Н в сложных горно-геологических условиях / А. А. Дудин, Н. А. Ефимушкин, А. С. Соколов [и др.] // Уголь. - 2021. - № 1. - С. 11-13.
3. Опыт применения канатных анкеров с повышенной несущей способностью в условиях ООО «Шахта «Осинниковская» / А. А. Дудин, Е. В. Вахрушев, С. Е. Злобин [и др.] // Уголь. - 2020. - № 3. - С. 34-37.
4. Канатный анкер АК01: усиление крепи штреков для работы очистного забоя без механизированной крепи сопряжения / А. В. Самок, Г. В. Райко, А. С. Позолотин, П. В. Гречишкин // Уголь. - 2011. - № 10. - С. 9-11.
5. Установление параметров анкерного крепления в зависимости от горно-технологических условий эксплуатации выработок / С. Б. Алиев, В. Ф. Демин, В. В. Яворский, Т. В. Демина // Уголь. - 2013. - № 1. - С. 69-72.
6. Поддержание выработки для повторного использования в аномальной зоне повышенного горного давления / Б. Б. Луганцев, Н. В. Беликова, В. В. Беликов [и др.] // Уголь. - 2021. - № 4. - С. 10-14.
7. Исследование устойчивости подготовительных выработок, закрепленных анкерной крепью, оказавшихся в сложных аварийных ситуациях при отработке угольных пластов на шахтах Кузбасса / Е. А. Разумов, В. Г. Венгер, С. И. Калинин [и др.] // Уголь. - 2021. - № 11. - С. 13-18.
8. Эффективность применения охранных конструкций из облегченных блоков деревянно-бетонных / Б. Б. Луганцев, А. И. Чавкин, Ю. В. Турк [и др.] // Маркшейдерия и недропользование. - 2024. - № 1. - С. 39-49.
9. Беликов, А. В. Обоснование применения в подготовительных выработках угольных шахт крепей усиления с высокой несущей способностью / А. В. Беликов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2007. - № 8. - С. 68-72.
10. Оценка способов поддержания горных выработок на основе применения анкерной крепи на шахтах Карагандинского угольного бассейна / А. А. Зейнуллин, Е. А. Абеуов, В. Ф. Демин [и др.] // Уголь. - 2021. - № 2. - С. 4-9.
11. Напряженно-деформированное состояние приконтурно-углепородного массива / В. Ф. Демин, Д. С. Шонтаев, Т. К. Балгабеков [и др.] // Уголь. - 2020. - № 5. - С. 63-67.
12. Mechanism of bolt breakage in deep mining roadway under dynamic load and advanced strengthening support technology / Y. Wu, X. Liu, Y. Tan [et al.] // Engineering Failure Analysis. - 2024. - Vol. 161. - P. 108255.
13. Theoretical framework for stress relief-support reinforcement cooperative control of rock bursts in deep coal mining / T. Zhao, W. Guo, D. Zhang [et al.] // Geohazard Mechanics. - 2024. - Vol. 1. - P. 49-57.
14. Hebblewhite, B. K. Geomechanical behaviour of laminated, weak coal mine roof strata and the implications for a ground reinforcement strategy / B. K. Hebblewhite, T. Lu // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. - 2004. - Vol. 41, № 1. - P. 147-157.
15. Игнатов, Е. В. Совершенствование способов крепления и крепей выработок, расположенных на границе «массив - обрушенные породы» / Е. В. Игнатов // Вестник КузГТУ. - 2006. - Т. 6, № 57. - С. 46-53.
16. Игнатов, Е. В. Совершенствование способов охраны и охраняющих устройств подготовительных выработок при бесцеликовых технологиях / Е. В. Игнатов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2009. - № 8 - С. 378-383.
17. Игнатов, Е. В. Геомеханические регламентации к способам охраны и крепления выработок при разработке пластов длинными столбами / Е. В. Игнатов, О. В. Иванова, Г. И. Грибанова // Вестник КузГТУ. - 2011. - № 3. - С. 26-28.
18. Practices, experience, and lessons learned based on field observations of support failures in some Chinese coal mines / X. Feng, N. Zhang, F. Xue [et al.] // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. - 2019. - Vol. 123. - P. 104097.
19. Обоснование технологий поддержания выемочных выработок при отработке пологих угольных пластов на больших глубинах / О. И. Казанин, А. А. Сидоренко, А. А. Евсюкова, Л. Цзылу // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2023. - № 9. - С. 5-21.
20. О сохранении устойчивости конвейерных штреков глубоких шахт / С. С. Гребенкин, Г. И. Соловьев, И. К. Демин [и др.] // Вестник НГАУ. - 2003. - № 10. - С. 31-33.
21. Optimizing support performances of bolt reaming and anchoring in a coal drift [Electronic resource] / W. Wang, Y. Pan, Y. Xiao [et al.] // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. - 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775524000519?via%3Dihub>.

REFERENCES

1. Federal norms and rules in the field of industrial safety «Instructions for the calculation and use of anchor support in coal mines». Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision, Order No. 448 dated November 19, 2020. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/573264130> (In Russ.).
2. Dudin AA, Efimushkin NA, Sokolov AS, et al. Experience in reinforcement of underground mine support with the AK01-21H intractable rope bolts in complex mining and geological conditions. Ugol'. 2021;(1):11-3 (In Russ.).
3. Dudin AA, Vachrushev EV, Zlobin SE et al. The experience of using rope anchors with increased bearing capacity in the conditions of «Osinnikovskaya» mine LLC. Ugol'. 2020;(3):34-7 (In Russ.).
4. Samok AV, Raiko GV, Pozolotin AS, et al. Rope anchor AK01: strengthening system for work of a lava without mechanized system interface. Ugol'. 2011;(10):9-11 (In Russ.).
5. Aliyev SB, Demin VF, Yavorsky VV, et al. Establishing Anchorage Parameters Depending on the Mining and Technological Conditions of Excavation Operation. Ugol'. 2013;(1):69-72 (In Russ.).
6. Lugantsev BB, Belikova NV, Belikov VV, et al. Upkeep of the drift for reuse in an abnormal zone of high mining pressure. Ugol'. 2021;(4):10-4. (In Russ.).
7. Razumov EA, Venger VG, Kalinin SI et al. Study of the stability of preparatory workings secured with anchorage, those who find themselves in difficult emergency situations when working out coal seams at the mines of Kuzbass. Ugol'. 2021;(11):13-18 (In Russ.).
8. Lugancev BB, Chavkin AI, Turuk JV, et al. Evaluation of effectiveness of the use of security structures made of lightweight wooden-concrete blocks. Mine surveying and subsurface use. 2024;(1):39-49 (In Russ.).
9. Belikov AV. Justification of the use of strengthening the support with high load-bearing capacity in the preparatory workings of coal mines. Mining informational and analytical bulletin. 2007;(8):68-72 (In Russ.).
10. Zeynullin AA, Abeuov EA, Demin VF et al. Estimation of ways to maintain mining works based on the application of anchor anchoring in the mines of the Karaganda coal basin. Ugol'. 2021;(2):4-9 (In Russ.).
11. Demin VF, Shontayev DS, Balgabekov TK, et al. Stressed-deformed state of the boundary-carbon array. Ugol'. 2020;(5):63-7. (In Russ.).
12. Wu Y, Liu X, Tan Y, et al. Mechanism of bolt breakage in deep mining roadway under dynamic load and advanced strengthening support technology, Engineering Failure Analysis. 2024;161:108255.
13. Zhao T, Guo W, Zhang D, et al. Theoretical framework for stress relief-support reinforcement cooperative control of rock bursts in deep coal mining. Geohazard Mechanics. 2024;2(1):49-57.
14. Hebblewhite BK, Lu T Geomechanical behaviour of laminated, weak coal mine roof strata and the implications for a ground reinforcement strategy. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2004;41(1):147-57.
15. Ignatov EV. Improvement of methods of fastening and fasteners of workings located on the border of the «massif - collapsed rocks». Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2006;6(1):49-52 (In Russ.).
16. Ignatov EV. Improving the methods of protection and security devices of preparatory workings bezselikov technologies. Mining informational and analytical bulletin. 2009;(8):378-83 (In Russ.).
17. Ignatov EV, Ivanova OV, Gribova GI. Geomechanical regulations to ways of protection and strengthening of developments at long wall mining. Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2011;3(85):26-8 (In Russ.).
18. Feng X, Zhang N, Xue F, et al. Practices, experience, and lessons learned based on field observations of support failures in some Chinese coal mines. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019;123:104097.
19. Kazanin OI, Sidorenko A A, Evsiukova AA, et al. Justification of the longwall panel entries support technology when mining gently inclined coal seams at large depths. Mining informational and analytical bulletin. 2023;9(1):5-21 (In Russ.).
20. Grebenkin SS, Solovyov GI, Demin IK, et al. On maintaining the stability of conveyor drifts of deep mines. Bulletin of the National Academy of Sciences. 2003;10:31-3 (In Russ.).
21. Wang W, Pan Y, Xiao Y. Optimizing support performances of bolt reaming and anchoring in a coal drift. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2024. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775524000519?via%3Dihub>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Луганцев Борис Борисович:

доктор технических наук,
профессор,
председатель совета директоров,
Общество с ограниченной ответственностью
«Шахтинский научно-исследовательский и проектно-
конструкторский угольный институт» (ООО «ШахтНИИ»),
г. Шахты, Российская Федерация

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lugancev Boris Borisovich:

Doctor of Engineering Sciences,
Professor,
Chairman of the Board of directors,
Limited Liability Company «Shakhty Research and design
and engineering Coal Institute» (LLC «Shakhtniui»),
Shakhty, Russian Federation

Чавкин Александр Иванович:

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией,
Общество с ограниченной ответственностью
«Шахтинский научно-исследовательский и проектно-
конструкторский угольный институт» (ООО «ШахтНИИУ»),
г. Шахты, Российская Федерация,
e-mail: Shahtniui.tgr@mail.ru

Турук Юрий Владимирович:

доктор технических наук, профессор.
Шахтинский институт (филиал) Федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Южно-Российский государственный
политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова»,
г. Шахты, Российская Федерация

Гревцева Елена Анатольевна:

кандидат экономических наук, доцент,
Шахтинский институт (филиал) Федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Южно-Российский государственный
политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова»,
г. Шахты, Российская Федерация

Афонина Наталия Борисовна:

доцент,
кандидат технических наук,
Шахтинский институт (филиал) Федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Южно-Российский государственный
политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова»,
г. Шахты, Российская Федерация

Chavkin Alexander Ivanovich:

Candidate of Technical Sciences,
Head of the laboratory.
Limited Liability Company «Shakhty Research and design
and engineering Coal Institute» (LLC «Shakhtniui»),
Shakhty, Russian Federation
e-mail: Shahtniui.tgr@mail.ru

Turuk Jurij Vladimirovich:

Doctor of Engineering Sciences,
Professor,
Shakhty Institute (branch) Federal State Budgetary Educational
Institution of Higher Education «South Russian State Polytechnic
University (NPI) named after M. I. Platov»,
Shakhty, Russian Federation

Grevtseva Elena Anatolyevna:

Associate Professor,
Candidate of Economic Sciences,
Shakhty Institute (branch) Federal State Budgetary Educational
Institution of Higher Education «South Russian State Polytechnic
University (NPI) named after M. I. Platov»,
Shakhty, Russian Federation

Afonina Natalia Borisovna:

Associate Professor,
Candidate of Technical Sciences,
Shakhty Institute (branch) Federal State Budgetary Educational
Institution of Higher Education «South Russian State Polytechnic
University (NPI) named after M. I. Platov»,
Shakhty, Russian Federation

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION:

Б. Б. Луганцев — существенный вклад в научно-исследовательскую работу, окончательное утверждение для публикации. А. И. Чавкин — существенный вклад в научно-исследовательскую работу, доработка и исправление рукописи. В. Д. Турук — существенный вклад в научно-исследовательскую работу, ответственность за целостность всех частей рукописи. Е. А. Гревцева — существенный вклад в научно-исследовательскую работу, доработка рукописи. Н. Б. Афонина — существенный вклад в научно-исследовательскую работу, исправление рукописи.

B. B. Lugantsev — significant contribution to research work, final approval for publication. A. I. Chavkin — significant contribution to research work, revision and correction of the manuscript. V. D. Turuk — significant contribution to research work, responsibility for the integrity of all parts of the manuscript. E. A. Grevtseva — significant contribution to scientific research, revision of the manuscript. N. B. Afonina — a significant contribution to scientific research, correction of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.



МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ МУЗЕЙ «ПЛАНЕТА»

Минералогический Музей «Планета» это первый и единственный в России музей частных коллекций.

Залы: Зал 1. «Минералы Урала»
Зал 2. «Минералы России и мира»
Зал 3. «Минералы России и мира»
Зал 4. Флюоресцирующие минералы
Зал 5. Зал палеонтологии
Зал 6. Комната ценностей

Контакты : Екатеринбург, ул. Чернышевского, 7. +7 (343) 287-71-10
СР-ВС: 11:00-19:00 | ПН-ВТ: ВЫХОДНОЙ



WWW.N-GN.RU

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ОБРАЗЦОВ СИЛЬВИНИТА НА ЗНАЧЕНИЕ ИХ ПРОЧНОСТИ ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ ДЛЯ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПАЛАШЕРСКОГО УЧАСТКА ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ

А. И. Рысин,

ООО «ПроТех Инжиниринг», г. Санкт-Петербург, Россия,

Белгородский государственный национальный исследовательский университет (НИУ «БелГУ»), г. Белгород, Россия;

В. Н. Тюпин

Белгородский государственный национальный исследовательский университет (НИУ «БелГУ»), г. Белгород, Россия

Аннотация: Выполнена оценка применимости переходных коэффициентов при расчете предела прочности на одноосное сжатие согласно нормативным методикам для соляных горных пород. Выявлено несоответствие расчетных и эмпирических значений прочности для сильвинита и каменной соли, в связи с чем была определена необходимость получения коэффициента пересчета для данного типа пород. Представлены результаты исследований прочностных свойств образцов соляных горных пород с различным соотношением линейных размеров высоты к диаметру и формой поперечного сечения, на основании чего установлены эмпирические зависимости предела прочности на одноосное сжатие от коэффициента формы для образцов сильвинитов на примере запасов Палашерского участка Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Полученные результаты позволяют судить о необходимости ввода переходных коэффициентов при пересчете прочности на одноосное сжатие для образцов различного поперечного сечения и набора более весомой статистической выборки в данном исследовании.

Ключевые слова: горные породы, калийно-магниевые соли, Верхнекамское месторождение, прочность, геометрические пропорции, поперечное сечение, одноосное сжатие, форма, сильвинит, эмпирические зависимости.

Благодарности: при проведении лабораторных испытаний принимали участие А.С. Нуртдинов, А. М. Лебедева.

Для цитирования: Рысин А. И., Тюпин В. Н. Влияние геометрической формы образцов сильвинита на значение их прочности при одноосном сжатии для горно-геологических условий Палашерского участка верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Маркшейдерия и недропользование. 2024. №3. С. 00-00. DOI:

THE INFLUENCE OF THE GEOMETRIC SHAPE OF SYLVINITE SAMPLES ON THE VALUE OF THEIR STRENGTH UNDER UNIAXIAL COMPRESSION FOR THE MINING AND GEOLOGICAL CONDITIONS OF THE PALASHERSKY AREA OF THE UPPER KAMA POTASH-MAGNESIUM SALT DEPOSIT

A. I. Rysin, ProTech Engineering LLC, Saint Petersburg, Russia,

Belgorod State National Research University (NRU «BelSU»), Belgorod, Russia;

V. N. Tyupin, Belgorod State National Research University (NRU «BelSU»), Belgorod, Russia

Abstract: The applicability of transition coefficients in the calculation of uniaxial compressive strength according to normative methods for salt rocks has been evaluated. The discrepancy between calculated and empirical values of strength for sylvinite and rock salt is revealed, in connection with which the necessity of obtaining a conversion factor for this type of rocks is determined. The results of research of strength properties of salt rock samples with different ratio of linear dimensions of height to diameter and cross-sectional shape are presented, on the basis of which empirical dependences of uniaxial compression strength on shape coefficient for silvinitic samples are established on the example of the reserves of the Palashersky area of the Upper Kama potash-magnesium salt deposit. The results obtained allow us to judge the need to introduce transition coefficients when recalculating uniaxial compressive strength for samples of different cross sections, and to recruit of more significant statistical sample in this study.

Keywords: rocks, potassium-magnesium salts, Verkhnekamskoye deposit, strength, geometric proportions, cross section, uniaxial compression, shape, silvinitic, empirical dependencies.

Gratitudes: to A. S. Nurtudinov and A. M. Lebedeva for took part in the laboratory tests.

For citation: Rysin A. I., Tyupin V. N. The influence of the geometric shape of sylvinite samples on the value of their strength under uniaxial compression for the mining and geological conditions of the Palashersky area of the upper kama potash-magnesium salt deposit. Surveying and subsoil use. 2024;(3):67-71.(In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_3_67_71.

Опыт разработки месторождений полезных ископаемых подземным способом указывает на то, что эффективность и безопасность горных работ зависит от физико-механических свойств пород, параметров трещиноватости и напряженного состояния горных массивов [1-5]. В частности, при выборе системы разработки и ее конструктивных параметров, то есть устойчивых размеров обнажений, целиков, параметров крепления выработок или камер, помимо упругих, учитываются прочностные свойства горных пород: пределы прочности на растяжение, сжатие, сдвиг, а также коэффициент крепости по М. М. Протодякову [6-8].

В практике определения механических свойств горных пород наиболее распространенными из-за простоты применения являются испытания на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$. Из-за повсеместного использования данной методики большая часть инженерных расчетов основывается на параметре прочности на одноосное сжатие. В связи с этим изучение влияющих на результаты данного испытания факторов, в том числе коэффициента формы образцов, становится актуальной задачей.

В российской практике для проведения одноосных испытаний на сжатие используется термин «образец правильной формы» (иногда – «стандартный образец»), под которым подразумевается цилиндрический или призматический (с квадратным поперечным сечением) образец с отношением высоты (h) к диаметру (d), равным 2,0. Выбор такого соотношения объясняется тем, что трение на контакте плита – порода создает неоднородное поле напряжений в приторцевой зоне образца, в результате чего она характеризуется объемным напряженным состоянием [9]. При малой высоте зоны у двух торцов сливаются в единое поле объемного напряженного состояния, и только приближение к отношению $h/d = 2$ позволяет сформироваться зоне «чистого» одноосного сжатия в центральной части образца.

В зарубежных стандартах при испытаниях на одноосное сжатие рекомендуется использовать соотношения высоты к диаметру в интервале от 2,0 до 2,5. По результатам ряда исследований методами математического моделирования наилучшим соотношением размеров образца для получения достоверных характеристик прочности породы при одноосном сжатии является $h/d \geq 3$ [10]. На участках, прилегающих к нажимным плитам, формируются зоны трехосных напряжений, на которые влияют силы трения между образцом и нажимной плитой, и лишь в центральной части образца при пропорции высоты образца к его диаметру 2 к 1 прослеживается зона напряжений, максимально близких к условиям одноосного сжатия. При увеличении высоты образца размер данной зоны увеличивается, а надежность полученных значений возрастает. Помимо соотношения h/d на величину $\sigma_{сж}$ влияет форма поперечного сечения образца в связи с различным распределением напряжений в сечении, а также тип контакта образца с нажимными плитами пресса.

Согласно отечественной нормативной документации и рекомендованным методикам, при массовых испытаниях допускаются отношения высоты к диаметру от 0,7 до 2,0, однако при обработке результатов вводится коэффициент высоты образца, который приводит все полученные данные в соответствие с результатами испытания стандартного образца [11-13]. Единый коэффициент формы унифицирует подход к испытаниям, но не позволяет учесть особенности деформирования и разрушения конкретного типа породы, в связи с чем зачастую для месторождений разрабатываются свои эмпирические коэффициенты формы [11, 14, 15].

По вопросам влияния формы поперечного сечения на результаты испытаний на сжатие существуют противоречивые мнения. В отечественных нормативных методиках не делается различий в прочностных показателях образцов с круглым и квадратным поперечным сечением при условии равенства абсолютных и относительных размеров. При этом при соблюдении равенства высот и находящихся с ними в необходимой пропорции диаметра (d) или ширины (a) квадрата торца образцы характеризуются различной площадью поперечного сечения. Соответствие испытаний таких образцов необходимо подтвердить экспериментально для конкретного вида горных пород при различных отношениях h/d или h/a .

Значительное влияние на результат испытания оказывает тип контакта. «Сухой» контакт, обеспечивающий полное сцепление, позволяет оценить прочность породы без внесения в среду дополнительных компонентов, но не всегда дает представление о реальном поведении массива. Уменьшение трения на контакте позволяет избежать возникновения зон объемного сжатия, однако результаты таких экспериментов нестабильны и дают большой разброс значений, показывая тем не менее результаты уменьшения прочности от воздействия смазок, прокладок из низко модульных материалов и увеличение прочности при использовании металлических зубчатых прокладок [9].

На калийных рудниках Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС) метод определения предела прочности на сжатие лег в основу решения большей части горнотехнических вопросов. Для реализации поставленных задач необходимо установить объективность величины $\sigma_{сж}$ при различном соотношении h/d и различной форме поперечного сечения образцов.

Цель исследования: определение степени влияния соотношений h/d , h/a испытуемых образцов сильвинитов ВКМКС и формы поперечного сечения на прочность при одноосном сжатии.

Методы исследований. Анализ ранее выполненных исследований на предмет влияния геометрических параметров образцов на предел прочности на сжатие. Экспериментальные исследования по установлению влияния геометрических параметров образцов сильвинитов на $\sigma_{сж}$. Получение эмпирических зависимостей $\sigma_{сж} = f(h/d)$ для образцов, представленных сильвинитом круглой и квадратной формы.

Общие положения

Приведение данных испытаний образцов с различными геометрическими параметрами к единой характеристике регламентируется двумя основными документами. Одним из них является основной нормативный документ для планирования горных работ в пределах Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей «Указания по защите рудников от затопления...» [11], расчетный аппарат которых отличен от методики ГОСТ 21153.2-84 «Методы определения предела прочности при одноосном сжатии», п. 1.5.1, в которой значение предела прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж\text{и}}$ в МПа для каждого i -го образца выборки вычисляют по формуле

$$\sigma_{сж\text{и}} = K_g \times \frac{P}{S} \times 10, \quad (1)$$

где P — сила, разрушающая образец, кН; S — площадь поперечного сечения образца, см²; K_g — безразмерный коэффициент высоты образца.

Значения коэффициента K_g при отношении высоты образца к его диаметру M устанавливают по таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Значения коэффициента высоты образца (K_g) при отношении высоты образца к его диаметру (M)

Values of the height coefficient of the sample (K_g) at the ratio of the height of the sample to its diameter (M)

Показатель	Значение								
M	0,70	0,80	0,90	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
K_g	0,68	0,72	0,76	0,80	0,86	0,90	0,94	0,97	1,00

Важным является тот факт, что в отечественных нормативных методиках оптимальным для определения предела прочности на сжатие считается соотношение продольных размеров образца к поперечным в пропорции 2 к 1. В то же время в зарубежных стандартах и научно-исследовательских статьях рекомендуется испытывать образцы в пропорции от 2,5 к 1.

Условия проведения экспериментальных исследований

В целях получения достоверных результатов и с учетом множества факторов, влияющих на прочностные характеристики силвинита в условиях Палашерского участка ВКМКС, для оптимизации количества экспериментов и обеспечения необходимой точности испытания выполнены следующие мероприятия:

- ✧ исследовано влияние отношения размеров и формы образца на значение предела прочности на сжатие;
- ✧ проведены эксперименты при постоянных температуре и влажности окружающей среды;
- ✧ изготовлены испытательные образцы с одинаковыми типоразмерами в рамках, определенных программой геометрических параметров с высокой точностью, удовлетворяющей всем требованиям ГОСТ 21153.2-84;
- ✧ изготовлены образцы таким образом, чтобы они имели визуальную аналогичность с с похожей структурой, слоистостью и составом горных пород;
- ✧ отобраны пробы для изготовления образцов с одного и того же участка шахтного поля для исключения зна-

чительных колебаний содержания нерастворимого остатка, KCl, NaCl, мощности пласта и слоя, складчатости и глубины залегания;

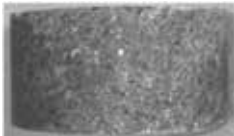
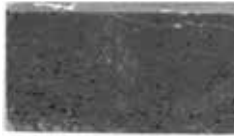
- ✧ осуществлен комплекс мгновенных испытаний (определение предела прочности на одноосное сжатие по методике ГОСТ 21153.2-84).

Результаты исследований

Общий вид образцов, отнесенных к разным по своим пропорциям группам, приведен в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Общий вид образцов
General view of the samples

h/d	Тип поперечного сечения	
	Круг	Квадрат
0.5		
0.7		
1.0		
1.5		
2.0		

Общее количество проведенных на текущем этапе работ испытаний для определения влияния отношения размеров образца — 70 образцов.

Статистическая обработка полученных результатов выполнена по выделенным группам образцов сильвинита согласно ГОСТ 21153.2-84.

На рисунке 1 приведены результаты всех проведенных испытаний сильвинита и логарифмической зависимости полученных средних показателей прочности на одноосное сжатие от коэффициента формы для образцов сильвинита круглого и квадратного сечений. Для построения зависимости использованы результаты 58 испытаний, отобранных после статистической обработки.

Математическая обработка результатов исследований позволила получить эмпирические формулы расчета предела прочности круглых и квадратных образцов сильвинитов в зависимости от соотношения h/d .

Для круглого сечения:

$$\sigma_{сж} = 42,217 - 22,39 \cdot \ln(h/d), \text{ МПа.} \quad (2)$$

Для квадратного сечения:

$$\sigma_{сж} = 42,964 - 16,08 \cdot \ln(h/d), \text{ МПа.} \quad (3)$$

Стоит отметить, что интенсивность спада прочности при различных поперечных сечениях по имеющейся на текущий момент выборке различна, что может привести к необходимости ввода переходного поправочного коэффициента. Для увеличения надежности полученных результатов необходимо расширить статистику по испытаниям призматических образцов с коэффициентом формы $h/d > 2,0$ для уточнения вида зависимости и определения наиболее надежного с точки зрения получения прочностных свойств сильвинита значения коэффициента формы.

Выводы

Исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Проведены обзор предыдущих исследований и анализ применимости переходных коэффициентов при расчете предела прочности на одноосное сжатие установленных в ГОСТ для соляных горных пород. Установлена необходимость определения коэффициента формы для образцов сильвинита нестандартной формы.

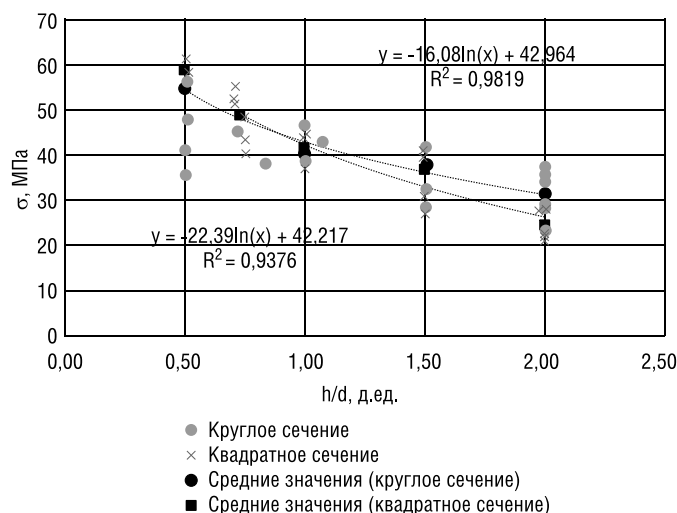


Рис. 1. Зависимость прочности сильвинита на одноосное сжатие от коэффициента формы (h/d)

Fig. 1. Dependence of the strength of sylvinit in uniaxial compression on the shape coefficient (h/d)

2. Анализ полученных результатов говорит о необходимости учета формы поперечного сечения образцов при расчете значения прочности на одноосное сжатие. Кривые аппроксимации полученных данных различны для круглого и квадратного сечения образцов.

3. Установлены эмпирические зависимости изменения предела прочности на одноосное сжатие от пропорций линейных размеров образцов сильвинитов на примере запасов Палашерского участка ВКМКС.

4. Вне зависимости от формы поперечного сечения образцов при соотношении h/d (h/a) в пропорции 2 к 1 при текущей выборке данных тенденции к установлению постоянной величины предела прочности на одноосное сжатие не выявлено. Целесообразно продолжить исследования при больших значениях коэффициента формы образцов.

5. Установлена потребность ввода для расчета предела прочности на одноосное сжатие сильвинитов Палашерского участка ВКМКС переходных коэффициентов, отличных от принятой нормативной документации. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Ветров, С. В. Допустимые размеры обнажений горных пород при подземной разработке руд / С. В. Ветров. - М.: Наука, 1975. - 232 с.
2. Булычев, Н. С. Проектирование и расчет крепи капитальных выработок / Н. С. Булычев, Н. Н. Фолиевая, Е. В. Стрельцов. - М.: Недра, 1986. - 288 с.
3. Баранов, О. А. Расчет параметров технологических процессов подземной добычи руд / О. А. Баранов. - М.: Недра, 1985. - 224 с.
4. Ломоносов, Г. Г. Производственные процессы подземной разработки месторождений / Г. Г. Ломоносов. - 2-е изд. - М.: Горная книга, 2013. - 517 с.
5. Певзнер, М. Е. Геомеханика / М. Е. Певзнер, М. А. Иофис, В. Н. Попов. - М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2005. - 438 с.
6. Слепцов, М. Н. Подземная разработка месторождений цветных и редких металлов / М. Н. Слепцов, Р. Ш. Азимов, В. Н. Мосинец. - М.: Недра, 1986. - 206 с.
7. Тюпин, В. Н. Установление динамически устойчивых размеров обнажений трещиноватого напряженного горного массива при камерных вариантах систем разработки / В. Н. Тюпин // Вестник Забайкальского государственного университета. - 2016. - Т. 22, № 6. - С. 31-39.
8. Тюпин, В. Н. Установление динамически устойчивых размеров междукammerных целиков при камерных вариантах систем разработки / В. Н. Тюпин, Т. И. Рубашкина // Вестник Забайкальского государственного университета. - 2016. - Т. 22, № 5. - С. 15-22.
9. Барях, А. А. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения / А. А. Барях, В. А. Асанов, И. Л. Паньков. - Пермь, 2008. - 199 с.

10. Kashf, M. Evaluation of sample scale effect on geomechanical tests / M. Kashf, S. Shad, D. Zivar // *Petroleum Research*. - 2022. - Vol. 12. - P. 527-535.
11. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / ГИ Уро РАН, 2014. - Пермь; Березники, 2014. - 130 с.
12. Проскуряков, Н. М. Физико-механические свойства соляных пород / Н. М. Проскуряков, Р. С. Пермьяков, А. К. Черников. - Л.: Недра, 1973. - 271 с.
13. Кузнецов, Н. Н. О влиянии отношения размеров образцов скальных горных пород на результаты определения их прочности при одноосном сжатии / Н. Н. Кузнецов, А. К. Пак // *Вестник МГТУ*. - 2014. - Т. 17, № 2. - С. 246-253.
14. Морозов, И. А. Уточнение коэффициента формы соляных пород Гремячинского месторождения / И. А. Морозов // *Горное эхо*. - 2022. - № 3. С. 19-24.
15. Паньков, И. Л. О новом коэффициенте формы, учитывающем размеры прямоугольных образцов горных пород / И. Л. Паньков // *Горное эхо*. - 2021. - № 1. - С. 60-63.

REFERENCES

1. Vetrov SB. Permissible size of rocky outcrops in underground mining. Moscow: Nauka, 1975 (In Russ.).
2. Bulychev N, Fotieva N, Streltsov O. Design and calculation of fixed workings. Moscow: Nedra, 1986 (In Russ.).
3. Baranov O. Calculation of parameters of technological processes of underground mining of ores. Moscow: Nedra, 1985 (In Russ.).
4. Lomonosov G. G. Production processes of underground mining. Second edition. Moscow, 2013 (In Russ.).
5. Pevzner MY, Iosif MA, Popov VN. Geomechanik. Moscow: Publishing House of Moscow State Mining University, 2005 (In Russ.).
6. Sleptsov M, Azimov RSh, Mosinets VN. Underground development of non-ferrous and rare metals deposits. Moscow: Nedra, 1986 (In Russ.).
7. Tyupin V. Establishment of dynamically steady sizes of exposures of the jointed intense massif at chamber options of systems of development. *Bulletin of Transbaikal state university*. 2016;22(6):31-9 (In Russ.).
8. Tyupin V, Rubashkina T. Establishing of a dynamically stable size interchamber pillars in chamber versions of development systems. *Bulletin of Transbaikal state university*. 2016;22(5):15-22 (In Russ.).
9. Baryakh A, Asanov V., Pankov I. Physical and mechanical properties of salt rocks of the Upper Kamsk potassium deposit. Perm, 2008 (In Russ.).
10. Kashf M, Shad S, Zivar D. Evaluation of sample scale effect on geomechanical tests. *Petroleum Research*. 2022;(12):527-35.
11. Mining Institute of the Ural Department of the Russian Academy of Sciences. Instructions for protecting mines from flooding and protecting undermined objects in the conditions of the Verkhnekamsk deposit of potassium-magnesium salts, 2014. Perm, 2014 (In Russ.).
12. Proskuryakov N, Permyakov R, Chernikov A. Physico-mechanical properties of salt rocks. Leningrad: Nedra, 1973 (In Russ.).
13. Kuznetsov N, Pak A. Influence of the hard rock specimens' ratio of the results. *Bulletin of Moscow State Technical University*. 2014;17(2);246-53 (In Russ.).
14. Morozov IA. Clarification of the shape coefficient of salt rocks of the Gremyachinskoe deposit. *Mountain Echo*. 2022;(3):19-24 (In Russ.).
15. Pankov I. On a new shape coefficient that takes into account the dimensions of rectangular rock samples. *Mining Echo*. 2021;(1):60-3 (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тюпин Владимир Николаевич:

доктор технических наук,
профессор,
Белгородский государственный национальный
исследовательский университет,
г. Белгород, Россия,
ORCID ID 0000-0002-3709-0957

Рысин Александр Игоревич:

аспирант,
руководитель лаборатории,
ФМСГП ООО «ПроТех Инжиниринг»,
г. Санкт-Петербург, Россия;
НИУ БелГУ,
г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tyupin Vladimir Nikolaevich:

Doctor of Technical Sciences,
Professor,
Belgorod State National Research University,
Belgorod, Russia,
ORCID ID 0000-0002-3709-0957

Rysin Aleksandr Igorevich:

postgraduate student,
head of laboratory of physics and mechanics of rock properties,
LPMRP ProTech Engineering LLC,
Saint Petersburg, Russia;
Belgorod State National Research University,
Belgorod, Russia

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION:

В. Н. Тюпин — постановка задачи исследования, редакция текстового и материала статьи; А. И. Рысин — планирование и выполнение эксперимента, обработка результатов и выявление закономерностей.

V. N. Tyupin — setting the research problem, editing the text and material of the article; A. I. Rysin — planning and performing an experiment, processing results and identifying patterns

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

ФОРМИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ШТАБЕЛЯ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА

*А. А. Поморцева,
ООО «Газпром инвест», Санкт-Петербург, Россия
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия;
Г. Б. Поспехов,
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация: Исследованы инженерно-геологические условия формирования и эксплуатации техногенного массива песчано-глинистых окомкованных руд штабеля при кучном выщелачивании золота. Выявлены ключевые факторы, определяющие формирование напряженно-деформированного состояния штабеля при кучном выщелачивании. Проведена оценка формирования напряженно-деформированного состояния массива штабеля. Основные методы исследования включали в себя использование численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива штабеля с применением методов механики сплошной среды. Установлено, что оптимальным подходом к оценке напряженно-деформированного состояния является комплексный анализ на основе алгоритма, приближенного к условиям формирования и эксплуатации массива штабеля при кучном выщелачивании. При моделировании учтены этапы строительства штабеля, уплотнение от воздействия горнотранспортного оборудования, а также вес вышележащих пород с учетом различной степени водонасыщения в процессе эксплуатации. Фильтрационное моделирование позволило определить зону полного насыщения при заданных параметрах орошения. Формирование напряженно-деформированного состояния массива штабеля при кучном выщелачивании золота и его устойчивость были проанализированы при моделировании по продольным и поперечным расчетным сечениям.

Ключевые слова: кучное выщелачивание, штабель, напряженно-деформированное состояние, оценка устойчивости, инженерно-геологический прогноз, моделирование геомеханических процессов.

Для цитирования: Поморцева А. А., Поспехов Г. Б. Формирование напряженно-деформированного состояния массива штабеля кучного выщелачивания золота // Маркшейдерия и недропользование. 2024. № 3. С. 72-79. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_72_79.

FORMATION OF STRESS-STRAIN STATE OF THE MASSIF OF HEAP LEACHING GOLD STACK

*A. A. Pomortseva,
Gazprom invest, Saint Petersburg, Russia
Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia;
G. B. Pospelkhov,
Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia;*

Abstract: Engineering and geological conditions of formation and operation of the technogenic massif of sandy-clay clay pelletised ores of gold heap leaching stack were investigated. Key factors determining the formation of stress-strain state of heap leaching stack were identified. The formation of the stress-strain state of the stack massif was evaluated. The main research methods included the use of numerical modelling of the stress-strain state of the stack massif with the application of continuum mechanics methods. It was established that the optimal approach to the assessment of the stress-strain state is a complex analysis based on an algorithm approximated to the conditions of formation and operation of the heap leach stack array. The modelling takes into account the stages of stack construction, compaction from the impact of mining transport equipment, as well as the weight of overlying rocks, taking into account different degrees of water saturation during operation. Filtration modelling made it possible to determine the zone of full saturation at given irrigation parameters. The formation of the stress-strain state of the heap leaching gold stack massif and its stability were analysed by longitudinal and cross-sectional modelling.

Keywords: heap leach pad, stress and strain state, stability assessment, engineering and geological forecast, modeling of geomechanical processes.

For citation: Pomortseva A. A., Pospelkhov G. B. Formation of stress-strain state of the massif of heap leaching gold stack. Surveying and subsoil use. 2024;(3):72-79. (In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_3_72_79.

Для эффективного решения прикладных задач в области геотехнологий, инженерной геологии и геомеханики необходимо провести детальное описание объекта исследования с целью разработки адекватной расчетной схемы. Применение полуэмпирических и аналитических методов анализа, которые включают в себя обобщение, идеализацию параметров среды и типизацию формы объектов строительства, может оказаться менее эффективным. В связи с этим инженерно-геологические и геомеханические процессы при формировании напряженно-деформированного состояния (далее – НДС) в массивах штабелей участков при кучном выщелачивании (далее – КВ) не могут быть полностью учтены [1, 2].

В настоящее время с целью улучшения точности расчетов и прогностических оценок широко применяются численные методы, основанные на методе конечных элементов (далее – МКЭ). Основным преимуществом МКЭ перед аналитическими методами является возможность учета анизотропии и неоднородности массива горных пород при прогнозировании горно-геомеханических условий [3–5].

Использование метода конечных элементов для оценки НДС массива отвечает условию статического равновесия при применении различных геомеханических моделей материала. Этот метод позволяет оценить развитие НДС с учетом пространственной изменчивости как самого сооружения, так и его отдельных элементов, в результате изменения различных свойств, включая геометрические параметры и неоднородности системы [6–8]. Численное моделирование МКЭ позволяет вычислить коэффициент запаса устойчивости и определить наиболее критическую поверхность скольжения [9, 10].

Цель исследования

Разработка комплексного подхода к численному моделированию НДС массива штабеля при кучном выщелачивании с учетом этапности возведения сооружения, нагрузки от горнотранспортной техники и условий обводненности при эксплуатации.

Метод исследования

Математическое моделирование развития напряженно-деформированного состояния массива штабеля при кучном выщелачивании золота методами механики сплошной среды [11–13].

Объект исследований

Массив штабеля при кучном выщелачивании окомкованных песчано-глинистых золотосодержащих руд состоял

из четырех ярусов. Руда в штабель укладывалась механизированным способом с помощью стакеров. Каждый ярус высотой 10 м был разделен на панели, которые отделялись друг от друга разделительными дамбами высотой 2 м. Для эффективного сбора продуктивного раствора наклон основания штабелей КВ принимали под углом 30° в поперечном направлении и 10° в продольном направлении, что соответствовало промышленной практике [14–16].

Основные конструктивные параметры штабеля при кучном выщелачивании представлены на рисунке 1. В основе алгоритма расчета параметров напряженного состояния штабеля при КВ лежали результаты лабораторных испытаний окомкованных песчано-глинистых руд штабеля.

Расчет устойчивости массива при кучном выщелачивании выполнялся для двух основных расчетных случаев. Первый расчетный этап – этап строительства, характеризующий напряженное состояние массива в процессе его формирования. Второй этап – этап эксплуатации, описывающий изменение напряженного состояния массива в процессе выщелачивания руды. Во время строительства массив и грунты основания находились в сухом состоянии. На этапе эксплуатации грунты ниже уровня обводнения растворами выщелачивания считались полностью водонасыщенными, а грунты выше уровня обводнения растворами выщелачивания – полностью сухими.

В основе расчетной схемы для описания поведения грунтов основания была принята упругопластическая модель Кулона – Мора [17–19]. Для достоверного прогноза изменения НДС массива горных пород зачастую используется упругопластическая модель Кулона – Мора [20]. Эта модель пластического течения используется для анализа механических свойств исследуемых техногенных массивов с целью определения их несущей способности.

Применение модели Кулона – Мора подходит для анализа поведения пород при однократной нагрузке или разгрузке, если жесткость грунта остается постоянной независимо от бокового давления [21, 22]. Однако данная модель неприменима в случаях циклического воздействия нагрузки и разгрузки на массив, подвергающийся нагружению и уплотнению в ходе технологических операций [23, 24].

Модель упрочняющегося грунта была использована для описания поведения окомкованной руды массива штабеля [25, 26]. За основу модели упрочняющегося грунта принята нелинейно-упругая модель Дункана – Ченга, описываю-

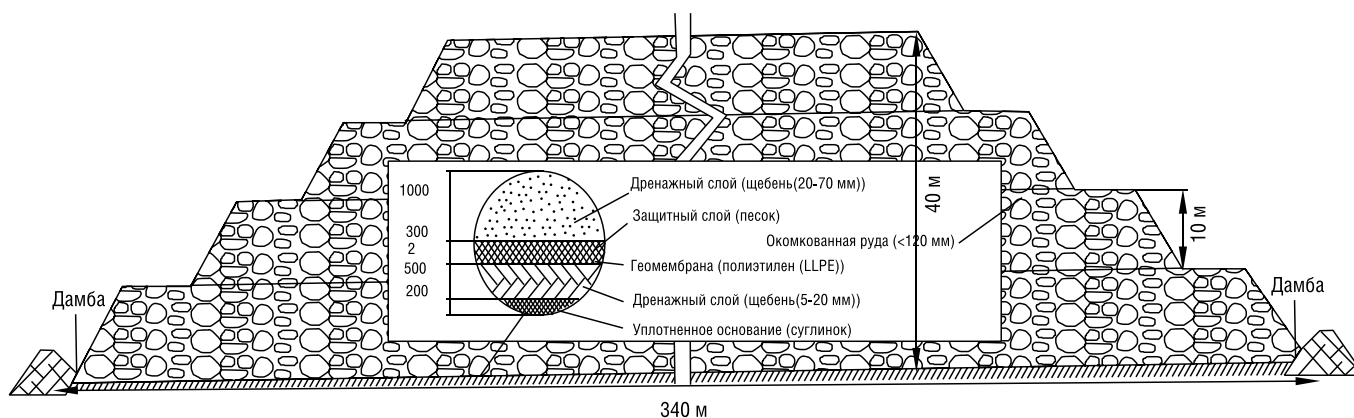


Рис. 1. Схема техногенного массива штабеля при кучном выщелачивании в поперечном направлении

Fig. 1. Schematic of the heap leach stack (cross direction)

шая гиперболическую зависимость вертикальных относительных деформаций ε_1 и компоненты девиатора тензора напряжений q_d (рис. 2).

Кроме модели упрочняющегося грунта часто рассматриваются модели с двойным упрочнением при сдвиге и объемном сжатии [27-29]. Класс таких моделей позволяет независимо друг от друга задавать упрочнение как при сдвиге, так и при сжатии [30-32].

Фильтрационный расчет пористой среды штабеля участка при КВ был реализован на основании модели Van Genuchten - Mualem, получившей широкое распространение в практике. Модель Van Genuchten - Mualem применяется для описания фильтрации через пористые тела в полностью водонасыщенном состоянии и неполностью водонасыщенном состоянии, позволяет учесть изменение фильтрационных характеристик пористой среды в зависимости от степени ее водонасыщения, что в значительной степени повышает достоверность прогноза развития фильтрационных процессов в зоне полного и неполного водонасыщения [33].

Фильтрационные характеристики пористой среды контролировались через характеристическую зависимость между степенью водонасыщения (влажностью) грунта и величиной отрицательного порового давления, которая характеризует способность грунта сохранять жидкость в пористом пространстве при различных значениях порового давления (рис. 2).

При выполнении фильтрационных расчетов аналитическими методами коэффициент фильтрации определялся гранулометрическим составом с учетом крупных включений [34, 35]. Показатели фильтрационной модели не полностью водонасыщенной среды были определены для гранулометрического состава с размерами фракций от 0,002-0,25 м [36].

Параметры фильтрационной модели для окомкованной руды в виде закономерностей изменения отрицательного порового давления и коэффициента фильтрации от степени водонасыщения сведены в таблицу 1.

При анализе фильтрационных характеристик штабеля при заданных параметрах орошения установлено, что зона полного водонасыщения не поднимается выше дренажного слоя, и принятые параметры дренажного слоя позволяют обеспечивать эффективный отвод раствора.

Расчет устойчивости выполнялся на основании численного моделирования в плоско-деформационной постановке в программном комплексе Plaxis. Рассмотрена последовательность этапов формирования ярусов массива, включая воздействие нагрузки от горнотранспортного оборудования и обводненность растворами выщелачивания массива. Процесс формирования массива сопровождается деформацией руды, что приводит к изменению геометрической конфигурации массива за счет уплотнения руды [37].

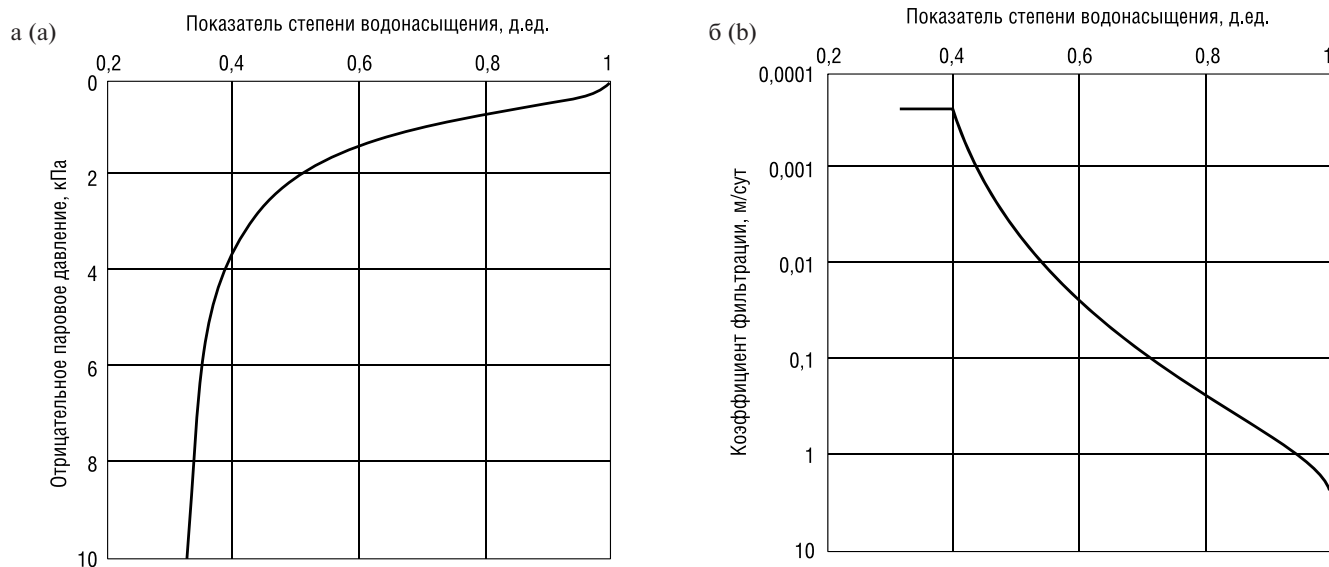


Рис. 2. Зависимости изменения отрицательного порового давления (а) и коэффициента фильтрации (б) от степени водонасыщения
Fig. 2. Dependences of change in negative pore pressure (a) and filtration coefficient (b) on the degree of water saturation

Таблица 1 / Table 1

Параметры фильтрационной модели Van Genuchten - Mualem
Parameters of the Van Genuchten - Mualem filtration model

Наименование материала	Коэффициент фильтрации полностью насыщенной раствором пористой среды k_{sat} , м/сут	Параметр модели Van Genuchten - Mualem					
		S_{res}	S_{sat}	g_a , 1/м	g_n	g_c	g_l
Окомкованная руда	2,35	0,139	1,0	12,4	2,28	-0,56	0,5
Гравийный слой	7,0	0,105	1,0	14,5	2,68	-0,62	0,5
Песчаный слой	3,5	0,105	1,0	14,5	2,68	-0,62	0,5

Таблица 2 / Table 2

Основные механические характеристики основания и элементов сооружения, модель Кулона - Мора
Main mechanical characteristics of the foundation and elements of the structure, Coulomb-Mohr model

Наименование	γ_{unsat} , кН/м ³	γ_{sat} , кН/м ³	c	E_0 , МПа	ν_0	C, кПа	φ , град
Грунт основания							
Суглинок дресвяный с примесью торфа, мягкопластичный	15,6	18,4	0,73	10,0	0,35	18	20
Элемент сооружения							
Тело дамбы	21,0	22,0	0,32	40,0	0,40	10	35
Защитный слой из щебенистого грунта	22,0	24,0	0,73	40,0	0,40	5	40

γ_{unsat} – объемный вес грунта при естественной влажности; γ_{sat} – объемный вес грунта при полном водонасыщении; e – коэффициент пористости; E_0 – модуль деформации грунта; ν_0 – коэффициент поперечной деформации грунта; C – эффективное сцепление грунта; φ – эффективный угол внутреннего трения.

Таблица 3 / Table 3

Основные механические характеристики окомкованной руды, модель Hardening soil
Major mechanical characteristics of pelletised ore, Hardeningsoil model

γ_{unsat} , кН/м ³	γ_{sat} , кН/м ³	e	E_{50} , МПа	E_{oed} , МПа	E_{ur} , МПа	m	c, кПа	φ , град	ψ , град
15,6	17,3	-	10,0	6,5	30	0,6	40	31	0

E_{50} – модуль деформации грунта; E_{oed} – упругий модуль деформации грунта; E_{ur} – модуль упругости грунта; m – показатель, учитывающий влияние среднего напряжения на деформационные свойства грунта; ψ – угол дилатансии.

Расчетные параметры физико-механических характеристик грунтов основания, элементов сооружения и окомкованной руды штабеля сведены в *таблицы 2 и 3*.

Расчеты исследований

При расчете напряженно-деформированного состояния в процессе формирования ярусов массива штабеля при КВ было принято четыре стадии формирования напряженного состояния, каждая из которых соответствует формированию ярусов массива штабеля (*рис. 4, см. цветную вклейку на стр. 27*). В зависимости от принятой расчетной схемы (стадия строительства, стадия эксплуатации) условия обводненности тела массива штабеля при КВ изменялись.

Была проведена оценка устойчивости массива на основе двух форм потери устойчивости: местной и общей. Местная устойчивость относится к потере устойчивости локального участка при минимальном значении коэффициента устойчивости по всему массиву (*рис. 5, см. цветную вклейку на стр. 27*).

Общая устойчивость в свою очередь означает потерю устойчивости всего массива, когда поверхность скольжения простирается через все четыре яруса массива и может иметь катастрофические последствия. При обеспечении общей устойчивости местная устойчивость может оказаться недостаточной.

Результаты оценки устойчивости массива штабеля при КВ согласно принятым расчетным схемам сведены в *таблице 4*. Результаты оценки общей устойчивости массива представлены в *таблице 5*.

Вне скобок приведены результаты оценки устойчивости в программном комплексе Plaxis, учитывающие изменение конфигурации массива в процессе его уплотнения; в скобках приведены результаты оценки устойчивости массива методом предельного равновесия, не учитывающие изменение начальной конфигурации тела массива в процессе уплотнения.

Таблица 4 / Table 4

Оценка местной устойчивости массива штабеля при кучном выщелачивании на стадии строительства
Assessment of local stability of heap leach stack massif at the construction stage

Расчетное сечение	Коэффициент запаса по устойчивости при формировании яруса штабеля			
	I ярус	II ярус	III ярус	IV ярус
Без нагрузки от горнотранспортного оборудования				
Поперечное сечение - I	2.16 (1.72)	2.12 (1.72)	1.98 (1.72)	1.98 (1.72)
Продольное сечение - II	2.18 (1.87)	2.16 (1.87)	2.13 (1.87)	2.01 (1.87)
С учетом нагрузки от горнотранспортного оборудования				
Поперечное сечение - I	1.57 (1.44)	1.76 (1.73)	1.97(1.82)	1.90(1.82)
Продольное сечение - II	1.80 (1.53)	1.95 (1.84)	1.99 (1.85)	1.93 (1.80)

Общая устойчивость откоса массива штабеля при кучном выщелачивании
Overall slope stability of heap leach stack massifs

Расчетное сечение	Коэффициент запаса по устойчивости при различных схемах нагружения				
	Стадия строительства	Стадия эксплуатации			
		режим нормальной эксплуатации	полное водонасыщение первого яруса	полное водонасыщение всех ярусов, с учетом дамб между ярусами	полное водонасыщение всех ярусов
Поперечное сечение - I	1.83	1.61	1.36	1.21	0.76
Продольное сечение - II	1.94	1.88	1.52	1.42	0.91

Заключение

1. В исследовании представлен комплексный подход к моделированию развития напряженно-деформированного состояния техногенного массива штабеля при кучном выщелачивании золота.

2. Основной целью работы является разработка алгоритма численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива штабеля участка КВ на основе численного инструмента, способного моделировать инженерно-геологическую и горно-геомеханическую обстановку участка КВ.

3. Для достижения более точных результатов моделирования и прогноза разработан комплексный подход оценки напряженно-деформированного состояния массива, адаптированный под условия сооружения и эксплуатации техногенного массива штабеля участка при кучном выщелачивании золота. Представленная модель показывает, что поверхность скольжения локализуется в пределах яруса и не распространяется на всю высоту штабеля, указывая на повышенный общий коэффициент устойчивости штабеля за счет сбалансированности сил активного давления и сил сопротивления

смещению пород. Рекомендуемая высота каждого яруса в 10 метров считается оптимальной и приемлемой для обеспечения общей устойчивости штабеля для рассматриваемого объекта моделирования.

4. Из проведенного исследования следует, что коэффициент запаса по устойчивости практически не изменяется при увеличении числа ярусов штабеля от первого до четвертого. Деформации преимущественно происходят в окомкованной руде первого яруса, что может привести к смещению пород штабеля и требует принятия специальных мер для поддержания устойчивости первого яруса.

5. В заключение подчеркивается важность проведения численного моделирования напряженно-деформированного состояния на основе комплексного подхода с учетом стадийности формирования и различных вариантов нагружения массива при эксплуатации, включая уплотнение пород массива штабеля под воздействием горнотранспортного оборудования, веса вышележащих пород, а также обводненности массива штабеля участка при кучном выщелачивании золота растворами цианида при обязательном выполнении численного фильтрационного моделирования. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Трубецкой, К. Н. Принципы обоснования параметров устойчивого и экологически сбалансированного освоения месторождений твердых полезных ископаемых / К. Н. Трубецкой, Д. Р. Каплунов, М. В. Рыльникова // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2014. - № 2. - С. 3-10.
2. Чантурия, В. А. Приоритетные направления исследований в области переработки минерального сырья / В. А. Чантурия, Л. А. Вайсберг, А. П. Козлов // Обогащение руд. - 2014. - № 2. - С. 3-9.
3. Шумилова, Л. В. Альтернативные варианты подготовки техногенных отходов к выщелачиванию металлов / Л. В. Шумилова, А. Н. Хатькова, В. Г. Черкасов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2021. - № 3-2. - С. 173-181.
4. Иваник, С. А. Флотационное выделение элементарной серы из золотосодержащих кеков / С. А. Иваник, Д. А. Илюхин // Записки Горного института. - 2020. - Т. 242. - С. 202-208.
5. Extraction of low-dimensional structures of noble and rare metals from carbonaceous ores using low-temperature and energy impacts at succeeding stages of raw material transformation / T. Alexandrova, N. Nikolaeva, A. Afanasova [et al.] // Minerals. - 2023. - Vol. 13, № 1. - P. 84-112.
6. Экогетехнология добычи бедных руд с созданием условий для попутной утилизации отходов горного производства / И. В. Соколов, Ю. Г. Антипин, А. А. Рожков [и др.] // Записки Горного института. - 2023. - Т. 260. - С. 289-296.
7. Особенности обоснования параметров кондиций рентабельного извлечения ценных редкоземельных составляющих многокомпонентного минерального сырья / Ф. Д. Ларичкин, Ю. Л. Войтеховский, А. Г. Воробьев [и др.] // Горный журнал. - 2016. - № 1. - С. 49-53.
8. Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов: в 2 т. / Под ред. М. И. Фазлуллина. - М.: ИД «Руда и металлы», 2005. - 407 с.
9. Санакулов, К. С. Эффективное использование техногенных отходов при кучном выщелачивании золота / К. С. Санакулов. - Навои, 2021. - 379 с.
10. Механохимическая технология добычи металлов из хвостов обогащения / В. И. Голик, Ю. И. Разоренов, В. С. Бригида [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2020. - Т. 331, № 6. - С. 175-183.
11. Heap leaching: Modeling and forecasting using CFD technology / D. McBride, J. Gebhardt, N. Croft [et al.] // Minerals. - 2018. - Vol. 8, № 1. - P. 9.

12. Кутепов, Ю. И. Методология инженерно-геологического изучения гидрогеомеханических процессов в техногенно-нарушенных массивах при разработке МПИ / Ю. И. Кутепов, Н. А. Кутепова // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2014. - № 8. - С. 123-131.
13. Petersen, J. Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores. A brief overview / J. Petersen // Hydrometallurgy. - 2016. - Vol. 165. - P. 206-212.
14. Повышение достоверности 3D-моделирования оползневого склона на основе учета данных инженерной геофизики / В. В. Глазунов, С. Б. Бурлуцкий, Р. А. Шувалова [и др.]. // Записки Горного института. - 2022. - Т. 257. - С. 771-782.
15. Лушников, Я. В. Определение физико-механических свойств окатышей при формировании штабеля кучного выщелачивания / Я. В. Лушников, В. К. Багазеев // Известия вузов. Горный журнал. - 2013. - № 8. - С. 124-127.
16. Татауров, С. Б. Экспериментально-теоретические исследования и обоснование геотехнологии формирования штабеля из окомкованных золотосодержащих руд для улучшения его фильтрационных свойств / С. Б. Татауров // Записки Горного института. - Т. 189. - С. 168-174.
17. Gangues and clays minerals as rate-limiting factors in copper heap leaching: a review / N. Toro, Y. Ghorbani, M. D. Turan [et al.] // Metals. - 2021. - Vol. 11. - P. 1539-1554.
18. Деметьев, В. Е. Основные аспекты технологии кучного выщелачивания золотосодержащего сырья / В. Е. Деметьев, А. П. Татаринов, С. С. Гудков // Горный журнал. - 2001. - № 5. - С. 53-55.
19. Properties governing the flow of solution through crushed ore for heap leaching / S. W. Robertson, P. J. van Staden, A. Cherkaev [et al.] // Hydrometallurgy. - 2022. - Vol. 208. - P. 1-17.
20. Argimbaev, K. R. Investigations of the deposit geological structure impact on the technogenic accident risk at the mining plant / K. Argimbaev // Journal of Engineering and Applied Sciences. - 2018. - Vol. 13, № 7. - P. 1713-1717.
21. Reyes, A. 3D slope stability analysis of heap leach pads using the limit equilibrium method / A. Reyes, P. Garma, D. Parra. - Peru, 2014. - P. 257-271.
22. Analysis of mining waste dump site stability based on multiple remote sensing technologies / L. Wei, Y. Zhang, Z. Zhao [et al.] // Remote Sensing. - 2018. - Vol. 10, № 12. - P. 2025-2045.
23. Ponomarenko, T. An assessment of the applicability of sustainability measurement tools to resource-based economies of the commonwealth of independent states / T. Ponomarenko, M. Nevskaya, O. Marinina // Sustainability. - 2020. - Vol. 12, № 14. - P. 5582-5589.
24. Smith, M. Leach pad cost benchmarking / M. Smith, D. Parra, A. Asociados // Proceedings of Heap Leach Solutions. - Peru, 2014. - P. 9.
25. Пашкевич, М. А. Формирование экологического ущерба при складировании сульфидсодержащих отходов обогащения полезных ископаемых / М. А. Пашкевич, А. В. Алексеев, Р. Р. Нуреев // Записки Горного института. - 2023. - Т. 260. - С. 155-167.
26. Rehabilitation of disturbed lands with industrial wastewater sludge / T. A. Petrova, E. Rudzisha, A. V. Alekseenko [et al.] // Minerals. - 2022. - Vol. 12, № 3. - P. 1-19.
27. Господариков, А. П. Техно-технологические аспекты использования валков с профилем в форме треугольника Рело в дробящих агрегатах на рудоподготовительном переделе / А. П. Господариков, Д. А. Ефимов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2022. - № 10-2. - С. 117-126.
28. A control volume finite element method for adaptive mesh simulation of flow in heap leaching / P. Mostaghimi, B. S. Tollit, S. J. Neethling [et al.] // Journal of Engineering Mathematics. - 2014. - Vol. 87, № 1. - P. 111-121.
29. 3D dual pore-system leaching model. Part 1: Study on fluid flow / X. Miao, G. A. Narsilio, A. Wu [et al.] // Hydrometallurgy. - 2017. - Vol. 167. - P. 173-182.
30. Brinkgreve, R. B. J. PLAXIS 3D 2017. Material Models Manual / R. B. J. Brinkgreve. - Netherlands, 2018. - 212 p.
31. Протосеня, А. Г. Прогноз напряженно-деформированного состояния и устойчивости лба забоя тоннеля при пересечении нарушенных зон грунтового массива / А. Г. Протосеня, А. В. Алексеев, П. Э. Вербило // Записки Горного института. - 2022. - Т. 254. - С. 252-260.
32. Smith, I. M. Programming the finite element method / I. M. Smith, D. V. Griffith. - 2nd edition. - Chisester, U.K.: John Wiley & Sons, 1982. - 351 p.
33. Schanz, T. The Hardening Soil Model: Formulation and verification / T. Schanz, P. A. Vermeer, P. G. Bonnier // Beyond 2000 in Computational Geotechnics. - 1999. - P. 281-290.
34. Деменков, П. А. Прогноз оседания поверхности земли при сооружении котлована вблизи застройки / П. А. Деменков, О. В. Трушко, В. В. Комолов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. - 2019. - № 2. - С. 300-309.
35. Schaap, M. G. A modified mualem-van genuchten formulation for improved description of the hydraulic conductivity near saturation / M. G. Schaap, M. Th. Van Genuchten // Vadose Zone Journal. - 2006. - Vol. 5. - P. 27-34.
36. A control volume finite element method for adaptive mesh simulation of flow in heap leaching / P. Mostaghimi, B. S. Tollit, S. J. Neethling [et al.] // Journal of Engineering Mathematics. - 2014. - Vol. 87. - P. 111-121.
37. A Brief note on the heap leaching technologies for the recovery of valuable metals / T. Thenepalli, R. Chilakala, L. Habte [et al.] // Sustainability. - 2019. - Vol. 11, № 12. P. 3347.

REFERENCES

1. Trubetskoy KN, Kaplunov DR, Rylnikova MV. The principles of parametes justification of sustainable and ecologically balanced exploration of solid mineral resources. MIAB. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2014;2:3-10 (In Russ.).
2. Chanturiya VA, Vaysberg LA, Kozlov AP. Promising trends in investigations aimed at all-round utilization of mineral raw materials. *Ore Dressing.* 2014;2:3-9 (In Russ.).
3. Shumilova LV, Khatkova AN, Cherkasov VG. Alternative preparation of mining waste for metal leaching. MIAB. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;3-2:173-81 (In Russ.).

4. Ivanik SA, Ilyukhin DA. Flotation extraction of elemental sulfur from gold-bearing cakes. *Journal of Mining Institute*. 2020;242:202-8 (In Russ.).
5. Alexandrova T, Nikolaeva N, Afanasova A, et al. Extraction of low-dimensional structures of noble and rare metals from carbonaceous ores using low-temperature and energy impacts at succeeding stages of raw material transformation. *Minerals*. 2023;13(1):84-112.
6. Sokolov IV, Antipin YuG, Rozhkov AA, et al. Environmental geotechnology for low-grade ore mining with the creation of conditions for the concurrent disposal of mining waste. *Journal of Mining Institute*. 2023;260:289-96 (In Russ.).
7. Larichkin FD, Voitekhovskiy YuL, Vorobyov AG, et al. Peculiarities of substantiating the parameters of the conditions for cost-effective extraction of valuable rare-earth components of multicomponent mineral raw materials. *Mining Magazine*. 2016;1:49-53 (In Russ.).
8. Underground and heap leaching of uranium, gold and other metals. Ed. M. I. Fazlullina. Moscow, 2005 (In Russ.).
9. Sanakulov KS. Efficient utilisation of technogenic wastes in heap leaching of gold, Navoi, 2021 (In Russ.).
10. Golik VI, Razorenov YuI, Brigida VS, et al. Mechanochemical technology of metal mining from enriching tails. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(6):175-83 (In Russ.).
11. McBride D, Gebhardt J, Croft N, et al. Heap leaching: Modeling and forecasting using CFD technology. *Minerals*. 2018;8(1):9.
12. Kutepov YuI, Kutepova NA. Methodology of engineering-geological study of hydrogeomechanical processes in technogenic-disturbed massifs during mining MPI. MIAB. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2014;8:123-31 (In Russ.).
13. Petersen J. Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores. A brief overview. *Hydrometallurgy*. 2016;165:206-12.
14. Glazunov VV, Burlutsky SB, Shuvalova RA, et al. Increasing the reliability of 3D modeling of a landslide slope based on accounting for engineering geophysics data. *Journal of Mining Institute*. 2022;257:771-82 (In Russ.).
15. Lushnikov YaV, Bagazeev VK. Definition of physical and mechanical properties of ore pellets when forming a stack of heap leaching. *News from universities. Mining magazine*. 2013;8:124-27 (In Russ.).
16. Tataurov SB. Experimental and theoretical studies and justification of geotechnology of stock pile formation from pelletized gold-bearing ores in order to enhance its filtration properties. *Journal of Mining Institute*, 2011;189:168-74 (In Russ.).
17. Toro N, Ghorbani Y, Turan MD, et al. Gangues and clays minerals as rate-limiting factors in copper heap leaching: a review. *Metals*. 2021;11:1539-54.
18. Dementev VE, Tatarinov AP, Gudkov SS. Main aspects of heap leaching technology for gold-bearing raw materials. *Mining Magazine*. 2001;5:53-5 (In Russ.).
19. Robertson SW, van Staden PJ, Cherkaev A, et al. Properties governing the flow of solution through crushed ore for heap leaching. *Hydrometallurgy*. 2022;208:1-17.
20. Argimbaev KR. Investigations of the deposit geological structure impact on the technogenic accident risk at the mining plant. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018;13(7):1713-17.
21. Reyes A, Garma P, Parra D. 3D slope stability analysis of heap leach pads using the limit equilibrium method. Peru, 2014:257-71.
22. Wei L, Zhang Y, Zhao Z, et al. Analysis of mining waste dump site stability based on multiple remote sensing technologies. *Remote Sensing*. 2018;10(12):2025-45.
23. Ponomarenko T, Nevskaya M, Marinina O. An assessment of the applicability of sustainability measurement tools to resource-based economies of the commonwealth of independent states. *Sustainability*. 2020;12(14):5582-89.
24. Smith M, Parra D, Asociados A. Leach pad cost benchmarking. Proceedings of Heap Leach Solutions. Peru, 2014.
25. Pashkevich MA, Alekseenko AV, Nureev RR. Environmental damage from the storage of sulfide ore tailings. *Journal of Mining Institute*. 2023;260:155-67 (In Russ.).
26. Petrova TA, Rudzisha E, Alekseenko AV, et al. Rehabilitation of disturbed lands with industrial wastewater sludge. *Minerals*. 2022;12(3):1-19.
27. Gospodarikov AP, Efimov DA. Technical and technological aspects of the use of Reuleaux triangular profile rolls in crushing units in the ore processing plant. MIAB. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;10-2:117-26 (In Russ.).
28. Mostaghimi P, Tollit BS, Neethling SJ, et al. A control volume finite element method for adaptive mesh simulation of flow in heap leaching. *Journal of Engineering Mathematics*. 2014;87(1):111-21.
29. Miao X, Narsilio GA, Wu A, et al. 3D dual pore-system leaching model. Part 1: Study on fluid flow. *Hydrometallurgy*. 2017;167:173-82.
30. Brinkgreve RBJ. PLAXIS 3D 2017. Material Models Manual. Netherlands, 2018.
31. Protosenya AG, Alekseev AV, Verbilo PE. Prediction of the stress-strain state and stability of the front of tunnel face at the intersection of disturbed zones of the soil mass. *Journal of Mining Institute*. 2022;254:252-60 (In Russ.).
32. Smith IM, Griffith DV. Programming the finite element method. John Wiley & Sons, Chisester, U.K, 2nd edition, 1982.
33. Schanz T, Vermeer PA, Bonnier PG. The hardening soil model: Formulation and verification. Beyond 2000 in Computational Geotechnics, 1999:281-90.
34. Demenkov PA, Trushko OV, Komolov VV. The forecast of earth surface subsidence at the excavator of the pit near the building. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2019;2:300-9 (In Russ.).
35. Schaap MG, Van Genuchten M. Th. A modified mualem-van genuchten formulation for improved description of the hydraulic conductivity near saturation. *Vadose Zone Journal*. 2006;5:27-34.
36. Mostaghimi P, Tollit BS, Neethling SJ, et al. A control volume finite element method for adaptive mesh simulation of flow in heap leaching. *Journal of Engineering Mathematics*. 2014;87:111-21.
37. Thenepalli T, Chilakala R, Habte L, et al. A Brief note on the heap leaching technologies for the recovery of valuable metals. *Sustainability*. 2019;11(12):3347.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ



Поморцева Анастасия Александровна:
соискатель,
кафедра маркшейдерского дела,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: a.a.pomortseva@mail.ru,
Scopus Author ID 57198448214,
ORCID ID 0000-0003-4247-6499



Поспехов Георгий Борисович:
кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник,
лаборатория физико-механических свойств
и разрушения горных пород НЦГиПП,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: pospehov@spmi.ru,
Scopus Author ID 57195332705,
ORCID ID 0000-0001-9090-5150

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pomortseva Anastasiia Aleksandrovna:
postgraduate student,
Department of Mine Surveying,
St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II,
St Petersburg Russia,
e-mail: a.a.pomortseva@mail.ru,
Scopus Author ID 57198448214,
ORCID ID 0000-0003-4247-6499

Posphehov Georgiy Borisovich:
Ph. D.-M. Sc.,
Leading Researcher,
Laboratory of Physical and Mechanical Properties and
Rock Fracture of the Scientific Centre of Geomechanics and
Mining Problems,
St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II,
St Petersburg, Russia,
e-mail: pospehov@spmi.ru,
Scopus Author ID 57195332705,
ORCID ID 0000-0001-9090-5150

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION:

Поморцева Анастасия Александровна — написание текста статьи, генерация идеи исследования, выполнение работы по систематизации материала, проведение исследований, получение данных для анализа; Поспехов Георгий Борисович — постановка задачи исследования, разработка методики, анализ результатов исследования, написание текста статьи /

Pomortseva Anastasiia Aleksandrovna — writing the text of the article, generating the idea of the research, systematization of the material, conducting research, obtaining data for analysis; Georgiy Borisovich Posphehov — setting the research problem, developing the methodology, analyzing the research results, writing the text of the article.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.



НИТУ «МИСИС»

Информируем Вас



История Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» началась больше ста лет назад, когда в 1918 году была создана Московская горная академия, в которой открылось металлургическое отделение. Университет постоянно расширялся, и уже в 1921 году отделения были преобразованы в факультеты, а к 1930 году академию разделили на шесть самостоятельных институтов.

На сегодняшний день три из них — институт стали, цветных металлов и горный институт снова объединились в одно учебное заведение — Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС».

Программы специалитета:

- ◆ Геотехнологии,
- ◆ Горное дело,
- ◆ Физические процессы горного или нефтегазового производства

Контакты: 119991, Москва, Ленинский пр-т, 4 стр.1, НИТУ «МИСИС».
Приемная комиссия (Граждане РФ) +7 499 649-44-80, +7 499 649-40-48, +7 499 236-30-78, +7 495 638-46-78, +7 495 638-45-16



WWW.N-GN.RU

О ПРОБЛЕМЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОССТАЮЩИХ ДРЕНАЖНЫХ СКВАЖИН ПРИ ОСУШЕНИИ МИХАЙЛОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (КУРСКАЯ МАГНИТНАЯ АНОМАЛИЯ)

В. В. Кушнерчук,

АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева», г. Железногорск, Россия;

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия;

В. В. Хаустов, В. Н. Тюпин,

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия;

Л. А. Семенова, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия;

А. И. Карнюшкин, Московский государственный технический университет им. М. Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация: Приведены результаты исследований функционирования дренажного комплекса Михайловского железорудного месторождения (КМА). В связи со значительными размерами карьерного поля, а также для уменьшения объема вскрыши его осушение осуществляется комбинированно-поверхностным и подземным способом. Установлено, что в настоящее время среднегодовой приток к шахтному водоотливу изменяется в пределах 2150...2830 м³/ч, из которых большая часть дренажных вод поступает из батского водоносного горизонта (основной обводняющий коллектор – 77 % водопритока) наряду с обводнением атмосферными осадками, надкелловейским водоносным комплексом и рудно-кристаллическими трещинными водами. Установлена относительная стабилизация режима водоносных комплексов и объемов водопритоков в карьер МГОКа за последние десятилетия. Показано негативное воздействие горного предприятия, повлекшее образование депрессий регионального масштаба и существенное истощение запасов подземных вод нижнего водоносного комплекса. Выявлена основная производственная проблематика работы подземного дренажного комплекса, связанная со сложностями сопряженного функционирования с карьером, а также с периодическими нарушениями нормального режима эксплуатации восстающих дренажных скважин вплоть до полного выхода из строя некоторых из них. Впервые натурными исследованиями (внутрискважинная видеофиксация) выявлены ранее неизученные деформации обсадных колонн восстающих дренажных скважин. Установлены причины деформаций, разработаны конкретные мероприятия по повышению надежности работы восстающих дренажных скважин. Намечены направления развития дальнейших исследований. Результаты исследований могут быть востребованы при дренаже восстающими дренажными скважинами не только на КМА, но и на прочих месторождениях, подобных по геолого-гидрогеологическим условиям.

Ключевые слова: месторождение, гидрогеологические условия, подземные воды, водоприток, дренаж, восстающие дренажные скважины, деформации.

Для цитирования: О проблеме эксплуатации восстающих дренажных скважин при осушении Михайловского месторождения (Курская магнитная аномалия) / В. В. Кушнерчук, В. В. Хаустов, В. Н. Тюпин [и др.] // Маркшейдерия и недропользование. 2024. №3. С. 80–88. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_80_88.

ABOUT THE PROBLEM OF OPERATION OF RISING DRAINAGE WELLS DURING DRAINAGE OF THE MIKHAILOVSKOYE FIELD (KURSK MAGNETIC ANOMALY)

V. V. Kushnerchuk, JSC Mikhailovsky Mining and Processing Plant named after. A. V. Varichev, Zheleznogorsk, Russia;

Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia;

V. V. Khaustov, V. N. Tyupin, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia;

L. A. Semenova, Southwestern State University, Kursk, Russia;

A. I. Karnyushkin, Moscow State Technical University named after. M.E. Bauman, Moscow

Abstract: The results of a study of the functioning of the drainage complex of the Mikhailovsky iron ore deposit at the KMA are presented. Due to the significant size of the quarry field, as well as to reduce the volume of overburden, its drainage is carried out using a combined surface and underground method. It has been established that currently the average annual inflow to the mine drainage varies within the range of 2150...2830 m³/h, of which most of the drainage water comes from the Bathonian aquifer (the main water supply reservoir – more than 70 % of the water inflow) along with watering by precipitation, the supra-Callovian aquifer complex and ore-crys-

talline fractured waters. The relative stabilization of the regime of aquifer complexes and the volume of water inflows into the MGOK quarry over the past decades has been established. The negative impact of the mining enterprise is shown, which led to the formation of depressions on a regional scale and a significant depletion of groundwater reserves in the lower aquifer complex. The main production problems in the operation of the underground drainage complex have been identified, related to the difficulties associated with the operation of the quarry, as well as periodic disruptions to the normal operation of rising drainage wells, up to the complete failure of some of them. For the first time, field studies (downhole video recording) revealed previously unstudied deformations of the casing columns of raised drainage wells. The causes of deformations have been established, and specific measures have been developed to improve the reliability of raised drainage wells. Directions for the development of further research are outlined. The research results can be used for drainage by rising drainage wells not only in the KMA, but also in other fields with similar geological and hydrogeological conditions.

Keywords: deposit, hydrogeological conditions, groundwater, water inflow, drainage, rising drainage wells, deformations.

For citation: Kushnerchuk V. V., Khaustov V. V., Tyupin V. N., et al. About the problem of operation of rising drainage wells during drainage of the Mikhailovskoye field (Kursk magnetic anomaly). Surveying and subsoil use. 2024;(3):80-88. (In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_3_80_88.

Общеизвестно, что Курская магнитная аномалия (КМА) является крупнейшей железорудной провинцией в мире. Ее площадь составляет 125 тыс. км², в пределах которой локализовано 18 месторождений и 26 перспективных участков с общими запасами порядка 51 млрд тонн. Без сомнения, эта уникальная железорудная провинция еще на протяжении многих десятилетий будет оставаться крупнейшим минерально-сырьевым бассейном России, в связи с чем актуальность дальнейшего изучения и совершенствования горно-геологических работ, транспорта, внедрения современных технологий производства руды не требует дополнительных доказательств.

Одним из крупнейших железорудных месторождений КМА является Михайловское месторождение (северо-запад Курской области), промышленное освоение которого открытым способом сопровождается выемкой и перемещением огромных масс горных пород и руд, дренированием внушительного количества подземных вод, что существенно изменяет гидрогеологические и экологические условия района. Развитие отмеченных технологических процессов носит прогрессирующий характер в пространственно-временном отношении и негативно влияет, в частности, на продолжительность жизненного цикла горных выработок подземного дренажного комплекса. В этой связи для надежного обеспечения выполнения планов Михайловского горно-обогатительного комбината им. А. В. Варичева (далее – МГОК) по добыче 50 млн тонн руды в год на период до 2032 года [1] исследования гидрогеологических и геомеханических процессов в пределах функционирующего горного предприятия весьма актуальны.

Объект исследований

В геолого-структурном отношении район Михайловского железорудного месторождения располагается в северо-западной части Воронежской антеклизы и частично ограничивающих ее прогибов Московской синеклизы и Днепровско-Донецкой впадины [2]. Месторождение приурочено к западному борту Михайловской структуры, к участку ее флексуобразного изгиба, осложненному продольными и поперечными разломами, дополнительной складчатостью [3].

Основные гидрогеологические особенности исследуемого района обусловлены наличием мощного осадочного чехла, перекрывающего месторождение, в котором выделены водоносные горизонты в песчаных отложениях четвертичной, меловой и юрской систем, в песчаных и карбонатных образованиях девонской системы [2, 4, 5]. Ниже в кристал-

лическом фундаменте прослеживается водоносная зона трещиноватости в архей-протерозойских изверженных и метаморфических породах.

Выдержанная глинистая келловейская толща разделяет гидрогеологический разрез на два водоносных комплекса:

- ✦ надкелловейский, включает безнапорные горизонты в четвертичных и меловых отложениях,
- ✦ подкелловейский напорно-безнапорный – комплекс водоносных горизонтов в батских, девонских и архей-протерозойских породах (рис. 1, см. цветную вставку на стр. 26).

Надкелловейский водоносный комплекс расположен в зоне активного водообмена и питается за счет инфильтрации атмосферных осадков и талых вод, а дренируется бортами карьера и гидрографической сетью. Только на отдельных локальных участках в районе карьера образовались незначительные по водопонижению (до 10...15 м) и площади (от сотен метров до 1-2 км в диаметре) депрессионные воронки, а их характер в настоящее время относительно стабилен – водоотбор полностью компенсируется метеогенным подпитыванием. Надкелловейский комплекс водоносных горизонтов отличается неоднородностью фильтрационных параметров, невыдержанностью по мощности и литологическому составу [4]. Верхнеюрский водоупор, отделяющий верхнюю гидродинамическую зону от нижней, имеет региональное распространение и сложен толщей келловейских глин мощностью 30...50 м.

Непосредственное прилегание юрских и девонских отложений к выступу рудно-кристаллической толщи с погружением к периферии месторождения на 30...60 м создает все условия для непосредственной гидравлической связи между всеми водоносными горизонтами (рис. 1).

Режим водоносных горизонтов, расположенных ниже верхнеюрских глин, обусловлен незначительными естественными ресурсами из-за затрудненных условий их восполнения (область питания расположена в 30 км северо-восточнее месторождения). Однако на фильтрационный режим нижнего водоносного комплекса оказывают влияние подземные воды верхнего водоносного комплекса посредством перетоков на участках прилегания юрских и девонских отложений на выступ рудно-кристаллической толщи, отмеченного выше, а также отсутствие или деградация юрских глинистых отложений в пределах долин рек [6, 7].

Горные работы ведутся в трех карьерах: центральном, соединительном и южном; северный карьер законсервирован и используется для складирования окисленных кварцитов.

Длина карьера по контуру вскрыши составляет 6,0 км, ширина — 2,6 км, глубина — 340 м, площадь достигла 15,6 км². В связи со значительными размерами карьерного поля, а также для уменьшения объема вскрыши и повышения экономической эффективности добычи руды его осушение осуществляется комбинированно поверхностным и подземным способом.

Осушение отложений надкелловейского комплекса, сбор дождевых и паводковых вод осуществляется с помощью прибортовых дренажных канав общей протяженностью совместно с канавами в карьере, включая нагорные канавы, более 60 км. Вода из них отводится к отстойникам и зумпфам водосбросных скважин и по ним перепускается в горные выработки подземного дренажного комплекса (ПДрК). Последний включает в себя 5 шахтных стволов и 67,4 км дренажных горных выработок (в обслуживании находятся 37,5 км штреков), расположенных в следующих уровнях: горизонт +50 м, горизонт -20 м, горизонт -100 м.

Шахтный водоотлив складывается из подземных вод, поступающих из восстающих дренажных скважин (далее ВДС) и из трещинных зон кристаллических пород, а также за счет прибортового дренажа апт-сеноманского горизонта и сбора атмосферных осадков (среднее значение за последние пять лет — 21 068 175 м³). Подземные воды при этом составляют 79 % от общего объема водоотлива, а наибольшая доля в нем приходится на батский водоносный горизонт — до 77 %. Часть дренажных вод используется на технические нужды комбината — в среднем 395 729 м³ воды в год.

Высокоэффективный экологически безопасный способ осушения месторождений КМА на основе систем восстающих дренажных скважин, сооружаемых из подземных горных выработок и эксплуатируемых в режиме постоянного снижения уровня вод дренируемого горизонта, разработан ОАО «ВИОГЕМ» [8-12]. Способ отлично себя зарекомендовал и широко внедрен, в числе прочего и в системе осушения

карьерного поля МГОК [10]. Однако в процессе эксплуатации ВДС выяснилось, что некоторые из них могут частично или полностью выходить из строя.

Негативное воздействие горного предприятия и крупных водозаборов на сегодняшний день привело к образованию депрессий регионального масштаба и существенному истощению запасов подземных вод нижнего водоносного комплекса [6]. Так, воронка депрессии в батском водоносном горизонте имеет в плане форму эллипса, вытянутую в северо-восточном и юго-западном направлениях, с относительно крутыми уклонами крыльев в приконтурной части карьера, особенно северной, и более пологими по периферии. Размеры воронки по большой оси достигают 80...90 км, по малой — 60...70 км, при этом ее контур достиг области питания водоносного горизонта, а водопонижение изменяется от 75 до 110 м. Уже на значительной площади вокруг карьера батский водоносный горизонт приобрел безнапорный характер, зона безнапорного режима прослеживается с севера на юг на 18...20 км, с запада на восток — на 12 км. Это притом что в естественных условиях батский водоносный горизонт характеризовался напорным режимом с возрастанием напоров в юго-западном направлении до 200 м и более. Однако в целом темп роста депрессий в подкелловейских водоносных горизонтах при современных объемах водоотлива замедляется и стабилизируется [6, 7].

Гидрогеологические условия месторождения можно характеризовать как сложные, а естественный режим подземных вод в пределах месторождения в результате мероприятий по его осушению существенно нарушен.

Материал и методы исследований

Наиболее достоверные сведения о техническом состоянии водопонижающей восстающей скважины могут быть получены только с применением средств прямого (визуального) обследования внутренней поверхности обсадной

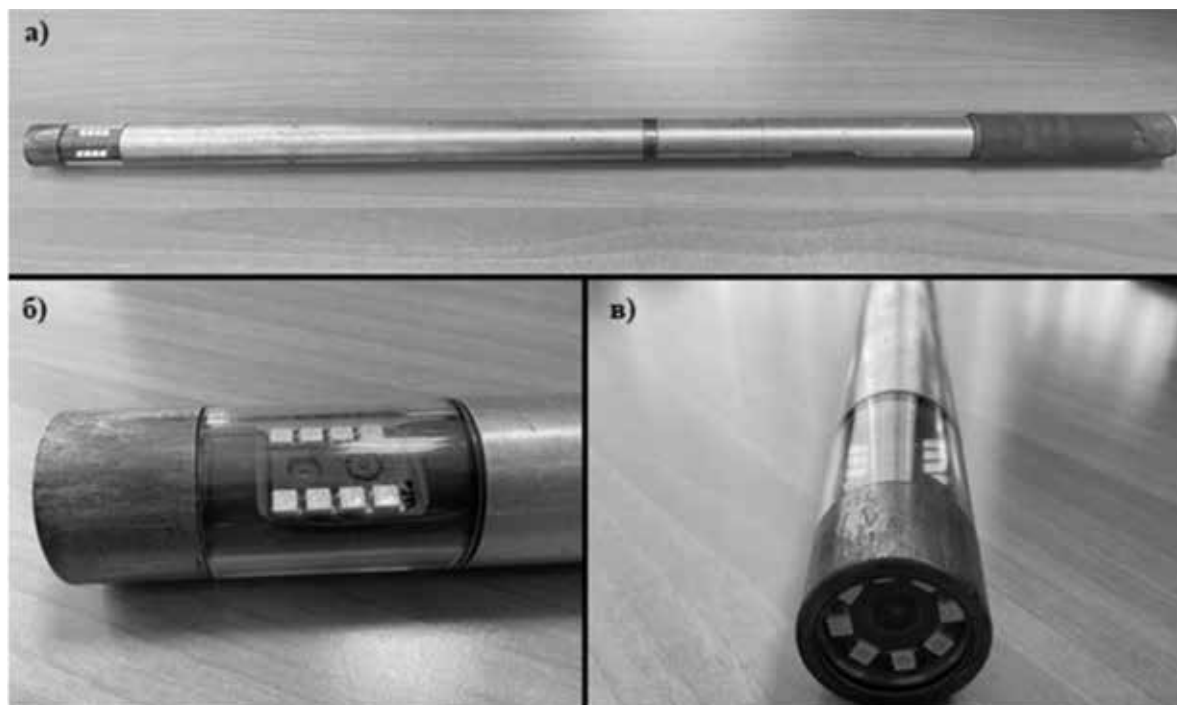


Рис. 2. Видеометрический скважинный прибор ВСР-200D: а - общий вид прибора; б - боковая видеокамера; в - фронтальная видеокамера

Fig. 2. Videometric downhole tool VSP-200D: a - general view of the device; b - side video camera; c - front video camera

колонны и фильтровой зоны ствола с использованием современных фото- и видеоустройств, обеспечивающих получение исходных данных в виде фотопанорам и видеозаписей [13-15].

Для определения причин нарушения технологического режима работы и аварий восстающих дренажных скважин выполнено их обследование с использованием фото- и видеофиксации. Обследование производилось методом видеоскопии видеозондом ВСП-200D, разработанным специалистами ВИОГЕМ (г. Белгород). Последний предназначен для изучения скважин глубиной до 200 метров. Видеозонд оснащен фронтальной видеокамерой с разрешением 1000 tvl; боковой видеокамерой, вращающейся на 360°, с разрешением 100 tvl, 5mp; процессором, принимающим команды оператора и управляющим вращением боковой камеры, переключением между камерами, записью на флеш-карту памяти в графическом формате, освещенностью; транслятором видеосигнала по кабелю UTP (рис. 2).

Подготовка прибора и выполнение видеосъемки в скважине выполняется по методике, разработанной ОАО «ВИОГЕМ», суть которой заключается в следующем.

Зонд подается в восстающую скважину на высоту 100...130 м средством механизации с цепным приводом через задвижку на пластиковых или алюминиевых штангах, наращиваемых замковым соединением (рис. 3).



Рис. 3. Подача зонда в скважину

Fig. 3. Feeding the probe into the well

Боковая камера вращается на 360° относительно оси прибора, с ее помощью оператор телесистемы визуально обследует стенки скважин на предмет выявления наруше-

ний обсадной колонны. Тыловая камера служит для технических целей: через нее подается изображение скважинного пространства непосредственно перед зондом. Переключение между камерами, управление вращением выполняется оператором телесистемы с помощью пульта управления. Глубина фиксации точки наблюдения осуществляется путем суммирования расстояния от точки крепления корпуса видео зонда к первой штанге до оптической оси боковой камеры, совокупной длины полностью вошедших в скважину штанг и длины видимого участка последней наращенной штанги с учетом высоты кондуктора спускоподъемного механизма.

Видеометрические наблюдения в скважине сопровождаются ведением полевого журнала, в котором отмечаются глубины нарушений, способствующих выходу скважины из строя, фиксируются их интервалы, отмечаются место и время съемки объекта путем вращения боковой видеокамеры, дается краткая описательная характеристика объекта.

Результаты исследований

По результатам рекогносцировочного обследования вышедших из строя дренажных скважин выявлено, что в 9 из 22 скважин отсутствовала возможность погружения прибора в связи с закрытой задвижкой, наличием полога и пр.

В доступных 13 скважинах выполнено обследование стенок обсадной колонны при помощи видеометрии (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Результаты осмотра скважин при помощи видео зонда

Results of well inspection using a video probe

№ скважины / Well No	Год бурения / Year of drilling	Местонахождение / Location	Пикет / Picket	Абс. отметка, м / Abs. elevation, m	Начальный дебит, м³/ч / Initial flow rate, m³/h	Глубина погружения прибора, м / Device immersion depth, m
В-132	1990	Северо-центральный штрек № 1	8	6	120	55
В-197	1992	Квершлаг ствола № 6	3	12,6	80	49
В-218	1993	Западный штрек № 19	4	-14,3	20	99,8
В-253	1995	Юго-западный штрек	75	-10,73	80	68,5
В-265	1996	Северо-западный штрек № 2	67	6,9	100	13
В-267	1996	Северо-западный штрек № 2	61	6,2	25	49
В-287	1998	Северо-западный штрек № 2	73	8,1	20	77,5
В-299	2000	Квершлаг ствола № 6	24	14,45	100	50,5
В-315	2002	Квершлаг ствола № 6	7	12,78	50	34
В-320	2003	Юго-западный штрек	86	-9,92	50	5,5
В-324	2004	Северо-центральный штрек № 1	4	8	10	73
В-351	2006	Северо-центральный штрек № 1	8	9,9	35	8,5
В-391	2011	Западный штрек № 19	8	-14,1	50	71,5

Выявлены разрывы и смещения обсадных колонн. Разрывы располагаются в пределах аргиллитистых глин девонского возраста. В качестве примера приведем скважину

В-391, пробуренную в западном штреке № 19 в 2011 году на глубину 101 м. Начальное бурение велось шарошечным долотом 151 мм на глубину 3,1 п. м, затем в скважину был установлен кондуктор 146 мм, который был раскреплен в скважине согласно паспорту. Устье скважины оборудовано сальниковым устройством с задвижкой на отводе. Далее бурение велось шарошечным долотом 132 мм до глубины 101 м. Батские пески были подсечены на 95-м метре бурения. Скважина обсажена колонной труб 89 мм, в интервале 95-101 м установлена фильтровая колонна длиной 6 п. м, состоящая из 5 щелевых фильтров по 1,2 м каждый.

Результат видеофиксации разрыва обсадной колонны восстающей дренажной скважины В-391 представлен на рисунке 4.



Рис. 4. Обрыв обсадной колонны скважины В-391

Fig. 4. Broken well casing B-391

Снижение дебита скважины В-391 во времени представлено на рисунке 5.

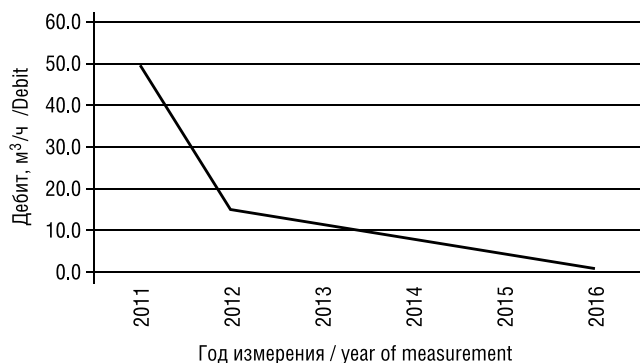


Рис. 5. График снижения дебита по годам скважины В-391

Fig. 5. Graph of flow rate reduction by year of well B-391

Обсуждение результатов исследований

Система осушения карьера МГОК должна обеспечить безопасные условия ведения вскрышных и добычных работ на расчетный период отработки месторождения, а также благоприятные условия эксплуатации горно-добычного и гор-

нотранспортного оборудования, машин и механизмов. Длительное функционирование дренажного комплекса карьера способствует, с одной стороны, образованию и развитию депрессионных воронок в водоносных горизонтах и комплексах, увеличению мощности обширной зоны аэрации, увеличению градиентов напоров и скорости потоков, то есть формированию контрастных техногенных гидрогеодинамического и гидрогеохимического режимов. В свою очередь, техногенный гидрогеологический режим способствует активизации разнообразных инженерно-геологических процессов: осыпей, обвалов, оползней, оплывин, суффозии, объемных деформаций в массивах пород и пр., которые способны приводить, в частности, к нарушению нормальных условий эксплуатации восстающих скважин подземного дренажного комплекса (далее - ПДрК) и прочим нежелательным последствиям. С другой стороны, в результате постоянного развития фронта горных работ и углубления карьера подземные горные выработки ПДрК общей протяженностью около 3 км уже оказались в зоне подработки, что самым негативным образом отражается на состоянии и эффективности функционирования системы осушения карьера в целом.

Состояние обслуживаемых подземных горных выработок ПДрК в целом удовлетворительное. Однако практика эксплуатации ПДрК свидетельствует о том, что основная производственная проблематика связана с подработкой его горных выработок карьером, а также с выходом из строя некоторых ВДС.

В процессе развития фронта горных работ в карьере при его углублении неизбежно погашение дренажных горных выработок, попадающих в зону опасного воздействия при приближении открытых горных работ к подземной выработке на расстояние, равное размеру охранного целика, рассчитываемого по сейсмическому действию массовых взрывов в карьере [16-22]. Процессы погашения дренажных горных выработок — отдельное исследование, результаты которого будут подробно рассмотрены в следующей публикации.

По снижению дебита скважины можно судить, что разрыв обсадной колонны скважины произошел в 2012 году (резкое падение дебита), и впоследствии происходила ее кольматация глинистыми образованиями, вплоть до полного прекращения истечения подземных вод из батского горизонта в 2016 году. Анализ дебитов скважин выявил их различия: в одних ВДС расход уменьшался постепенно, в других дебит резко падал. Снижение расхода объясняется кольматацией скважины глинистыми массами, образовавшимися в результате разрыва обсадной колонны в пределах пестроцветных алевролитистых глин (D3), их обводнением с последующим вымыванием в ствол скважины. Далее глинистый материал осаждался на стенках скважины и образовывались глинистые пробки, сопровождающиеся резким падением ее дебита (см. рис. 5). Постепенное снижение дебита некоторых скважин связано с повреждением их фильтра непосредственно в пределах батского водоносного горизонта, что может свидетельствовать о масштабных объемных деформациях в стратонах, охватывающих более мощную пачку слоев, нежели представлялось ранее.

В целом появление подобных разрывов связано с геомеханическим и инженерно-геологическим факторами в связи с набуханием глин при попадании в них воды из батского во-

доносного горизонта. В результате разрыва обсадных колонн дренажных скважин оставшаяся в водоносном горизонте незакольматированная фильтровая часть скважины обеспечивает дополнительное обводнение девонских отложений и зоны дезинтеграции скального горного массива, так как происходит процесс дополнительного увлажнения и обводнения затрубного пространства в течение всего времени их эксплуатации. Последнее не может не отражаться на снижении физико-механических характеристик обводняемых пород. Также не исключено влияние сейсмического воздействия буровзрывных работ на геомеханические процессы в прибортовой зоне карьера [21, 22]. Разрывы обсадных колонн свидетельствуют о наличии смещений в слоях девонского возраста, что требует расширения существующей сети глубинного геомеханического мониторинга с последующим созданием численной гидрогеомеханической модели массива с ВДС для прогнозирования негативных деформационных процессов.

Предложения

Натурные исследования восстающих дренажных скважин ПДрК МГОК позволили впервые выявить ранее неизученные деформации их обсадных колонн с последующим выбыванием дрен из строя. Безусловно, последнее является причиной снижения эффективности работы всего ПДрК, поэтому требуются усилия по последовательному воспроизводству утраченных восстающих дренажных скважин.

Намечены следующие направления исследований:

- ✦ совершенствование конструкции фильтровых колонн с подбором фильтровой зоны для недопущения прорывов воды и выноса обводненных пород по стволу скважины;
- ✦ изготовление фильтров без термической обработки, что увеличит заданную первоначальную скважность, целостность и водопропускную способность установленного фильтра;
- ✦ увеличение частоты мониторинга дренажных скважин, в частности дебита для наиболее точного определения времени их деструкции;
- ✦ расширение области исследований геомеханических процессов в пределах всего прибортового массива по дополнительной сети глубинного геомеханического мониторинга с увеличением ее заглубления вплоть до зоны выявленных разрывов обсадных колонн;
- ✦ разработка численных геомеханической и гидрогеологической моделей в пределах исследуемых массивов горных пород с учетом дополнительной обводненности зоны дезинтеграции скального горного массива по причине вышедших из строя восстающих дренажных скважин [1, 4, 6];
- ✦ пролонгация видеообследований всех доступных для мониторинга восстающих дренажных скважин в пределах всего ПДК в целях геометризации зон деформаций и обсадных колонн в плане и по глубине;
- ✦ организация проведения измерений внутреннего сечения обсадной колонны на определенных интервалах в целях выяснения истинных причин разрушения восстающих дренажных скважин.

В качестве оперативных рекомендаций в связи со сложившейся непростой геомеханической ситуацией в массивах размещения ВДС можно предложить:

- ✦ продолжить видеообследования всех доступных для изучения ВДС в пределах ПДрК для геометризации зон деформаций и обсадных колонн в плане и по глубине;
- ✦ увеличить частоту замеров дебитов водопонижающих скважин для наиболее точного выявления времени выхода их из строя;
- ✦ проводить измерения внутреннего сечения обсадной колонны на определенных интервалах в целях уточнения причин разрушения ВДС;
- ✦ совершенствовать конструкции фильтровых колонн с подбором фильтровой зоны для недопущения прорывов воды и выноса обводненных пород по стволу скважины.

Результаты исследований могут быть востребованы при дренаже восстающими дренажными скважинами не только на КМА, но и на прочих месторождениях, похожих по геолого-гидрогеологическим условиям.

Выводы

1. Гидрогеологическое поле Михайловского месторождения железных руд занимает сводовую часть Воронежского массива и частично его склоны и представляет собой открытую гидрогеологическую структуру с интенсивным вертикальным водообменом. В его пределах зона пресных вод охватывает весь осадочный комплекс пород и верхнюю трещиноватую зону кристаллического фундамента (средняя мощность зоны порядка 200...300 м).

2. Михайловское железорудное месторождение характеризуется достаточно сложным геологическим строением (несмотря на горизонтальное и субгоризонтальное залегание стратифицированной толщи осадочного чехла), являющимся результатом длительной геотектонической эволюции всего региона КМА и оказывающим значительное влияние на гидрогеологические условия и открытую разработку железных руд в целом.

3. Фактические данные последнего десятилетия и неоднократные оценки водопритоков (ВИОГЕМ, НТЦ НОВОТЭК, АОЗТСП «Геолинк», ООО «СПб-Гипрошахт») подтверждают представление об относительной стабилизации режима водоносных комплексов и объема водопритоков в карьер МГОК, что дает основание предположить, что в ближайшие годы объемы водопритоков в карьер за счет подземных вод не изменятся значительно.

4. Установлено, что за последнее время среднегодовой приток к шахтному водоотливу изменялся в пределах 2150...2830 м³/ч, из которых порядка 300 м³/ч дренажных вод поступает из надкелловейского водоносного комплекса, около 1500 м³/ч — из батского водоносного горизонта, 100 м³/ч составляют притоки из девонских и руднокристаллических отложений, и 250...930 м³/ч — атмосферные осадки. В связи со значительными размерами карьерного поля, а также для уменьшения объема вскрыши и повышения экономической эффективности добычи руды его осушение осуществляется комбинированно-поверхностным и подземным способом.

5. Водоносные горизонты подкелловейского комплекса осушаются комбинированно: системой насосных установок в карьере, для чего создана система подземных выработок и пробуренных из них восстающих скважин на все водоносные горизонты и дренажные узлы. ПДК включает 5 шахтных

стволов и 67,4 км дренажных горных выработок, расположенных в трех уровнях: горизонт +50м, горизонт 20 м, горизонт 100 м.

6. Система дренажа в целом эксплуатируется в соответствии с проектными решениями, а состояние подземных горных выработок ПДК – удовлетворительное (при суммарной протяженности обслуживаемых горных выработок порядка 37 км). Тем не менее многолетняя практика эксплуатации ПДК свидетельствует о том, что основная производ-

ственная проблематика его работы связана со сложностями сопряженного функционирования с карьером, а также с периодическими нарушениями нормального режима эксплуатации восстающих дренажных скважин вплоть до полного выхода из строя некоторых из них.

7. Проведенные натурные исследования восстающих дренажных скважин ПДК МГОК впервые выявили ранее неизученные деформации их обсадных колонн с последующим выбыванием дрен из строя. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Опыт освоения и осушения месторождения в сложных гидрогеологических условиях / А. В. Козуб, Р. И. Исмагилов, Б. П. Бадтиев [и др.] // Горная промышленность. - 2019. - № 5 (147). - С. 12-14.
2. Железные руды КМА: монография / под ред. В. П. Орлова, И. А. Шевырева, Н. А. Соколова. - М.: Геоинформмарк, 2001. - 616 с.
3. Дунаев, В. А. Структурное районирование Михайловского железорудного месторождения в связи с устойчивостью откосов действующего карьера / В. А. Дунаев, Н. Т. Рязузов, С. С. Серый // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 1996. - № 6. - С. 14-20.
4. Железорудная база России / под ред. В. П. Орлова, М. И. Веригина, Н. И. Голивкина. - М.: Геоинформмарк, 1998. - 842 с.
5. Смолянинов, В. М. Подземные воды Центрально-Черноземного региона: условия их формирования, использование / В. М. Смолянинов. - Воронеж: Истоки, 2003. - 240 с.
6. Бочаров, В. Л. Эколого-гидрогеологические условия территории КМА / В. Л. Бочаров, А. Н. Круговых // Высокие технологии в экологии: мат-лы 9-й Межд. науч.-практ. конф. - Воронеж: Менеджер, 2006. - С. 71-76.
7. Бугреева, М. Н. Гидрогеохимическая оценка подземных вод Михайловского промрайона КМА / М. Н. Бугреева, Р. И. Титов // Вестник Воронежского университета. Серия: Геология. - 2002. - № 2. - С. 123-129.
8. Проектирование карьеров / К. Н. Трубецкой, Г. Л. Краснянский, В. В. Хронин [и др.]. - 3-е изд., перераб. - М.: Высшая школа, 2009. - 696 с.
9. Теоретическое обоснование и преимущества применения систем восстающих дренажных скважин на обводненных объектах / Ю. В. Пономаренко, Ю. И. Волков, В. С. Кузькин [и др.] // Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях: мат-лы 7-го Межд. симпозиума. - Белгород: ВИОГЕМ, 2003. - С. 30-45.
10. Пономаренко, Ю. В. Способ осушения бортов глубоких карьеров с помощью систем комбинированных дренажных устройств / Ю. В. Пономаренко // Горный журнал. - 2014. - № 7. - С. 52-54.
11. Осушение глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых системами восстающих дренажных скважин - технология будущего / К. Н. Трубецкой, Ю. И. Волков, А. А. Изотов [и др.] // Неделя горняка - 2006: сб. мат-лов. Белгород: ВИОГЕМ, 2006. С. 175-184.
12. Сооружение восстающих скважин в подземном дренажном комплексе Стойленского ГОКа / А. Ю. Шемякин, И. А. Тимошков, Ю. И. Волков [и др.] // Горный журнал. - 2014. - № 6. - С. 24-26.
13. Яницкий, Е. Б. Применение фотометодов для изучения структуры массива скальных пород и состояния стационарных уступов в карьере / Е. Ю. Яницкий, И. М. Игнатенко, А. В. Дунаев // Геология, география и глобальная энергия. - 2009. - № 1 (32). - С. 31-37.
14. Диагностика технического состояния крепи стволов шахты им. Губкина / С. В. Сергеев, Е. Д. Воробьев, И. М. Игнатенко [и др.] // Горный журнал. - 2020. - № 10. - С. 64-67.
15. Особенности обеспечения экологической безопасности подземной разработки Яковлевского месторождения богатых железных руд / Д. В. Голубничий, Д. Х. Гилязов, И. М. Игнатенко [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. - 2023. - № 2. - С. 94-103.
16. Oparin, V. N. Theoretical fundamentals to describe interaction of geomechanical and physicochemical processes in coal seams / V. N. Oparin // Journal of Mining Science. - 2017. - Vol. 53, № 2. - P. 201-215.
17. Martin, D. Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks / D. Martin, P. Stacey // CRC Press. - 2018. - URL: <https://www.routledge.com/Guidelines-for-Open-Pit-Slope-Design-in-Weak-Rocks/Martin-Stacey/p/book/9781138298095>.
18. Определение границ опасных деформаций и зон сдвижения горных пород на месторождении Тырныауз / Н. Б. Агарков, В. В. Хаустов, Н. А. Лукьяненко [и др.] // Маркшейдерия и недропользование. - 2022. - № 2 (118). - С. 46-50.
19. Sergeev, S. V. In-situ estimation of stress-strain behavior of reinforced-concrete landing support. EUROCK-2018 / S. V. Sergeev, A. V. Zinchenko, G. Y. Yurchenko // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. - 2018. - Vol. 2. - P. 1311.
20. Seismically safe parameters of confined blasting in levelling dry dock bottom / V. N. Tyupin, E. B. Yanitsky, A. E. Polyakh [et al.] // Eurasian Mining. - 2022. - № 2. - P. 16-19.
21. Closed-form solution of stress and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rock / Duc-Phi D, Nam-Hung Tran, Hong-Lam Dang [et al.] // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. - 2019. - Vol. 113. - P. 11-23.
22. Тюпин, В. Н. Зависимость геомеханического состояния трещиноватого массива от интервала замедления в зоне сейсмического действия массовых взрывов / В. Н. Тюпин, В. В. Хаустов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2021. - № 2. - С. 45-54.

REFERENCES

1. Kozub AV, Ismagilov RI, Badtiev BP, et al. Experience in the development and drainage of deposits in difficult hydrogeological conditions. *Mining Industry*. 2019;5(147):12-4 (In Russ.).
2. Iron ores KMA: monograph / ed. V. P. Orlova, I. A. Shevyreva, N. A. Sokolova. Moscow, 2001 (In Russ.).

3. Dunaev VA, Ryaguzov NT, Seryi SS. Structural zoning of the Mikhailovskoye iron ore deposit in connection with the stability of the slopes of the active quarry. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 1996;(6):14-20 (In Russ.).
4. Iron ore base of Russia / ed. V.P. Orlova, M.I. Verigina, N.I. Golivkina. Moscow: ZAO Geoinformmark, 1998 (In Russ.).
5. Smolyaninov VM. Groundwater of the Central Black Earth region: conditions of their formation, use. Voronezh: Istoki, 2003 (In Russ.).
6. Bocharov VL, Krugovyykh AN. Ecological and hydrogeological conditions of the KMA territory. 9th international scientific and practical conference «High technologies in ecology». Proceedings. Voronezh, 2006:71-6 (In Russ.).
7. Bugreeva MN, Titov RI. Hydrogeochemical assessment of groundwater in the Mikhailovsky industrial area of KMA. *Bulletin of Voronezh State University*. 2002;(2):123-9 (In Russ.).
8. Trubetskoy KN, Krasnyansky GL, Khronin VV, et al. Quarry design. 3rd ed. reworked. Moscow: Higher School, 2009 (In Russ.).
9. Ponomarenko YuV, Volkov YuI, Kuzkin VS, et al. Theoretical justification and advantages of using systems of rising drainage wells on water-flooded objects. 7th International Symposium «Development of mineral resource deposits and underground construction in complex hydrogeological conditions». Materials. Belgorod, 2003:30-45 (In Russ.).
10. Ponomarenko YuV. A method for draining the sides of deep quarries using systems of combined drainage devices. *Mining Journal*. 2014;(7):52-4 (In Russ.).
11. Trubetskoy KN, Volkov YuI, Izotov AA, et al. rainage of deep mineral deposits by systems of rising drainage wells – the technology of the future. Miner's Week - 2006. Collection of materials. Belgorod, 2006:175-84 (In Russ.).
12. Shemyakin AYU, Timoshkov IA, Volkov YuI, et al. Construction of riser wells in the underground drainage complex of Stoilensky GOK. *Mining Journal*. 2014;(6):24-6 (In Russ.).
13. Yanitsky EB, Ignatenko IM, Dunaev AV. Application of photographic methods to study the structure of rock massifs and the state of stationary benches in a quarry. *Geology, geography and global energy*. 2009;1(32):31-7 (In Russ.).
14. Sergeev SV, Vorobyov ED, Ignatenko IM, et al. Diagnostics of the technical condition of the shaft support of the mine named after. Gubkina. *Mining Journal*. 2020;(10):64-7 (In Russ.).
15. Golubnichiy DV, Gilyazev DKh, Ignatenko IM, et al. Features of ensuring environmental safety of underground mining of the Yakovlevskoye deposit of rich iron ore. *Bulletin of Voronezh State University. Series: Geology*. 2023;(2):94-103 (In Russ.).
16. Oparin VN. Theoretical fundamentals to describe the interaction of geomechanical and physicochemical processes in coal seams. *Journal of Mining Science*. 2017;53(2):201-15.
17. Martin D, Stacey P. Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks. CRC Press. 2018. Available from: <https://www.routledge.com/Guidelines-for-Open-Pit-Slope-Design-in-Weak-Rocks/Martin-Stacey/p/book/9781138298095>
18. Agarkov NB, Khaustov VV, Lukyanenko NA, et al. Determination of the boundaries of dangerous deformations and rock displacement zones at the Tyrnauz deposit. *Mine surveying and subsoil use*. 2022;2(118)6:46-50 (In Russ.).
19. Sergeev SV, Zinchenko AV, Yurchenko GY. In-situ estimation of stress-strain behavior of reinforced-concrete landing support. EUROCK 2018. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses*. 2018;2:1311.
20. Tyupin VN, Yanitsky EB, Polyakh AE, et al. Seismically safe parameters of confined blasting in levelling dry dock bottom. *Eurasian Mining*. 2022;(2):16-9.
21. Duc-Phi D, Nam-Hung Tran, Hong-Lam Dang, et al. Closed-form solution of stress and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019;(113):11-23.
22. Tyupin VN, Khaustov VV. Dependence of the geomechanical state of a fractured massif on the deceleration interval in the zone of seismic action of mass explosions. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2021;(2):45-54.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ



Вячеслав Викторович Кушнерчук:
аспирант,
Белгородский государственный национальный
исследовательский университет,
г. Белгород, Россия,
e-mail: v_kushnerchuk@mgok.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vyacheslav Viktorovich Kushnerchuk:
postgraduate student,
Belgorod State National research university,
Belgorod, Russia,
e-mail: v_kushnerchuk@mgok.ru



Владимир Васильевич Хаустов:
доктор геолого-минералогических наук,
доцент,
Белгородский государственный национальный
исследовательский университет,
г. Белгород, Россия,
<http://orcid.org/0000-0002-1895-7367>,
WoS Researcher ID: C-3838-2016,
Scopus Author ID: 7003912446,
e-mail: khaustov@bsu.edu.ru

Vladimir Vasilyevich Khaustov:
doctoral candidate of geologo-mineralogical sciences,
Associate Professor,
Belgorod National Research University,
Belgorod, Russia,
<http://orcid.org/0000-0002-1895-7367>,
WoS Researcher ID: C-3838-2016,
Scopus Author ID: 7003912446,
e-mail: khaustov@bsu.edu.ru



Владимир Николаевич Тюпин:
доктор технических наук,
профессор,
Белгородский государственный национальный
исследовательский университет,
г. Белгород, Россия,
<http://orcid.org/0000-0002-3709-0957>,
WoS Researcher ID: AAH-7764-2019,
Scopus Author ID: 6507398036,
e-mail: tyupinvn@mail.ru

Vladimir Nikolaevich Tyupin:
doctoral candidate of technical sciences,
Professor,
Belgorod National Research University,
Belgorod, Russia,
<http://orcid.org/0000-0002-3709-0957>,
WoS Researcher ID: AAH-7764-2019,
Scopus Author ID: 6507398036,
e-mail: tyupinvn@mail.ru



Семенова Людмила Анатольевна:
кандидат педагогических наук,
доцент,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Россия,
<http://orcid.org/0000-0002-4816-101X>,
e-mail: romahka31@yandex.ru

Semenova Lyudmila Anatolyevna:
Candidate of Pedagogical Sciences,
Associate Professor,
Southwestern State university,
Kursk, Russia,
<http://orcid.org/0000-0002-4816-101X>,
e-mail: romahka31@yandex.ru



Карнюшкин Александр Иванович:
кандидат технических наук,
доцент,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана,
г. Москва, Россия,
<http://orcid.org/0000-0001-5685-162X>,
e-mail: him_expert@mail.ru

Karnyushkin Alexander Ivanovich:
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Moscow State Technical University named
after N. E. Bauman,
Moscow, Russia,
<http://orcid.org/0000-0001-5685-162X>,
e-mail: him_expert@mail.ru

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION:

Кушнерчук Вячеслав Викторович — написание текста статьи, анализ результатов исследования, выполнение работы по систематизации материала; Хаустов Владимир Васильевич — постановка задачи, написание текста статьи, Тюпин Владимир Николаевич — генерация идеи исследования; Семенова Людмила Анатольевна — проведение полевых работ; Карнюшкин Александр Иванович — постановка задачи, анализ результатов исследования.

Kushnerchuk Vyacheslav Viktorovich — writing the text of the article, analyzing the research results, performing work on systematizing the material; Khaustov Vladimir Vasilievich — problem statement, writing the text of the article; Tyupin Vladimir Nikolaevich — generating the research idea; Semenova Lyudmila Anatolyevna — conducting field work; Karnyushkin Alexander Ivanovich — problem statement, analysis of research results.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.



МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г. И. НОСОВА

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова — один из крупнейших многопрофильных вузов страны, в котором обучается более девяти тысяч студентов и работает около двух тысяч преподавателей и сотрудников.

Институты, факультеты, кафедры

- Институт металлургии, машиностроения и материалобработки
- Институт горного дела и транспорта
- Институт энергетики и автоматизированных систем
- Институт дополнительного профессионального образования и кадрового инжиниринга МГТУ «Горизонт»
- Проектная школа

Контакты : единый контакт-центр: +7 800 100 1934, e-mail: mgtu@magtu.ru; приемная комиссия: +7 3519 33 09 39, e-mail: priem@magtu.ru




WWW.N-GN.RU

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАРКШЕЙДЕРСКОЙ СЪЕМКИ СКЛАДОВ ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО ПРИ ПОМОЩИ БПЛА

*Н. В. Литвиненко, Е. А. Романько, С. Е. Гавришев,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;
Ю. Д. Маврин
ООО «Магнитогорская маркшейдерско-геодезическая компания», г. Магнитогорск, Россия*

Аннотация: Определение остатков полезного ископаемого на складах по результатам маркшейдерской съемки является важной задачей маркшейдерской службы на любом горнодобывающем предприятии. В настоящее время широкое распространение для выполнения маркшейдерских съемок получил аэрофотограмметрический способ при помощи БПЛА из-за его относительной доступности, эффективности и безопасности выполнения работ. Результатом съемки является цифровая модель местности, содержащая миллионы закоординированных точек. При этом объем склада должен быть установлен с учетом требуемой величины погрешности его определения. Выявлены основные факторы, оказывающие влияние на величину погрешности определения объема, предложена классификация способов аэрофотосъемки. Представлены результаты исследований по влиянию выявленных факторов на величину погрешности подсчета объемов. Даны рекомендации по выполнению съемок и подсчету объемов складов, обеспечивающие требуемый уровень погрешности определения объема.

Ключевые слова: склад полезного ископаемого, допустимая погрешность определения объемов, высота аэрофотосъемки, продольное перекрытие, плановая съемка, перспективная съемка, комбинированная съемка, оптимизация высот, плотность облака точек.

Для цитирования: Литвиненко Н. В., Романько Е. А., Гавришев С. Е., Маврин Ю. Д. Обоснование параметров маркшейдерской съемки складов полезного ископаемого при помощи БПЛА // Маркшейдерия и недропользование. 2024. №3. С. 89-96. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_89_96.

JUSTIFICATION OF PARAMETERS OF MINE SURVEYING OF MINERAL WAREHOUSES USING UAV

*N. V. Litvinenko, E. A. Romanko, S. E. Gavrishev,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia;
Y. D. Mavrin
Magnitogorsk Surveying and Geodetic Company LLC, Magnitogorsk, Russia*

Abstract: Determination of mineral residuals in stockpiles based on the results of surveying is an important task of the surveying service at any mining enterprise. Currently, the aerial photogrammetric method of surveying using UAVs is widely used for surveying because of its relative availability, efficiency and safety of work. The result of the survey is a digital terrain model containing millions of coordinated points. At the same time, the volume of the warehouse should be established taking into account the required value of the error of its determination. The main factors influencing the value of the volume determination error are identified, the classification of aerial survey methods is proposed. The results of researches on the influence of the revealed factors on the error value of volume calculation are presented. Recommendations are given for surveying and calculating the volumes of warehouses, providing the required level of volume determination error.

Keywords: mineral warehouse, permissible error in determining volumes, aerial survey height, longitudinal overlap, planned survey, prospective survey, combined survey, height optimization, point cloud density.

For citation: Litvinenko N. V., Romanko E. A., Gavrishev S. E., Mavrin Y. D. Justification of parameters of mine surveying of mineral warehouses using UAV. Surveying and subsoil use. 2024;(3):89-96. (In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_3_89_96.

Одной из задач маркшейдерской службы горнодобывающего предприятия является определение фактического положения горных работ, в том числе объемов остатков складов полезного ископаемого. С одной стороны, допущенная погрешность по результатам съемки и подсчета объема приводит к значительным экономическим

последствиям, с другой — нормативной документацией устанавливается ее предельная величина. Определение остатков на складах выполняется в два этапа — производство съемок и подсчет объемов любым из способов, который предусмотрен проектом производства маркшейдерских работ на предприятии, имеющимся оборудованием и программным обеспечением.

печением. На сегодняшний день наиболее современными, простыми, быстрыми способами съемок, которые снижают трудоемкость, увеличивают производительность труда и детальность съемок, улучшают условия безопасности труда являются методы наземного и воздушного лазерного сканирования и фотограмметрии с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1-12]. При этом обработка результатов съемки должна обеспечить необходимый и достаточный уровень определения погрешности подсчета объема при исключении обработки чрезмерных измерений, которые требуют значительных временных затрат и вычислительных мощностей.

Целью исследования является установление необходимого и достаточного уровня определения величины объема склада полезного ископаемого, обеспечивающего необходимую детальность съемок и отсутствие обработки чрезмерных измерений.

Материал и методы исследования

На горнодобывающих предприятиях при установлении допустимой величины погрешности определения объема горнотехнических объектов с положительными формами техногенного рельефа (складов полезного ископаемого, отвалов, карт намыва) руководствуются существующей нормативной документацией [п. 105, 13], при этом погрешность не должна превышать 2 %. Либо известными требованиями [14], представленными в таблице 1 и, как правило, указанными в проекте производства маркшейдерских работ горнодобывающего предприятия.

Таблица 1 / Table 1

Допустимые погрешности определения объемов полезного ископаемого в отвалах при добыче полезных ископаемых, %
Permissible errors in determining the volume of minerals in dumps at mining, %

Показатель / Indicator	Объем отвала, тыс. м ³ / The volume of the dump, thousands of cubic meters			
	<20	20-50	50-200	>200
Относительная погрешность определения объемов	8	5	3	2
Допустимая разность двух независимых определений объемов	12	8	4	8

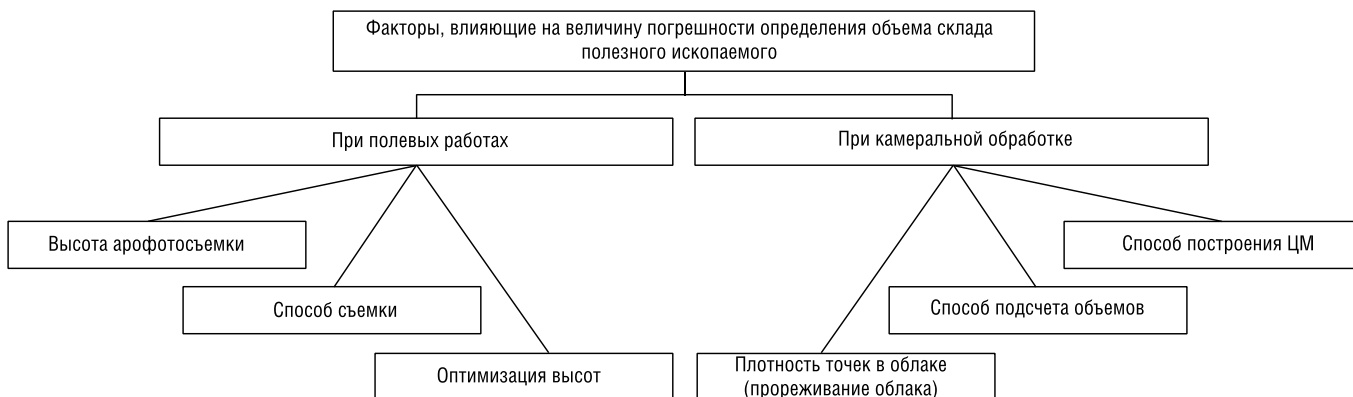


Рис. 1. Факторы, оказывающие влияние на погрешность определения объемов складов полезных ископаемых

Fig. 1. Factors influencing the error in determining the volume of mineral deposits

Очевидно, что погрешность определения величины объема склада будет зависеть от точности выполнения съемок объекта и определения объема по результатам выполненных съемок. При выполнении маркшейдерских съемок горнотехнических объектов при помощи аэрофотосъемки БПЛА и подсчете их объема необходимо выделить следующие факторы, оказывающие непосредственно влияние на точность полученных результатов, они представлены на рисунке 1.

По каждому представленному фактору выполнена аэрофотосъемка складов при помощи БПЛА DJI Phantom 4 pro v.2 с изменением параметров исследуемого фактора от полета к полету. Обработка результатов аэрофотосъемки выполнялась в программном комплексе Agisoft Metashape по одному и тому же алгоритму и с неизменными настройками. По полученному облаку точек выполнялся подсчет объема полезного ископаемого на снимаемом складе в программном комплексе «Кредо Генплан».

Факторы, оказывающие влияние на погрешность определения объемов складов полезных ископаемых

Рассмотрим подробно данные факторы.

Высота аэрофотосъемки (высота фотографирования)

Один из основных параметров аэрофотосъемки, от которого совместно с параметрами аэрофотокамеры зависит пространственное разрешение аэрофотоснимков – соотношение единицы растрового изображения с его линейным размером на земной поверхности GSD (Ground Sample Distance) и среднеквадратическая погрешность съемки рельефа m_H . [15, 16].

$$GSD = (S_w \times H \times 100) / (f \times N_x), \quad (1)$$

где GSD – размер пикселя на земле, см/пиксел; S_w – ширина сенсора камеры, мм; H – высота съемки, м; f – фокусное расстояние, мм; N_x – ширина кадра снимка, пиксел.

$$m_H = \sqrt{\frac{3 \times H^2 \times q^2}{N_x^2 (1 - \frac{P_x}{100})}} + 0,5 \times m_{Hs}, \quad (2)$$

где m_H – СКП съемки рельефа, м; H – высота съемки, м; q – СКП измерения координат на цифровом фотоснимке, пиксел (0,33); N_x – ширина кадра снимка, пиксел; P_x – продольное перекрытие, %; m_{Hs} – СКП определения высоты центра проекции аэрофотоснимка, м.

Для БПЛА DJI Phantom 4 pro v.2 выполнен расчет пространственного разрешения фотоснимков GSD и погрешности съемки рельефа m_H , результаты представлены на рисунке 2.

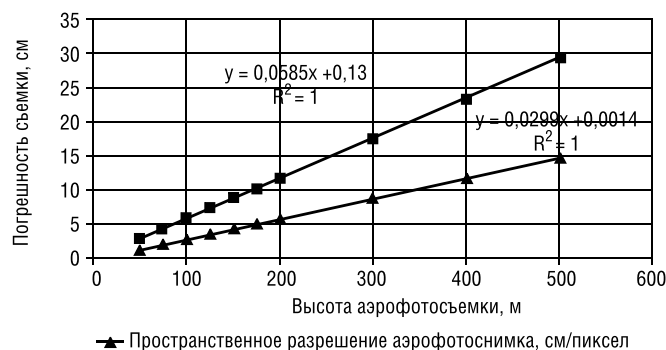


Рис. 2. Зависимость пространственного разрешения фотоснимка и погрешности съемки рельефа от высоты аэрофотосъемки

Fig. 2. The correlation of the spatial resolution of the photograph and the accuracy of the relief survey on the height of the aerial photography

Анализируя формулу 2, можно отметить, что из регулируемых в процессе полета факторов на СКП съемки рельефа оказывает влияние не только высота съемки H , но и продольное перекрытие снимков P_x .

Влияние высоты аэрофотосъемки при разных значениях продольного перекрытия на погрешность съемки рельефа m_H представлена на рисунке 3.

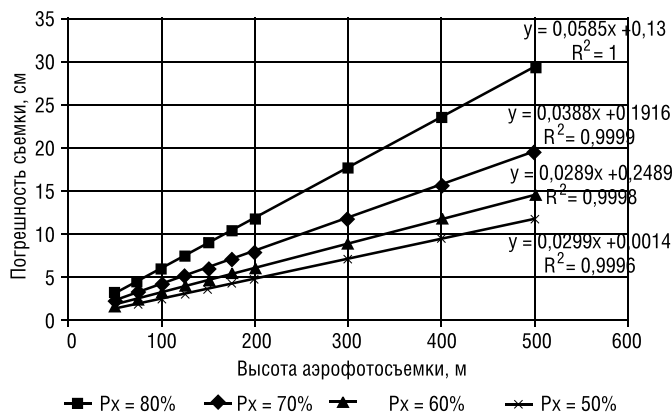


Рис. 3. Зависимость погрешности съемки рельефа от высоты аэрофотосъемки при разных значениях продольного перекрытия

Fig. 3. The correlation of the error of the relief survey with the height of aerial photography at different values of the longitudinal overlap

Способ съемки

Существуют различные способы аэрофотосъемки, очевидно, что каждый из них оказывает некоторое влияние на точность определения объема. Выделены факторы, оказывающие существенное влияние на результаты съемки, и предложена классификация способов съемки, которая представлена на рисунке 4.

Влияние способа аэрофотосъемки в зависимости от положения оптической оси камеры рассмотрено на примере эстакадного усреднительного склада с параметрами: $L = 98$ м, $B = 50$ м, $H = 16$ м, $V = 33\,638$ м³. Аэрофотосъемка склада вы-



Рис. 4. Способы аэрофотосъемки

Fig. 4. Aerial photography methods

полнена тремя способами: плановой, перспективной и комбинированной. Результаты подсчета объема склада по указанным способам представлены в таблице 2. На рисунке 5 представлены вертикальные сечения цифровой модели склада, построенные по результатам аэрофотосъемки, выполненной разными способами, отображающими полноту и достоверность построения цифровых моделей склада по результатам съемок. Сечение цифровой модели склада (ЦМС), представленное на рисунке 5в, отражает фактическое положение поверхности склада.

Таблица 2 / Table 2

Результаты определения объема эстакадного усреднительного склада

The results of determining the volume of the flyover warehouse

Способ аэрофотосъемки / Aerial photography method	Количество фотоснимков, шт. / Number of images, pcs	Объем склада, м ³ / The volume of the mineral storage, m ³	Погрешность определения объема, % / The error in determining the volume
Плановая (а)	92	33 230	1,6
Перспективная (б)	282	33 776	
Комбинированная (в)	314	33 638	1,2

Оптимизация высот

Зачастую поверхность склада имеет сложную форму техногенного рельефа со значительными перепадами высот на небольших участках. В таком случае необходимо применять оптимизацию измерения высот одним из следующих способов.

Способы оптимизации измерения высот:

1. Выполнение двух аэрофотосъемок склада при разных высотах полета БПЛА с совместной обработкой полученных данных.
2. Заложение дополнительных опознавательных знаков в местах резкого перепада высот [15].
3. Выполнение контрольных перспективных снимков объекта в процессе плановой аэрофотосъемки с дальнейшей

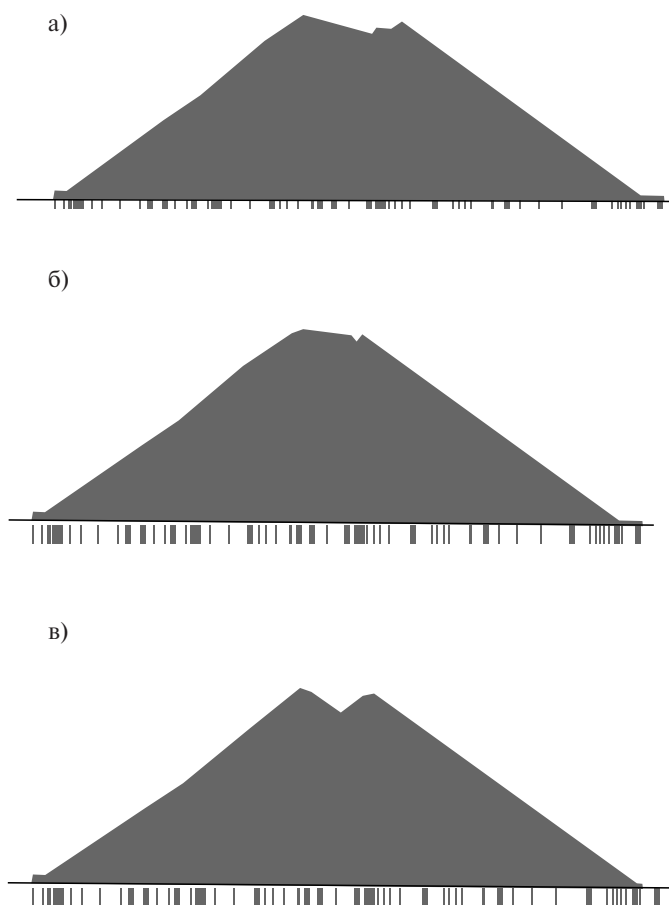


Рис. 5. Вертикальные сечения моделей склада, построенные по результатам аэрофотосъемки

Fig. 5. Vertical sections of warehouse models based on the results of aerial photography

совместной обработкой плановых и перспективных фотоснимков.

Первый способ оптимизации измерения высот заключается в выполнении двух независимых плановых аэрофотосъемок склада на разных высотах полета БПЛА. При этом количество снимков увеличивается практически вдвое, что приводит к увеличению количества избыточных данных для фототриангуляции при построении цифровой модели склада и, соответственно, повышению точности построения модели по высоте. Данный способ выполняется непосредственно на этапах планирования полета (создание полетных заданий) и выполнения аэрофотосъемочных работ. На этапе

планирования выполняется создание двух полетных заданий с идентичными характеристиками полета за исключением высоты выполнения съемки, высота устанавливается различной.

Второй способ оптимизации заключается в заложении и координировании дополнительных опознавательных знаков в местах резкого перепада высот. Так, при съемке складов опознавательный знак необходимо закладывать на верхней площадке склада. При выполнении фототриангуляции и построении ЦМС они являются дополнительными точками для внешнего ориентирования модели и корректировки модели по высоте. Данный способ выполняется на этапе полевых работ перед аэрофотосъемочными работами.

Третий способ заключается в выполнении серии перспективных фотоснимков при полете БПЛА к центру участка аэрофотосъемки после завершения маршрута плановой съемки. Данный способ реализуется в автоматическом режиме и предусмотрен приложениями для выполнения аэрофотосъемок DJI GS RTK, DJI Pilot. Также данная функция реализована в приложении для планирования и выполнения аэрофотосъемок DroneDeploy с небольшим отличием от вышеперечисленных приложений: перспективная съемка участка аэрофотосъемки выполняется не при полете БПЛА к центру участка, а при облете участка по периметру с ориентированием объектива камеры в направлении к центру участка.

Влияние оптимизации измерения высоты на погрешность определения объема склада полезного ископаемого рассмотрено на примере накопительного склада отвального типа

Таблица 3 / Table 3

Результаты определения объема накопительного склада отвального типа

The results of determining the volume of a dump-type accumulative warehouse

Способ аэрофотосъемки / Aerial photography method	Объем склада, м ³ / The volume of the mineral storage, m ³	Погрешность определения объема, % / The error in determining the volume
Без оптимизации измерения высот	14 805	15,3
С оптимизацией при помощи опознавательного знака	17 485	

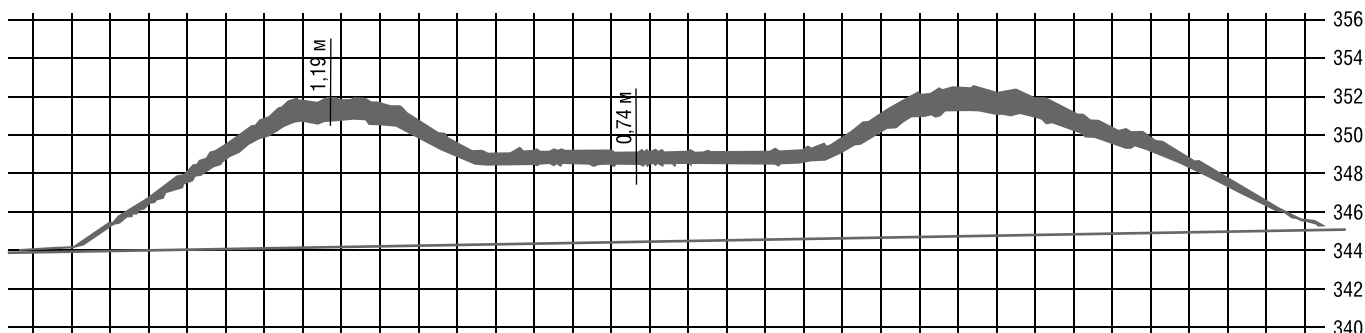


Рис. 6. Вертикальные сечения моделей склада, построенные по результатам аэрофотосъемки с оптимизацией измерения высот и без оптимизации

Fig. 6. Vertical sections of warehouse models based on the results of aerial photography with and without optimization of height measurement

с параметрами: $L = 77$ м, $B = 65$ м, $H = 6$ м, $V = 17\,485$ м³. Результаты определения объема склада с оптимизацией измерения высот при помощи опознавательного знака и без оптимизации представлены в *таблице 3*. На *рисунке 6* представлено положение поверхности склада, полученное по результатам аэрофотосъемки с оптимизацией измерения высот и без нее.

Плотность точек в облаке (прореживание облака)

При использовании аэрофотограмметрического метода съемки с помощью БПЛА значительно увеличиваются объемы получаемой информации и детальность цифровых моделей снимаемых объектов. Обработка результатов маркшейдерских съемок и построение цифровых моделей объектов требуют значительных временных затрат и вычислительных мощностей.

Для установления величины необходимой и достаточной детальности маркшейдерских съемок на погрешность определения объемов складов выполнены подсчеты объема накопительного склада отвального типа с параметрами: $L = 77$ м, $B = 65$ м, $H = 6$ м, $V = 18\,287$ м³ в зависимости от степени прореживания исходного облака точек. Цифровая модель склада представлена на *рисунке 7*, результаты определения объема склада в зависимости от плотности точек в облаке представлены в *таблице 4* и на *рисунке 8*.

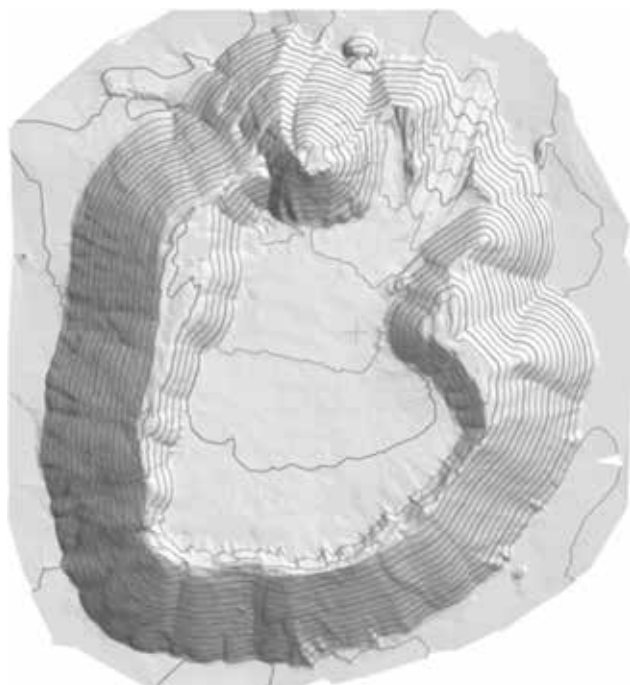


Рис. 7. Цифровая модель накопительного склада отвального типа
Fig. 7. Digital model of a dump-type accumulative warehouse

С целью удобства представления результатов определения объема введены следующие обозначения параметров: V — объем склада, м³; m_V — погрешность определения объема, %; N — количество точек, шт.; h — высота сечения рельефа, м.

Анализируя зависимость на *рисунке 8*, можно отметить, что прореживание ЦММ с шагом до 5 м не оказывает существенного влияния на величину погрешности определения объема. Дальнейшее увеличение шага прореживания приводит к резкому увеличению погрешности. Учитывая, что в [13]

рекомендована допустимая погрешность определения объема склада в 2 %, рекомендуем ограничить прореживание ЦММ при подсчете объемов шагом в 5 м.

Таблица 4 / Table 4

Результаты определения объема склада в зависимости от плотности точек в облаке

The results of determining the warehouse volume depending on the density of points in the cloud

Шаг прореживания точек в облаке, м / Step of thinning of points in the cloud, m	Результат подсчета объемов склада, Results of calculating warehouse volumes	$V_{м^3}/m_V\%$ N
Исходное облако точек	$18\,287\text{ м}^3 / 0,00\%$ 12 964 019	
0,2 м	$18\,220\text{ м}^3 / 0,37\%$ 101 329	
0,5 м	$18\,219\text{ м}^3 / 0,37\%$ 17 023	
1,0 м	$18\,210\text{ м}^3 / 0,42\%$ 4 229	
2,0 м	$18\,157\text{ м}^3 / 0,71\%$ 1 189	
5,0 м	$17\,918\text{ м}^3 / 2,10\%$ 216	
10,0 м	$16\,257\text{ м}^3 / 11,10\%$ 57	
15,0 м	$15\,959\text{ м}^3 / 12,47\%$ 29	



Рис. 8. Зависимость погрешности определения объема склада от плотности точек в облаке

Fig. 8. The relationship of the error in determining the warehouse volume on the density of points in the cloud

Способ построения цифровой модели склада

Построение достоверных цифровых моделей возможно не только по облаку точек, но и по структурным линиям (верхним и нижним бровкам отвалов), изолиниям высот и другими способами. Для выявления зависимости погрешности определения объема одного и того же склада от способа построения его цифровой модели были рассмотрены способы создания цифровых моделей накопительного склада отвального типа, представленного на *рисунке 7*, с параметра-

**Результаты подсчета объема склада в зависимости от способа
построения его цифровой модели**
The results of calculating the warehouse volume depending on the method of constructing its digital model

Шаг прореживания точек в облаке, м / Step of thinning of points in the cloud, m	Результат подсчета объема склада при различных способах построения цифровой модели склада / Results of calculating the warehouse volume with different methods of building a digital warehouse model			
	по облаку точек / on a point cloud, $\frac{V / m_v}{N}$	по структурным линиям / on structural lines, V / mv	по структурным линиям и облаку точек / on structural lines and point cloud, $\frac{V / m_v}{N}$	по изолиниям высот / on elevation isolines, $\frac{V / m_v}{h}$
Исходное облако точек / Original point cloud	$\frac{18\,287\text{ м}^3}{12\,964\,019}$ / 0,00 %	17 836 м ³ / 2,5%		$\frac{18\,231\text{ м}^3}{0,1\text{ м}}$ / 0,30 %
0,2 м	$\frac{18\,220\text{ м}^3}{101\,329}$ / 0,37 %			$\frac{18\,240\text{ м}^3}{0,2\text{ м}}$ / 0,25 %
0,5 м	$\frac{18\,219\text{ м}^3}{17\,023}$ / 0,37 %			$\frac{18\,280\text{ м}^3}{0,5\text{ м}}$ / 0,03 %
1,0 м	$\frac{18\,210\text{ м}^3}{4\,229}$ / 0,42 %			$\frac{18\,638\text{ м}^3}{1,0\text{ м}}$ / 1,92 %
2,0 м	$\frac{18\,157\text{ м}^3}{1\,189}$ / 0,71 %		$\frac{18\,179\text{ м}^3}{1\,189}$ / 0,59 %	$\frac{18\,618\text{ м}^3}{2,0\text{ м}}$ / 1,80 %
5,0 м	$\frac{17\,918\text{ м}^3}{216}$ / 2,10 %		$\frac{18\,021\text{ м}^3}{216}$ / 1,45 %	
10,0 м	$\frac{16\,257\text{ м}^3}{57}$ / 11,10%		$\frac{17\,840\text{ м}^3}{57}$ / 2,44 %	
15,0 м	$\frac{15\,959\text{ м}^3}{29}$ / 12,47%		$\frac{17\,775\text{ м}^3}{29}$ / 2,96 %	

ми: $L = 77$ м, $B = 65$ м, $H = 6$ м, $V = 18\,287$ м³ по облаку точек, структурным линиям, структурным линиям и облаку точек, изолиниям высот и вычислены их объемы. Результаты представлены в таблице 5.

Выводы

В статье выявлены основные факторы, оказывающие влияние на погрешность определения объемов складов, предложена классификация способов аэрофотосъемки.

Необходимая и достаточная величина погрешности определения объема склада согласно [13, 14] обеспечивается при выполнении следующих условий:

1. С увеличением высоты полета уменьшается точность определения пространственных координат, ее устанавливать необходимо по величине GSD и величине погрешности

съемки рельефа совместно с величиной продольного перекрытия снимков.

2. В зависимости от сложности формы склада и однородности его поверхности рекомендуем выполнять плановую съемку для складов простой формы, но с обязательной оптимизацией высот, для складов сложной формы – перспективную или комбинированную.

3. Обеспечение требуемой точности возможно при следующих способах построения ЦМС:

- ✦ по облаку точек, прореженному с шагом через 5 м;
- ✦ по структурным линиям;
- ✦ по структурным линиям совместно с прореженным облаком точек до 7,5 м;
- ✦ по изолиниям высот. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Съемка складов полезных ископаемых аэрофотограмметрическим способом при помощи БПЛА / Ю. Д. Маврин, Н. В. Литвиненко, Е. А. Романько, С. О. Картунова // Маркшейдерия и недропользование. - 2020. - № 4 (108). - С. 51-53.
2. Поспехов, Г. Б. Обоснование методологии мониторинга состояния объектов складирования отходов углеобогажительных предприятий / Г. Б. Поспехов, В. Н. Кондакова, Н. А. Кутепова // Маркшейдерия и недропользование. - 2022. - № 5 (121). - С. 59-63.
3. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. ГКИНП (ГНТА)-02-036-02. - М.: ЦНИИГАиК, 2004. - 48 с.
4. Добрянский, И. А. Проблемы маркшейдерского обеспечения открытых горных работ при использовании беспилотного летательного аппарата / И. А. Добрянский // Маркшейдерский вестник. - 2022. - № 3 (148). - С. 28-32.
5. Волюнский, С. Е. Внедрение беспилотных технологий на Стойленском ГОКе / С. Е. Волюнский, Э. Г. Абатуров // Горный журнал. - 2021. - № 6. - С. 15-17.

6. Курбатова, В. В. Маркшейдерский учет объемов рудных складов с применением методов ДЗЗ / В. В. Курбатова // Маркшейдерия и недропользование. - 2020. - № 5 (109). - С. 43-46.
7. Соколов, А. К. Развитие маркшейдерского обеспечения в условиях современности / А. К. Соколов, Ю. В. Жибоедов, П. А. Шамраев // Горный журнал. - 2022. - № 6. - С. 45-47.
8. Внедрение беспилотных летательных аппаратов для оперативного решения научно-производственных задач в условиях Михайловского ГОКа им. А. В. Варичева / Р. И. Исмагилов, А. Г. Захаров, Б. П. Бадтиев [и др.] // Горная промышленность. - 2020. - № 3. - С. 26-30.
9. Параметрическая сходимость результатов съемки беспилотных воздушных аппаратов Геоскан 40 и GNSS при выполнении маркшейдерских работ на месторождении "Наталка" Магаданской области / В. В. Курбатова, Н. Е. Ломакина, И. Ю. Гарифулина [и др.] // Маркшейдерия и недропользование. - 2023. - № 2 (124). - С. 76-80.
10. Волошина, Е. А. Обоснование применения беспилотных летательных аппаратов для определения объема складов полезного ископаемого / Е. А. Волошина, С. Ю. Новоженин, С. К. Келексаев // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2023. - № 11-1. - С. 305-321.
11. Блищенко, А. А. Оценка точности измерения складов на горных объектах с помощью беспилотной технологии / А. А. Блищенко, А. К. Лобынцев, А. К. Сухов // Маркшейдерский вестник. - 2020. - № 4 (137). - С. 23-27.
12. Гусев, В. Н. Исследование комплекса факторов, оказывающих влияние на погрешность реализации маркшейдерской съемки горных объектов с применением геодезического квадрокоптера / В. Н. Гусев, А. А. Блищенко, А. П. Санникова // Записки Горного института. - 2022. - Т. 254. - С. 173-179.
13. Об утверждении Правил осуществления маркшейдерской деятельности: Приказ Ростехнадзора от 19.05.2023 №186 [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1301713025> (режим доступа: 08.05.2024).
14. Инструкция по маркшейдерскому учету объемов горных пород при добыче полезных ископаемых открытым способом (РД 07-604-03): серия 07, выпуск 13. - М.: ФГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2004. - 24 с.
15. Методические рекомендации по производству аэрофототопографических работ с использованием беспилотных летательных аппаратов при изысканиях в целях строительства и реконструкции автомобильных дорог. ОДМ 218.9.017.-2019 [Электронный ресурс]. - URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293728/4293728465.htm> (режим доступа: 14.05.2024).
16. ГОСТ Р 59328-2021. Аэрофотосъемка топографическая. Технические требования. - М.: Стандартинформ, 2021. - 49 с.

REFERENCES

1. Mavrin YuD, Litvinenko NV, Romanko EA, et al. Survey of mineral deposits by aerial photogrammetric method using UAV. *Surveying and subsoil use*. 2020;4(108):51-3 (In Russ.).
2. Pospheov GB, Kondakova VN, Kutepova NA. Justification of the methodology for monitoring of the state of coal processing waste storage facilities. *Mine surveying and subsoil use*. 2022;5(121):59-63 (In Russ.).
3. Instruction on photogrammetric works for creation of digital topographic maps and plans. GKINP (GNTA)-02-036-02. Moscow, 2004. (In Russ.)
4. Dobryansky IA. Problems of mine surveying support for open-pit mining using an unmanned aerial vehicle. *Mine Surveying Bulletin*. 2022;3(148):28-32 (In Russ.).
5. Volynsky SE, Abaturon EG. Introduction of unmanned technologies at Stoilensky Mining and Processing Plant. *Mining Journal*. 2021;6:15-7 (In Russ.).
6. Kurbatova V. V. Geological survey records of ore deposits volumes with use of earth remote sensing (ERS) methods. *Mine surveying and subsurface use*. 2020;5(109):43-6 (In Russ.).
7. Sokolov AK, Zhiboedov YuV, Shamraev PA. Development of surveyor support in the conditions of modernity. *Mining Journal*. 2022;6:45-7 (In Russ.).
8. Ismagilov RI, Zakharov AG, Badtiev BP, et al. Introduction of unmanned aerial vehicles for operative solution of scientific and production tasks in conditions of A.V. Varichev Mikhailovsky GOK. *Mining Industry*. 2020;3:26-30 (In Russ.).
9. Kurbatova VV, Lomakina NE, Garifulina IYu. Parametric convergence of the survey results of Geoscan 40 and GNSS unmanned aerial vehicles during surveying operations at the Natalka field in the Magadan region. *Mine surveying and subsurface use*. 2023;2(124):76-80 (In Russ.).
10. Voloshina EA, Novozhenin SYu, Kelekhsaev SK. Substantiation of use of unmanned aerial vehicles in volume evaluation of mineral storages. *MIAB*. 2023;11(1):305-21 (In Russ.).
11. Blishchenko AA, Lobyntsev AK, Sukhov AK. Evaluation of the accuracy of measuring volume of warehouse in mining objects using unmanned technology. *Mine surveying bulletin*. 2020;4(137):23-7 (In Russ.).
12. Gusev VN, Blishchenko AA, Sannikova AP. Investigation of a complex of factors influencing the error in the implementation of surveying of mining objects using a geodetic quadcopter. *Journal of Mining Institute*. 2022;254:173-9 (In Russ.).
13. Rostekhnadzor Order No. 186 dated 19.05.2023 «On Approval of the Rules for Surveying Activities». Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1301713025> (In Russ.).
14. Instruction on surveyor's accounting of rock volumes in open pit mining (RD 07-604-03). Ser. 07. Issue. 13. Moscow, 2004 (In Russ.).
15. Methodological Recommendations on the production of aerial photopographic works using unmanned aerial vehicles during surveys for the construction and reconstruction of highways. ODM 218.9.017.-2019. Moscow, 2019 (In Russ.).
16. GOST R 59328-2021 «Topographic aerial photography. Technical requirements». Moscow, 2021 (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Литвиненко Николай Валерьевич:

старший преподаватель,
кафедра геологии, маркшейдерского дела и обогащения
полезных ископаемых,
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Магнитогорский
государственный технический университет им. Г. И. Носова»,
г. Магнитогорск, Россия,
e-mail: n.litvinenko@magtu.ru,
ORCID ID 0000-0003-0819-4367

Романько Елена Александровна:

кандидат технических наук,
доцент,
кафедра геологии, маркшейдерского дела и обогащения
полезных ископаемых.
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Магнитогорский
государственный технический университет им. Г. И. Носова»,
г. Магнитогорск, Россия,
e-mail: romanko_h@mail.ru,
ORCID ID 0000-0001-6030-1954

Гавришев Сергей Евгеньевич:

профессор,
доктор технических наук,
кафедра разработки месторождений полезных ископаемых.
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Магнитогорский
государственный технический университет им. Г. И. Носова»,
г. Магнитогорск, Россия,
e-mail: ormpi-cg@mail.ru,
ORCID ID 0000-0001-8594-8463

Маврин Юрий Дмитриевич:

ведущий специалист,
маркшейдерско-геодезическая служба,
ООО «Магнитогорская маркшейдерско-геодезическая
компания»,
г. Магнитогорск, Россия,
e-mail: mavrinyurii@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Litvinenko Nikolaj Valerievich:

Senior Lecturer,
Department of Geology, surveying and mineral processing,
Nosov Magnitogorsk State Technical University,
Magnitogorsk, Russia,
e-mail: n.litvinenko@magtu.ru,
ORCID ID 0000-0003-0819-4367

Romanko Helen Aleksandrovna:

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Department of Geology, surveying and mineral processing,
Nosov Magnitogorsk State Technical University,
Magnitogorsk, Russia,
e-mail: romanko_h@mail.ru,
ORCID ID 0000-0001-6030-1954

Gavrishev Sergei Evgenievich:

Doctor of Technical Sciences,
Professor,
Head of Department of Mineral Deposit Development,
Nosov Magnitogorsk State Technical University,
Magnitogorsk, Russia,
e-mail: ormpi-cg@mail.ru,
ORCID ID 0000-0001-8594-8463

Mavrin Yuriy Dmitrievich:

leading specialist,
surveyor-geodesic service,
LLC «Magnitogorsk surveyor-geodesic company»,
Magnitogorsk, Russia,
e-mail: mavrinyurii@mail.ru

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДАМИ ВЫСОКОТОЧНОЙ ГЕОДЕЗИИ И РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ ЗАПОЛЯРНОГО НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

О. В. Волков, Ю. В. Васильев, Д. П. Иноземцев, А. В. Филатов, В. И. Козырев,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука» Сибирского отделения Российской академии наук, Западно-Сибирский филиал, г. Тюмень, Россия

Аннотация: Для получения информации о наличии и величине деформационных процессов в ходе разработки Заполярного нефтегазоконденсатного месторождения применена интегрированная методика маркшейдерско-геодезических работ, включающих:

- ✦ высокоточные геодезические спутниковые наблюдения на всех пунктах наблюдательной сети месторождения для определения глобальных сдвижений горных пород, выраженных изменениями координат пунктов геодинамического полигона;
- ✦ высокоточное нивелирование локального участка геодинамического полигона для определения вертикальных сдвижений горных пород в районе геодинамически активной зоны;
- ✦ применение метода радарной интерферометрии устойчивых отражателей на регион нефтегазодобычи с большим числом техногенных объектов.

В настоящей работе выполнен сопоставительный анализ техногенного влияния разработки месторождения (по накопленным картам отбора и падения пластовых давлений) на современные деформации земной поверхности (по результатам спутниковых наблюдений и радарной интерферометрии).

Ключевые слова: современные деформационные процессы, геодинамический мониторинг, высокоточные геодезические измерения, муть оседания земной поверхности, спутниковая радарная интерферометрия, сдвиги пунктов, промышленная безопасность.

Для цитирования: Результаты мониторинга деформационных процессов методами высокоточной геодезии и радарной интерферометрии на геодинамическом полигоне Заполярного нефтегазоконденсатного месторождения / О. В. Волков, Ю. В. Васильев, Д. П. Иноземцев [и др.] // Маркшейдерия и недропользование. 2024. №3. С. 97-103. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_97_103.

THE RESULTS OF MONITORING DEFORMATION PROCESSES USING HIGH-PRECISION GEODESY AND RADAR INTERFEROMETRY AT THE GEODYNAMIC POLYGON OF THE POLAR OIL AND GAS CONDENSATE FIELD

O. V. Volkov, Yu. V. Vasiliev, D. P. Inozemtsev, A. V. Filatov, V. I. Kozirev,

Federal State Budgetary Institution of Science Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences West Siberian Branch, Tyumen, Russia

Abstract: To obtain information on the presence and magnitude of deformation processes during the development of the Polar oil and gas condensate field, an integrated method of surveying and geodetic works was applied, including:

- ✦ high-precision geodetic satellite observations at all points of the field's observation network to determine global rock movements expressed by changes in the coordinates of points of the geodynamic polygon;
- ✦ high-precision leveling of a local section of a geodynamic polygon to determine vertical movements of rocks in the area of a geodynamically active zone;
- ✦ application of the radar interferometry method of stable reflectors to the oil and gas production region with a large number of man-made objects.

In this paper, a comparative analysis of the anthropogenic impact of field development (based on accumulated maps of reservoir pressure selection and drop) on modern deformations of the Earth's surface (based on the results of satellite observations and radar interferometry) is performed.

Keywords: modern deformation processes, geodynamic monitoring, high-precision geodetic measurements, subsidence of the Earth's surface, satellite radar interferometry, point movements, industrial safety.

For citation: Volkov O. V., Vasiliev Yu. V., Inozemtsev D. P., et al. The results of monitoring deformation processes using high-precision geodesy and radar interferometry at the geodynamic polygon of the Polar oil and gas condensate field. Surveying and subsoil use. 2024;(3):97-103. (In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_3_97_103.

Заполярное нефтегазоконденсатное месторождение (ЗНГКМ) находится в Южной части Тазовского района Ямало-Ненецкого автономного округа Тюменской области, районный центр пос. Тазовский – в 85 км северо-западнее. По величине геологических запасов углеводородов (УВ) является уникальным, по геологическому строению – сложным. Месторождение открыто в 1965 году и входит в Западно-Сибирскую нефтегазоносную провинцию. Территория района находится в северной геокриологической зоне со сплошным распространением вечной мерзлоты.

По состоянию на 1 января 2024 года из недр месторождения по сеноманской залежи в целом накопленная добыча газа с начала разработки составила 1 791,35 млрд м³, обводнение залежи составило 19,7 %, средневзвешенное давление по эксплуатационной зоне 40,96 бар. Общий фонд скважин по сеноманской залежи составляет 533, в том числе 488 добывающих и 37 наблюдательных единиц.

По состоянию на 1 января 2024 года из недр месторождения по неокомской залежи по Объекту I накопленная добыча газа с начала разработки составила 98,2 млрд м³ при пластовом давлении по эксплуатационной зоне – 151,4 бар. По Объекту II накопленная добыча газа с начала разработки составила 73,5 млрд м³, при пластовом давлении по эксплуатационной зоне – 161,7 бар. Общий фонд скважин по неокомской залежи составляет 144, в том числе 140 добывающих единиц.

Такая гигантская техногенная нагрузка (две скважины на 1 км² площади) инициирует проявление геодинамических процессов природно-техногенного генезиса, которые формируют деформационные и флюидодинамические изменения в недрах [1-3].

Анализ результатов маркшейдерско-геодезических работ

Для обеспечения промышленной безопасности и охраны недр от техногенного влияния разработки Заполярного месторождения был разработан технический проект полигона [4]. В 2021 году выполнена закладка наблюдательной сети, а в 2022 и 2023 годах выполнены нулевой и первый цикл мониторинга с целью осуществления долговременной системы наблюдений за современными деформационными процессами [5].

Ход высокоточного нивелирования II класса (РФ108-РФ18) был проложен для изучения деформаций в районе расположения максимального количества зданий и сооружений непосредственно рядом с геодинамически активной зоной. Длина хода составила 10,7 км. Полученная ошибка на км хода составила 0,39 мм.

Для организации измерений с использованием метода ГНСС-наблюдений с точностью, необходимой для фиксации геодинамических процессов, создана сеть спутниковой триангуляции из постоянно действующих базовых станций (3 шт.) и реперов геодинамического полигона (26 шт.).

Контроль стабильности положения базовых станций обеспечивался привязкой последних к пунктам фундамен-

тальной астрономо-геодезической сети РФ: DKSН (г. Диксон), SLH1 (г. Салехард), NOYA (г. Ноябрьск), UNGN (пос. Уньюган).

Привязка базовых станций к геоцентрической системе координат на эпоху 2011.01.01 осуществлялась посредством организации длительных (не менее пяти независимых сеансов измерений продолжительностью не менее 24 часов каждый) спутниковых наблюдений.

Материалы спутниковых геодезических наблюдений представили собой массив данных в системе геоцентрических координат ГСК2011.

Для выделения горизонтальных и вертикальных составляющих сдвижений геодезические пространственные координаты (X, Y, Z) были преобразованы в референсные плоские прямоугольные координаты (X, Y, H) в соответствии с методиками ГОСТ Р 51794-2008 [6], а также ГКИНП 06-278-04 [7].

После исключения из результатов уравнивания систематической величины – общего сдвига плиты – выполнена оценка стабильности положения пунктов относительно пункта ZAP-2B. Оценка стабильности положения базовых станций приведена в *таблице 1*.

Таблица 1 / Table 1

Оценка стабильности базовых станций Assessment of the stability of base stations

Название пункта / Item name	Смещение по X, м / Offset by X, m	Смещение по Y, м / Offset by Y, m	Смещение по H, м / Offset by H, m
2023-2022 годы			
ZP-2B	0.000	0.000	0.000
ZAP	-0.007	-0.005	-0.008
ZP-3C	0.002	0.006	-0.005

Наблюдения на пунктах геодинамического полигона осуществлялись в соответствии с программой наблюдений пунктов СГС-1 [8].

При уравнивании данных геодезических спутниковых наблюдений за опорные приняты постоянно действующие базовые станции ZAP, ZP-2B, ZP-3C.

Схема спутниковых наблюдений на пунктах маркшейдерско-геодезической сети Заполярного геодинамического полигона представлена на рисунке 1.

Полученные средние квадратические ошибки и эллипсы ошибок на точках геодинамического полигона сведены в *таблицу 2*.

Точность полученных плановых координат не хуже 2 мм, по высоте максимальная погрешность составила 4 мм.

Максимальная величина изменения координат (28 мм) зафиксирована на опорном репере РО 112. Средняя величина горизонтальных сдвижений по площади месторождения составила ±10 мм и не превысила априорной точности спут-

никовых геодезических наблюдений. Характер разнонаправленности векторов свидетельствует об отсутствии систематического источника деформации горных пород в горизонтальной плоскости.

По результатам сравнения высот построена карта распределения вертикальных сдвижений по территории, с максимальным значением оседания -35 мм (рис. 2, см. цветную вклейку на стр. 45).

Таблица 2 / Table 2

**Оценка точности определения координат и высот пунктов
геодинамического полигона**

**Assessment of the accuracy of determining the coordinates and
heights of points of a geodynamic polygon**

Наименование пункта / item name	СКО в плане (м) / COE in terms of (m)	СКО по высоте (м) / Height ratio (m)	Азимут эллипса ошибок / Azimuth of the error ellipse	Большая полуось эллипса ошибок (м) / The semi- major axis of the error ellipse (m)	Малая полуось эллипса ошибок (м) / The small semi-axis of the error ellipse (m)
PO-8 вр рп	0.001	0.002	9°34'41"	0.001	0.001
PO-18 вр рп	0.001	0.002	6°03'42"	0.001	0.001
PO-42 вр рп	0.001	0.002	9°43'03"	0.001	0.001
PO-47 вр рп	0.002	0.003	177°19'46"	0.001	0.001
PO-48 вр рп	0.001	0.002	7°24'10"	0.001	0.001
PO-106	0.001	0.002	7°45'39"	0.001	0.001
PO-109	0.002	0.003	2°23'28"	0.001	0.001
PO-108	0.001	0.002	5°30'11.3415"	0.001	0.001
PO-110	0.002	0.003	176°20'57"	0.002	0.001
PO-112	0.002	0.003	14°47'40"	0.001	0.001
PO-114	0.002	0.004	15°17'18"	0.002	0.002
PO-226	0.002	0.003	177°52'15"	0.001	0.001
PO-229	0.002	0.003	176°58'55"	0.001	0.001
РФ-8	0.001	0.002	6°13'08"	0.001	0.001
РФ-18	0.002	0.002	5°07'05"	0.001	0.001
РФ-42	0.001	0.002	5°25'49"	0.001	0.001
РФ-47	0.001	0.003	179°43'02"	0.001	0.001
РФ-48	0.001	0.002	7°46'56"	0.001	0.001
РФ-106	0.001	0.002	6°56'32"	0.001	0.001
РФ-108	0.001	0.002	5°44'09"	0.001	0.001
РФ-109	0.002	0.003	1°39'26"	0.001	0.001
РФ-110	0.002	0.003	176°07'31"	0.002	0.001
РФ-112	0.002	0.003	16°03'46"	0.001	0.001
РФ-114	0.002	0.004	12°10'04"	0.002	0.001
РФ-226	0.002	0.003	178°08'45"	0.001	0.001
РФ-229	0.001	0.002	179°56'04"	0.001	0.001

Радарная интерферометрия выполнялась с целью получения дополнительной информации к инструментальным геодезическим измерениям о смещениях деформаций земной поверхности Заполярного НГКМ по требованиям СТО Газпром 2-3.1-439-2010 [9].

Интерферометрическая обработка радиолокационных космоснимков является дополнительным методом в системе геодинамического мониторинга, позволяющим получать площадные оценки вертикальных и плановых смещений земной поверхности.

Метод спутниковой радиолокационной интерферометрии использует эффект интерференции электромагнитных волн и основан на математической обработке нескольких когерентных амплитудно-фазовых измерений одного и того же участка земной поверхности со сдвигом в пространстве радиолокатора с синтезированной апертурой антенны (РСА). Преимуществом РСА перед оптическими сенсорами является способность получать изображение земной поверхности независимо от условий освещенности и облачности, что особенно актуально для северных широт. Метод площадной дифференциальной интерферометрии подробно описан в работах [10-12].

Подбор и интерферометрическая обработка радиолокационных космических снимков проводились для выявления вертикальных смещений земной поверхности на территорию Заполярного НГКМ с 2017 по 2023 год с использованием спутника Sentinel-1A/B [13].

Исходя из многолетнего опыта обработки спутниковых радиолокационных данных на территорию Западной Сибири, выбор исходных сцен для обработки основывается на следующих моментах:

- ✦ съемки должны быть равномерно распределены в течение интервала наблюдений, так как большие промежутки увеличивают погрешность в расчете смещений;
- ✦ снежный покров оказывает маскирующее влияние и снижает когерентность разновременных радиолокационных сигналов, отраженных от земной поверхности;
- ✦ низкая когерентность отдельных интерферограмм приводит к уменьшению количества стабильных интерферометрических отражателей и, как следствие, точечек измерения смещений.

Таким образом, основной принцип – это выбрать середину между равномерным покрытием во времени и исключением снежных периодов, которые для территории севера Сибири составляют девять месяцев: с середины сентября по середину мая.

Однако опыт обработки радарных данных на месторождениях с похожим географическим положением показал, что основную информацию о деформациях земной поверхности дают постоянные отражатели (здания, сооружения и другие объекты инфраструктуры нефтедобычи). Природные объекты, отражающие радиолокационный сигнал, были исключены из рассмотрения вследствие низкой точности. Учитывая данные факторы, принято решение использовать 156 кадров, снятых в период с 8 апреля 2016 года по 4 августа 2023 года, которые включают восемь бесснежных сезонов и семь снежных.

Доступные съемки приведены на временной шкале (рис. 3).

Результаты интерферометрической обработки радиолокационных данных 156-го радиолокационного кадра Sentinel-1A/B получены по методу интерферометрии постоянных отражателей StaMPS/MPI для 17 689 точек. Техногенные объекты в этом случае выступали в роли реперных точек,

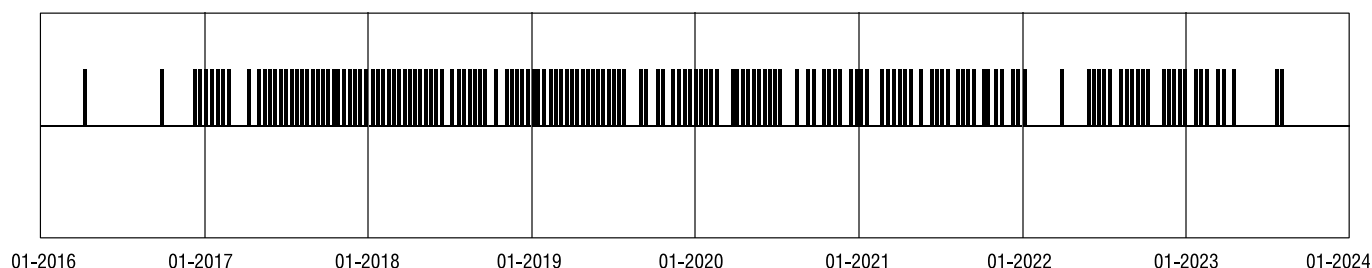


Рис. 3. Распределение съемок Sentinel-1A/B по времени

Fig. 3. Time distribution of Sentinel-1A/B surveys

связанных с грунтом [14]. Расположение точек измерений и среднегодовые скорости смещений приведены на *рисунке 4* (см. цветную вклейку на стр. 46).

Используя интерполяцию по методу обратных взвешенных расстояний (IDW) [15], значения скоростей смещений в точках измерения конвертированы в однородную сетку, на основе которой построены изолинии схемы оседания земной поверхности за период 2017–2023 годов (рис. 5, см. цветную вклейку на стр. 46).

Как и для геодезических измерений, деформации, выявленные по результатам интерферометрической обработки, являются относительными. За нулевую точку принят объект, который расположен на территории НПС-2 и отмечен звездой на *рисунке 4*. Точки измерений раскрашены по значению среднегодовой скорости в мм/год. Наибольшая просадка отмечена в центральной части месторождения. Распределение отрицательных скоростей смещений техногенных объектов показывает, что на исследуемой территории сохраняется муфта оседания.

Анализ скорости смещений техногенных объектов за 2022–2023 годы (рис. 6) представлен в сравнении с этим же периодом по ГНСС-наблюдениям, свидетельствует о выявленной тенденции оседания земной поверхности над подрабатываемой территорией месторождения.

Анализ истории разработки и эксплуатации Заполярного НГКМ месторождения свидетельствует о том, что происходит повсеместное снижение первоначально высоких пластовых давлений, изменяется состав пластового флюида, плотность и прочностные свойства горных пород, что в итоге приводит к потере механической устойчивости дискретной динамически активной геологической среды.

Именно деформирование порового пространства и минерального скелета коллекторов вследствие падения пластовых давлений является основной причиной самого уплотнения и деформаций вышележащих пород [16].

Рассчитанные карты текущих сдвижений земной поверхности были сопоставлены с промыслово-геологической информацией по сеноманским и неокомским залежам Заполярного месторождения (с картами накопленных отборов газа, изобар) для анализа взаимосвязи деформационных процессов земной поверхности с отборами газа и конденсата.

В целом же муфта оседаний земной поверхности концентрически развивается от контура сеноманской залежи к ее центру, значения смещений при этом возрастают от 0 (на контуре) до максимума 7 см (в центре залежи) за период с 2017 по 2023 год.

Наличие зоны оседания в купольной части месторождения подтверждается не только схемой вертикальных сдвижений земной поверхности по результатам спутниковых геодезических наблюдений за период 2022–2023 годов с результатами интерферометрии за этот же период (рис. 6, см. цветную вклейку на стр. 47), но и наличием зоны депрессии, представленной на схематической карте пластовых давлений (рис. 7, см. цветную вклейку на стр. 47).

Сопоставление карты падения пластовых давлений сеноманской залежи Заполярного месторождения с картой сдвижений земной поверхности показало хорошую сходимость (рис. 7). Так, зона максимальных накопленных отборов (зона дренирования УКПГ-2С) совпадает с зоной максимальных оседаний земной поверхности. В зоне дренирования УКПГ-3С отбор газа пока не вызвал значимых оседаний земной поверхности, что может быть объяснено тем, что накопленный отбор газа в этой зоне меньше, чем в зонах УКПГ-1С и 2С.

Корреляционная связь геолого-промысловых показателей по сеноманскому газу и неокомской залежи (по картам отбора и картам изобар) со сдвигами земной поверхности на Заполярном месторождении просматривается на *рисунках 8 и 9*, (см. цветную вклейку на стр. 48). Однако необходим набор статистики по результатам нивелирования, ГНСС-наблюдениям, радиолокационным космоснимкам, так и промыслово-геологическим материалам для более уверенных выводов по сопоставительному анализу.

Выводы

1. По результатам высокоточных спутниковых наблюдений определены вертикальные сдвижения, построена схематическая карта оседания земной поверхности за период 2022–2023 годов, с максимальным значением -35 мм.

2. Выполнена интерферометрическая обработка 156 радиолокационных сцен Sentinel-1A/B, полученных в течение 78 месяцев с апреля 2017-го по сентябрь 2023 года, в том числе 15 сцен, полученных в период с 14 сентября 2022 года по 4 августа 2023 года.

4. Выполнено сравнение результатов интерферометрической обработки с данными высокоточных спутниковых наблюдений на геодинамическом полигоне за 2022–2023 года. Среднеквадратическое отклонение смещений по интерферометрии от наземных измерений составило 20 мм. Зона максимального оседания расположена в центральной части месторождения на территории УКПГ-2С, накопленные отрицательные сдвиги с сентября 2017 года по сентябрь 2023 года по абсолютному значению достигают -70 мм.

5. Сопоставительный анализ результатов выполненных работ позволяет сделать вывод о том, что прослеживается взаимосвязь по выявленной зоне оседания в центральной части месторождения по (спутниковым наблюдениям, радарной интерферометрии) с динамикой падения пластовых давлений (по картам изобар), величиной отбора кон-

денсата (газа) по геолого-промысловым показателям разработки.

6. Выявлено, что основными условиями формирования мульды оседания земной поверхности является техногенный фактор, связанный с долговременной разработкой добычи углеводородного сырья. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Закон РФ «О недрах» ст. 24 от 221.02.1992 № 2395-1 [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/9003403> (дата обращения: 14.09.2023).
2. Система обеспечения геодинамической и экологической безопасности при проектировании и эксплуатации объектов ТЭК: методические рекомендации. - СПб.: ВНИМИ, 2001. - 86 с.
3. Об утверждении Правил осуществления маркшейдерской деятельности: Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 19.05.2023 № 186 [Электронный ресурс]. - URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202306010002> (дата обращения: 03.08.2023).
4. Горно-геологическое обоснование и технический проект геодинамического полигона на Заполярном НГКМ / ООО «ТРГЦ». - Тюмень, 2019 г.
5. Анализ и интерпретация данных радарной интерферометрии (2009-2022 гг.) на территории Заполярного НГКМ: Технический отчет / ООО НПФ «Сибгеокарта».
6. ГОСТ Р 51794-2008 «Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразования координат определяемых точек» [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200073046> (дата обращения: 03.08.2023).
7. ГКИНП 06-278-04, «Руководство по выполнению работ в системе координат 1995 года» «СК-95». [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200054080> (дата обращения: 01.12.2022).
8. ГОСТ Р 573732-2016 «Глобальные навигационные спутниковые системы. Методы и технологии геодезических работ. Пункты спутниковой геодезической сети 1 класса (СГС-1). Технические условия». [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200143239> (дата обращения: 01.12.2022).
9. СТО Газпром 2-3.1-439-2010 «Методика проведения космического мониторинга состояния территорий горных отводов, для обеспечения промышленной безопасности при добыче и хранении нефти и газа» [Электронный ресурс]. - URL: http://gasoproekt.ru/sto_gazprom (дата обращения: 01.06.2024).
10. Zebker, H. A. Topographic Mapping Derived from Synthetic Aperture Radar Measurements / H. A. Zebker, R. M. Goldstein // Journal of Geophysical Research. - 1986. - Vol. 91. - P. 4993-5002.
11. Ferretti, A. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation / A. Ferretti, A. Monti-Guarneri, C. Prati. - Noordwijk: ESA Publications, 2007. - 234 p.
12. Hanssen, R. F. Radar Interferometry - Data Interpretation and Error Analysis / R. F. Hanssen. - Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. - 308 p.
13. Официальный сайт европейского аэрокосмического агентства. [Электронный ресурс]. - URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/observation-scenario/acquisition-segments/archive> (дата обращения: 01.06.2024).
14. Филатов, А. В. Использование метода интерферометрии устойчивых отражателей при геодинамическом мониторинге Самотлорского месторождения / А. В. Филатов, Ю. В. Васильев // Маркшейдерский вестник. - 2012. - № 4. - С. 57-62.
15. Демьянов, В. В. Геостатистика: Теория и практика / В. В. Демьянов, Е. А. Савельева. - М.: Наука, 2010. - 327 с.
16. Кашников, Ю. Г. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья / Ю. А. Кашников, С. Г. Ашихмин. - М.: Горная книга, 2019. - 467 с.

REFERENCES

1. The Law of the Russian Federation «On Subsoil», Article 24 of 221.02.1992 No.2395-1. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/9003403> (In Russ.).
2. The system for ensuring geodynamic and environmental safety in the design and operation of fuel and energy complex facilities. Methodological recommendations. St. Petersburg:VNIMI, 2001 (In Russ.).
3. Rules for the implementation of surveying activities. Approved by Order of Rostechnadzor No. 186 dated 05/19/2023. Available from: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202306010002> (In Russ.).
4. Mining and geological justification and technical design of the geodynamic polygon at the Polar NGKM. LLC «TRGTS». Tyumen, 2019 (In Russ.).
5. Technical report: «Analysis and interpretation of radar interferometry data (2009-2022) on the territory of the Polar NGCM». NPF Sibgeokarta LLC (In Russ.).
6. GOST R 51794-2008 «Global navigation satellite systems. Coordinate systems. Methods for converting coordinates of defined points» Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200073046> (In Russ.).
7. GKI NP 06-278-04, «Guidelines for work in the coordinate system of 1995» «SK-95». Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200054080> (In Russ.).
8. GOST R 573732-2016 «Global navigation satellite systems. Methods and technologies of geodetic works. Points of the satellite geodetic network of the 1st class (CGS-1). Technical conditions». Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200143239> (In Russ.).

9. STO Gazprom 2-3.1-439-2010 «Methodology for conducting space monitoring of the condition of mining areas to ensure industrial safety during oil and gas production and storage». Available from: http://gasoproekt.ru/sto_gazprom (In Russ.).
10. Zebker HA, Goldstein R M. Topographic Mapping Derived from Synthetic Aperture Radar Measurements. *Journal of Geophysical Research*. 1986;91:4993-5002.
11. Ferretti A, Monti-Guarnieri A, Prati C. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. Noordwijk: ESA Publications, 2007.
12. Hanssen RF. Radar Interferometry - Data Interpretation and Error Analysis. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.
13. The official website of the European Aerospace Agency. Available from: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/observation-scenario/acquisition-segments/archive> (In Russ.).
14. Filatov AV, Vasiliev YuV. Using the method of interferometry of stable reflectors in geodynamic monitoring of the Samotlor deposit. *Surveying bulletin*. 2012;4:57-62 (In Russ.).
15. Demyanov VV, Savelyeva EA. Geostatistics: Theory and practice. Moscow: Nauka, 2010 (In Russ.).
16. Kashnikov YuA, Ashikhmin SG. Mechanics of rocks in the development of hydrocarbon deposits. Moscow, 2019 (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ



Волков Олег Викторович:
заместитель начальника службы главного
маркшейдера,
ООО «Газпром добыча Ямбург»,
г. Новый Уренгой, Россия,
e-mail: o.volkov@yamburg.gazprom.ru



Васильев Юрий Владимирович:
старший научный сотрудник,
кандидат геолого-минералогических наук.
Западно-Сибирский филиал
Институт нефтегазовой геологии и геофизики
(ЗСФ ИИГГ СО РАН),
г. Тюмень, Россия,
e-mail: 968355@mail.ru



Иноземцев Дмитрий Павлович:
главный геодезист.
кандидат геолого-минералогических наук.
Западно-Сибирский филиал
Институт нефтегазовой геологии и геофизики
(ЗСФ ИИГГ СО РАН),
г. Тюмень, Россия,
e-mail: radan92@list.ru



Филатов Антон Валентинович:
кандидат физико-математических наук,
Западно-Сибирский филиал
Институт нефтегазовой геологии и геофизики
(ЗСФ ИИГГ СО РАН),
г. Тюмень, Россия,
e-mail: aaddmail9@gmail.com



Козырев Владимир Иванович:
научный сотрудник,
кандидат геолого-минералогических наук.
Западно-Сибирский филиал
Институт нефтегазовой геологии и геофизики
(ЗСФ ИИГГ СО РАН),
г. Тюмень, Россия,
e-mail: radan92@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Volkov Oleg Viktorovich:
deputy Head of the Chief Surveyor's Service,
«Gazprom Dobycha Yamburg»,
Novy Urengoy, Russia,
e-mail: o.volkov@yamburg.gazprom.ru

Vasiliev Yuri Vladimirovich:
senior researcher,
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
West Siberian branch of the Institute of Petroleum
Geology and Geophysics (ZSF INGG SB RAS),
Tyumen, Russia,
e-mail: 968355@mail.ru

Inozemtsev Dmitry Pavlovich:
chief surveyor,
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
West Siberian branch of the Institute of Petroleum
Geology and Geophysics (ZSF INGG SB RAS),
Tyumen, Russia,
e-mail: radan92@list.ru

Filatov Anton Valentinovich:
candidate of physical and mathematical sciences,
West Siberian branch of the Institute of Petroleum
Geology and Geophysics (ZSF INGG SB RAS),
Tyumen, Russia,
e-mail: aaddmail9@gmail.com

Kozyrev Vladimir Ivanovich:
researcher,
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
West Siberian Branch of the Institute of Petroleum
Geology and Geophysics (ZSF INGG SB RAS).
Tyumen, Russia,
e-mail: radan92@list.ru

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.



РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ (МГРИ)

Информируем Вас

Университет берет свое начало с геологоразведочного факультета Московской горной академии, созданной в сентябре 1918 г.

Факультеты:

- ◆ Геологоразведочный факультет,
- ◆ Факультет технологии разведки и разработки,
- ◆ Факультет геологии и геофизики нефти и газа,
- ◆ Гидрогеологический факультет,
- ◆ Факультет экономики и управления,
- ◆ Экологический факультет



Контакты : 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; +7(495)255-40-20 10:00-18:00 e-mail: priem@mgri.ru,
<https://www.mgri.ru/commission/poryadok-postupleniya/>

WWW.N-GN.RU



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ МУЗЕЙ ИМ. В.И.ВЕРНАДСКОГО

Первая партия минералов поступила в коллекцию музея в 1755 году от горнопромышленников Демидовых.

Коллекции музея служили учебным пособием для студентов Московского университета (1759—1930) и Московского геологоразведочного института (1930—1988).

В 1988 году музей был создан в результате объединения учебных музеев МГРИ.

Музей проводит тематические выставки и экскурсии, циклы лекций, викторины, научные конференции и другие мероприятия для посетителей.

Адрес: г. Москва, Моховая ул., д. 11, стр. 11
ст. м. «Охотный ряд»

+7 (495) 692-09-43

E-mail: info@sgm.ru

<https://sgm.ru>



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ
МУЗЕЙ
ИМ. В.И. ВЕРНАДСКОГО



WWW.N-GN.RU

ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛЬНОГО НАЛОЖЕНИЯ ГИДРАВЛИКИ В МОДЕЛЯХ ПУСТОТ КАК ОБОСНОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ КАРТИРОВАНИЯ КАРСТОПРОЯВЛЕНИЙ

*А. В. Тимохин, В. Д. Кантемиров, Р. С. Титов,
Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

Аннотация: Изучение закарстованных территорий на предмет их использования для оптимального размещения объектов недропользования, а также возведения на них инженерных сооружений является важной геотехнологической и эксплуатационной задачей. На основе расчета гидравлических параметров геологической среды показано, что карстовые объекты являются причиной формирования дренажного режима и водопонижения вплоть до осушения этой среды. Установлено, что даже малые размеры карстовых пустот приводят к колебаниям уровня глубинных вод и формированию слоев аэрации. Определено, что в обводненных глубинных толщах разведку и мониторинг карстовых объектов достаточно надежно в сочетании с анализом измеренных скоростей фильтрации по модели гидравлики обеспечивают методы резистивиметрии и термометрии скважин. Тогда как при картировании карстов выше уровня глубинных вод и в покрывающих толщах целесообразно опираться на идентификацию сигнальной аэрации и осушения среды с применением электрометрического метода на основе связи моделей гидравлики и полей электропроводности. Рассмотрены принципиальные возможности геофизических методов картирования карстов. Установлено, что глубина и охват разведки должны превышать размеры очага фильтрационных возмущений в исследуемых массивах. Показано, что регистрация высокочастотных сигналов не позволяет обеспечить достоверность оценки карстологической безопасности.

Ключевые слова: карст, планирование мероприятий безопасности, сигналы фильтрации, электрометрия, обоснование информационных решений, картирование, геотехнология.

Благодарности, финансирование: Авторы выражают особую признательность и большую благодарность коллегам из лаборатории управления качеством минерального сырья ИГД УрО РАН, а также коллективу редакции «Маркшейдерия и недропользование» за поддержку и помощь в написании и оформлении статьи. Работа выполнена в рамках НИР, темы 1 «Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем» (FUWE-2022-0005), рег. № 1021062010531-8-1.5.1.

Для цитирования: Тимохин А. В., Кантемиров В. Д., Титов Р. С. Исследование сигнального наложения гидравлики в моделях пустот как обоснование электрометрии для картирования карстопроявлений // Маркшейдерия и недропользование. 2024. №3. С. 104–111. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_104_111.

INVESTIGATION OF THE SIGNAL OVERLAP OF HYDRAULICS IN VOID MODELS AS A JUSTIFICATION FOR ELECTROMETRY FOR MAPPING KARST PHENOMENA

*A. V. Timokhin, V. D. Kantemirov, R. S. Titov,
Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia*

Abstract: The study of the karst territories for their use for optimal placement of subsurface use facilities, as well as the construction of engineering structures on them, is an important geotechnological and operational task. Based on the calculation of the hydraulic parameters of the geological environment, the article shows that karst objects are the cause of the formation of drainage regime and water loss, up to the drainage of this environment. It has been established that even small sizes of karst voids lead to fluctuations in the level of deep waters (UGW) and the formation of aeration layers. It is determined that in watered, deep strata, exploration and monitoring of karst objects is sufficiently reliable, in combination with the analysis of measured filtration rates according to the hydraulic model, methods of resistivity and thermometry of wells provide. Whereas, when mapping karsts above the UGV and in the covering strata, it is advisable to rely on the identification of signal aeration and dehumidification of the medium using the electrometric method, based on the connection of models of hydraulics and fields of electrical conductivity. The principal possibilities of geophysical methods of karst mapping are considered. It is established that the depth and coverage of exploration should exceed the size of the focus of filtration disturbances in the studied arrays. It is shown that the registration of high-frequency signals does not allow to ensure the reliability of the assessment of karstological safety.

Keywords: karst, planning of safety measures, filtration signals, electrometry, justification of information solutions, mapping, geo-technology.

Acknowledgments, Funding: The authors express special gratitude and great gratitude to their colleagues from the Laboratory of Mineral Raw Materials Quality Management of the IGD Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, as well as to the editorial staff of «Surveying and Subsoil Use», for their support and assistance in writing and formatting the article. Methodological foundations of the strategy of integrated development of reserves of solid mineral deposits in the dynamics of development of mining systems (FUWE-2022-0005), reg. №. 1021062010531-8-1.5.1.

For citation: Timokhin A. V., Kantemirov V. D., Titov R. S. Investigation of the signal overlap of hydraulics in void models as a justification for electrometry for mapping karst phenomena. Surveying and subsoil use. 2024;(3):104-111. (In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_3_104_111.

Исследование в области снижения риска техногенных катастроф при недропользовании является актуальным практическим направлением изучения опасных явлений как для отдельных горных предприятий, так и для оценки риска реализации инфраструктурных проектов освоения территорий со сложными инженерно-геологическими условиями.

Потенциально опасные по угрозе карстопроявлений территории на осваиваемых землях соответствующего назначения в промышленных регионах РФ сравнительно обширны. Локализация карстов на этих территориях обусловлена двумя типами природы образования: геологической (естественной) и техногенной. Карстоопасное строение территории определяется наличием как отдельных типов этих карстов, так и их сочетаниями.

В строительных нормах и правилах территории развития карстов различают подработанные (техногенный карст) и сложенные карстующимися породами, образованными в процессе суффозии, растворения гипсо-известковистых минералов агрессивными подземными водами (геологическая природа) [1]. Наиболее известны карстопроявления геологической природы как явления карбонатно-терригенных толщ и опасных объектов, образованных суффозией известняка. На месторождениях магнетитов и бокситов естественная природа карстов включает литологический подтип и связывается с уплотнением руд и пород [2, 3]. Помимо природных форм, отмечены еще более существенные по угрозе факторы техногенного карста, связанные с наличием подземных выработанных пространств на отводах действующих, законсервированных и ликвидированных горнодобывающих предприятий [4].

Известно, что обнаружение и идентификация карстов и сплошных (безопасных) массивов лежит в области изучения сигнальных параметров геофизического картирования, где системы измерений служат информационным инструментом поддержки мероприятий по обеспечению безопасности ведения горных работ и строительства.

В настоящее время в связи с возможностью оценки сигналов карстопроявлений, которые характеризуют изменения поля фильтрации (гидравлических параметров), в целях идентификации карстов обсуждаются возможности применения методов электрометрии.

Цель исследований. Разработка инструмента обнаружения, идентификации и картирования карстов как в сплошных, так и в деструктивных (нарушенных) средах на основе геофизических измерений электрометрическим методом.

Методы и материал исследований

Уравнения гидравлики одиночного пустотного объекта в окружении сплошного массива позволяют произвести расчеты сложного влияния естественных карстов и техногенных образований, что реализуется аппаратом теории поля.

Наиболее известным и признанным в практическом использовании к настоящему времени является вывод о влиянии вертикальной гидродинамически совершенной (не изолированной обсадными колоннами и сетчатыми фильтрами) скважины на поток фильтрации. Представления о режиме фильтрации в среде с одиночной скважиной рассмотрены в прикладных решениях теории поля С. А. Коля, Б. К. Матвеева и А. А. Огильви. Изложенный в работе [5] фундаментальный вывод об удвоении в скважине скорости внешнего потока используется в алгоритмах интерпретации откачек и индикаторных методов: резистивиметрии и термометрии.

Оцениваемый массив в модели фильтрации одиночной скважины (одиночного пустотного объекта, выработки) был представлен как однородная фильтрующая среда с вложенной в ламинарный поток системой из двух цилиндров большого и малого радиуса, имеющих общую ось. Цилиндр большого радиуса задается полым, цилиндр малого радиуса является внутренним и задается сплошным (рис. 1).

Однако в силу гидрологических особенностей, формируемых естественным карстом и процессами проходки и выемки горной породы (техногенный карст), применение известного вычислительного аппарата, разработанного Б. К. Матвеевым [5] для наблюдаемой в скважине скорости фильтрации в методах откачек, резистивиметрии и термометрии, в исходном виде не представляется возможным.

Так как для карстов:

1) во внешнем цилиндре модели одиночной скважины практически всегда имеется фильтрующий или изоляционный материал (внутренний малый цилиндр модели);

2) природа формирования естественного карста и способы шахтной проходки (техногенный карст) не дают основания для существования единственно вертикальной модели. Практически все наоборот: чтобы учесть все нюансы, необходима модель наклонных к горизонту объектов.

Сечение большинства горных выработок имеет прямоугольную форму. Геометрией модели допущена аппроксимация сечения окружностью и эллипсом. При этом искажаемая допуском пространственная область, как было показано ранее в работе [6], не велика и на целевое качество решений практически не влияет, но существенно уменьшается объем вычислений. Влияние скважины и модель вертикального по-

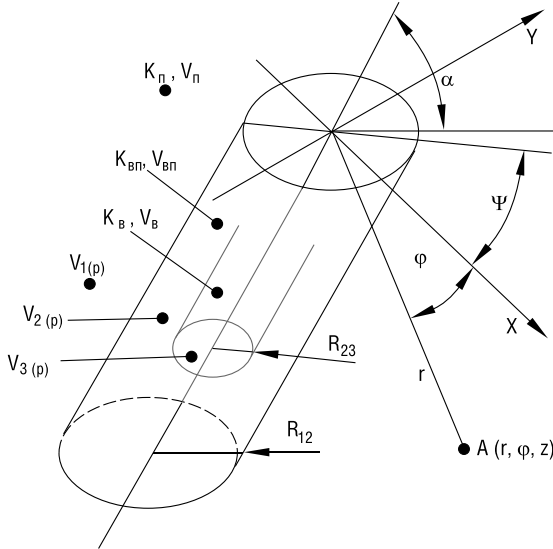


Рис. 1. Цилиндрическая модель фильтрации:

α – угол наклона единой оси цилиндров к горизонтальной плоскости; Ψ – угол между большой осью эллипсов (проекция системы на горизонтальную плоскость) и направлением фильтрации; R_{12} и R_{23} – радиусы соответственно большого и малого цилиндров; $K_{п}$, $K_{б}$ и $K_{вп}$ – коэффициенты фильтрации соответственно вмещающей среды (породы), среды, слагающей внутренний (малый) цилиндр, и полости между цилиндрами (абсолютно проницаемой $K_{вп} \rightarrow \infty$); $V_{п}$, $V_{б}$ и $V_{вп}$ – скорости фильтрации соответственно вмещающей среды, среды, слагающей внутренний цилиндр, и полости между цилиндрами

Fig. 1. Cylindrical filtration model:

α – the angle of inclination of the single axis of the cylinders to the horizontal plane; Ψ – the angle between the large axis of the ellipses (the projection of the system onto a horizontal plane) and the direction of filtration; R_{12} and R_{23} – the radii of the large and small cylinders, respectively; $K_{п}$, $K_{б}$ and $K_{вп}$ – filtration coefficients, respectively, of the host medium (rock), the medium composing the inner (small) cylinder and the cavity between the cylinders (absolutely permeable; $V_{п}$, $V_{б}$ and $V_{вп}$ – filtration rates, respectively, of the host medium, the medium composing the inner cylinder and the cavity between the cylinders

лого цилиндра, раскрываемые в работе Б. К. Матвеева [5], в частном случае оставлены.

По формуле скорости фильтрации жидкостей и газов в пористой среде от градиента напора (закон Дарси) имеем [5]

$$V = -K \frac{\partial H}{\partial X}, \quad (1)$$

где V – скорость фильтрации, м/сутки; K – коэффициент фильтрации, м/сутки; $\partial H / \partial X$ – гидравлический градиент потока (напора), отн. ед.

Стандартное преобразование теории поля дает выражение функции потенциала скорости [5]

$$u = KH. \quad (2)$$

При этом u непрерывна и потенциальна, а значит, удовлетворяет уравнению Лапласа в цилиндрических координатах [5]:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} = 0. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) устанавливает выражения для потенциалов скоростей, которые имеют следующий вид [5]:

✧ во вмещающей среде

$$u_{п} = V_{п} r \cos \varphi + \frac{B_1 \cos \varphi}{r}; \quad (4)$$

✧ в полости между цилиндрами

$$u_{вп} = A_2 r \cos \varphi + \frac{B_2 \cos \varphi}{r}; \quad (5)$$

✧ в малом цилиндре

$$u_{б} = V_{б} r \cos \varphi + \frac{A_3 \cos \varphi}{r}, \quad (6)$$

где B_1 , A_2 , B_2 , A_3 – постоянные коэффициенты в алгоритмах идентичных объектов (по наклону, размеру и строению); $V_{п}$ и $V_{б}$ – скорости фильтрации соответственно вмещающей среды и среды, слагающей внутренний цилиндр (см. рис. 1), м/сутки.

Модельные коэффициенты B_1 , A_2 , B_2 , A_3 вычисляются следующим образом.

На поверхностях цилиндров (эллипсах в проекции горизонта) имеют место равенства:

✧ для большого цилиндра

$$r = \frac{R_{12}}{\sqrt{\cos^2(\varphi - \Psi) \cos(90^\circ - \alpha) + \sin(\varphi + \Psi)}}; \quad (7)$$

✧ для малого цилиндра

$$r = \frac{R_{23}}{\sqrt{\cos^2(\varphi - \Psi) \cos(90^\circ - \alpha) + \sin(\varphi + \Psi)}}, \quad (8)$$

где R_{12} и R_{23} – радиусы соответственно большого и малого цилиндров (рис. 1), м.

Выражения (7, 8) удовлетворяют граничным условиям, равенству скоростей фильтрации и гидравлических напоров:

$$\frac{\partial u_{п}}{\partial r} = \frac{\partial u_{вп}}{\partial r}, \quad \frac{\partial u_{вп}}{\partial r} = \frac{\partial u_{б}}{\partial r}, \quad (9)$$

$$\frac{1}{K_{п}} u_{п} = \frac{1}{K_{вп}} u_{вп}, \quad \frac{1}{K_{вп}} u_{вп} = \frac{1}{K_{б}} u_{б}. \quad (10)$$

где $K_{п}$, $K_{вп}$ и $K_{б}$ – функциональные выражения коэффициентов фильтрации во взаимовлияющем поле, соответственно во вмещающей среде, в полости между цилиндрами и малом цилиндре.

Далее, решением уравнений (9, 10) для выражений (4–6) и граничных условий (7, 8) определяются постоянные коэффициенты B_1 , A_2 , B_2 , A_3 , подстановка которых в (4–6 при r , φ , $z = \text{const}$) дает выражения для вычисления потенциалов $u_{п(вп, б)}$, а с учетом (2) и (1) – скоростей фильтрации V_{1-3} .

Реальные объекты моделируются вариантами входных параметров:

I. $K_{б} \rightarrow \infty$, $R_{23} = 0$ – условия полого цилиндра;

II. $R_{23} / R_{12} = kR$ – условия проницаемого цилиндра;

III. $K_g = 0$, $R_{23} / R_{12} = kR$ – условия непроницаемого цилиндра.

Приведенные выше уравнения (1-6) даны в математических стандартах, заимствованных из прототипа [5]. Алгоритм вычисления коэффициентов B_1 , A_2 , B_2 , A_3 по уравнениям (7-10) является предметом новизны постановки решения задачи теории поля и ранее частично был представлен в работах [6, 8].

Расчет параметров объемного поля фильтрационных возмущений, вызываемых карстовыми структурами и подземными выработками, производится как сочетание полых разноориентированных объектов при выполнении вышеуказанных входных параметров (I, II и III).

Еще раз отметим, что полую область характеризует скорость фильтрации в два раза выше исходной скорости, имеющей место в потоке до модельного размещения полого цилиндра. Что ранее в целях вычисления поправок для скважинных гидрогеологических опытов для условия вертикальной выработки было изложено в работе Б. К. Матвеева [5].

Вмещающая породная среда принимается как сплошной однородный массив с известной проницаемостью (конечные значения фильтрации V_n). В каждой координируемой точке горизонтального слоя среды от одиночных разноориентированных объектов вычисляется векторная сумма возмущений (рис. 2).

При расчетах влияния естественных карстов важным является соблюдение направления оценки объектов возмущений, требующее учета литологического строения и расположения их контактов. В моделях влияния подземных выработок особое внимание уделяется геометрической интерпретации исследуемой территории. Для этого используются маркшейдерские данные, при их отсутствии анализируются сведения о ранних способах ведения подземных горных работ, применяемых в исторический период на изучаемых массивах [7-9].

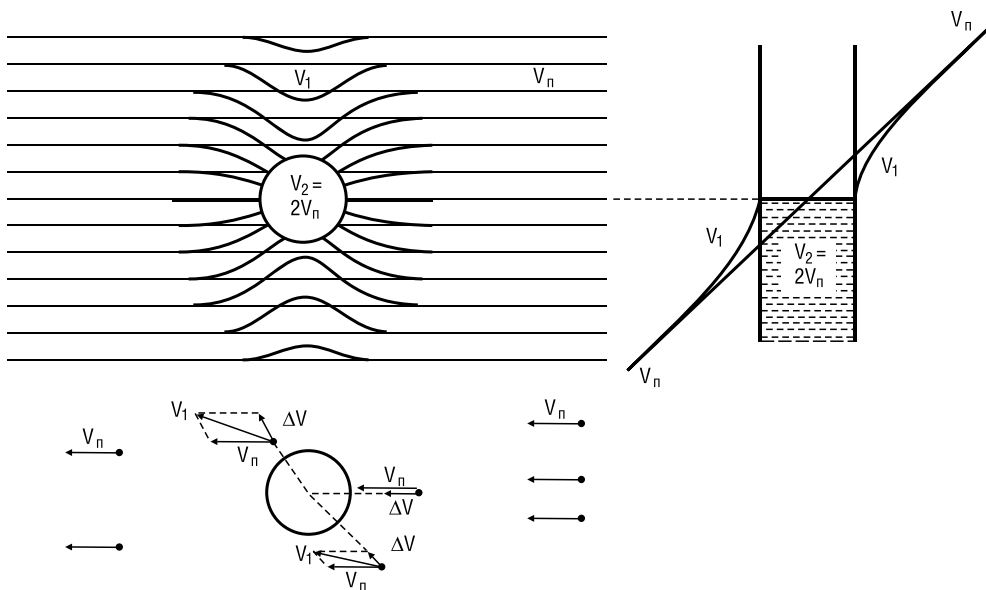


Рис. 2. Модель изменения исходного фильтрационного потока вертикальной выработкой: V_n – скорость потока в породной области (вмещающей среде) вне зоны влияния; V_1 , V_2 – скорости потока фильтрации в области влияния выработки, соответственно породная и полая

Fig. 2. A model for changing the initial filtration flow by vertical production: V_n – the flow rate in the rock region (host medium) outside the zone of influence; V_1 , V_2 – filtration flow rates in the area of production influence, respectively rock and hollow

Анализ фильтрационных возмущений показал, что максимум «вызванной» скорости фильтрации и скорости потока (рис. 2) наблюдается в горизонтальной выработке околоствольной одной трети общей протяженности шахтного поля, отдельного выработанного горного объема. Использование геометрических, входных параметров дало основание для обобщения технических моделей наиболее известных систем подземных горных работ.

Результаты исследований

Для формирования обширной базы иллюстрационных примеров сигнатур и сигналов карстопроявлений моделирование фильтрации позволило конкретизировать водный режим, получить представления о параметрах в послойной глубине проекции и предложить методы геофизических измерений для оценки безопасности – идентификации как сплошных сред, так и деструктивных зон. Расчеты гидравлических параметров геологической среды показали, что полые объекты выступают причиной формирования дренажа и режима водопонижения, вплоть до осушения массива. Первые стадии карстообразования и малые размеры пустот приводят к колебаниям уровня глубин подземных вод УГВ и формированию слоев аэрации [10].

Поскольку карсты представляют собой «очаги» фильтрационных возмущений, то их идентификация может быть реализована на основе геофизических измерений и оценки аномальных параметров. В глубинных обводненных толщах оцениваемого массива хорошие результаты разведки обеспечиваются каротажем скважин методами резистивиметрии и термометрии в сочетании с анализом скоростей фильтрации, измеренных и полученных по модели гидравлики [7]. Тогда как картирование карстов в покрывающих толщах (выше УГВ) целесообразно проводить с применением метода электрометрии с идентификацией сигнальной аэрации и осушения, на основе связи моделей гидравлики и полей электропроводности [8-9].

Развитие метода электрометрии дало возможность использования модели поля электропроводности в качестве инструмента обнаружения, идентификации и картирования карстов как в сплошных, так и в деструктивных (нарушенных) средах. Применение электрометрического метода в задачах поиска карстов позволяет производить их картирование в шахтном и карьерном пространстве.

Для реализации картирования карстов методом электрометрии решались две основные задачи:

1. Рассмотрение параметров гидравлики

и электропроводности как связанных геопотенциальных распределений и их интерпретация на базе математического аппарата теории поля.

2. Изучение и оценка карстогенного режима фильтрации (явлений аэрации, дренирования и осушения) с позиций формирования сигналов обнаружения в динамической постановке.

Принятый подход позволит от прогностических алгоритмов картирования карстов перейти к уровню верификаций геофизических измерителей.

Модель поля электропроводности

По модели объемного глубинного и периферийного поля электропроводности анализируется режим зон аэрации. Полыми объектами в среде сплошного массива обеспечивается снижение степени его влажности до 0,05-0,3 отн. ед., тогда как пустоты и каверны заполнены воздухом – электрическое сопротивление $\rho \rightarrow \infty$, ток не распространяется [10, 13]. Сплошной массив и грунты с естественной упаковкой влагу сохраняют – ток распространяется. Область влияния карста на фильтрационный поток представлена на рисунке 2.

Приближение горных работ обеспечивает попадание карстовых объектов в пространственную область более ярких сигналов обнаружения. Также условия появления ярких сигналов при рассеивании водной массы по очагам перетоков между полыми объектами и, напротив, в паводок, при наложении ламинарных слоев возникают в периоды дренирования и осушения. Пример поля двухточечных источников тока I+ и I- в сплошном и подработанном массивах и изменения электрического поля с охватом сигнального карстового объекта представлены на рисунке 3.

Пример А на рисунке 3 относится к анализу поля в сплошном массиве с природной геометрией и сопротивлением пород (ток распространяется). В примере Б на рисунке 3 анализируется присутствие пустот преимущественно внутри поля и в прилегающих породах – условия заполнения воздухом ($\rho \rightarrow \infty$, ток не распространяется). Пустоты находятся в изучаемой градиентной области поля (источники тока I+ и I- над сплошным массивом).

Для выбора методик измерений важен порядок применения уравнений теории поля:

- 1 – источники тока над проводящим полупространством;
- 2 – источники при различных изучаемых характеристиках геологической среды.

Напряженность E и потенциал U электрического поля связаны следующим уравнением [13]

$$E = -\text{grad}U, (11)$$

где U – потенциал электрического поля, В.

Потенциал электрического поля удовлетворяет уравнению Лапласа

$$\Delta U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. (12)$$

Плотность тока j выражается через напряженность E и сопротивление ρ , а кажущееся сопротивление ρ_k через j :

$$j = \frac{E}{\rho}, \rho_k = j_{MN} \times \frac{\rho_{MN}}{j_0}, (13)$$

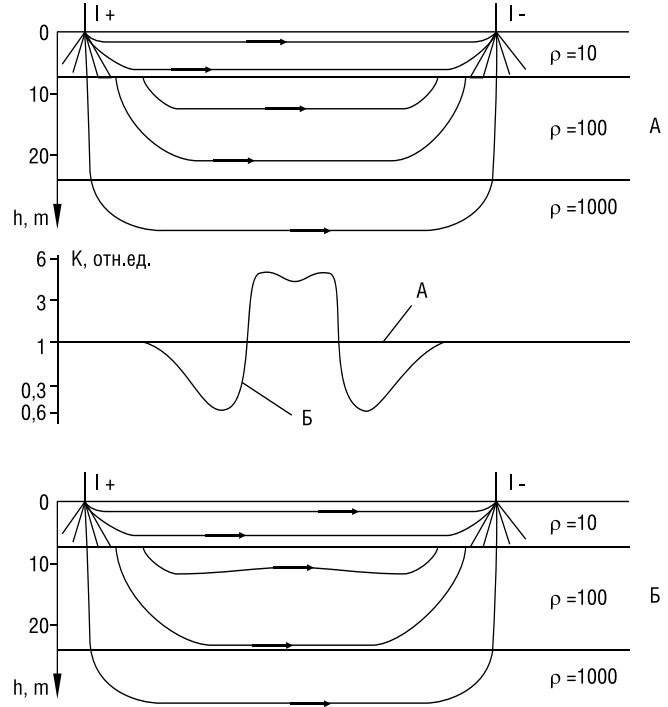


Рис. 3. Эскиз особенностей геометрии преломления силовых линий электрического поля:

А – источники тока над сплошным массивом горных пород; Б – источники тока над массивом с выработкой; ρ – удельные сопротивления слоев, Ом·м (модель); K – искажение плотности электрического тока, отн. ед.

Fig. 3. Sketch of the features of the geometry of refraction of electric field lines: А – sources of electric current over a solid rock mass; Б – sources of electric current above the array with generation; ρ – resistivity of layers, Ohms·m (model); K – distortion of the electric current density, rel. units

где j_{MN} , ρ_{MN} – плотность тока и сопротивление вблизи приемных электродов MN ; j_0 – нормальная плотность тока в однородной среде.

Граничные условия – равенство потенциалов электрического поля U и нормальных составляющих j :

$$U_1 = U_2, \frac{1}{\rho_1} \times \frac{\partial U_1}{\partial n} = \frac{1}{\rho_2} \times \frac{\partial U_2}{\partial n}. (14)$$

Уравнения (11-14) показывают, что силовые линии электрического поля в массиве с выработкой ($\rho \rightarrow \infty$) по сравнению со сплошным массивом перераспределены (рис. 3) и устанавливают для картирования соответствующие этому параметры и пределы. Выбор существенного для интерпретации параметра дает итог предварительного анализа этих уравнений.

Моделированием установлено, что за характеристику трансформации полым объектом (выработкой и т. п.) электрического поля следует принять специально введенный коэффициент «искажение плотности тока» K_m :

$$K_r = \frac{j_{(\infty)}}{j_n} = \frac{\rho_{k(\infty)}}{\rho_{kn}}, (15)$$

где $j_{(\infty)}$, j_n – плотности тока;

$\rho_{k(\infty)}$, ρ_{kn} – кажущиеся электрические сопротивления соответственно над подработкой и над сплошным массивом.

Уравнение (15) как выражение сигналов электрического поля позволяет связать результаты электрометрических измерений с параметрами гидродинамических моделей, приращениями скорости фильтрации $V_{1-3} / V_n \sim 6,5 \div 8,5$ и скоростями потока $7,5 \div 9,5 V_n$ (рис. 2).

Модели оцениваемых объектов

Модели полых объектов и подземных выработок формулируются на основе цилиндрической модели фильтрации как совокупность цилиндров трех видов при их размещении во вмещающих породах с задаваемыми свойствами фильтрации. Выше указано, что для цилиндрической модели фильтрации (рис. 1) определения модельных коэффициентов B_1, A_2, B_2, A_3 и решения с учетом (2) и (1) уравнений (4-6) дадут определения соответствующих скоростей фильтрации V_{1-3} .

Таким образом, для реальных объектов, моделируемых тремя вариантами входных параметров, будем иметь:

♦ I вариант — вложенный полый цилиндр (рис. 1) при коэффициенте фильтрации $K_g \rightarrow \infty$ и $R_{23} = 0$ характеризует полые объекты, карсты, скважины и горные выработки:

$$\frac{V_1}{V_n} = \cos(\varphi) \cdot \quad (16)$$

$$\cdot \left\{ 1 + \frac{R_{12}^2}{r^2 \cdot (\cos^2(\varphi - \phi) \cdot \cos^2(90^\circ - \alpha) + \cos^2(\varphi - \phi))} \right\};$$

$$\frac{V_2}{V_n} = 2 \cdot \cos(\varphi), \quad (17)$$

где V_n — скорость потока во вмещающей среде (в породной области) (рис. 1), м/сутки; V_1, V_2 — скорости фильтрации в области влияния выработки, соответственно вмещающей среды и полости между внутренним и внешним цилиндрами (рис. 1), м/сутки; R_{12} — радиус большого цилиндра (рис. 1), м.

♦ II вариант — вложенный проницаемый цилиндр (рис. 1) характеризует карсты с засыпкой и горные выработки, заполненные фильтрующими материалами, закладкой, песками, щебнем:

выражения для V_1 / V_n варианта соответствуют (16);

$$V_2 = \frac{2 \cos(\varphi)}{1 - kR^2} \cdot$$

$$\left\{ (V_n - V_b kR^2) + \frac{(V_b - V_n) \cdot R_{23}^2}{r^2 \cdot (\cos^2(\varphi - \phi) \cdot \cos^2(90^\circ - \alpha) + \cos^2(\varphi - \phi))} \right\}; \quad (18)$$

$$\frac{V_3}{V_b} = \cos(\varphi) \cdot$$

$$\left\{ 1 + \frac{R_{23}^2}{r^2 \cdot (\cos^2(\varphi - \phi) \cdot \cos^2(90^\circ - \alpha) + \cos^2(\varphi - \phi))} \right\}, \quad (19)$$

где V_b — скорость потока среды, слагающей внутренний цилиндр (рис. 1), м/сутки; R_{23} — радиусы малого цилиндра (рис. 1), м; V_3 — скорости фильтрации в области влияния выработки, среды, слагающей внутренний цилиндр (рис. 1), м/сутки.

♦ III вариант — непроницаемый цилиндр (рис. 1) при коэффициенте фильтрации $K_g = 0$ и $R_{23} / R_{12} = kR$ характеризует карсты и выработки с закладкой бетоном, туннинг метрополитена:

выражения для V_1 / V_n варианта соответствуют (16);

$$V_2 = \frac{\cos(\varphi)}{1 - kR^2} \cdot$$

$$\cdot \left\{ 1 - \frac{2R_{23}^2}{r^2 \cdot (\cos^2(\varphi - \phi) \cdot \cos^2(90^\circ - \alpha) + \cos^2(\varphi - \phi))} \right\}. \quad (20)$$

В породной области, где скорость фильтрации равна V_1 , функция потенциала скорости u_1 непрерывна и потенциальна, выполняется принцип суперпозиции, тогда вектор скорости фильтрации в области влияния примет следующий вид:

$$\vec{V}_1 j(r, \varphi) = \vec{V}_n + \Delta \vec{V} j(r, \varphi), \quad (21)$$

где j — индекс соответствия объекта одной из трех моделей принимает значения 1, 2 и 3;

$\vec{V}_n$ — вектор исходной скорости, м/сутки;

$\vec{V}_1 j(r, \varphi)$ — вектор скорости во вмещающей среде в области влияния соответствующего объекта (длина вектора, т. е. скорость, вычисляется по уравнению (16), м/сутки;

$\Delta \vec{V}_1 j(r, \varphi)$ — «векторный функционал объекта», приращение скорости фильтрации, обусловленное соответствующим объектом. Направленный по течению к центру выработки в области притока и от центра в области расхода.

Любое количество координированных карстовых объектов и выработок, для которых действует принцип суперпозиции, можно выразить через так называемый векторный суммарный функционал объекта:

$$\Delta \vec{V} j(r_0, \varphi_0) = \sum_{n=1}^N \Delta \vec{V}_n j(r_n, \varphi_n). \quad (22)$$

где n — порядковый номер учитываемых объектов от 1 до N ; (r_0, φ_0) — координаты в системе карстовых объектов и горных выработок (шахтного поля); (r_n, φ_n) — координаты относительно центра сечения n -го объекта.

Представленные уравнения являются методической основой для оценки строения реальных геологических сред любой природной сложности и условий ведения подземных горных работ и строительства метрополитена.

Обсуждение результатов. Полые пространства, в которых скорость фильтрации равна удвоенной скорости фронта притока, формируют в породной и пустотной областях общее неоднородное векторное поле скоростей (V_{1-3} / V_n) при депрессионном изменении исходного потока (водопонижении). Особенности вычислений состоят в том, что к V_1 и V_2 физический смысл и понятие скорости в полной мере можно применить лишь в области сформировавшегося потока, поскольку выше по разрезу, как показывают расчеты, поток прерывается.

Анализ поля геологической гидравлики установил, что каждый из параметров V_{1-3} послойных и глубинных проекций является логической скоростью фильтрации, которая возникает как бы при мгновенном размещении на пути потока отдельного объекта, карста или выработки, учитываемых в виде векторных слагаемых (приращений в области притока и области расхода) к исходной скорости V_n .

В изучении карстов верхней части массивов, затронутых водопонижением, накопление сигнальных данных ожидает-

ся в связи с применением измерений методом электрометрии в его объемной постановке [9, 12]. Таким образом, будет пополнена информационная база примеров и сигнальных данных карстопроявлений.

Выводы

1. Установлены принципы измерительных систем картирования карстов. Посредством площадных и периферийно-сгущаемых съемок электрометрии методом сопротивления в сочетании с вертикальными электрозондированиями и преобразования данных измерений в геопотенциальные поля электропроводности были получены алгоритмы и методическая практика оценки закарстованных территорий.

2. Наиболее эффективная оценка исследуемых объектов производится при выполнении условия, где глубина и периферийный охват разведки должен превышать размеры очага фильтрационных возмущений. Однако для развития и совершенствования метода электрометрии в настоящее время не-

обходимо комплексное изучение следов сигнала в незначительном интервале покрывающих толщ.

3. Нежелательны в оценках закарстованности результаты малоглубинной регистрации, не преобразуемые к геопотенциальным полям охвата. Ограничения включают использование в интерпретации высокочастотных сигналов, характеризующих приповерхностные покровные отложения.

4. За период 1992-2022 годов на Среднем и Южном Урале авторами изучено более 600 га площадей с карстоопасными участками при общем их распространении, по разным оценкам, от 54 до 280 тыс. га. На сплошных массивах, ранее отнесенных без должных оснований к подработанным (около 147 га) и «подозрительным» (более 200 га), сняты ограничения. На территориях проведено картирование, документирование и подтверждение геометрии карстов, обеспечены меры безопасности, оценены возможности вариантов предостроительной и эксплуатационной реабилитации. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Свод правил. Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах. СП 21.13330.2012 [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200094386> (дата обращения: 01.05.2024).
2. Wright, V. P. A revised Classification of Limestones / V. P. Wright. // *Sedimentary Geology*. - 1992. - Vol. 76, № 3-4. - P. 177-185.
3. Тимохин, А. В. Руды магнезитов и бокситов как петрофизические объекты спектрально-сортовой оценки на основе электрометрии (из архивов оксид-метрической разведки на месторождениях Урала) / А. В. Тимохин, Р. С. Титов, М. В. Козлова // *Литосфера*. - 2021. - Т. 21, № 3. - С. 431-443.
4. Frank, U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges / U. Frank // *Software & Systems Modeling*. - 2014. - Vol. 13, № 3. - P. 941-962.
5. Матвеев, Б. К. Геофизические методы изучения движения подземных вод / Б. К. Матвеев. - М.: Гостеолтехиздат, 1963. - 133 с.
6. Мельник, В. В. Решение задач безопасности ведения подземных горных работ при отработке угольных лав с использованием современных методов геофизики / В. В. Мельник, Т. Ш. Далатказин, А. Л. Замятин // *Проблемы недропользования*. - 2022. - № 4 (35). - С. 122-131.
7. Тимохин, А. В. Решение проблемы карстологической безопасности Урала с применением измерительных средств картирования и геометризации геолого-техногенных сред / А. В. Тимохин // *Золотодобывающая промышленность*. - 2010. - № 2 (38). - С. 26-29.
8. Харисов, Т. Ф. Геофизические поисково-оценочные исследования в условиях подземного рудника / Т. Ф. Харисов, В. В. Мельник, А. Л. Замятин // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. - 2020. - № 7. - С. 49-55.
9. Шевченко, М. Д. Определение закономерностей расположения тектонических нарушений для прогноза проницаемости массива горных пород / М. Д. Шевченко // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. - 2021. - № 5-2. - С. 174-180.
10. Соколов, Д. С. Основные условия развития карста / Д. С. Соколов. - М.: Гостеолтехиздат, 1962. - 322 с.
11. Хмелевской, В. К. Электроразведка / В. К. Хмелевской. - М.: Изд-во МГУ, 1984. - 422 с.
12. Редозубов, А. А. Специальный курс электроразведки / А. А. Редозубов. - Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. - 416 с.
13. Бурсиан, В. Р. Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке / В. Р. Бурсиан. - Л.: Недра, 1972. - 368 с.
14. Хмелевской, В. К. Основы геофизических методов / В. К. Хмелевской, В. И. Костицын; Перм. ун-т. - Пермь, 2010. - 400 с.
15. Recent advances in Karst Research: from Theory to fieldwork and Applications / M. Paris, F. Gabrovsek, G. Kaufman, N. Ravbar // *Geological Society*. - 2018. - Vol. 466. - P. 1-24.

REFERENCES

1. A set of rules. Buildings and structures in workable areas and subsidized soils. Buildings and structures on moonlit territories and subsidized soils. SP 21.13330.2012. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200094386> (In Russ.).
2. Wright VP. A revised Classification of Limestones. *Sedimentary Geology*. 1992; №76(3-4):177-85.
3. Timokhin AV, Titov RS, Kozlova MV. Ores of magnesites and bauxites as petrophysical objects of spectral grade assessment based on electrometry (from the archives of oxide-metric exploration in the deposits of the Urals). *Lithosphere*. 2021;21(3):431-43 (In Russ.).
4. Frank U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges. *Software & Systems Modeling*. 2014;13(3):941-62.
5. Matveev BK. Geophysical methods for studying motion groundwater. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1963 (In Russ.).
6. Melnik VV, Dalatkazin TSh, Zamyatin AL. Solving problems of safety of conducting underground mining operations during mining of coal lavas using modern methods of geophysics. *Problems of subsurface use*. 2022;4(35):122-31 (In Russ.).
7. Timokhin AV. Solving the problem of karstological safety of the Urals using measuring tools for mapping and geometrization of geological and man-made environments. *Gold mining industry*. 2010;2(38):26-9 (In Russ.).
8. Kharisov TF, Melnik VV, Zamyatin AL. Geophysical prospecting and evaluation studies in an underground mine. *News of higher educational institutions. Mining journal*. 2020;7:49-55 (In Russ.).

9. Shevchenko MD. Determination of the regularities of the location of tectonic disturbances for forecasting the permeability of a rock mass. *Mining information and analytical bulletin*. 2021;5-2:174-80 (In Russ.).
10. Sokolov DS. Basic conditions of karst development. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1962 (In Russ.).
11. Khmelevskoy VK. *Elektrorazvedka*. Moscow, 1984 (In Russ.).
12. Redozubov AA. Special course of electrical exploration. Ekaterinburg, 2010 (In Russ.).
13. Bursian VR. Theory of electromagnetic fields used in electrical exploration. Leningrad: Nedra, 1972 (In Russ.).
14. Khmelevskaya VK, Kostisyn VI. Fundamentals of geophysical methods. Perm, 2010 (In Russ.).
15. Paris M, Gabrovsek F, Kaufman G, et al. Recent advances in Karst Research: from Theory to fieldwork and Applications. *Geological Society*. 2018;466:1-24.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ



Тимохин Александр Владимирович:
научный сотрудник,
лаборатория управления качеством минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН,
г. Екатеринбург, Россия,
e-mail: timohin.igduran.geo@mail.ru,
ORCID 0000-0003-1246-0672



Кантемиров Валерий Данилович:
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией управления качеством минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН,
г. Екатеринбург, Россия,
e-mail: ukrkant@mail.ru,
ORCID 0000-0001-6486-2740



Титов Роман Сергеевич:
старший научный сотрудник,
лаборатория управления качеством минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН,
г. Екатеринбург, Россия,
e-mail: ukr07@mail.ru,
ORCID 0000-0002-3569-2743

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Timokhin Aleksandr Vladimirovich:
researcher,
Laboratory of Quality Management of Mineral Raw Materials,
Institute of Mining, Institute of Mining of Ural branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia,
e-mail: timohin.igduran.geo@mail.ru,
ORCID 0000-0003-1246-0672

Kantemirov Valery Danilovich:
Ph.D.,
Quality management laboratory chief, Institute of Mining of Ural branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia,
e-mail: ukrkant@mail.ru,
ORCID 0000-0001-6486-2740

Titov Roman Sergeevich:
senior researcher,
Quality management laboratory,
Institute of Mining of Ural branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia,
e-mail: ukr07@mail.ru,
ORCID 0000-0002-3569-2743

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.



КАЗАНСКИЙ ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ НЕФТЕГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Информируем Вас



Подготовка студентов в Институте геологии и нефтегазовых технологий ведется по 2-м направлениям:
05.03.01 Геология и 21.03.01 «Нефтегазовое дело».

Контакты: 420008, Казань, Кремлевская 4/5, Институт геологии нефтегазовых технологий
Тел/факс: (843) 233-71-61. E-mail: geofak@kpfu.ru

WWW.N-GN.RU

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ГИДРОФОБНОСТИ И ИЗВЛЕКАЕМОСТИ АЛМАЗОВ ТРУБКИ «БОТУОБИНСКАЯ»

*Е. Г. Коваленко, Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА», г. Мирный, Россия;
Г. П. Двойченкова, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Россия,
Мирнинский политехнический институт — филиал Северо-Восточного федерального университета
им. М. К. Аммосова, г. Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия;
В. В. Морозов, И. В. Пестряк, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Москва, Россия;
В. А. Чуть-Ды, Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА», г. Мирный, Россия*

Аннотация: Перспективным направлением решения задачи производства мелких алмазов является расширение диапазона обогащаемых классов и снижение потерь алмазов за счет применения современных технологий. Приведены результаты исследований причин сниженной гидрофобности алмазов трубки «Ботубинская» и выбор параметров подготовки исходного питания к процессам липкостной и пенной сепарации, обеспечивающих восстановление поверхностных свойств и извлечение в концентрат гидрофилизованных алмазов. Исследования показали, что минеральные покрытия на поверхности алмазов представляют собой прочно связанные с поверхностью алмазных кристаллов фрагменты первичных или измененных кимберлитов, а также шламы и пленки. Для алмазов из гипергенно измененных кимберлитов характерно преобладание карбонатных и алюмосиликатных минералов. Методом беспенной флотации алмазо-кимберлитовых проб показано, что применение механической оттирки достаточно эффективно для удаления шламовых покрытий, но не обеспечивает полного удаления прочно связанных с поверхности алмазов карбонатно-алюмосиликатных микробрехций. В результате проведенных исследований показано, что для более полного извлечения мелких алмазов из кимберлитов, обогащаемых на Нюрбинском ГОКе, целесообразно применение процессов механической оттирки и тепловой очистки алмазов от гидрофилизирующих покрытий для восстановления их гидрофобности. Показано, что применение сочетания этих методов обеспечивает повышение извлечения алмазов при липкостной сепарации на 14,1 % и при пенной сепарации на 20,4 %. Уровень извлечения гидрофильных алмазов (более 82 %), достигаемый при использовании технологии пенной сепарации, позволяет рекомендовать данный процесс для применения при совершенствовании технологии обогащения мелких классов алмазов.

Ключевые слова: алмазы, минеральные покрытия, гидрофобизация, оттирка, тепловая обработка, липкостная сепарация, пенная сепарация.

Для цитирования: Выбор технологии повышения гидрофобности и извлекаемости алмазов трубки «Ботубинская» / Е. Г. Коваленко, Г. П. Двойченкова, В. В. Морозов [и др.] // Маркшейдерия и недропользование. 2024. №3. С. 112-121. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_112_121.

THE CHOICE OF TECHNOLOGY TO INCREASE THE HYDROPHOBICITY AND RECOVERABILITY OF DIAMONDS OF THE BOTUOBINSKAYA TUBE

*E. G. Kovalenko, Yakutniproalmaz Institute JSK «ALROSA», Mirny, Russia;
G. P. Dvoichenkova, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow,
Mirny Polytechnic Institute (branch) North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Mirny, Republic of Sakha
(Yakutia), Russia;
V. V. Morozov, I. V. Pestryak, National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia;
V. A. Chut-Dy, Yakutniproalmaz Institute JSK «ALROSA», Mirny, Russia*

Abstract: A promising direction for solving the problem of producing small diamonds is to expand the range of enriched classes and reduce diamond losses through the use of modern technologies. The article presents the results of research on the causes of reduced hydrophobicity of Botuobinskaya tube diamonds and the choice of parameters for preparing the feedstock for the processes of sticky and foam separation, ensuring the restoration of surface properties and extraction of hydrophilized diamonds into concentrate. Studies have shown that the mineral coatings on the surface of diamonds are fragments of primary or modified kimberlites, as well as slurries and films, firmly connected to the surface of diamond crystals. Diamonds from hypergenically altered kimberlites are characterized by the predominance of carbonate and aluminosilicate minerals. It has been shown by the method of unrestricted flotation of diamond-kimberlite samples that the use of mechanical scrubbing is effective enough to remove slurry coatings, but does not provide complete removal of car-

bonate-aluminosilicate microbreccias firmly bound to the surface of diamonds. As a result of the conducted research, it is shown that for a more complete recovery of small diamonds from kimberlites enriched at the Nyurbinsky GOK, it is advisable to use the processes of mechanical stripping and thermal cleaning of diamonds from hydrophilizing coatings to restore their hydrophobicity. It is shown that the use of a combination of these methods provides an increase in diamond recovery during sticky separation by 14.1 % and during foam separation by 20.4 %. The level of recovery of hydrophilic diamonds (more than 82 %) achieved using foam separation technology allows us to recommend this process for use in improving the technology of enrichment of small classes of diamonds.

Keywords: diamonds, mineral coatings, hydrophobization, scrubbing, heat treatment, sticky separation, foam separation.

For citation: Kovalenko E. G., Dvoichenkova G. P., Morozov V. V., et al. The choice of technology to increase the hydrophobicity and recoverability of diamonds of the Botuobinskaya tube. Surveying and subsoil use. 2024;(3):112-121. (In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_3_112_121.

Перспективным направлением повышения эффективности алмазобогащательных предприятий является увеличение производства мелких алмазов [1]. В АК «Алроса» нашла широкое применение технология пенной сепарации алмазов, позволяющая снизить границу обогащаемого класса до 0,5 мм. Перспективным резервом увеличения производства мелких алмазов на новых и действующих обогащательных фабриках является процесс пенной сепарации [2, 3]. На сегодня нижняя граница обогащаемого класса на Нюрбинском ГОКе (методом липкостной сепарации) составляет 1 мм. Алмазы крупностью менее 1 мм не извлекаются, причиной чего является их недостаточно высокая гидрофобность и флотируемость. По той же причине не достигает плановых показателей извлечение алмазов в процессе липкостной сепарации.

С учетом исследований, проведенных на обогащательных фабриках Мирнинского и Айхальского ГОКов, вероятной причиной сниженной флотируемости алмазов является покрытие их поверхности гидрофильными минеральными образованиями различного происхождения [4, 5]. На поверхности алмазов присутствуют изначально или формируются в ходе технологического процесса рельефные и пленочные минеральные образования, которые снижают гидрофобность кристаллов алмазов и снижают их извлечение при липкостной и пенной сепарации [6].

Восстановление природной гидрофобности алмазов достигается путем тепловой обработки, а также приданием водной среде растворяющих свойств путем ее электрохимической обработки [7, 8]. Выбор технологии восстановления природной гидрофобности алмазов определяется характером гидрофильных покрытий и в первую очередь прочностью связи минералов с поверхностью алмаза, которая существенно различается для покрытий, прочно связанных с поверхностью кристаллов алмазов через промежуточные кристаллические соединения и покрытий, связанных с поверхностью алмазов силами адгезии [7, 9].

Цель исследования: оценка возможности применения различных способов подготовки исходного питания к процессам липкостной и пенной сепарации.

Задачи исследования: определение состава поверхностных соединений и выбор способов и параметров процессов восстановления гидрофобности алмазов и повышения их флотируемости.

Объект исследований: алмазы крупностью $-2 + 0,5$ мм, извлеченные из алмазо-кимберлитовых проб эксплоразведочных скважин горизонтов +175 - +85 м трубки «Ботуобинская».

Методики исследований

Исследования минерального состава образований на поверхности алмазов выполнялись путем применения метода растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа в лаборатории научно-исследовательского геологоразведочного предприятия АК «АЛРОСА» с использованием растрового электронного микроскопа Tescan Mira 3 LMU. Для проведения рентгеноспектрального микроанализа применяли энергодисперсионный спектрометр Advanced Aztec Energy IE350 на базе детектора X-MAXN (компании Oxford Instruments, Ltd) [10]. Особенностью применяемой методики является возможность прецизионного анализа тонкого поверхностного слоя на алмазах толщиной 2-3 нм, а также возможность диагностировать различные химические вещества в выбранных участках исследуемых образцов [11].

Для прямого анализа минерального состава гидрофилизирующих покрытий на алмазах была применена методика ИК-спектроскопии в диапазоне 600-4500 см⁻¹ с использованием Фурье-спектрометра Nicolett 6700 (фирмы Thermo Fisher Scientific). Применение ИК-Фурье-спектроскопии является действенным методом определения состава минеральных объектов на поверхности алмаза [12].

Для анализа влияния условий подготовки пробы на изменение гидрофобности алмазов использовалась методика флотации в трубке Халлимонда [13]. Предварительная обработка алмазо-кимберлитовой смеси (исходной пробы) проводилась в термостатированной ячейке с вертикальной мешалкой с регулируемым числом оборотов. Обесшламливание пробы проводилось путем декантации водной фазы со шламами через 20 с отстаивания.

Для проведения лабораторных исследований процесса липкостной и пенной сепарации алмазосодержащих проб были применены лабораторный барабанный липкостной сепаратор и пенный сепаратор с объемом камеры 1 л, а также специальное технологическое оборудование: оттирочная машина роторного типа, парогенератор, термостатированная ячейка-кондиционер. Методики лабораторных исследований с применением пенной сепарации подробно описаны в работах [7-9].

Разработка методики количественной оценки минерального состава образований на поверхности алмазов по данным рентгеноэлектронного микроанализа

Основным недостатком известных методов анализа минерального состава поверхностных образований на алмазах является затрудненность дифференцированного определения состава отдельных микрообразований, что необходимо

для идентификации их генезиса и выбора методов удаления с поверхности алмазов. С учетом высокой точности и поверхностного разрешения метода рентгеноэлектронной сканирующей микроскопии было предложено использовать получаемые этим методом данные об элементном составе отдельных участков покрытий для определения их минерального состава. Для оценки минерального состава покрытий на поверхности алмазов было предложено использование методики расчета, определяющей схожесть химического состава анализируемых объектов к составу представительных групп минералов (метод базовых минеральных групп).

Технологические характеристики базовых минеральных групп, представленные в *таблице 1*, с одной стороны, позволяют учесть генезис покрытий, приводящих к гидрофилизации алмазов, с другой — определить рациональные технологии восстановления природной гидрофобности алмазов и способов предотвращения повторной гидрофилизации. Именно этим отличается предложенная классификация от других, предполагающих формирование групп только по генезису [14].

Группа карбонатных минералов характеризуется прочным срастанием с поверхностью алмазов и наибольшей склонностью к кристаллизации в пересыщенных растворах [8, 15]. Группа алюмосиликатов характеризуется участием в микробрекчиях, прочно связанных с поверхностью алмаза, так и склонностью к налипанию шламовых классов на поверхности алмазов [7, 16]. Группа оливинов и пироксенов в меньшей степени склонна к налипанию на поверхность алмазов. Группа минеральных солей (преимущественно хлоридов и сульфатов) характеризуется способностью кристаллизоваться в поровых пространствах поверхностных образований из водных сред с предельно высокой концентрацией солей.

Для выбора параметров идентификации выбранных минеральных групп были учтены известные данные о химическом составе основных минералов, а также характерных соотношений между этими параметрами. Согласно данным работы [17], в кимберлитах прослеживается как положитель-

ная, так и отрицательная корреляция MgO и CaO в их составах. В последнем случае концентрация MgO проявляет положительную корреляцию с SiO₂, а CaO — с CO₂. На основе этих фактов кимберлиты часто рассматриваются как смесь двух составляющих: ультраосновной оливин-ортопироксеновой (гарцбургитовой) и карбонатной (кальцитовой или доломитовой). Поэтому при выборе комбинированных параметров состава покрытий для их использования в качестве критериев принадлежности были выбраны сумма кальция и магния (характерных карбонатным минералам) и сумма алюминия и кремния (характерных алюмосиликатным минералам). Для определения солеобразных хлоридов рассчитывалась сумма массовых долей калия, натрия и хлора. Для более четкого определения оливинов и пироксенов использовался критерий разности содержаний кальция и магния.

Массовая доля железа и серы была использована в качестве критерия самостоятельной минеральной фазы, несмотря на малую представительность (единичные образования). Значения содержаний серы и железа также были использованы в качестве вспомогательных при определении основных минеральных групп.

Средние значения указанных параметров по пяти минеральным группам, полученные экспериментальным путем, использовались в качестве базовых при оценке минерального состава методом минеральных групп (*табл. 2*).

Системный анализ минерального состава отдельных образований и усредненных данных на поверхности алмазов проводился по данным анализа элементного состава с использованием метода принадлежностей [18], адаптированного для конкретных условий. Этот метод позволяет использовать данные, которые характеризуют пробу как совокупность (смесь) пяти минеральных групп с определением доли каждой минеральной группы в пробе.

Согласно алгоритму, первоначально определяется отклонение параметров пробы и базовых минеральных групп по основным параметрам диагностики (*табл. 2*). Уравнение для расчета отклонения S1 параметров пробы от параметров

Таблица 1 / Table 1

Основные технологические характеристики базовых минеральных групп, заложенные в модель при анализе минеральных образований на алмазах

The main technological characteristics of the basic mineral groups incorporated into the model in the analysis of mineral formations on diamonds

№ п/п	Минеральная группа	Кимберлиты	Форма присутствия на алмазах	Склонность к адгезии на алмазах	Удаление образований с алмазов	Склонность к кристаллизации на алмазах
1	Карбонаты / Carbonates	Измененные	РПО, пленки	Средняя	Термическое и электрохимическое	Высокая
2	Алюмосиликаты / Aluminosilicates	Первичные	РПО, шламы	Высокая	Термическое и механическое	Средняя
3	Минеральные соли / Mineral salts	Первичные и измененные	Поровый материал в покрытиях	Низкая	Термическое	Средняя
4	Оливины и пироксены / Olivines and pyroxenes	Первичные	РПО и шламы	Средняя	Механическое	Нет
5	Оксиды и сульфиды железа / Iron oxides and sulfides	Первичные и измененные	РПО и шламы	Средняя	Механическое	Низкая

РПО – рельефные поверхностные образования

Основные технологические характеристики базовых минеральных групп, заложенные в модель при анализе минеральных образований на алмазах

The main technological characteristics of the basic mineral groups incorporated into the model in the analysis of mineral formations on diamonds

№ п/п	Минеральная группа / Mineral group	α_{Ca+Mg} – сумма содержаний кальция и магния / the sum of the calcium and magnesium contents, %	α_{Al+Si} – сумма содержаний алюминия и кремния / the sum of aluminum and silicon contents, %	α_{Fe} – содержание железа / iron content, %	α_S – содержание серы / sulfur content, %	α_{Na+Cl} – сумма содержаний натрия и хлора / the sum of the sodium and chlorine contents, %	α_{Mg-Ca} – разность содержаний магния и кальция / the difference in the contents of magnesium and calcium, %
1	Карбонаты / Carbonates	40	0,1	0,3	0,2	0,1	2,3
2	Алюмосиликаты / Aluminosilicates	5	33	1,3	0,2	0,3	5,0
3	Минеральные соли / Mineral salts	5,0	2,0	0,2	1,0	60,0	0,4
4	Оливины и пироксены / Olivines and pyroxenes	50,5	13,5	5,2	0,3	0,5	40,0
5	Оксиды и сульфиды железа / Iron oxides and sulfides	3	0,1	65	9	0,1	0

минеральной группы 1 в выбранном шестипараметрическом пространстве имеет вид

$$S1 = \sqrt{\begin{aligned} &(k_1(\alpha_{Ca+Mg} - \alpha_{Ca+Mg}^1)/\alpha_{Ca+Mg}^1)^2 + \\ &(k_2(\alpha_{Si+Al} - \alpha_{Si+Al}^1)/\alpha_{Si+Al}^1)^2 + \\ &(k_3(\alpha_{Fe} - \alpha_{Fe}^1)/\alpha_{Fe}^1)^2 + \\ &(k_4(\alpha_S - \alpha_S^1)/\alpha_S^1)^2 + \\ &(k_5(\alpha_{Na+Cl} - \alpha_{Na+Cl}^1)/\alpha_{Na+Cl}^1)^2 + \\ &(k_6(\alpha_{Mg-Ca} - \alpha_{Mg-Ca}^1)/\alpha_{Mg-Ca}^1)^2 \end{aligned}} \quad (1)$$

где α^1_{Ca+Mg} , α^1_{Si+Al} , α^1_{Fe} , α^1_S , α^1_{Na+Cl} , α^1_{Mg-Ca} – содержания в минеральной группе 1 кальция и магния, алюминия и кремния, железа; содержания серы, натрия и хлора, разность содержаний магния и кальция; k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , k_5 , k_6 – весовые коэффициенты, определяющие степень влияния содержания определенного компонента на общий результат.

С использованием значения отклонений параметров пробы и пяти минеральных групп (S1-S5) рассчитываются доли принадлежности анализируемой пробы к минеральной группе каждого типа (расчетное уравнение 2), где доля принадлежности поступившей пробы к минеральной группе 1 обозначается d_1^P , минеральной группе 2 – d_2^P , минеральной группе 3 – d_3^P , минеральной группе 4 – d_4^P , минеральной группе 5 – d_5^P :

$$\begin{aligned} d_1^P &= \frac{S2 \times S3 \times S4 \times S5}{S2 \times S3 \times S4 \times S5 + S1 \times S3 \times S4 \times S5 + S1 \times S2 \times S4 \times S5 + S1 \times S2 \times S3 \times S5 + S1 \times S2 \times S3 \times S4}, \\ d_2^P &= \frac{S1 \times S3 \times S4 \times S5}{S2 \times S3 \times S4 \times S5 + S1 \times S3 \times S4 \times S5 + S1 \times S2 \times S4 \times S5 + S1 \times S2 \times S3 \times S5 + S1 \times S2 \times S3 \times S4}, \\ d_3^P &= \frac{S1 \times S2 \times S4 \times S5}{S2 \times S3 \times S4 \times S5 + S1 \times S3 \times S4 \times S5 + S1 \times S2 \times S4 \times S5 + S1 \times S2 \times S3 \times S5 + S1 \times S2 \times S3 \times S4}, \\ d_4^P &= \frac{S1 \times S2 \times S3 \times S5}{S2 \times S3 \times S4 \times S5 + S1 \times S3 \times S4 \times S5 + S1 \times S2 \times S4 \times S5 + S1 \times S2 \times S3 \times S5 + S1 \times S2 \times S3 \times S4}, \\ d_5^P &= \frac{S1 \times S2 \times S3 \times S4}{S2 \times S3 \times S4 \times S5 + S1 \times S3 \times S4 \times S5 + S1 \times S2 \times S4 \times S5 + S1 \times S2 \times S3 \times S5 + S1 \times S2 \times S3 \times S4}. \end{aligned}$$

Принадлежность к минеральной группе d_i^P в используемой методике расчета отождествляется с массовой долей минеральной группы γ_i^P в исследуемой пробе.

Анализ поверхностных минеральных образований на алмазах

Методом рентгеновской микроскопии показано, что на алмазах исследуемых проб гидрофилизирующие покрытия представлены образованиями различной площади, формы, структуры и толщины. Гидрофилизирующие покрытия представлены как распространенными по поверхности алмаза преимущественно тонкими покрытиями, так и рельефными образованиями высотой до 400 мкм, которые сконцентрированы в трещинах, впадинах и также в смежных поверхностях в области нарушения кристаллической решетки алмаза.

Элементный и минеральный состав отдельных участков покрытий на алмазах существенно различается (рис. 1, 2, табл. 3).

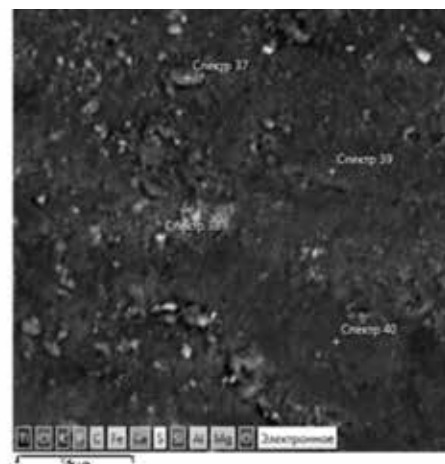


Рис. 1. Многослойная карта энерго-дисперсионной спектроскопии гидрофильного алмаза трубки «Ботуобинская»
Fig. 1. Multilayer map of energy dispersion spectroscopy of hydrophilic diamond of the Botuobinskaya tube

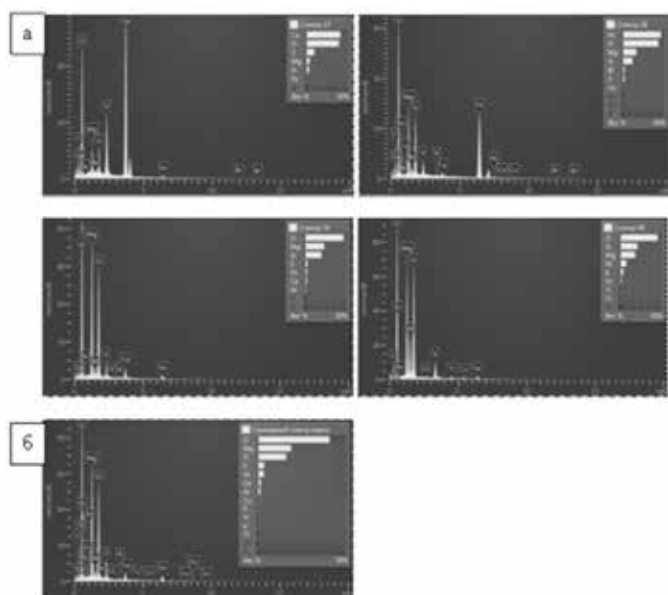


Рис. 2. Рентгеноэлектронные спектры отдельных минеральных образований (а) суммарный спектр поверхности гидрофильного алмаза (б) трубки «Ботубинская»

Fig. 2. X-ray electron spectra of individual mineral formations (a) the total spectrum of the surface of a hydrophilic diamond (b) the Botubinskaya tube

Таблица 3 / Table 3

Минеральный состав участков покрытий на гидрофильном алмазе
Mineral composition of coating sites on hydrophilic diamond

Минеральная группа / Mineral groups	Спектр / Spectra			
	37	38	39	40
Карбонаты / Carbonates	40,6	13,6	4,9	4
Алюмосиликаты / Aluminosilicates	47,8	19,4	35,6	19,6
Минеральные соли / Mineral salts	3,3	1,6	5,1	5,8
Оливины и пироксены / Olivines and pyroxenes	5,1	20,2	45,2	64,2
Оксиды и сульфиды железа / Iron oxides and sulfides	3,2	45,2	9,2	6,4

По результатам трансформации результатов рентгено-электронной спектроскопии анализа можно диагностировать, что рельефное образование на поверхности алмаза (спектр 37) имеет преимущественно кальций-магний карбонатный состав. Другое рельефное поверхностное образование (спектр 38) представлено окисленными минералами железа и кремнезема. В ровном участке покрытия диагностируются оливины, пироксены (спектр 39), в мелкозернистом шламовом покрытии — алюмосиликаты, оливины и пироксены (спектр 40).

Анализ суммарного состава покрытий на алмазах, извлеченных из зоны первичных кимберлитов, показал, что на них в наибольшей мере распространены оливины и пироксены, в меньшей мере — алюмосиликатные и кальциево-карбонатные минералы (табл. 3).

На поверхности гидрофильных алмазов, извлеченных из хвостового продукта, полученного при переработке гипергенно измененных кимберлитов, диагностируется существенно большее количество рельефных поверхностных образований с высотой до 300 мкм. Рельефные покрытия постороннего материала на алмазах сложены микрокристаллическим материалом микробрекчиевой структуры. Химический состав характерных поверхностных минеральных образований на алмазах из зоны интенсивных гипергенных изменений весьма неоднороден (табл. 4).

Результаты трансформации данных элементного анализа в оценку состава методом минеральных групп показывает неравномерное распределение минеральных групп (табл. 5) по поверхности алмаза. Такая неоднородность в основном обусловлена одновременным присутствием рельефных образований, представляющих собой прочно связанные с поверхностью алмазных кристаллов фрагменты первичных или измененных кимберлитов, а также шламовых и пленочных покрытий.

Анализ результатов оценки минерального состава покрытий показал, что основным минералом на поверхности алмазов, извлеченных из первичных кимберлитов, являются оливины, пироксены, алюмосиликаты и силикаты, а на алмазах, извлеченных из измененных кимберлитов, — карбонаты кальция и магния и алюмосиликаты.

Для проверки данных оценки минералогического состава покрытий на алмазах был применен метод ИК-спектроскопии. Интегральные ИК-спектры алмазов были получены

Таблица 4 / Table 4

Химический состав поверхностных образований на поверхности алмазов (из первичных и измененных кимберлитов), %
Chemical composition of surface formations on the surface of diamonds (from primary and modified kimberlites), %

Содержание / Content	Ca	Mg	Al	Si	S	K+Na	Cl	Ti	Fe
Алмазы из первичных кимберлитов / Diamonds from primary kimberlites									
Максимальное / Maximum	57,3	38,74	14,82	44,73	54,20	4,93	5,66	1,31	46,91
Минимальное / Minimum	0,99	7,79	3,07	8,11	0,55	0,1	0,1	0,1	1,36
Среднее / Average	29,23	24,76	<0,1	28,95	4,12	0,27	0,37	1,31	13,67
Алмазы из измененных кимберлитов / Diamonds from modified kimberlites									
Максимальное / Maximum	50,82	31,32	13,08	42,68	70,45	8,21	6,33	43,36	67,15
Минимальное / Minimum	0,34	2,86	1,16	0,97	0,71	0,22	0,1	0,23	0,73
Среднее / Average	36,34	14,5	3,54	17,76	4,81	0,57	0,34	1,23	8,79

Таблица 5 / Table 5

Характеристики варьирования параметров группового минерального состава покрытий на исследованных алмазах, %
Characteristics of variation of parameters of the group mineral composition of coatings on the studied diamonds, %

Минеральная группа / Mineral groups	Массовая доля минеральной группы / Mass fraction of the mineral group		
	Минимальная / Minimum	Максимальная / Maximum	Среднее / Average
Алмазы из первичных кимберлитов / Diamonds from primary kimberlites			
Карбонаты / Carbonates	1,5	67,6	18,6
Алюмосиликаты / Aluminosilicates	3,9	87,4	33,1
Минеральные соли / Mineral salts	0,1	21,8	2,2
Оливины и пироксены / Olivines and pyroxenes	2,9	84,0	41,8
Оксиды и сульфиды железа / Iron oxides and sulfides	0,1	60,2	4,3
Алмазы из измененных кимберлитов / Diamonds from modified kimberlites			
Карбонаты / Carbonates	4,2	77,8	30,6
Алюмосиликаты / Aluminosilicates	3,8	85,8	36,5
Минеральные соли / Mineral salts	0,1	12,5	2,1
Оливины и пироксены / Olivines and pyroxenes	0,1	64,3	24,8
Оксиды и сульфиды железа / Iron oxides and sulfides	0,1	63,5	5,9

на Фурье-спектрометре Nicolet 6700 (фирмы Thermo Fisher Scientific). Методика подготовки проб включала запрессовывание 20-25 кристаллов алмаза крупностью 0,4-0,5 мм в порошок KBr и последующее спектрофотометрирование образца в диапазоне 400-4500 см⁻¹ [19]. Результаты ИК-спектроскопии подтвердили результаты оценки минерального состава по данным рентгеноэлектронной спектроскопии и показали, что в покрытиях гидрофильных алмазов, извлеченных из первичных кимберлитов, характерно преобладание минеральных групп оливинов и пироксенов над другими минеральными группами, а для алмазов из гипергенно измененных кимберлитов характерно существенное преобладание карбонатных и алюмосиликатных минералов, что обусловлено изменяющимся составом вмещающих кимберлитов.

Повышение гидрофобности алмазов за счет удаления гидрофильных минеральных покрытий

В качестве перспективных способов очистки поверхности алмазов были рассмотрены процессы интенсивной механической оттирки в высокоскоростном активаторе с применением реагентов-диспергаторов, а также теплового кондиционирования питания пенной сепарации.

Применение механической оттирки для очистки поверхности минералов хорошо зарекомендовало себя при подготовке кварцевого сырья [20]. Были получены положительные результаты и при использовании механической активации (оттирки) для алмазосодержащего сырья [5, 16]. В процессе оттирки дезинтегрируются малопрочные полиминеральные агрегаты и могут разрушаться зерна малой прочности. При-

менение теплового кондиционирования питания пенной сепарации было изучено и апробировано на обогатительной фабрике № 3 Мирнинского ГОКа. Обнаруженное повышение флотуемости алмазов связывается в основном с удалением рельефных поверхностных образований вследствие проявления термомеханического разрушающего эффекта. Отмечается также возможность увеличения растворимости карбонатных пленок на поверхности алмазов при электрохимической обработке оборотной воды [8]. Очистка алмазов и восстановление их природной гидрофобности в процессах липкостной сепарации достигаются также с применением виброакустической обработки исходного питания в сочетании с электрохимическим кондиционированием оборотной воды [16].

Для оценки влияния выбранных способов и режимов обработки на гидрофобность алмазов использовалась методика флотации в трубке Халлимонда [13]. В данной методике флотуемость алмазов отождествляется с их гидрофобностью, которая проявляется, как в технологических процессах пенной и липкостной сепарации. Особенностью выбранной методики является возможность использования представительных проб алмазов (более 50 кристаллов в одном опыте) в смеси с кимберлитом и получение результатов в приближенных к реальным технологическим процессам показателях (извлечении в концентрат). Перед проведением экспериментов алмазо-кимберлитовая проба с крупностью алмазов 0,5-0,65 мм и кимберлита крупностью 0,7-1 мм выдерживалась в течение 1 часа в оборотной воде с высокой концентрацией кимберлитовых шламов (5 %). Такие условия принципиально соответствовали режиму подготовки исходного продукта в промышленных условиях [4, 5].

Предварительная тепловая и механическая обработка исходной алмазо-кимберлитовой пробы проводилась в термостатированной ячейке с вертикальной роторной мешалкой с регулируемым числом оборотов. Обесшламливание обработанной пробы проводилось путем декантации водной фазы через 30 с отстаивания.

Результаты экспериментов показали, что очищающее действие тепловой обработки относительно поверхности алмазов от шламов проявляется при нагревании выше 40°C как без использования механической оттирки, так и с ее применением (рис. 3). Наибольший эффект наблюдается при температуре 80-90°C. Извлечение кимберлита в концентрат в проведенных экспериментах составляло около 1,5 % и не изменялось более чем на 0,2 %, что не позволяло считать данные по влиянию механической и тепловой обработки на флотуемость кимберлита достоверными ($R^2 = 0,23-0,38$).

Результаты экспериментов также показали, что очищающее действие оттирки проявляется при продолжительности обработки 40-60 с как без использования тепловой обработки, так и при одновременном использовании оттирки и тепловой обработки (рис. 4). Необходимо отметить, что при более продолжительном применении оттирки наблюдается некоторое снижение гидрофобности алмазов и их флотуемости, что ставит задачу определения оптимального диапазона продолжительности оттирки.

Таким образом, результаты опытов по беспенной флотации показали возможность увеличения гидрофобности алмазов при использовании выбранных видов обработки. Мак-

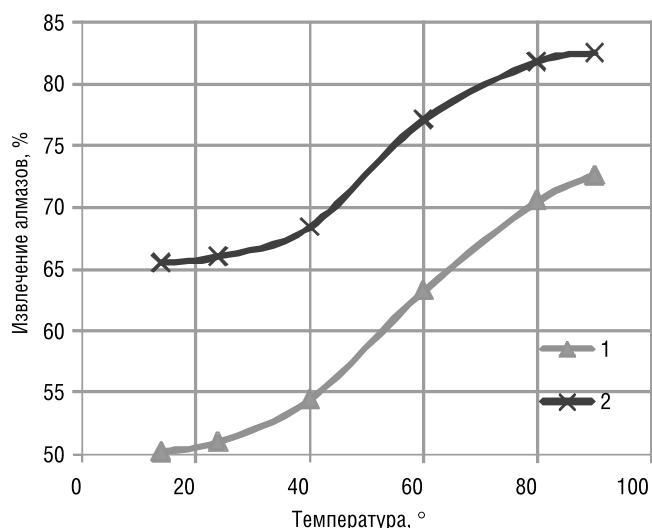


Рис. 3. Влияние температуры тепловой обработки на флотуемость гидрофилизованных алмазов: 1 - без применения оттирки; 2 - при применении оттирки в течение 60 с

Fig. 3. The effect of heat treatment temperature on the floatability of hydrophilized diamonds: 1 - without the use of a scrubbing; 2 - when applying a scrubbing for 60 seconds

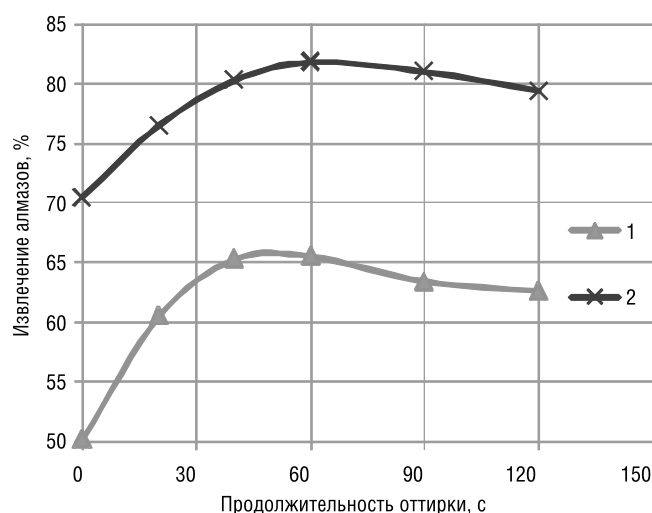


Рис. 4. Влияние продолжительности механической активации (оттирки) на флотуемость гидрофилизованных алмазов: 1 - без использования тепловой обработки; 2 - с использованием тепловой обработки при 83°C

симальный прирост флотуемости алмазов наблюдается при сочетании нагрева пробы до 60-90°C и механической оттирки в течение 40-60 с (рис. 3, 4). Такой эффект, по-видимому, связан с одновременным удалением шламов и тонких карбонатных пленок [5, 7, 9].

Выбранные режимы подготовки алмазов к флотации были проверены на установках липкостной и пенной сепарации на алмазосодержащих пробах кимберлитов. Методика приготовления пробы включала операцию механического обесшламливания, проводимую в роторном активаторе в течение 20-120 с. Перед оттиркой пробу нагревали до температуры 60-85°C и выдерживали в течение 60 с. После оттирки

водную фазу со шламами удаляли декантированием. Для процесса липкостной сепарации использовали алмазо-кимберлитовую смесь крупностью от 1,4 до 2 мм. При проведении процесса липкостной сепарации сгущенную обесшламленную пробу подавали на барабанный сепаратор, покрытый липким составом, состоящим из петролатума (59 %), октола (12 %) и индустриального масла И-40 (29 %).

При проведении процесса пенной сепарации сгущенную обесшламленную алмазо-кимберлитовую пробу крупностью 1,4-1,7 мм обрабатывали собирателем – мазутом флотским Ф-5 при расходе 1000 г/т исходного питания. В водную фазу пульпы добавляли вспениватель – ОПСБ при концентрации 50 мг/л. Результаты опытов показали эффективность выбранных режимов подготовки алмазосодержащих проб к операциям липкостной и пенной сепарации. Сочетание механической оттирки и тепловой обработки при добавках реагентов – диспергаторов шламов является эффективным способом подготовки алмазосодержащих продуктов к пенной сепарации, обеспечивающим заметный прирост извлечения алмазов (табл. 6).

Таблица 6 / Table 6

Влияние механической оттирки и тепловой обработки на результаты липкостной и пенной сепарации

The effect of mechanical scrubbing and heat treatment on the results of sticky and foam separation

№	Продолжительность оттирки, с / The duration of the scrubbing, s	Температура обработки / Processing temperature, °C	Извлечение в концентрат ЛС / Recovery into a concentrate SS, %		Извлечение в концентрат ПС / Recovery into a concentrate FS, %	
			алмазов / diamonds	кимберлита / kimberlite	алмазов / diamonds	кимберлита / kimberlite
1	-	14	78,4	1,13	62,3	1,33
2	60	14	87,5	0,98	69,1	1,35
3	-	85	86,4	1,63	72,4	1,39
4	40	60	92,5	0,99	77,3	1,35
5	40	85	93,8	1,45	82,7	1,49
6	60	60	91,4	0,94	77,6	1,39
7	60	85	92,2	1,40	82,0	1,40

Наилучшие результаты липкостной сепарации (прирост извлечения алмазов на 14,1 % при уменьшении выхода кимберлита на 0,24 %) достигаются при сочетании тепловой обработки питания липкостной сепарации при температуре 60 °C и механического диспергирования в течение 40 с (табл. 6, опыт 4). Увеличение температуры обработки до 85°C (опыты 3, 5, 7) заметно увеличивает выход в концентрат кимберлита и одновременно снижает эффективность процесса за счет нагревания и деструкции липкостной мази.

Наилучшие результаты пенной сепарации (прирост извлечения алмазов на 20,4 %) достигаются при сочетании механического диспергирования в течение 40 с с тепловой обработкой питания пенной сепарации при температуре 85°C. Выход кимберлита в концентрат остается практически неизменным. Повышение температуры кимберлитового продукта до 85°C не сказывается отрицательно на процессе пенной сепарации. Напротив, повышение температуры среды в операции кондиционирования с собирателем до 30-35°C и тем-

пературы в операции пенной сепарации до 18–21°C является одной из причин улучшения показателей пенной сепарации.

Анализ энергозатрат показывает, что дополнительный расход энергии на тепловую обработку в осенне-зимне-весенний период компенсируется снижением расхода на отопление корпуса и не приводит к существенному увеличению себестоимости продукции. Оценка конечной рентабельности применения рассматриваемых технологий существенно зависит от содержания мелких алмазов в перерабатываемой руде, которое для трубки «Ботуобинская» весьма значительно.

Полученные результаты обосновывают возможность и целесообразность применения комбинированной технологии механической и тепловой обработки перед процессами липкостной и пенной сепарации с целью повышения технологических показателей обогащения мелких классов алмазов трубки «Ботуобинская» на Нюрбинском ГОКе.

Выводы

1. Результатами электронно-зондового рентгеноспектрального анализа и ИК-Фурье-спектроскопии показано, что основной причиной снижения гидрофобности мелких алмазов трубки «Ботуобинская» в процессе обогащения является их гидрофилизация закрепившимися минеральными покрытиями, представляющими собой прочно связанные с поверхностью алмазных кристаллов фрагменты первичных или измененных кимберлитов, а также шламовые и пленоч-

ные покрытия. Показано, что в покрытиях гидрофильных алмазов, извлеченных из первичных кимберлитов, характерно преобладание минеральных групп оливинов и пироксенов над другими минеральными группами, а для алмазов из гипергенно измененных кимберлитов характерно существенное преобладание карбонатных и алюмосиликатных минералов, что обусловлено изменяющимся составом вмещающих кимберлитов.

2. Показано, что применение механической оттирки достаточно эффективно для удаления шламовых покрытий, но не обеспечивает полного удаления прочно связанных с поверхности алмазов карбонатно-алюмосиликатных микробрекций. Установлена наибольшая эффективность одновременного применения процессов механической оттирки и тепловой очистки от гидрофилизирующих покрытий для восстановления гидрофобности алмазов. Показано, что применение сочетания этих методов обеспечивает повышение извлечения алмазов при липкостной сепарации на 14,1 % и при пенной сепарации – на 20,4 %. Уровень извлечения гидрофильных алмазов (более 82 %), достигаемый при использовании комбинированной подготовки исходного питания, позволяет рассматривать данный процесс как перспективный при обогащении алмазосодержащих кимберлитов трубки «Ботуобинская» с применением технологии липкостной и пенной сепарации на Нюрбинском ГОКе. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Chanturiya, V. A. Innovation-based processes of integrated and high-level processing of natural and technogenic minerals in Russia / V. A. Chanturiya // Proceedings of the 29th International Mineral Processing Congress. - Moscow, 2019. - P. 3–12.
2. Краткий отчет независимых экспертов о запасах и ресурсах месторождений алмазов группы компаний «Алроса» (2018 г.) [Электронный ресурс]. - URL: http://alrosa.wearetesting.co.uk/wpcontent/uploads/2013/11/Alrosa_Independent_Expert_Report-2013.pdf (дата обращения: 03.08.2020).
3. Отчет независимых экспертов о запасах и ресурсах месторождений алмазов группы компаний «Алроса» [Электронный ресурс]. - URL: http://alrosa.wearetesting.co.uk/wpcontent/uploads/2013/11/Alrosa_Independent_Expert_Report-2013.pdf (дата обращения: 14.09.2023).
4. Авдохин, В. М. Современные технологии обогащения алмазосодержащих кимберлитов / В. М. Авдохин, Е. Н. Чернышева // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2010. - № 1. - С. 465–477.
5. Научное обоснование и выбор оптимального варианта по восстановлению гидрофобных свойств поверхности алмазов из руды трубки «Интернациональная» / В. А. Верхотурова, И. В. Елшин, А. А. Немаров [и др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. - 2014. - № 8 (91). - С. 50–56.
6. Махрачев, А. Ф. Новые направления в технологии обогащения алмазосодержащего сырья на предприятиях АК «АЛРОСА» / А. Ф. Махрачев, Н. П. Ларионов, В. Б. Савицкий // Горный журнал. - 2005. - № 7. - С. 99–101.
7. Экспериментальное обоснование применения ультразвуковых и электрохимических воздействий в цикле липкостной сепарации алмазосодержащего сырья месторождений Накынского рудного поля / Г. П. Двойченкова, Ю. А. Подкаменный, А. С. Тимофеев, Ю. Н. Никитина // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2023. - № 10. - С. 74–88.
8. The Mechanism of Formation of Finely Dispersed Minerals on the Surface of Diamonds and the Application of Electrolysis Products of Water Systems for their Destruction / V. Chanturiya, G. Dvoichenkova, V. Morozov, Y. Podkamenny // Journal of the Polish Mineral Engineering Society. - 2019. - Vol. 1, № 43. - P. 53–57.
9. Современные направления повышения эффективности пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов / В. В. Морозов, Е. Г. Коваленко, Г. П. Двойченкова [и др.] // Горные науки и технологии. - 2024. - Т. 9, № 1.
10. Practical guides for x-ray photoelectron spectroscopy (XPS): Interpreting the carbon 1s spectrum / T. Gengenbach, G. Major, M. Linford, C. Easton // J. Vac. Sci. Technol. - 2021. - A 39. - P. 013204.
11. Mahoney, J. Surface analysis using X-ray photoelectron spectroscopy / J. Mahoney, C. Monroe, A. M. Swartley // Spectroscopy Letters An International Journal for Rapid Communication. - 2020. - Vol. 53, № 10. - P. 726–736.
12. Chukanov, N. V. Infrared Spectroscopy of Minerals and Related Compounds / N. V. Chukanov, A. D. Chervonnyi. Springer International Publishing Switzerland, 2016. - 1120 p.
13. Батушкин, А. Н. Оценка собирательных свойств аполярных реагентов в аппарате беспенной флотации / А. Н. Батушкин, А. А. Байченко // Вестник Кузбасского государственного технического университета. - 2005. - № 6 (51). - С. 73–75.
14. Вторичные минералы кимберлитов / Н. Н. Зинчук, А. Д. Харьков, Ю. М. Мельник, Н. П. Мовчан. - Киев: Наукова думка, 1993. - 282 с.
15. Co-Deposition Mechanisms of Calcium Sulfate and Calcium Carbonate Scale in Produced Water / Y. Yan, T. Yu, H. Zhang [et al.] // Crystals. - 2021. - Vol. 11. - P. 1494.

16. Подкаменный, Ю. А. Повышение извлечения алмазов в условиях липкостной сепарации на основе комбинированного электрохимического и ультразвукового воздействия: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю. А. Подкаменный. - М., 2019. - 23 с.
17. Хмельков, А. М. Основные минералы кимберлитов и их эволюция в процессе ореолообразования (на примере Якутской алмазоносной провинции) / А. М. Хмельков. - Новосибирск: АРТА, 2008. - 252 с.
18. Hero, A. O. Pareto-optimal methods of gene ranking / A. O. Hero, G. Fleury // VLSI Signal Processing Log. - 2004. - Vol. 38, № 3. - P. 259-275.
19. Новые применения Фурье-спектрометров / Г. Г. Горбунов, Л. В. Егорова, Д. Н. Еськов [и др.] // Оптический журнал. - 2001. - Т. 68, № 8. - С. 81-85.
20. Малуко, О. П. Обогащение кварцевых песков / О. П. Малуко, В. А. Рафийенко. - М.: Горная книга, 2014. - 55 с.

REFERENCES

1. Chanturiya VA. Innovation-based processes of integrated and high-level processing of natural and technogenic minerals in Russia / Proceedings of the 29th International Mineral Processing Congress. Moscow, 2019:3-12.
2. Summary report of independent experts on reserves and resources of diamond deposits of the Alrosa Group of companies (2018). Available from: http://alrosa.wearetesting.co.uk/wpcontent/uploads/2013/11/Alrosa_Independent_Expert_Report-2013.pdf (In Russ.).
3. Report of independent experts on reserves and resources of diamond deposits of the Alrosa Group of Companies. Available from: http://alrosa.wearetesting.co.uk/wpcontent/uploads/2013/11/Alrosa_Independent_Expert_Report-2013.pdf. (In Russ.).
4. Avdokhin VM, Chernysheva EN. Modern technologies for the enrichment of diamond-containing kimberlites. *Mining information and analytical bulletin*. 2010;1:465-77.
5. Verkhoturova VA, Elshin IV, Nemarov AA, et al. Scientific substantiation and selection of the optimal option for restoring the hydrophobic properties of the surface of diamonds from the ore of the Internatsionalnaya tube. *The Bulletin of Irkutsk State University*. 2014;8(91):50-6. (In Russ.).
6. Makhachev AF, Larionov NP, Savitsky VB. New directions in the technology of enrichment of diamond-containing raw materials at ALROSA enterprises. *Mining Journal*. 2005;7:99-101. (In Russ.).
7. Dvoichenkova GP, Podkamenny YuA, Timofeev AS, et al. Experimental substantiation of the use of ultrasonic and electrochemical effects in the cycle of sticky separation of diamond-containing raw materials from deposits of the Nakynsky ore field. *Mining information and analytical bulletin*. 2023;10:74-88. (In Russ.).
8. Chanturiya V, Dvoichenkova G, Morozov V, et al. The Mechanism of Formation of Finely Dispersed Minerals on the Surface of Diamonds and the Application of Electrolysis Products of Water Systems for their Destruction. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*. 2019;1(43):53-7. (In Russ.).
9. Morozov VV, Kovalenko EG, Dvoichenkova GP, et al. Modern directions for improving the efficiency of foam separation of diamond-containing kimberlites // *Mining sciences and technologies*. 2024;9(1) (In Russ.).
10. Gengenbach T, Major G, Linford M, et al. Practical guides for x-ray photoelectron spectroscopy (XPS): Interpreting the carbon 1s spectrum. *J. Vac. Sci. Technol. A* 39, 013204, 2021. <https://doi.org/10.1116/6.0000682>
11. Mahoney J, Monroe C, Swartley AM. Surface analysis using X-ray photoelectron spectroscopy. *Spectroscopy Letters An International Journal for Rapid Communication*, 2020;53(10):726-36.
12. Chukanov NV, Chervonnyi AD. Infrared Spectroscopy of Minerals and Related Compounds. Springer International Publishing Switzerland, 2016.
13. Batushkin AN, Baichenko AA. Assessment of the collective properties of apolar reagents in a non-foam flotation apparatus. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2005;6(51):73-5. (In Russ.).
14. Zinchuk NN, Kharkiv AD, Melnik YuM, et al. Secondary minerals of kimberlites. Kiev: Naukova Dumka, 1993. (In Russ.).
15. Yan Y, Yu T, Zhang H, et al. Co-Deposition Mechanisms of Calcium Sulfate and Calcium Carbonate Scale in Produced Water. *Crystals*. 2021;11:1494.
16. Podkamenny YuA. Increasing diamond extraction under conditions of sticky separation based on combined electrochemical and ultrasonic effects. Moscow, 2019 (In Russ.).
17. Khmelkov AM. The main minerals of kimberlites and their evolution in the process of halo formation (on the example of the Yakut diamond-bearing province). Novosibirsk: ARTA, 2008 (In Russ.).
18. Hero AO, Fleury G. Pareto-optimal methods of gene ranking. *VLSI Signal Processing Log*. 2004;38(3):259-75.
19. Gorbunov GG, Egorova LV, Eskov DN, et al. New applications of Fourier spectrometers. *Optical magazine*. 2001;68(8):81-5 (In Russ.).
20. Malyuk OP, Rafiyenko VA. Enrichment of quartz sands. Moscow, 2014 (In Russ.).

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION:

Коваленко Е. Г. — разработка методик, проведение испытаний, написание текста статьи; Двойченкова Г. П. — генерация идеи исследования, написание текста статьи; Морозов В. В. — разработка программы исследований, систематизация материала; написание текста статьи. Пестряк И. В. — проведение и анализ результатов спектральных исследований; Чуть-Ды В. А. — проведение экспериментальных исследований, обработка данных / Kovalenko E. G. — Development of methods, conducting tests, writing the text of the article; Dvoichenkova G. P. — Generation of the research idea, writing the text of the article; Morozov V. V. — Development of the research program, systematization of the material; writing the text of the article; Pestryak I. V. — conducting and analyzing the results of spectral studies; Chut-Dy V. A. — conducting experimental studies, data processing.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коваленко Евгений Геннадьевич:

кандидат технических наук,
главный инженер института «Якутнипроалмаз»
АК «АЛРОСА»,
доцент.
Мирнинский политехнический институт –
филиал Северо-Восточного федерального университета
им. М. К. Аммосова (МПТИ (ф) СВФУ),
г. Мирный, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация,
ORCID ID 0000-0002-0320-0839,
Scopus ID 57200340844,
e-mail: kovalenkoeg@alrosa.ru, kovalenkoeg@gmail.ru

Двойченкова Галина Петровна:

доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник.
Институт проблем комплексного освоения недр РАН,
г. Москва, Российская Федерация.
Профессор.
Мирнинский Политехнический институт – филиал Северо-
Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова
(МПТИ (ф) СВФУ),
г. Мирный, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация,
ORCID 0000-0003-3637-7929,
Scopus ID 8837172700,
e-mail: dvoigp@mail.ru

Морозов Валерий Валентинович:

доктор технических наук,
профессор,
кафедра общей и неорганической химии.
Университет науки и технологий МИСИС,
г. Москва, Российская Федерация,
ORCID 0000-0003-4105-944X,
Scopus ID 7402759618;
e-mail: dchmggu@mail.ru

Пестряк Ирина Васильевна:

доктор технических наук,
заведующий,
кафедра общей и неорганической химии,
доцент.
Университет науки и технологий МИСИС,
Москва, Россия,
Scopus ID 55577597700,
ORCID 0000-0002-1745-6579,
e-mail: spestryak@mail.ru

Чуть-Ды Валентина Анатольевна:

аспирант ИПКОН РАН,
ведущий инженер-технолог,
институт «Якутнипроалмаз», АК «АЛРОСА»,
г. Мирный, Российская Федерация,
Scopus ID 58037854600,
e-mail: verhoturova-vale@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kovalenko Evgeny Gennadievich:

Candidate of Technical Sciences,
Chief Engineer,
«Yakutniproalmaz» Institute AC «ALROSA»,
Associate Professor,
Polytechnic Institute (branch) North-Eastern Federal University
named after M. K. Ammosov,
Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation,
ORCID ID 0000-0002-0320-0839,
Scopus ID 57200340844,
e-mail: kovalenkoeg@alrosa.ru, kovalenkoeg@gmail.ru

Dvoichenkova Galina Petrovna:

Doctor of Technical Sciences,
Leading Researcher,
Institute of Problems of Integrated Development of Mineral
Resources of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation,
Professor,
Polytechnic Institute (branch) North-Eastern Federal University
named after M. K. Ammosov,
Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation,
ORCID 0000-0003-3637-7929,
Scopus ID 8837172700,
e-mail: dvoigp@mail.ru

Morozov Valery Valentinovich:

Dr. Sci. (Eng.),
Professor,
Department General and Inorganic Chemistry,
National University of Science and Technology MISIS,
Moscow, Russian Federation,
ORCID 0000-0003-4105-944X,
Scopus ID 7402759618;
e-mail: dchmggu@mail.ru

Pestryak Irina Vasilevna:

Doctor of Technical Sciences,
Head of the Department of General and Inorganic Chemistry,
Associate Professor,
National University of Science and Technology MISIS,
Moscow, Russia,
Scopus ID 55577597700,
ORCID 0000-0002-1745-6579,
e-mail: spestryak@mail.ru

Chut-Dy Valentina Anatolievna:

postgraduate student of IPCON RAS.
Leading Process Engineer,
Yakutniproalmaz Institute AC ALROSA,
Mirny, Russian Federation,
Scopus ID 58037854600,
e-mail: verhoturova-vale@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КАРЬЕРОВ ЦЕМЕНТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ, РАЗРАБАТЫВАЮЩИХ МИНЕРАЛЬНОЕ СЫРЬЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБАЙНОВ ПОСЛОЙНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ SM

С. И. Фомин, А. Лелен,

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Определена оптимальная производительность карьеров цементной промышленности, разрабатывающих минеральное сырье с использованием комбайнов послойного фрезерования Surface Miner, позволяющих повысить надежность и экономическую эффективность отработки месторождений. Установлено, что на производительность фрезерного комбайна существенно влияет ряд факторов: скорость движения комбайна в процессе фрезерования; ширина полосы фрезерования; мощность обрабатываемого слоя; физико-механические свойства обрабатываемых горных пород; применяемая технологическая схема. Выявлено, что повышение производительности комбайнов Surface Miner достигается при увеличении длины фронта по послойному фрезерованию горных пород, при циклично-поточной и поточной технологии отработки месторождения и минимуме вспомогательных технологических процессов. Применение комбайнов Surface Miner на карьерах цементной промышленности позволит обеспечить тонкослоевую отработку горной массы, уменьшить потери руды и выбросы загрязняющих веществ, проводить рациональное использование недр, повысить промышленную безопасность.

Ключевые слова: месторождения цементного сырья, фрезерный комбайн Surface Miner, производительность, производственная мощность, селективная добыча.

Для цитирования: Фомин С. И., Лелен А. Определение производительности карьеров цементной промышленности, разрабатывающих минеральное сырье с использованием комбайнов послойного фрезерования SM // Маркшейдерия и недропользование. 2024. № 3. С. 122-127. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_122_127.

OUTPUT DETERMINATION OF OPEN-CAST MINING CEMENT RAW MATERIALS DEPOSITS USING SURFACE MINERS SM

S. I. Fomin, A. Ljeljen,

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

Abstract:

Introduction. The relevance of the study is due to the need to optimize technological processes in quarries for cement raw materials and increase the reliability and economic efficiency of deposit development. Surface Miner (SM) layer milling machines, allow carrying out thin-layer mining of deposits, to conduct rational use of subsoil, to increase industrial safety. During open-cast mining of cement raw materials deposits using layer milling machines (SM), the increase of economic efficiency of mining works may be achieved by determining rational values of parameters and indicators of the open cast mine.

The main aim. To determinate the optimum productivity of cement industry quarries developed with layer milling machines (SM) ensuring increased reliability and economic efficiency of deposit development.

Methodology. As the basic methods of research, we used monitoring of technological processes of the quarry, systematic analysis of the structure, characteristics, properties of technological complexes and links of quarries of cement plant Beocin (Serbia) developing complex structure carbonate deposits with the use of layer-milling machines. Dependence of duration of dump truck rides, number of rides per shift and number of dump trucks for 1 milling machine on the distance of rock mass transportation for mining-technical conditions of the quarries at the cement plant Beocin (Serbia) has been determined.

Conclusions. Application of (SM) surface miners at cement industry open-pit mines ensures thin-layer mining of rock mass, reduction of ore losses and emissions of pollutants, rational use of subsoil, increase of industrial safety. Number of factors influences Surface Miner productivity: speed of the machine moving in the process of milling, width of the milling band, thickness of the mined layer, physical and mechanical characteristics of the mined rock and applied technological scheme. It is shown that the increase of Surface Miner productivity is achieved when the length of the front is increased, when the cyclic-continuous and continuous technology of deposit mining is used, and the auxiliary technological processes are minimized.

Keywords: cement raw material deposits, layer milling machines Surface Miner, productivity, production capacity, selective extraction.

For citation: Fomin S. I., Ljeljen A. Output determination of open-cast mining cement raw materials deposits using surface miners SM. Surveying and subsoil use. 2024;(3):122-127. (In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_3_122_127.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оптимизации технологических процессов на карьерах по добыче цементного сырья и повышения надежности и экономической эффективности отработки месторождений. Комбайны послойного фрезерования Surface Miner (SM) позволяют осуществлять тонкослоевую разработку месторождения, проводить рациональное использование недр, повысить промышленную безопасность. При открытой разработке месторождений цементного сырья с использованием комбайнов послойного фрезерования (SM) повышение экономической эффективности горных работ может быть достигнуто за счет определения рациональных значений параметров и показателей карьера.

Производительность карьеров цементной промышленности, разрабатываемых с использованием комбайнов послойного фрезерования, должна определяться с учетом горнотехнических и горно-геологических условий разработки месторождений, использования технических возможностей фрезерных горных комбайнов и рабочей зоны карьера, установленного в проектной документации режима горных работ и рациональной организации труда [1-5].

Для определения производительности карьеров цементной промышленности, разрабатываемых с использованием комбайнов послойного фрезерования, следует установить продолжительность технологических операций при работе фрезерного комбайна [6-9].

Цель исследований: определение производительности карьеров цементной промышленности, разрабатывающих минеральное сырье с использованием комбайнов послойного фрезерования (SM).

Объект исследований

Горнотехнические и горно-геологические условия карьеров предприятия по производству цемента «Беочин» (Сербия).

Методология

В качестве основных методов исследований использовался мониторинг технологических процессов карьера, системный анализ структуры, характеристик, свойств технологических комплексов и звеньев карьеров цементного завода «Беочин» (Сербия), отрабатывающих сложноструктурные карбонатные месторождения с использованием машин послойного фрезерования. Установлена зависимость продолжительности рейса автосамосвала, количества рейсов в смену и количества автосамосвалов, приходящихся на 1 фрезерный комбайн, от расстояния транспортирования горной массы для горнотехнических условий карьеров цементного завода «Беочин».

Рассмотрены возможные варианты продолжительности проведения технологических операций при работе комбайнов послойного фрезерования на карьерах цементной промышленности:

- ✦ календарный фонд времени технологических операций при работе комбайнов (SM) определяется как произведение общего числа календарных дней в рассматриваемый период на количество часов работы в сутки, принятому в проектной документации;
- ✦ номинальный фонд времени технологических операций при работе комбайнов (SM) — это произведение общего числа дней работы за рассматриваемый промежуток времени работы комбайна в течение суток на ко-

личество часов работы в сутки, принятому в проектной документации.

$$F_{\text{норм}} = n((N_{\text{дн}} - N_{\text{вых}})T_{\text{см}} - T_{\text{празд}}), \quad (1)$$

где n — количество смен работы в сутки; $N_{\text{дн}}$ — количество суток работы в заданном интервале; $N_{\text{вых}}$ — количество выходных и праздничных дней в заданном интервале, сут.; $T_{\text{см}}$ — продолжительность смены, ч; $T_{\text{празд}}$ — общее количество часов, на которое сокращается время работы в предпраздничные дни, ч.

Эффективный фонд времени проведения технологических операций при работе комбайнов — это максимально возможная продолжительность работы фрезерного комбайна за исключением времени, которое затрачивается на ремонтные и планово-профилактические операции

$$F_{\text{эф}} = F_{\text{норм}} K_u K_{\text{осм}}, \quad (2)$$

где K_u — коэффициент использования комбайна, учитывающий плановые ремонты оборудования (0,85-0,95) в зависимости от условий и режима работы; $K_{\text{осм}}$ — коэффициент, учитывающий регулярные технологические осмотры главных узлов и механизмов комбайна, обусловлен соблюдением норм эксплуатации комбайнов послойного фрезерования (принимается по данным практики — 0,96).

Производительность карьера цементной промышленности, разрабатываемого с использованием комбайнов послойного фрезерования [10], находится по формуле

$$П = F_{\text{эф}} N \times A_k K_{\text{опыт}}, \quad (3)$$

где N — количество фрезерных комбайнов, работающих в карьере, шт.; A_k — эксплуатационная производительность комбайна, т/год; $K_{\text{опыт}}$ — коэффициент, учитывающий опыт работы и квалификацию машиниста комбайна, $K_{\text{опыт}} = 0,7-1,1$ (по данным хронометражных наблюдений).

Величина производительности карьера варьируется в процессе отработки месторождения и отражается в структуре производственного процесса [11-14].

Структура производственного процесса отражается в следующих показателях:

- ✦ производительность горнодобывающего предприятия по руде на начало года $P_{\text{нз}}$;
- ✦ производительность горнодобывающего предприятия по руде на конец года $P_{\text{кз}}$;
- ✦ производительность горнодобывающего предприятия по руде на конец года $P_{\text{ср}}$.

Производительность горнодобывающего предприятия по руде на конец года

$$P_{\text{ср}} = P_{\text{нз}} + P_{\text{вв}} + P_{\text{выб}} \quad (4)$$

где $P_{\text{вв}}$ — вводимая мощность в течение года на карьере по разработке месторождения цементного сырья; $P_{\text{выб}}$ — выводимая мощность в течение года на карьере по разработке месторождения цементного сырья.

Среднегодовая производственная мощность учитывает баланс производственных мощностей в течение года

$$P_{ср.год} = P_{нз} + P_{ср.вв} - P_{ср.выб}, \quad (5)$$

где $P_{ср.вв}$ — среднегодовая вводимая мощность в течение года на карьере по разработке месторождения цементного сырья; $P_{ср.выб}$ — среднегодовая выводимая мощность в течение года на карьере по разработке месторождения цементного сырья;

$$P_{ср.вв} = P_{вв} n_{вв},$$

где $n_{вв}$ — коэффициент ввода производственных мощностей, определяемый от их ввода в эксплуатацию до конца года.

$$P_{ср.выб} = P_{выб} n_{выб},$$

где $n_{выб}$ — коэффициент отсутствия ввода производственных мощностей от их вывода из эксплуатации до конца года.

В случае если срок ввода (вывода) мощностей не установлен в проектной документации, то при определении значения годовой производственной мощности целесообразно применять коэффициент усреднения 0,35.

Усреднённая за год производственная мощность карьера с учётом баланса производственных мощностей в течение года находится по формуле

$$P_{ср.год} = P_{нз} + 0,35 P_{вв} + 0,35 P_{выб}. \quad (6)$$

Производительность комбайна послойного фрезерования при челноковой технологической схеме работы (с возвращением в начало заходки холостым ходом) имеет вид

$$Q_{сз} = \frac{3600 T_{см} H B L_{рх} K_{то} K_3 K_n K_c K_k N_z}{\frac{L_{рх}}{V_{рх}} + \frac{L_{хх}}{V_{хх}} + T_n + T_o}, \text{ м}^3/\text{год} \quad (7)$$

где H — мощность слоя фрезерования руды, м; B — ширина заходки фрезерования, м; $K_{то}$ — коэффициент технического обслуживания комбайна послойного фрезерования (0,82–0,85); K_3 — коэффициент, учитывающий потери рабочего времени на осмотр, обслуживание и замену резцов барабана (0,90); $K_{л}$ — коэффициент, учитывающий потери рабочего времени при замене и установке карьерных автосамосвалов под погрузку (0,95); K_k — коэффициент, учитывающий климатический фактор; K_c — коэффициент, учитывающий потери рабочего времени при селективной отработке пластов руды (0,90); $V_{рх}$ — скорость рабочего хода фрезерного комбайна; $V_{хх}$ — скорость холостого хода комбайна в начало заходки; $L_{рх}$ — длина участка фрезерования руды, м; $L_{хх}$ — длина перемещения комбайна при возвращении в начало заходки без фрезерования, м; T_o — время опускания фрезерного барабана в забой до начала рабочего хода, с; $T_{л}$ — время поднятия фрезерного барабана в забой до начала холостого хода в начало заходки, с.

Длина перемещения комбайна послойного фрезерования рабочим ходом, необходимая для загрузки одного карьерного автосамосвала,

$$L_{ноз} = \frac{V_{ра}}{BH}, \text{ м}, \quad (8)$$

где $V_{ра}$ — объем руды, размещаемый в кузове одного карьерного автосамосвала (в целике), м³; B — ширина заходки фрезерования, м; H — мощность слоя фрезерования, м.

Продолжительность загрузки комбайном одного карьерного автосамосвала

$$T_{заг} = \frac{L_{ноз}}{H}, \text{ м}. \quad (9)$$

При челноковой технологической схеме работы комбайна количество карьерных автосамосвалов, загружаемых за смену, определяется по формуле

$$N = \frac{Q_{см}}{V_{ра}}, \text{ авт/смен.}, \quad (10)$$

где $Q_{см}$ — сменная эксплуатационная производительность комбайна при челноковой схеме работы, м³/смен.; $V_{ра}$ — объем руды, размещаемый в кузове одного карьерного автосамосвала (в целике), м³.

Нормативное количество рейсов карьерного автосамосвала в смену определяется по формуле

$$N = \frac{T_{см} K_{иа}}{T_{ра}}, \text{ авт/смен.}, \quad (11)$$

где $N_{ра}$ — нормативное количество рейсов автосамосвала, рейс/смен.; $K_{иа}$ — коэффициент использования автосамосвала (0,8–0,85); $T_{см}$ — продолжительность смены, мин.; $T_{ра}$ — продолжительность рейса карьерного автосамосвала, мин.

Здесь

$$T_{ра} = t_{дв} + t_{нозр.} + t_{о.л.} + t_{у.л.} + t_{у.в.} + t_{р.}, \text{ мин.} \quad (12)$$

где $t_{дв}$ — время движения гружёного и порожнего автосамосвала, мин.; $t_{нозр.}$ — время загрузки карьерного автосамосвала фрезерным комбайном, мин.; $t_{о.л.}$ — время ожидания погрузки карьерного автосамосвала, мин.; $t_{у.л.}$ — время установки автосамосвала под загрузку, мин.; $t_{у.в.}$ — время установки под карьерного автосамосвала разгрузку, мин.; $t_{р.}$ — время разгрузки автосамосвала, мин.

Сырьевой базой предприятия по производству цемента «Беочин» с годовой производительностью 1,6 млн т цемента являются близкорасположенные месторождения карбонатных пород, обрабатываемые двумя карьерами с годовой производственной мощностью соответственно 0,9 и 1,4 млн т [15, 16].

На рисунке 1 представлены графики зависимости продолжительности рейса карьерного автосамосвала, количества рейсов в смену и количества автосамосвалов, приходящихся на 1 фрезерный комбайн, от расстояния транспортирования горной массы для горнотехнических условий карьеров предприятия по производству цемента «Беочин».

Результаты исследований

Как показали исследования результатов работы фрезерного комбайна в горнотехнических и горно-геологических условиях карьеров предприятия по производству цемента «Беочин», с увеличением длины обрабатываемого блока эксплуатационная производительность комбайна увеличивается.



Рис. 1. Графики зависимости продолжительности рейса автосамосвала (ряд 1), количества рейсов в смену (ряд 2) и количества автосамосвалов, приходящихся на 1 фрезерный комбайн (ряд 3), от расстояния транспортирования горной массы для горнотехнических условий карьеров предприятия по производству цемента «Беочин»

Fig. 1. Graph of dependence the duration of the haul of the dump truck (row 1), the number of trips per shift (row 2) and the number of dump trucks per 1 milling combine (row 3) of the distance of transportation of rock mass for the opencast mining conditions of the cement production plant Beochin (Serbia)

На рисунке 2 представлен график зависимости производительности комбайна послойного фрезерования от длины эксплуатационного блока для горнотехнических условий карьеров предприятия по производству цемента «Беочин».

Закключение

1. Оптимальная производительность комбайна послойного фрезерования Surface Miner обеспечивается при длине фронта горных работ, позволяющей осуществлять бесперебойную поточную обработку эксплуатационного блока месторождения с минимальным количеством вспомогательных технологических операций и без холостого хода комбайна.

2. Увеличение производительности комбайнов Surface Miner достигается при увеличении длины фронта по послойному фрезерованию горных пород при циклично-поточной и поточной технологии обработки месторождения и минимуме вспомогательных технологических процессов.

3. Эксплуатационная производительность фрезерного комбайна Surface Miner находится в зависимости от ряда

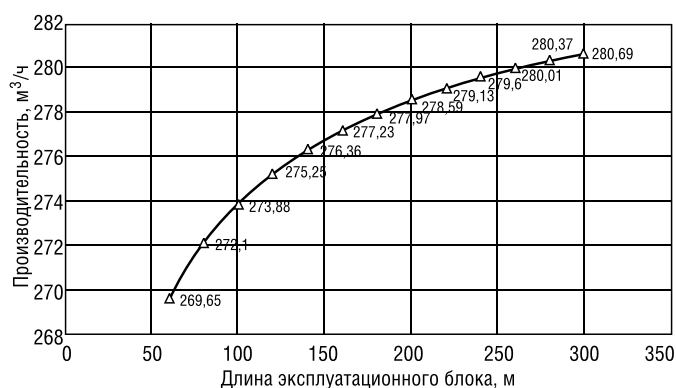


Рис. 2. График зависимости производительности комбайна послойного фрезерования эксплуатационного блока для горнотехнических условий карьеров предприятия по производству цемента «Беочин»

Fig. 2. Graph of dependence output of the layer-by-layer milling combine of the production unit for the opencast mining conditions of the cement production plant Beochin (Serbia)

факторов: скорости перемещения рабочим и холостым ходом, ширины заходки, мощности обрабатываемого слоя, физико-механических свойств обрабатываемых горных пород, применяемой организации горных работ.

4. Производительность карьера, разрабатывающего месторождение цементного сырья с использованием комбайна послойного фрезерования, зависит от скорости движения фронта горных работ, скорости движения заходки по длине фронта, мощности обрабатываемого слоя горных пород, ширины полосы фрезерования, длины фронта горных работ, вида принятой технологической схемы обработки. При этом рациональную длину фронта горных работ 150 м рекомендуется устанавливать для челноковых схем обработки месторождения при фрезеровании рабочим ходом и возвращении в начало заходки холостым ходом. В случае увеличения длины фронта горных работ целесообразен переход к организации обработки месторождения с разворотом комбайна в конце заходки и рабочим ходом и в обратном направлении.

5. Применение комбайнов Surface Miner на карьерах цементной промышленности позволит обеспечить тонкослойную обработку горной массы, уменьшить потери руды и выбросы загрязняющих веществ, проводить рациональное использование недр, повысить промышленную безопасность. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Арсентьев, А. И. Производительность карьеров / А. И. Арсентьев; Горный ин-т им. Г. В. Плеханова (техн. ун-т). - СПб., 2002. - 85 с.
2. Optimization of long-term quarry production scheduling under geological uncertainty to supply raw materials to a cement plant / T. Vu, T. Bao, C. Drebenstedt [et al.] // Mining Technology. - 2021. - Vol. 130, (3). - P. 146-158.
3. Трубецкой, К. Н. Проектирование карьеров: Учеб. для вузов: В 2 т. / К. Н. Трубецкой, Г. Л. Краснянский, В. В. Хронин. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Издательство Академии горных наук, 2001. - Т. I. - 519 с.
4. Afeni, T. B. A comparative study of geometric and geostatistical methods for qualitative reserve estimation of limestone deposit / T. B. Amenities, V. O. Akeju, A. E. Aladejare // Geoscience Frontiers. - 2021. - Vol. 12, № 1. - P. 243-253.
5. Dagdelen, K. Optimum cement quarry scheduling algorithm / K. Dagdelen, M. W. A. Asad // Proceedings of the 30th symposium on application of computers and operations research in the mineral industry. - Phoenix, AZ, 2002. - P. 697-709.
6. Zajaczkowski, M. Technological and Economic Analysis of the Application of Surface Miner on the Example of a Limestone Deposit in Poland / M. Zajaczkowski // Inzynieria Mineralna. - 2021. - Vol. 2. - P. 237-242.
7. Пихлер, М. Увеличение объёмов добычи известняка в Украине с помощью карьерных комбайнов Wirtgen без применения буровзрывных работ / М. Пихлер, А. П. Иль, Н. М. Линнеманн // Горная промышленность. - 2019. - № 2 (144). - С. 64-66.

8. Опарин, В.Н. Безвзрывные технологии открытой добычи твердых полезных ископаемых / В. Н. Опарин, А. Р. Маттис; отв. ред. В. Н. Опарин // Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. - 335 с.
9. Шемякин, С.А. Экономическое обоснование эффективности безвзрывной селективной выемки полезного ископаемого и вмещающих пород с использованием технико-технологических комплексов на основе фрезерных комбайнов / С. А. Шемякин, Д. Н. Матвеев, А. Ю. Чебан // Горный журнал. - 2015. - № 2. - С. 43-46.
10. Фомин, С. И. Анализ безвзрывной технологии тонкослойной выемки с применением фрезерных комбайнов при открытой разработке месторождений цементного сырья / С. И. Фомин, И. П. Виноградов // Цемент и его применение. - 2017. - № 4. - С. 42-44.
11. Швабенланд, Е.Е. О потенциале фрезерных комбайнов непрерывного действия при разработке месторождений открытым способом / Е. Е. Швабенланд // Рациональное освоение недр. - 2014. - № 1. - С. 54-60.
12. Фомин, С.И. Оценка эффективности принятия проектных решений / С.И. Фомин, Д.В. Пасынков, А.С. Семенов // Записки Горного института. - 2009. - Т. 180. - С. 12-15.
13. Решетняк, С.П. Обоснование проектирования участков карьерных бортов без предохранительных берм / С.П. Решетняк, М.В. Мелихов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование. - 2015. - № 60-1. - С. 439-448.
14. Bralic, N. Cement Raw Material Reserve Calculation - Geological Sections vs. Structural Maps Approaches, Case Study from Southern Croatia / N. Bralic, T. Malvic // Minerals. - 2022. - Vol. 12, № 8. - P. 1056.
15. Jovanovic, B. Technical Project for Limestone and Overburden Exploitation at the Open Pit Mutalj - I Stage // Mining Institute I.I.c. Belgrade. - 2014. - Vol. 1. - P. 112-119.
16. Management of the limestone mining and deposition process at the open pit'Mutalj'for the purpose of achieving the necessary quality / B. Jovanovic, D. Milosevic, V. Canovic [et al.] // Mining and Metallurgy Engineering Bor. - 2016. - Vol. 1. - P. 51-54.
17. Аврамова, Н. С. Технологические схемы разработки наклонных залежей с использованием фрезерного комбайна / Н. С. Аврамова // Проблемы машиноведения и машиностроения. - 2006. - № 35. - С. 149-152.
18. Пихлер, М. Направление совершенствования и результаты применения комбайнов Wirtgen Surface Miner на карьерах и разрезах мира / М. Пихлер, Ю.Б. Панкевич // Горная промышленность. - 2000. - № 3. - 42 с.
19. Шевченко, А.Г. Безвзрывная разработка бокситовых руд комбайнами Wirtgen Surface Miner расширяет сырьевую базу рудника Дебеле (Гвинея) / А.Г. Шевченко, М. Пихлер, Ю.Б. Панкевич // Горная промышленность. - 2003. - № 2. - С. 44-45.
20. Райков, А.Б. Новый карьерный комбайн Wirtgen 2200 SM в Республике Гвинея / А.Б. Райков, А.Г. Шевченко, А.М. Панченко [и др.] // Горная промышленность. - 2002. - № 1. - С. 5.
21. Volk, H.-J. Wirtgen Drivers the Development of Surface Mining / H.-J.Volk // Procedia Engineering. - 2016. - Vol. 138. - P. 30-39.

REFERENCES

1. Arsentev A.I. Quarry productivity. Mining in-t im. G.V. Plekhanov (Technical University). -Saint Petersburg, 2002. - 85 p. (In Russ.).
2. Vu T., Bao T., Drebenstedt C., [et al.] Optimization of long-term quarry production scheduling under geological uncertainty to supply raw materials to a cement plant. *Mining Technology*. 2021; 130(3):146-58.
3. Trubeckoj K.N., Krasnyanskij G.L., Hronin V.V. Quarry Design: Textbook for Higher Education Institutions: In 2 vols. Moscow, 2001 (In Russ.).
4. Afeni T.B., Akeju V.O., Aladejare A.E. A comparative study of geometric and geostatistical methods for qualitative reserve estimation of limestone deposit. *Geoscience Frontiers*. 2021;12(1):243-53.
5. Dagdelen K., Asad M.W.A. Optimum cement quarry scheduling algorithm // K. Dagdelen, M.W.A. Asad // Proceedings of the 30th symposium on application of computers and operations research in the mineral industry, Phoenix, AZ: Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2002:697-709.
6. Zajackowski M. Technological and Economic Analysis of the Application of Surface Miner on the Example of a Limestone Deposit in Poland. *Inzynieria Mineralna*. 2021;2:237-42.
7. Pichler M., Il A.P., Linnemann N.M. Increasing the volume of limestone mining in Ukraine with the help of Wirtgen quarry miners without the use of drilling and blasting works. - Mining industry. 2019. - № 2 (144). - P. 64-66.
8. Oparin V.N., Mattis A.R. Non-explosive technologies of open production of solid minerals / V.N. Oparin, A.R. Mattis; Holes. Ed. by V.N. Oparin // Novosibirsk: SB RAS Publ., 2007. - 335 p.
9. Shemyakin S.A., Matveev D.N., Cheban A.Yu. Economic substantiation of the efficiency of non-explosive selective extraction of minerals and host rocks using technical and technological complexes based on milling combines / S.A. Shemyakin, D.N. Matveev, A.Yu. *Mining magazine*. - 2015. - № 2. - P. 43-46. - 2015. (In Russ.).
10. Fomin S.I., Vinogradov I.P. Analysis of blast-free high selective mining excavation technology using milling machines in open-cast mining of cement raw material deposits. *Cement and its use*. 2017;4:42-4 (In Russ.).
11. Shvabenland E. E. On the potential of milling combines of continuous action in the development of deposits by an open method / E. E. Shvabenland // Rational development of subsoil. - 2014. - № 1. - P. 54-60. (In Russ.).
12. Fomin S.I., Pasyнков D.V., Semenov A.S. Notes of the Mining Institute]. - 2009. - Т. 180. - P. 12-15. (In Russ.).
13. Reshetnyak S.P., Melikhov M.V. Justification of design of quarry board sites without safety berms] / S.P. Reshetnyak, M.V. Melikhov // Mining bulletin. Mining in the XXI century: technology, science, education. - 2015. - № 60-1. - S. 439-448.
14. Bralic N, Malvic T. Cement Raw Material Reserve Calculation-Geological Sections vs. Structural Maps Approaches, Case Study from Southern Croatia. *Minerals*. 2022;12(8):1056.
15. Jovanovic, B., Technical Project for Limestone and Overburden Exploitation at the Open Pit Mutalj - I Stage // Mining Institute I.I.c. Belgrade. 2014; 1:112-19.

16. Jovanovic B, Milosevic D, Canovic V, [et al.] Management of the limestone mining and deposition process at the open pit 'Mutalj' for the purpose of achieving the necessary quality. *Mining and Metallurgy Engineering Bor*. 2016;(1):51-4.
17. Avraamova NS. Technological schemes for the development of sloping deposits with the use of a Surface miner. *Problems of Mechanical Science and Engineering*. 2006; 35:149-52. (In Russ.).
18. Pikhler M, Pankevich Yu.B. Direction of improvement and results of the use of Wirtgen Surface Miners in quarries and open-pit mines of the world / M. Pikhler, Pankevich Yu. Mining industry. - 2000. - № 3. - 42 p. (In Russ.).
19. Shevchenko AG, Pihler M, Pankevich YyB. Blast-free mining of bauxite ores with Wirtgen Surface Miners expands the raw material base of the Debele mine in Guinea. *Mining industry*, 2003; 2:44-5 (In Russ.).
20. Raikov A.B., Shevchenko A.G., Panchenko A.M. [and others]. New Wirtgen 2200 SM surface miner in the Republic of Guinea // *Mining Industry*. - 2002. - № 1. - P. 5. (In Russ.).
21. Volk H-J. Wirtgen Drivers the Development of Surface Mining. *Procedia Engineering*. 2016; 138:30-9.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ



Фомин Сергей Игоревич:
доктор технических наук,
профессор,
кафедра разработки месторождений полезных
ископаемых,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: fominsi@mail.ru,
Scopus ID: 57193997360,
ORCID ID 0000-0002-0939-1189



Лелен Алекса:
аспирант,
кафедра разработки месторождений полезных
ископаемых (РМПИ),
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург,
e-mail: s215134@stud.spmi.ru,
ORCID ID 0000-0003-1358-1142,
WoS ResearcherID AFC-7785-2022

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fomin Sergey Igorevich:
D.,
Professor,
the Department of Mineral Deposits Development,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining
University, 1
St. Petersburg, Russia,
e-mail: fominsi@mail.ru
Scopus ID: 57193997360,
ORCID ID 0000-0002-0939-1189

Ljelen Aleksa :
Phd - student,
the Department of Mineral Deposits Development,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining
University,
St. Petersburg, Russia,
e-mail: s215134@stud.spmi.ru,
ORCID ID 0000-0003-1358-1142,
WoS ResearcherID AFC-7785-2022

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION:

Фомин Сергей Игоревич — разработка концепции исследования, постановка задачи, валидация результатов исследования, корректирование текста статьи; Лелен Алекса — детальная проработка концепции исследования, техническая реализация и проведения расчетов в рамках исследования, написание текста статьи / Fomin Sergey Igorevich — development of the research concept, problem statement, validation of research results, correction of the text of the article; Lelen Alexa — detailed elaboration of the research concept, technical implementation and calculations within the framework of the study, writing the text of the article.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

ГЛАВНАЯ | НОВОСТИ | ОБЗОРЕНИЕ | СТАТЬИ | ВЫПУСК ЖУРНАЛА | ИНФОРМАЦИЯ | О ЖУРНАЛЕ | КОНТАКТЫ

МАРКШЕЙДЕРИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

№ 1 (129) 2024 г | № 2 (130) 2024 г | № 3 (131) 2024 г | № 4 (132) 2024 г

(915) 111-03-86

www.n-gn.ru



МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ МУЗЕЙ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Минералогический музей был основан в 1785 году и ведет свое начало от Кабинета естественной истории Учительской семинарии. Музей обладает старейшей минералогической коллекцией в России. В формировании эталонной коллекции минералов принимали участие знаменитые ученые: Д.И. Менделеев, Э.К. Гофман и другие. Фонды музея насчитывают более 30 тысяч образцов (870 минеральных видов), составляющих следующие коллекции: систематическая (по минеральным видам), мемориальные коллекции (Д.И. Менделеева, Э.К. Гофмана, архиепископа Нила и других), коллекция метеоритов, фотоиллюстративный фонд, фонд рукописных и полевых материалов, фонд справочной и вспомогательной литературы. В музее хранятся минералы, из которых Д.И. Менделеевым и последующими учеными были получены новые химические элементы. Коллекция алмазов и сопутствующих минералов из Кимберли, ЮАР, приобретенная Э.К. Гофманом в XIX веке, позволила в стенах кафедры минералогии ЛГУ создать метод поиска алмазов по сопутствующим минералам. С помощью этого метода было открыто первое коренное месторождение алмазов в СССР.

Адрес:

г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9
spbu.ru, excursions@spbu.ru

+7 (812) 328-94-81, +7 (931) 007-79-01

Часы работы

Прием посетителей организован по сеансам в группах до 10 человек с экскурсионным обслуживанием

Время проведения сеансов

вт – 12:00, чт – 16:00; время проведения сеансов с экскурсионным обслуживанием для организованных групп по предварительной записи

Последний четверг каждого месяца – санитарный день



WWW.N-GN.RU



РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ

Информируем Вас

Факультет Инженерная академия специальность **Геология**

Целью обучения является подготовка квалифицированных специалистов в области геологии, способных разрабатывать инновационные методы решения производственных задач в области поиска и разведки месторождений нефти, газа и твердых полезных ископаемых.

Во время обучения студенты получают знания, формируют навыки и умения в области анализа современного состояния и актуальных проблем геологической науки, поиска и изучения геологической, геофизической, геохимической информации и космических снимков, применения методов комплексных геолого-геофизических исследований, создания трехмерных геологических моделей, приобретают опыт самостоятельной научно-исследовательской, прикладной и педагогической работы. Задачи обучения направлены на привитие навыков ориентирования в аналоговых и цифровых геологических данных, формирование представлений о назначении инновационных методов геолого-геофизических исследований и обработки информации, развитие навыков применения инновационных методов прогноза месторождений полезных ископаемых и ориентирования в специализированных программах при эффективном использовании их возможностей.

Контакты : 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6. Приемная комиссия (Граждане РФ) +7 (495) 433-95-88,
+7 (495) 787-38-27 доп.: 1214. priem@rudn.ru. КОНТАКТ-ЦЕНТР: +7 (499) 936-87-87. information@rudn.ru



WWW.N-GN.RU



24-я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА

ИНДУСТРИЯ КАМНЯ

ДОБЫЧА ОБРАБОТКА ПРИМЕНЕНИЕ

Россия, Москва

 **КРОКУС ЭКСПО**
Международный выставочный центр

павильон 2
залы 5 и 6

**25-27
ИЮНЯ
2024**

WWW.STONEFAIR.RU



9 – 10 октября 2024

Москва, Россия

Рэдиссон Славянская



**20-Й ГОРНЫЙ ФОРУМ
И ВЫСТАВКА**

minexrussia.ru