



Федеральное бюджетное учреждение науки  
Институт горного дела  
Уральского отделения Российской академии наук

В НОМЕРЕ:

- Теория проектирования и геотехнологические проблемы отработки месторождений полезных ископаемых
- Геомеханические и геодинамические процессы при освоении недр
- Экологические проблемы горнопромышленных комплексов и природопользования
- Обогащение полезных ископаемых
- Новые методы исследований

СЕТЕВОЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЕ НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ISSN 2313-1586

# ПРОБЛЕМЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

## PROBLEMS OF SUBSOIL USE



Сайт  
<http://trud.igduran.ru>

Выпуск 1 (44)

2025

16+

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт горного дела Уральского отделения РАН

№ государственной регистрации Эл № ФС77-56413 от 11.12.2013

Выходит 4 раза в год только в электронном виде

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

С.В. Корнилков, д.т.н., проф., г.н.с., ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург – главный редактор  
В.М. Аленичев, д.т.н., проф., г.н.с., ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург – зам. главного редактора

**Члены редакционной коллегии:**

Н.Ю. Антонинова, к.т.н., заведующая лабораторией ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург  
А.А. Абдурасулов, к.ф.-м.н., советник ректора, доцент, Таджикский технический университет имени академика  
М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан  
Н.Г. Валиев, д.т.н., проф., заведующий кафедрой горного дела УГГУ, г. Екатеринбург  
С.Д. Викторов, д.т.н., проф., заведующий отделом проблем геомеханики и разрушения горных пород ИПКОН РАН,  
г. Москва  
С.Е. Гавришев, д.т.н., проф., заведующий кафедрой разработки полезных ископаемых, МГТУ им. Носова,  
г. Магнитогорск  
С.Ж. Галиев, д.т.н., проф., чл.-корр. НАН РК, вице-президент АО «Казахстанский институт развития индустрии»  
Министерства индустрии и новых технологий Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан  
А.В. Глебов, д.т.н., заместитель директора ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург  
Ш.Ш. Заиров, д.т.н., проф., Навоийский государственный горный институт, г. Навои, Республика Узбекистан  
О.В. Зотеев, д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления ИГД УрО РАН  
И. В. Зырянов, д.т.н., заведующий кафедрой горного дела политехнического института (филиал) СВФУ в г. Мирном  
В.С. Коваленко, д.т.н., проф., Горный институт НИТУ «МИСиС», г. Москва  
К.Ч. Кожогулов, д.т.н., проф., чл.-корр НАН КР, директор Института геомеханики и освоения недр НАН КР,  
г. Бишкек, Киргизская Республика  
И.А. Козлова, к.г.-м. н, директор института геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург  
И.Л. Кравчук, д.т.н. директор Челябинского Филиала института горного дела УрО РАН, г. Челябинск  
М.В. Курленя, д.т.н., проф., академик, научный руководитель ИГД СО РАН, г. Новосибирск  
Ю.Г. Лаврикова, д.э.н., проф., директор Института экономики УрО РАН, г. Екатеринбург  
С.В. Лукичев, д.т.н., проф., директор ГоИ КНЦ РАН, г. Апатиты  
А.М. Макаров, д.т.н., проф., исполнительный директор ООО НИИОГР, г. Челябинск  
А.А. Панжин, к.т.н., ученый секретарь ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург  
А.Е. Пелевин д.т.н., проф. кафедры обогащения полезных ископаемых УГГУ, г. Екатеринбург  
И.Ю. Рассказов, д.т.н., чл.-корр. РАН, директор Хабаровского федерального научного центра, г. Хабаровск  
Л.С. Рыбникова, д.т.н., с.н.с. ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург  
Д.И. Симисинов., д.т.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург  
И.В. Соколов, д.т.н., директор ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург  
С.М. Ткач, д.т.н., директор ИГДС СО РАН, г. Якутск  
С.И. Фомин, д.т.н., проф. кафедры, НМСУ «Горный», г. Санкт-Петербург  
Хадхуугийн Жаргалсайхан, д.т.н., директор Института горного дела Монгольского государственного университета  
науки и технологий, г. Улан-Батор, Монголия  
Л.С. Шамганова, д.т.н., член-корреспондент НАН РК, Институт горного дела им. Д.А. Кунаева, Национальный центр по  
комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан  
В.Л. Яковлев, д.т.н., проф., чл.-корр. РАН, советник РАН, ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург

Издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт горного дела Уральского отделения РАН

*Все статьи проходят обязательное рецензирование*

Адрес редакции: 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, д. 58, тел. (343)350-35-62

Сайт издания: [trud.igduran.ru](http://trud.igduran.ru)

Выпускающий редактор: Е.А. Катаева

Редактор: О.А. Истомина

Компьютерный набор и верстка: Я.В. Неугодникова, Т.Г. Петрова

*Уважаемые читатели журнала!*

Предлагаем вам первый выпуск издания «Проблемы недропользования» за 2025 год. Этот номер посвящен итогам XIX Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования», которая традиционно проводится с 2007 года в Институте горного дела УрО РАН. Конференция призвана способствовать междисциплинарному диалогу в области недропользования для создания прорывных технологий, а также стать площадкой для повышения квалификации молодых специалистов производства, молодых ученых, аспирантов и студентов!

Конференция прошла в очном формате в Институте горного дела УрО РАН, а также в дистанционном формате на площадках в городах Апатиты, Хабаровске, Перми, Новосибирске и Якутске, объединенных посредством телемоста.

Основная цель конференции — междисциплинарный диалог в области недропользования для создания прорывных технологий. Кроме того, конференция стала площадкой для повышения квалификации молодых специалистов производства, молодых ученых, аспирантов и студентов по вопросу импортозамещения в недропользовании.

Исследованиям в данном направлении посвящен наш номер, тематика которого освещает, кроме того, основные рубрики журнала и знакомит читателя с результатами исследований молодых ученых в области теории проектирования, геотехнологических проблем отработки месторождений, геомеханических и геодинамических процессов при освоении месторождений, экологических проблем горнопромышленных комплексов и природопользования, обогащения полезных ископаемых, методов исследования.

*Редколлегия*

## Содержание

### ТЕОРИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

<b>Возняк М.Г.</b> Процесс управления качеством руды на роботизированном горном предприятии .....	<b>6</b>
---	----------

### ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОСВОЕНИИ НЕДР

<b>Корнилков С.В., Харисов Т.Ф., Масальский Н.А., Коптяков Д.А.</b> Исследование физико-механических свойств пород прибортового массива карьера ПАО «Ураласбест».....	<b>16</b>
<b>Усанов С.В., Коновалова Ю.П., Ногин С.А., Зотов Д.С.</b> Систематизация данных многолетнего мониторинга развития сдвижения на Песчанском скарново-магнетитовом месторождении .....	<b>25</b>
<b>Ушаков Е.М.</b> Исследование зон концентрации напряжений на контуре очистных выработок полигональной формы при отработке мощных рудных месторождений .....	<b>36</b>
<b>Федорин В.А., Шишков Р.И., Татарина О.А.</b> Анализ геотехнологической оценки запасов угольных месторождений Терсинского ГЭР Кузбасса.....	<b>44</b>
<b>Ломов М.А., Бурдинская А.А.</b> Экспериментальные исследования удароопасности на рудниках Дальневосточного региона .....	<b>53</b>

### ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

<b>Дрибан В.А., Хохлов Б.В., Антипенко А.В.</b> Оценка рисков провалообразования при затоплении угольных шахт.....	<b>65</b>
<b>Константинов А.В., Ломов М.А.</b> Применение методов кластерного анализа для выделения акустически активных зон .....	<b>78</b>
<b>Потурай В.А.</b> Состав углеводородов в углекислых минеральных водах .....	<b>89</b>
<b>Янников А.М., Янникова С.А., Корепанов А.Ю.</b> Моделирование гидродинамического режима верхнекембрийских водоносных комплексов в процессе эксплуатации трубки «Нюрбинская» (Западная Якутия) .....	<b>99</b>

### ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

<b>Горячев А. А.</b> Извлечение цветных металлов из аллювиальных техногенных песков методом низкотемпературного обжига с сульфатом аммония .....	<b>115</b>
<b>Драпей А. В., Козловская М.М., Мисютинская В.А., Прохоров К.В.</b> Исследование влияния различных реагентных режимов на флотационное извлечение полезных компонентов из пробы руды месторождения Маломыр».....	<b>124</b>

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

<b>Хасанов Д.Н.</b> Методы повышения точности фотограмметрии открытых горных работ.....	<b>135</b>
<b>Леуткин А.А., Кордубайло А.О.</b> Анализ эффективности систем охлаждения электромагнитного молота.....	<b>147</b>



**ТЕОРИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ  
ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

УДК 622.012:681.3.01:519.67

**Возняк Мария Григорьевна**  
научный сотрудник,  
Горный институт КНЦ РАН,  
184209 Мурманская обл.,  
г. Апатиты, ул. Ферсмана, 24

### ПРОЦЕСС УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ РУДЫ НА РОБОТИЗИРОВАННОМ ГОРНОМ ПРЕДПРИЯТИИ

#### *Аннотация:*

*Проблема обеспечения качества продукции горных предприятий всегда являлась наиболее важной и затрагивала интересы почти всех перерабатывающих производств. На каждом предприятии данная проблема решается индивидуально, но чаще сводится к применению программных модулей для оптимизации рудопотоков. Такие модули обычно представляют собой интеграционное решение, объединяющее имеющиеся на предприятии систему диспетчеризации и систему горно-геологического обеспечения. Учитывая активное внедрение в технологические процессы горного производства различных автоматизированных систем, было бы актуальным представить место процесса управления качеством руды на новом этапе развития горного производства, т.е. на полностью роботизированном предприятии.*

*В статье проведен анализ распространенных проблем, связанных с усреднением качества руды на современных горнодобывающих предприятиях, выявлены основные принципы работы интеграционных решений для оптимизации подачи руды на обогащение, составлена схема потоков данных и схема процесса оптимизации подачи руды на обогащение на цифровом горнодобывающем предприятии.*

*Ключевые слова: роботизированная система, автоматизированная система, управление горным предприятием, роботизированное управление, человеческий фактор, обмен данными, структура управления горным предприятием, киберфизические системы, интернет вещей, управление качеством руды, оптимизация подачи руды.*

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.006

**Wozniak Maria G.**  
Researcher,  
Mining Institute of the KSC RAS,  
24 Fersman Str., 184209 Apatity,  
Murmansk Region

### ORE QUALITY MANAGEMENT PROCESS AT THE ROBOTIC MINING FACILITY

#### *Abstract:*

*The problem of ensuring the quality of mining enterprises' products has always been the most important and has affected the interests of almost all processing industries. At each enterprise, this problem is solved individually, but more often it comes down to the use of software modules to optimize ore flows. Such modules are usually an integration solution that combines the dispatching system and the mining and geological support system available at the enterprise. Given the active introduction of various automated systems into the technological processes of mining, it would be relevant to imagine the place of the ore quality management process at a new stage in the development of mining, i.e. at a fully robotic enterprise.*

*The article analyzes common problems related to ore quality averaging in modern mining enterprises, identifies the basic principles of integration solutions for optimizing ore supply for enrichment, draws up a data flow diagram and a process diagram for optimizing ore supply for enrichment in a digital mining enterprise.*

*Key words: robotic system, automated system, mining enterprise management, robotic management, human factor, data exchange, mining enterprise management structure, cyber-physical systems, Internet of Things, ore quality management, ore feed optimization.*

### *Введение*

В условиях изменчивости содержания полезного компонента на различных участках месторождения стабилизация качества сырья является актуальной задачей для горной промышленности. Стабильное качество поставляемого рудниками сырья определяет минимизацию затрат на выпуск товарной продукции обогатительными фабриками. На сегодняшний день неотъемлемой частью работы горнодобывающих предприятий является управление качеством минерального сырья на стадии планирования и непосредственной добычи, это позволяет оптимизировать всю производственную цепочку и сни-

зять эксплуатационные затраты на производство концентрата с определенными параметрами. Однако на современных горнодобывающих предприятиях существует ряд проблем, связанных с усреднением качества руд, для устранения которых применяются различные методы и технологии.

### *1. Распространенные проблемы, связанные с усреднением качества руды, и способы их устранения*

Наиболее распространенные проблемы, связанные с усреднением качества руды на горнодобывающих предприятиях:

- Отставание от потребностей рудника химического анализа проб отбитой горной массы. Из-за низкой оперативности анализа рудники получают его результаты в лучшем случае через сутки после опробования. Таким образом, информация о качестве руды в потоке отстает от выполнения добычных работ, последующих производственных процессов и процессов перевозки руды. Как следствие отсутствует своевременная информация о характеристиках рудной массы в конкретных пунктах, а управление производством осуществляется исходя из визуальной оценки массива геологом и общих представлений о реальной ситуации.

- Отсутствие сквозной, оперативно действующей системы информации о качестве руды по всей технологической цепи, начиная от опробования рудного тела и отбитой руды по каждому забою и заканчивая складами и рудопотоками на поверхности.

- Недостоверность анализа качества руд на обогатительных фабриках, имеющих относительно большую хрупкость и меньшую прочность, которые образуют в навале рудной массы менее крупные куски и большее количество мелочи, чем окружающие их горные породы. За счет этого в процессе дробления рудной массы на фабрике руды более высокого качества проходят все стадии дробления быстрее прочих и раньше попадают на анализ состава руды. Это приводит к недостоверным результатам анализа пробы относительно всего объема прибывшей рудной массы.

- Отсутствие информационной системы, позволяющей обеспечить визуализацию информации о процессах усреднения руды в единой диспетчерской. Обычно автоматизированным процессом является получение исходной информации о статусе каждой единицы оборудования с помощью различных датчиков. Остальные процессы диспетчеризации осуществляются практически в ручном режиме.

Проблемы, связанные с анализом качества, обычно разрешаются на предприятиях методами оперативного распознавания состава руды и процессом предконцентрации.

В настоящее время отечественные и зарубежные компании выпускают как стационарные, так и портативные аппараты для экспресс-анализа минеральных сред. Естественно, что информация, получаемая на портативных аппаратах, менее точная, чем на стационарных установках, тем более что они работают не на специально подготовленных порошковых пробах, а на кусковом материале и в массиве горных пород. Но главное их достоинство – это быстрота и возможность получения большого массива статистических данных за относительно короткие сроки, что необходимо для оперативного управления производством.

Для устранения проблемы недостоверности анализа качества руд на обогатительных фабриках принято использовать варианты технологии с разделением по типам и сортам руды. Разделение компонентов рудной массы может производиться на базе непосредственного использования различия определенных свойств полезных ископаемых и засоряющих их горных пород. Процесс предконцентрации максимально автоматизируется с применением специальных сепараторных устройств. В основу процессов предконцентрации закладываются устойчивые корреляционные связи между определенными

физическими характеристиками и вещественным составом горных пород, а также степень различия этих характеристик между разделяемыми компонентами рудной массы. Разделение компонентов рудной массы может производиться на базе непосредственного использования различия каких-то свойств полезных ископаемых и засоряющих их горных пород. Это позволяет отделять наиболее богатую часть рудной массы путем ее грохочения. Кроме того, используя различие в удельном весе руды и пустой породы, возможно разделение руды и пустых пород в плотной жидкой среде, например, в процессе гидроподъема рудной массы на поверхность или, по аналогии с обогащением в тяжелых средах, в специальных емкостях, отделяя наиболее доступную в этих условиях часть пустых пород.

Проблема отсутствия информационной системы, позволяющей оперативно получить достоверную информацию о характеристиках руды по всему диапазону шахтного поля и по всей технологической схеме рудника, устраняется применением различных интеграционных решений, обеспечивающих взаимосвязь двух систем рудника – диспетчеризации и системы горно-геологического обеспечения горных работ.

## *2. Принцип работы интеграционных модулей для оптимизации подачи руды на обогащение, применяемых на современных горнодобывающих предприятиях*

Разработкой модулей, обеспечивающих взаимосвязь диспетчерской системы и горно-геологической информационной системы (ГГИС), применяемой на руднике, занимаются различные компании - промышленные интеграторы. Разрабатываемые модули оптимизации подачи руды обычно базируются на работе с поступающими из ГГИС данными о содержании полезного компонента в блочных моделях выемочных единиц и рудного склада. При проведении оперативного опробования кускового материала в массиве горных пород посредством экспресс-анализаторов полученный массив статистических данных за относительно короткие сроки позволяет формировать достаточно точные блочные модели выемочных единиц, которые необходимы для дальнейшего оперативного управления производством.

На основе имеющихся данных о целевом содержании полезного компонента в руде и данных о доступности технологического оборудования, получаемых от диспетчерской системы или ГГИС, посредством интеграционного модуля для оптимизации подачи руды подготавливаются графики работ, после чего выполняется поиск оптимизированных маршрутов с рудника на фабрику или склад. Далее, основываясь на этих данных, формируются сменно-суточные задания для попадающих в план работ исполнителей. Определенные системой варианты заданий передаются в исполнительную систему/систему диспетчеризации (рис. 1).

Таким образом, современное решение по оптимизации подачи руды на обогащение представляет собой сложный комплекс систем. Внедрение такого комплекса повышает коэффициент извлекаемости полезных ископаемых (ПИ), сокращая операционные расходы на транспортировку и снижая потери ПИ в процессе обогащения и обычно требует значительно меньших вложений средств, чем усреднительный склад. Однако для эффективной и точной работы системы и обогатительной фабрики требуется разработать и внедрить целый комплекс регламентов, который бы позволял эффективно управлять процессом. Помимо этого, интеграционные решения имеют и недостатки, например, может присутствовать несогласованность интегрируемых данных, вследствие отсутствия в компании единой системы управления ими, или закрытость служб сопровождения и разработчиков интегрируемых информационных систем. Особенно этот вопрос актуален сейчас, когда зарубежные производители программ отказываются осуществлять их поддержку. Это может затруднить интеграцию и последующие доработки в рамках комплекса программных систем.

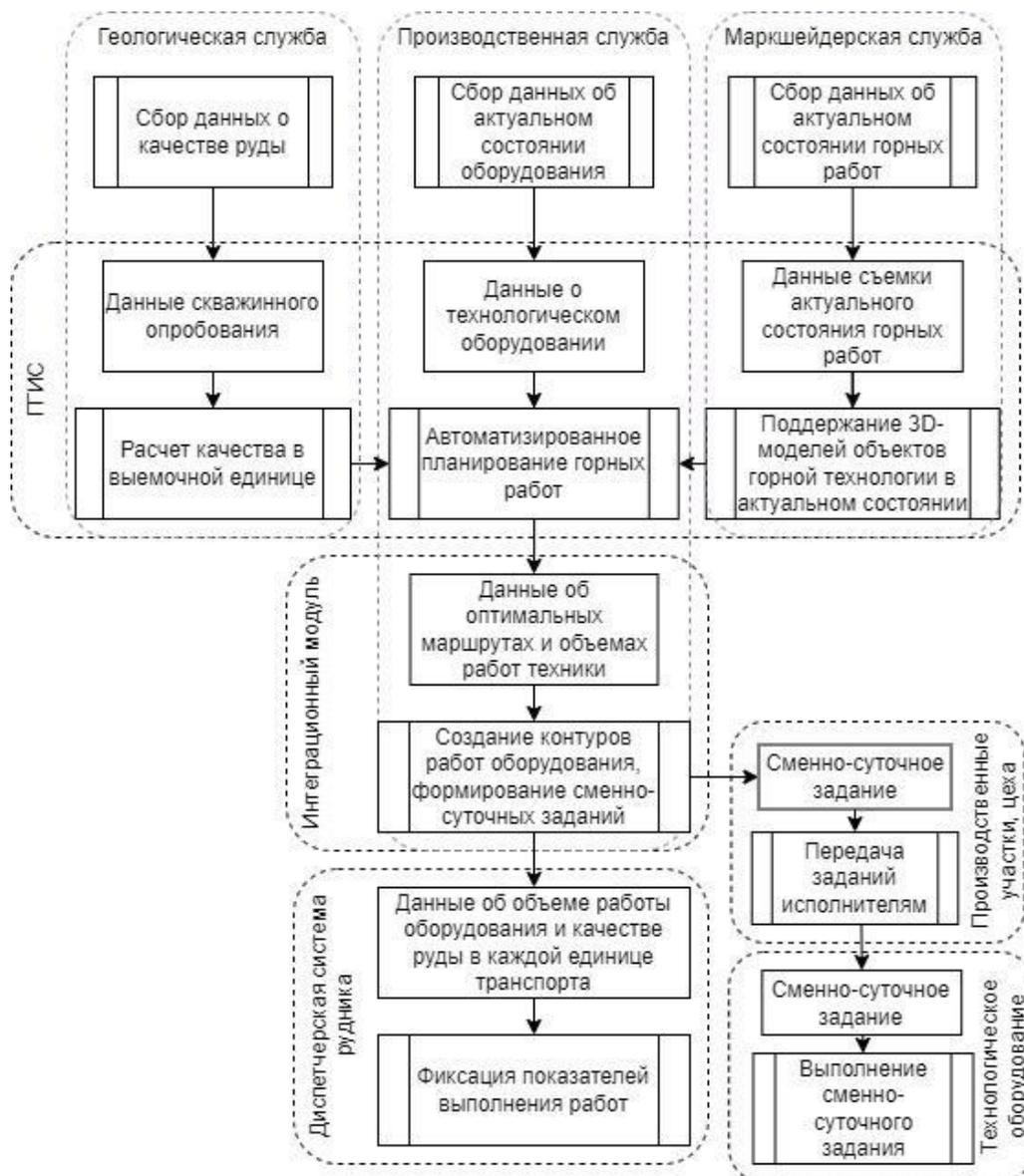


Рис. 1. Принцип работы интеграционных решений для оптимизации подачи руды на обогащение

### 3. Процесс управления качеством руды на роботизированном горном предприятии

В настоящее время наблюдается быстрый рост применения цифровых технологий во многих областях человеческой деятельности. Горная промышленность не стала исключением, и находится в процессе внедрения автоматизированной и роботизированной техники практически во все технологические процессы горных работ. Основными движущими силами этого процесса являются повышение экономической эффективности производства и исключение необходимости присутствия человека в местах с опасными условиями труда.

Очевидно, на полностью роботизированном производстве современная структура управления претерпит значительные изменения, так, например, не будет необходимости в организации некоторых функциональных служб, подразделений и производственных участков, их задачи могут быть выполнены автоматически по данным, получаемым от

систем управления и мониторинга технологических процессов. Для мониторинга и выработки управляющих воздействий такая система цифрового управления будет отслеживать ход выполнения производственных процессов и предоставлять необходимые данные о динамике их показателей, состоянии технических средств, оборудования и выработанного пространства, инфраструктурных объектов, формируя связную совокупность киберфизических систем и цифровых двойников объектов и процессов горного производства.

Перенос на особенности горного производства общие технологические предпосылки появления киберфизических систем, можно выделить следующие этапы их формирования:

1. Увеличение количества устройств со встроенными процессорами и системами хранения данных: сети мониторинга геомеханических, аэрологических параметров; горное оборудование с микроконтроллерами управления отдельными подсистемами; маркшейдерские и геологические приборы для съемки и опробования и т.д.

2. Интеграция, позволяющая добиться большего эффекта методом объединения ряда отдельных компонентов в единую систему: промышленный интернет вещей и цифровое подключение – системы диспетчеризации и мониторинга горнотранспортного оборудования; сети интеллектуальных сенсоров; умные среды горного предприятия. Цифровое подключение персонала, все еще остающегося в пространстве ведения работ.

3. Вывод человека из контуров управления технологическими процессами и горным предприятием в целом из-за ограничения когнитивных способностей человека, которые эволюционируют медленнее, чем развиваются возможности алгоритмов искусственного интеллекта. При этом – усиление аналитических способностей человека с помощью цифровых помощников и создание интерактивных систем в контуре управления на высших уровнях.

Таким образом, начиная со второго, а в основном на третьем этапе проектирование, планирование, управление горными работами, мониторинг природных и техногенных процессов, собственно технические средства и оборудование будут формировать единую роботизированную систему, автоматически адаптирующуюся к изменяющимся горно-геологическим и горнотехническим условиям по мере развития горных работ, представляя собой комплекс цифровых двойников объектов и процессов горной технологии, т.е. цифровое горнодобывающее предприятие. Цифровое горнодобывающее предприятие – это предприятие, в котором процессы добычи, транспортировки и переработки полезных ископаемых полностью автоматизированы, и управление развитием горных работ, технологическими комплексами геологоразведочного, горного, транспортного, дробильно-размольного, обогатительного и вспомогательного оборудования обеспечивается с использованием искусственного интеллекта (ИИ), методов обработки больших массивов данных (*BIG DATA*), прогнозной аналитики, интернета вещей в едином цифровом и информационном пространстве на основе непрерывно обновляемого цифрового двойника предприятия с применением онлайн мониторинга состояния всех горных выработок, оборудования и персонала. Обобщенная схема потоков данных на цифровом горнодобывающем предприятии, иллюстрирующая этот процесс, приведена на рис. 2.

Основные задачи, необходимые для управления качеством руды, будут выполняться искусственным интеллектом на основе данных, получаемых от технологического оборудования. Схема процесса оптимизации подачи руды на обогащение на цифровом горнодобывающем предприятии изображена на рис. 3



Рис. 2. Обобщенная схема потоков данных на цифровом горнодобывающем предприятии



Рис. 3. Схема процесса оптимизации подачи руды на обогащение на цифровом горнодобывающем предприятии

Данные, собранные во время бурения скважин и экспресс-анализа качества массива, обеспечивают облако выборки по конкретным измеренным показателям для последующего прогнозирования гранулометрического и качественного состава породы в развале. Блочная модель, построенная на основе полученной информации, может учитывать качественные, прочностные характеристики и все структурные нарушения, обнаруженные в массиве горных пород. Такие блочные модели будут строиться по всем выемочным единицам, и на их основе будет производиться планирование работ, а также определение оптимальных маршрутов техники. На основе данных, содержащихся в блочных моделях, будет выполняться прогнозирование качественного состава руды в каждой единице рудничного транспорта. Некоторые функции диспетчерской системы не будут актуальны при работе цифрового горнодобывающего предприятия, однако их часть, например, фиксация показателей выполнения работ и статусов оборудования, а также передача заданий на исполнительную технику будет выполняться посредством алгоритмов искусственного интеллекта. Зафиксированные системой результаты работ будут использованы для

последующего планирования. При анализе этих особенностей обмена данными на цифровом горнодобывающем предприятии становится ясно, что в процессе оптимизации подачи руды на обогатительную фабрику не будет недостатков, связанных с интеграционными решениями, т.к. данный процесс будет являться естественной частью единой роботизированной системы.

### Заключение

В результате анализа принципов работы интеграционных решений для оптимизации потоков руды на современных горнодобывающих предприятиях было выявлено, что внедрение такого сложного комплекса систем позволяет повысить коэффициент извлекаемости ПИ, сократить операционные расходы на транспортировку и снизить потери ПИ в процессе обогащения. Но для эффективной и точной работы системы и обогатительной фабрики требуется разработать и внедрить целый комплекс регламентов, который бы позволял эффективно управлять процессом. Помимо этого, интеграционные решения имеют и недостатки, например, может присутствовать несогласованность интегрируемых данных вследствие отсутствия в компании единой системы управления ими или закрытость служб сопровождения и разработчиков интегрируемых информационных систем. Однако на полностью роботизированном производстве современная структура управления претерпит значительные изменения и с учетом особенностей обмена данными на цифровом горнодобывающем предприятии становится ясно, что в процессе оптимизации подачи руды на обогатительную фабрику не будет недостатков, связанных с интеграционными решениями, т.к. данный процесс будет являться естественной частью единой роботизированной системы.

### Список литературы

1. Решетняк С.П., 2012. Основные проблемы проектирования карьеров нового поколения. *Записки горного института*, Т. 197, С. 154-158.
2. Кубрин С.С., 2016. Автоматизированная система управления горным производством как платформа комплексирования технологических стадий и операций в единый технологический процесс. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11, С. 96-107.
3. Michael J. de C Henshaw, 2017. «*Cyber-physical systems. What will the merger of the Internet of people, things and services lead to?*», available at: [www.tadviser.ru](http://www.tadviser.ru),
4. Alexopoulos K., Sipsas K., Xanthakis E., Makris S., Mourtzis D., 2018. An industrial Internet of Things based platform for context-aware information services in manufacturing. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, no. 31, pp.1111–1123.
5. Monostori L., 2018. Cyber-physical systems theory and application. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1199 p.
6. Nikolakis N., Sipsas K., Makris S., 2018. A cyber-physical context-aware system for coordinating human-robot collaboration. *Procedia CIRP*, no. 72, pp. 27–32.
7. Nikolakis N., Kantaris G., Bourmpouchakis K., Alexopoulos K., 2020. A cyber-physical system approach for enabling ventilation on-demand in an underground mining site. *Procedia CIRP*, no. 97, pp. 487–490.
8. Анистратов Ю.И., Анистратов К.Ю. и др., 2019. *Открытые горные работы – XXI век*. Справочник. Том 2. Под ред. К.Ю. Анистратова Москва: ООО «Система максимум», 872 с.
9. Гришин Е.Л., Трушкова Н.А., 2018. Обеспечение безопасности ведения горных работ в современных условиях добычи полезных ископаемых. *Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр.* Вып. 16. Пермь: ГИ УРО РАН, С. 254-257.
10. Наговицын О.В., Возняк М.Г., 2021. К вопросам управления роботизированным горнодобывающим предприятием. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5-1, С. 326-335.

11. Приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 N 505 "Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых" (Зарегистрировано в Минюсте России 21.12.2020 № 61651) URL: [https://vgsch.organizations.mchs.gov.ru/uploads/resource/2024-02-21/normativnaya-dokumentaciya\\_17085208501138992792.pdf](https://vgsch.organizations.mchs.gov.ru/uploads/resource/2024-02-21/normativnaya-dokumentaciya_17085208501138992792.pdf) (дата обращения 14.02.2025)

12. *Безопасность при взрывных работах*: Сборник документов. Серия 13. Выпуск 1. 2-е изд., испр. и доп. Москва: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2009, 232 с.

13. *Инструкция по охране труда и технике безопасности водителей самосвалов*. Санкт-Петербург: Группа компаний «КаршМаш», 2018, 60с.

## References

1. Reshetnyak S.P., 2012. Osnovnye problemy proektirovaniya kar'erov novogo pokoleniya [Main problems of designing quarries of new generation]. *Zapiski gornogo instituta*, Vol. 197, P. 154-158.

2. Kubrin S.S., 2016. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya gornym proizvodstvom kak platforma kompleksirovaniya tekhnologicheskikh stadii i operatsii v edinyi tekhnologicheskii protsess [Automated mining production management system as a platform for integrating technological stages and operations into a complex technological process]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 11, P. 96-107

3. Michael J. de C Henshaw, 2017. «Cyber-physical systems. What will the merger of the Internet of people, things and services lead to?», available at: [www.tadviser.ru](http://www.tadviser.ru),

4. Alexopoulos K., Sipsas K., Xanthakis E., Makris S., Mourtzis D., 2018. An industrial Internet of Things based platform for context-aware information services in manufacturing. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, no. 31, pp.1111–1123.

5. Monostori L., 2018. Cyber-physical systems theory and application. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1199 p.

6. Nikolakis N., Sipsas K., Makris S., 2018. A cyber-physical context-aware system for coordinating human-robot collaboration. *Procedia CIRP*, no. 72, pp. 27–32.

7. Nikolakis N., Kantaris G., Bourmpouchakis K., Alexopoulos K., 2020. Acyber-physical system approach for enabling ventilation on-demand in an underground mining site. *Procedia CIRP*, no. 97, pp. 487–490.

8. Anistratov Yu.I., Anistratov K.Yu. i dr., 2019. Otkrytye gornye raboty – XXI vek [Open-pit mining – the 21st century]. *Spravochnik*. Tom 2. Pod red. K.Yu. Anistratova Moscow: OOO "Sistema maksimum", 872 p.

9. Grishin E.L., Trushkova N.A., 2018. Obespechenie bezopasnosti vedeniya gornykh работ v sovremennykh usloviyakh dobychi poleznykh iskopaemykh [Ensuring the safety of mining operations in modern conditions of mining]. *Strategiya i protsessy osvoeniya georesursov: sb. nauch. tr. Vyp. 16*. Perm': GI URO RAN, P. 254-257.

10. Nagovitsyn O.V., Voznyak M.G., 2021. K voprosam upravleniya robotizirovannym gornodobyvayushchim predpriyatiem [To the issues of management of a standardized mining enterprise]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 5-1, P. 326-335.

11. Prikaz Rostekhnadzora ot 08.12.2020 N 505 "Ob utverzhdenii Federal'nykh norm i pravil v oblasti promyshlennoi bezopasnosti "Pravila bezopasnosti pri vedenii gornykh работ i pererabotke tverdykh poleznykh iskopaemykh" [Rostekhnadzor Order No. 505 dated 12/08/2020 "On Approval of Federal Norms and Rules in the field of industrial safety "Safety Rules for Mining and Processing of Solid Minerals"] (Zaregistrirovano v Minyuste Rossii 21.12.2020 № 61651) URL: <https://vgsch.organizations.mchs.gov.ru/uploads/resource/>



---

2024-02-21 normativnaya-dokumentaciya\_17085208501138992792.pdf (data obrashcheniya 14.02.2025)

12. Bezopasnost' pri vzryvnykh rabotakh [Safety during blasting operations]: Sbornik dokumentov. Seriya 13. Vypusk 1. 2-e izd., ispr. i dop. Moscow: Zakrytoe aktsionernoe obshchestvo "Nauchno-tekhnicheskii tsentr issledovaniy problem promyshlennoi bezopasnosti", 2009, 232 p.

13. Instruktsiya po okhrane truda i tekhnike bezopasnosti voditelei samosvalov [Instructions on labor protection and safety for dump truck drivers stuff]. Sankt-Peterburg: Gruppy kompanii "KarshMash", 2018, 60 p.



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
ПРИ ОСВОЕНИИ НЕДР**

УДК 622.83:001.891.53

**Корнилков Сергей Викторович**  
доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник,  
Институт горного дела УрО РАН,  
г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [kornilkov@igduran.ru](mailto:kornilkov@igduran.ru)

**Харисов Тимур Фаритович**  
кандидат технических наук,  
заведующий лабораторией геомеханики  
подземных сооружений,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [timur-ne@mail.ru](mailto:timur-ne@mail.ru)

**Масальский Николай Александрович**  
лаборант,  
лаборатория геомеханики подземных  
сооружений,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [nmasalskiy01@mail.ru](mailto:nmasalskiy01@mail.ru)

**Коптяков Дмитрий Александрович**  
научный сотрудник,  
лаборатория геомеханики подземных  
сооружений,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [koptyakov\\_d@mail.ru](mailto:koptyakov_d@mail.ru)

**ИССЛЕДОВАНИЕ  
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ПОРОД ПРИБОРТОВОГО МАССИВА  
КАРЬЕРА ПАО «УРАЛАСБЕСТ»\***

*Аннотация:*

*Данное исследование посвящено анализу прочностных и деформационных характеристик горных пород Баженовского месторождения хризотил-асбеста, имеющих ключевое значение для эффективной и безопасной разработки. Работа основана на лабораторных испытаниях образцов пяти основных литологических типов пород (габбро, перидотиты, диориты, тальк-карбонатны и серпентиниты), отобранных в 2023 – 2024 гг. Целью исследования было уточнение прочностных характеристик, необходимых для расчета параметров взрывной подготовки массива, а также сопоставление полученных результатов с данными предыдущих исследований.*

*В работе подробно описана методика подготовки образцов, включающая отбор штучного материала, изготовление цилиндрических образцов и их испытания на одноосное сжатие и растяжение. Представлены результаты анализа, демонстрирующие изменчивость прочностных свойств пород, причем наибольшая изменчивость наблюдается у серпентинитов и тальк-карбонатных пород, что связано с их структурной неоднородностью и степенью серпентинизации. Проведен сравнительный анализ полученных данных с результатами исследований 2005*

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.016

**Kornilkov Sergey V.**  
Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Chief Researcher,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
620075, Yekaterinburg, Mamina-Sibiriyakst., 58  
e-mail: [kornilkov@igduran.ru](mailto:kornilkov@igduran.ru)

**Kharisov Timur F.**  
Candidate of Technical Sciences,  
Head of Laboratory of geomechanics  
of underground structures,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [timur-ne@mail.ru](mailto:timur-ne@mail.ru)

**Masalskiy Nikolay A.**  
Laboratory Assistant,  
Laboratory of geomechanics  
of underground structures,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [nmasalskiy01@mail.ru](mailto:nmasalskiy01@mail.ru)

**Koptyakov Dmitry A.**  
Researcher,  
Laboratory of geomechanics  
of underground structures,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [koptyakov\\_d@mail.ru](mailto:koptyakov_d@mail.ru)

**RESEARCH OF THE PHYSICO-MECHANICAL  
PROPERTIES OF ROCKS  
OF THE NEARBOARD ARRAY  
OF THE QUARRY OF PJSC «URALASBEST»**

*Abstract:*

*This study is devoted to the analysis of the strength and deformation characteristics of rocks from the Bazhenovskoe chrysotile asbestos deposit, which are of key importance for an efficient and safe mining. The work is based on laboratory tests of samples of five main lithological rock types (gabbro, peridotite, diorite, talc carbonate and serpentinite), selected in 2023 – 2024. The purpose of the study was to clarify the strength characteristics necessary for calculating the parameters of explosive preparation of the array, as well as to compare the results obtained with data from previous studies.*

*The paper describes in detail the method of sample preparation, including the selection of rough material, the manufacture of cylindrical samples and their testing for uniaxial compression and tension. The results of the analysis are presented, demonstrating the variability of the strength properties of rocks, with the greatest variability observed in serpentinites and talc carbonate rocks, which is associated with their structural heterogeneity and the degree of serpentinitization. A comparative analysis of the data obtained with the results of studies conducted in 2005 and 1984 is carried out. It was revealed that the samples taken in 2023 – 2024 have slightly reduced strength characteristics, which is explained by the presence of microcracks caused by*

\*Статья подготовлена в рамках реализации государственного задания № 075-00410-25 00 Г.р. № 1022040300093-0-1.5.1. Тема 3 (2025-2027).

и 1984 г. Выявлено, что образцы, отобранные в 2023 – 2024 гг., имеют несколько сниженные прочностные характеристики, что объясняется наличием микротрещин, вызванных взрывными работами. С учетом этих факторов, а также влияния параметров образцов наблюдается хорошая сходимостъ результатов с данными прошлых исследований. Также отмечено, что пределы прочности на сжатие и растяжение у пород с Южного карьера в некоторых случаях выше, чем у пород с Центрального карьера. В заключении делается вывод о необходимости мониторинга прочностных свойств горных пород с использованием экспресс-методов в связи с их изменчивостью при ведении горных работ.

*Ключевые слова:* Баженовское месторождение, массив горных пород, физико-механические свойства, лабораторные испытания, продольные и поперечные деформации, модуль упругости.

*blasting operations. Taking into account these factors, as well as the influence of the sample parameters, there is a good convergence of the results with the data from previous studies. It is also noted that the compressive and tensile strength limits of rocks from the Southern Quarry are in some cases higher than those of rocks from the Central Quarry. It is concluded that it is necessary to monitor the strength properties of rocks using express methods due to their variability during mining operations.*

*Key words:* Bazhenovskoye deposit, rock massif, physical and mechanical properties, laboratory tests, longitudinal and transverse deformations, elastic modulus.

### Введение

На всех этапах освоения месторождений необходимы знания о прочностных и деформационных свойствах горных пород, слагающих массив. Именно эти показатели определяют применяемые в процессе разработки технологические решения для успешного извлечения полезных ископаемых.

Основной характеристикой качества считается доля переизмельченной породы и выход негабаритных фракций во взорванной горной массе и пр. Поэтому уточнение прочностных характеристик горных пород, а также уточнение характеристики дробимости пород, изменяющих свои свойства с увеличением глубины разработки, необходимы для расчета параметров процесса взрывной подготовки массива [1–4].

В ходе выполнения работы (2023 – 2024 гг.) был проведен анализ горно-геологических условий массива Баженовского месторождения хризотил-асбеста. Отобран штучный материал основных литологических типов пород исследуемого массива (серпентинитов, перидотитов, габбро, тальк-карбонатных, диоритов). Проведение испытаний физико-механических свойств пород, слагающих прибортовой массив Баженовского карьера, проводилось в лабораторных условиях путем непосредственных определений предела прочности пород при сжатии и растяжении.

### Материалы и методы

Для исследования и актуализации показателей физико-механических свойств пород прибортового массива карьера ПАО «Ураласбест» выполнен отбор штучного материала на уступах центрального и южного карьеров в 2023 – 2024 гг. (рис. 1, 2).

На основании анализа геологического строения массива горных пород Баженовского месторождения и совместно с геологической службой карьера составлен перечень пород, подлежащих лабораторным испытаниям:

- габбро, 5 штучов;
- перидотит, 5 штучов;
- диорит, 5 штучов;
- тальк-карбонатные породы, 8 штучов;
- серпентиниты, 7 штучов.

Количество отобранных штучов определялось возможностью получения необходимого количества kernового материала и изготовления образцов для проведения лабораторных исследований физико-механических свойств пород.

Каждый штuff был осмотрен для исключения видимых трещин, неоднородностей и включений, которые могли бы привести к неверной интерпретации результатов. Дальнейшая подготовка образцов, пригодных для определения упругих свойств, заключалась в изготовлении цилиндров правильной геометрической формы с установленными допусками при отношении длины к диаметру не менее 2. Выбуривание кернов из отобранных штuffов производилось установкой Husqvarna DMS160A с подачей воды при оборотах до 1000 в минуту. Для образования торцевых поверхностей и обеспечения их параллельности использовались камнерезная и шлифовальная установки СВК-1000 и СОТОК-1А, соответственно, при оборотах до 1000 в минуту. Все образцы были высушены в нормальных условиях для проведения испытаний в воздушно-сухом состоянии.

Согласно ГОСТ 21153.0-75 «Породы горные. Отбор проб и общие требования к методам физических испытаний» для продолжительного хранения и транспортирования каждый штuff упаковывался в водонепроницаемую пленку с последующей его маркировкой [5].

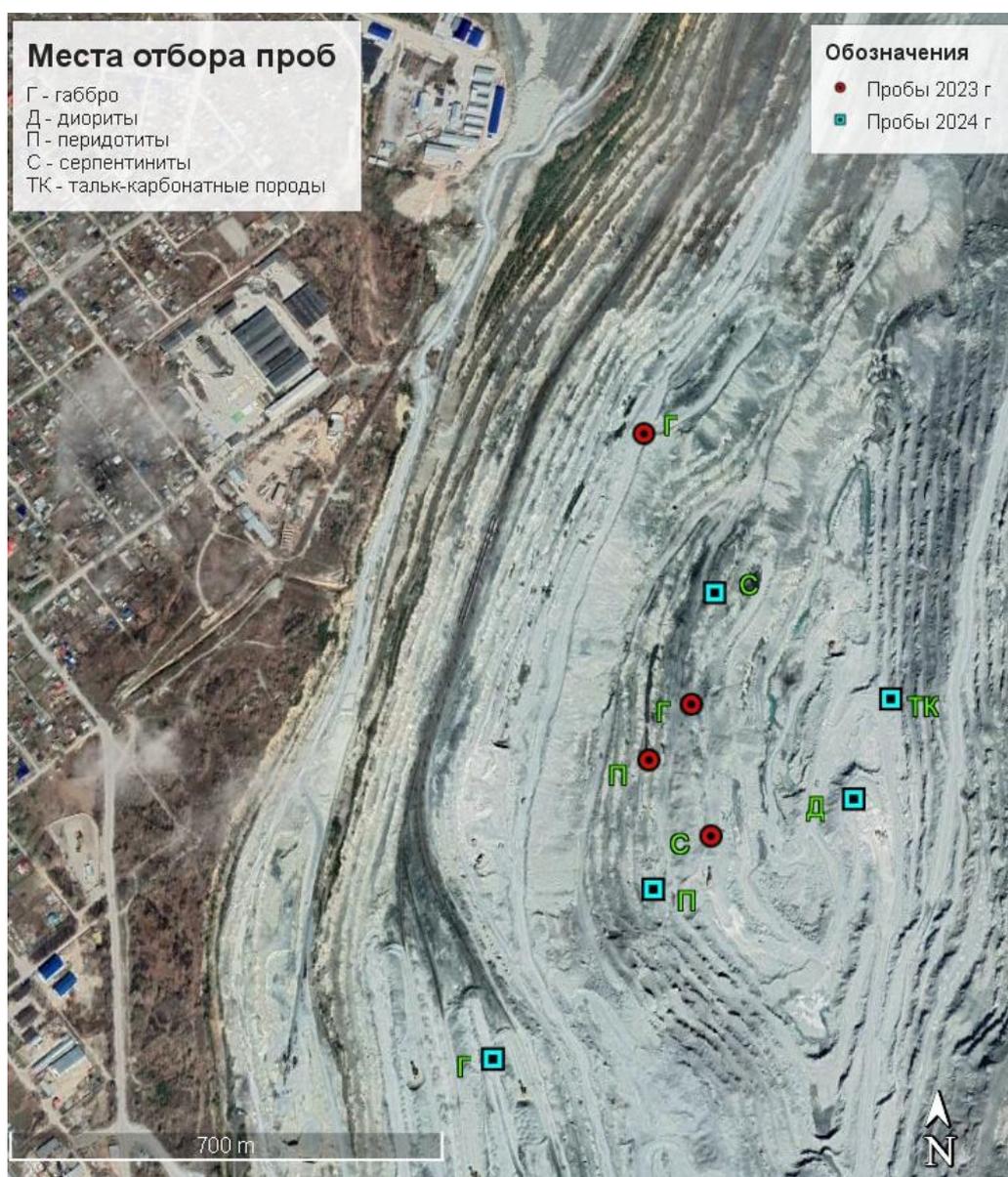


Рис. 1. Места отбора проб габбро, диоритов, перидотитов, серпентинитов, тальк-карбонатов в виде штuffового материала (Центральный карьер): синим отмечены пробы, отобранные в 2024 г., красным – в 2023 г., соответственно

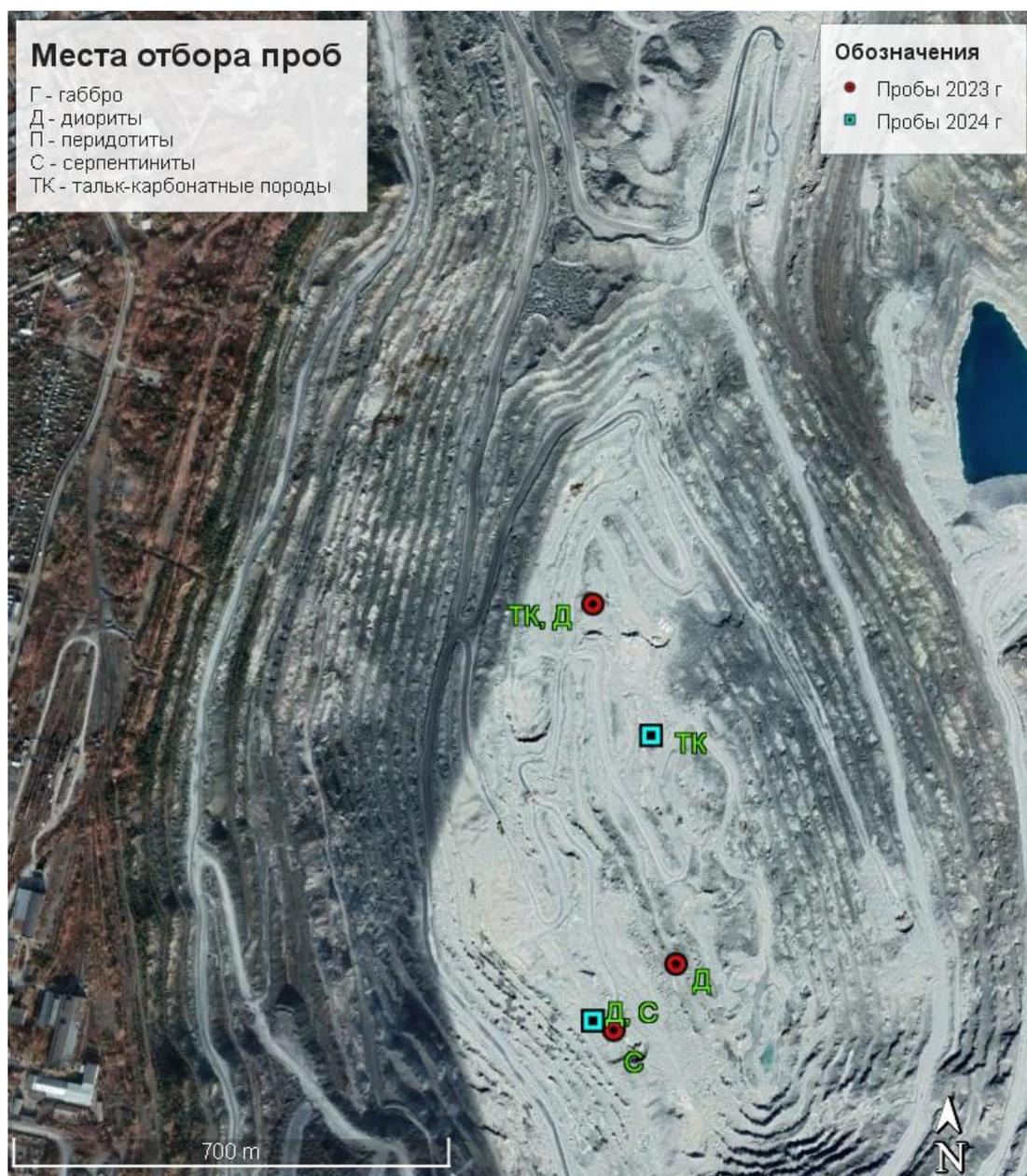


Рис. 2. Места отбора проб габбро, диоритов, перидотитов, серпентинитов, тальк-карбонатов в виде штуфового материала (Южный карьер): синим отмечены пробы, отобранные в 2024 г., красным – в 2023 г., соответственно

Испытания образцов горных пород производились с помощью комплексного оборудования, позволяющего выполнять лабораторные определения прочностных и деформационных характеристик [6].

Используемое оборудование и программный комплекс АСИС позволяют задавать необходимые параметры приложения нагрузки и фиксировать деформационные процессы, протекающие в образце. Процесс испытания отображается в виде графика зависимости вертикального напряжения по мере роста нагрузки на образец.

Контроль геометрических параметров изготавливаемых образцов производился штангенциркулем с погрешностью  $\pm 0,02$  мм.

В результате подготовки были получены и отобраны образцы правильной геометрической формы без видимых нарушений.

Образцы горной породы, имеющие механические повреждения или включения, нетипичные для рассматриваемого типа пород, отбраковывались.

Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 21153.2-84 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии» и ГОСТ 21153.3-85 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении (с Изменением N 1)» на образцах правильной геометрической формы в виде цилиндров. Методы заключаются в измерении максимальной разрушающей силы, приложенной к торцам образца через стальные плоские плиты, оснащенные сферическим шарниром, при постоянном нагружении со скоростью 1 МПа/сек и в измерении максимальной разрушающей силы, приложенной через стальные встречно направленные плиты к образующим образца при постоянном нагружении со скоростью 1 МПа/сек, соответственно.

#### Результаты исследования

Анализ полученных результатов при испытаниях на предел прочности на сжатие показал, что степень изменчивости значений по пробам не превышает 30 % по всем литологическим типам. Наименьший коэффициент вариации 13,91 % у перидотитов, максимальный – у диоритов 29,75 %.

Был произведен анализ средних значений предела прочности на сжатие и растяжение для каждой пробы. В абсолютном и относительном выражении наблюдается изменчивость прочностных свойств. При сопоставлении средних значений по пробам, отобранным на карьерах, выявлено, что предел прочности на одноосное сжатие у проб, отобранных на Южном карьере, выше у диоритов на 15,57 %, серпентинитов на 27,1 %, тальк-карбонатов на 19,39 %, чем на Центральном.

Значения предела прочности на растяжение у проб серпентинитов, отобранных на Южном карьере, выше на 32,72 %, чем на Центральном.

Результаты статистической обработки проведенных испытаний проб объединены по наименованию горных пород и представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Значения предела прочности горных пород при одноосном сжатии (2024 г.)

Наименование пород	Предел прочности при одноосном сжатии, МПа				Стандартное отклонение, МПа	Стандартная ошибка, МПа	Коэффициент вариации, %	Количество образцов проб/образцов, шт.
	Минимальные	Максимальные	Среднее	Медиана				
Габбро	142,67	270,58	196,41	191,97	53,54	23,94	27,26	5/25
Диориты	177,11	331,31	218,69	188,35	65,05	29,09	29,75	5/23
Перидотиты	115,16	165,97	150,08	160,11	20,87	9,33	13,91	5/32
Серпентиниты	46,43	101,31	70,34	66,55	17,82	6,74	25,33	7/39
Тальк-карбонаты	20,57	36,90	25,62	22,67	5,87	2,22	22,91	7/40

Таблица 2

**Значения предела прочности при растяжении (2024 г.)**

Наименование пород	Предел прочности при растяжении, МПа				Стандартное отклонение, МПа	Стандартная ошибка, МПа	Коэффициент вариации, %	Количество образцов проб/образцов, шт.
	Минимум	Максимум	Среднее	Медиана				
Габбро	23,05	28,88	25,30	24,66	2,28	1,02	9,01	5/24
Диориты	17,45	22,72	20,45	20,67	2,01	0,90	9,83	5/28
Перидотиты	11,83	20,47	15,74	14,99	3,21	1,43	20,39	5/30
Серпентиниты	4,56	9,01	8,64	8,26	2,69	1,01	31,13	7/50
Тальк-карбонаты	2,86	6,73	4,64	4,42	1,32	0,50	28,45	7/42

Анализ результатов испытаний, приведенных в табл. 1, 2, показывает, что значения пределов прочности на растяжение проб габбро и диоритов превышают значения остальных литологических типов при наименьшем коэффициенте вариации 9 – 10 %. Максимальный коэффициент вариации у проб серпентинитов и тальк-карбонатных пород 28 – 31 %. Это обусловлено, на наш взгляд, структурной неоднородностью и степенью серпентинизации.

Сравнительный анализ полученных результатов лабораторных испытаний в 2023 – 2024 гг. и ранее выполненных в 2005 и 1984 г. исследований прочностных характеристик горных пород Баженовского месторождения представлен на рис. 3, 4.

Образцы в 2023 – 2024 гг. были подготовлены из штуфового материала, отобранного из взорванной горной массы на карьере. Ведение взрывных работ обуславливает наличие микротрещин в породах. Это приводит к снижению прочностных характеристик примерно на 15 – 20 %. В 1984 г. испытываемые образцы имели иные параметры и форму согласно действующей нормативной документации, что также оказывает влияние на значения пределов прочности.

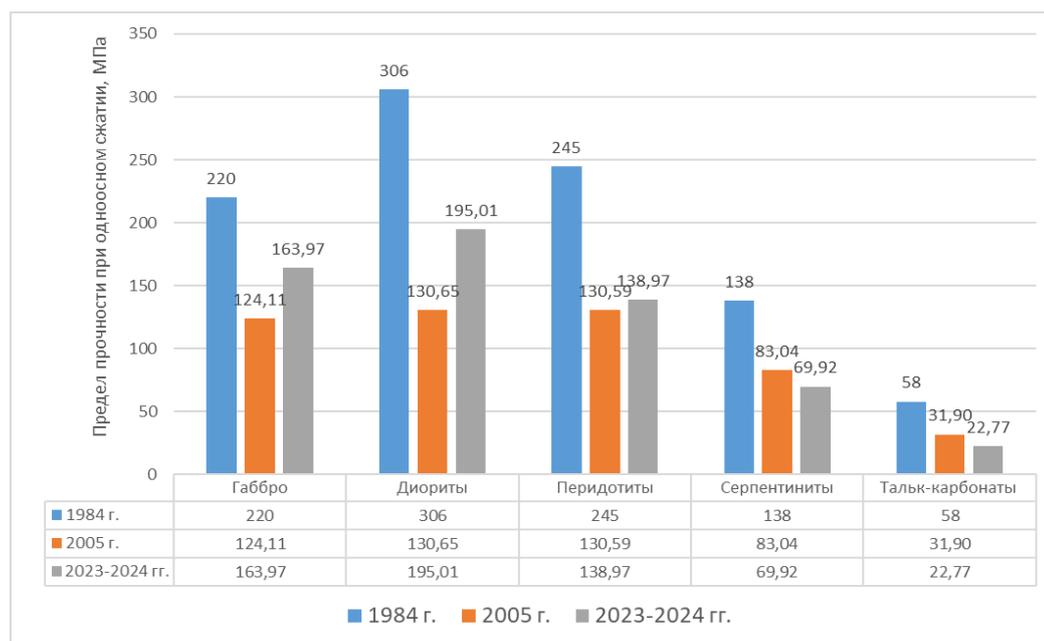


Рис. 3. Значения предела прочности на сжатие пород Баженовского месторождения, полученные в 2023 – 2024 гг., 2005 и в 1984 г. (без учета влияния параметров образцов и микротрещиноватости)

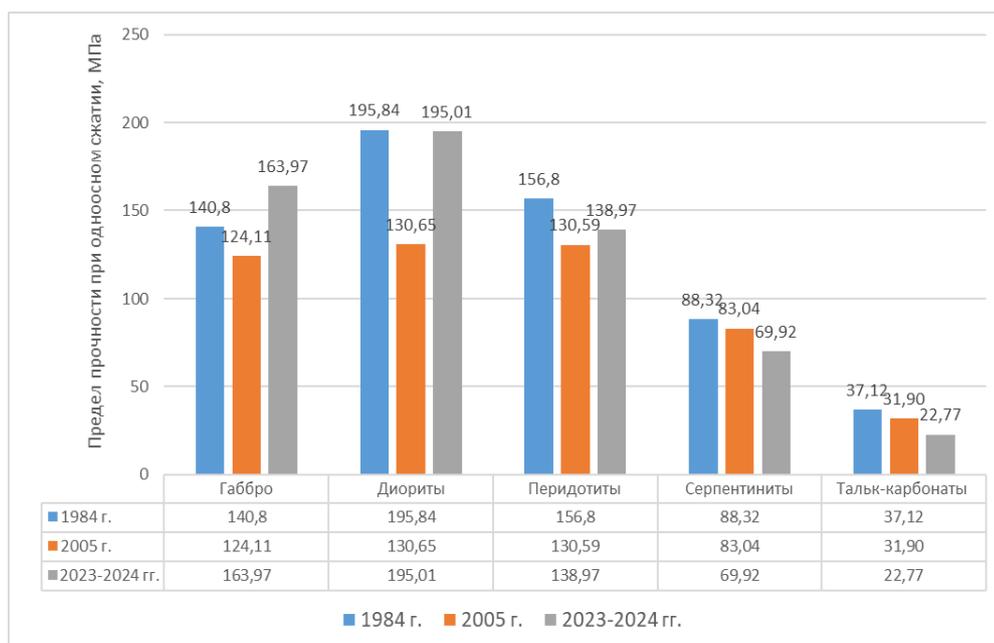


Рис. 4. Значения предела прочности на сжатие пород Баженовского месторождения, полученные в 2023 – 2024 гг., 2005 и в 1984 г. (с учетом влияния параметров образцов и микротрещиноватости)

*Сравнительный анализ результатов*

Сравнительный анализ предела прочности пород на одноосное сжатие с результатами исследований, полученными в 2005 и 1984 г. по всем литологическим типам, представлен на рис. 4. Прослеживается общая тенденция повышенных значений предела прочности (1984 г.) по всем литологическим типам.

При учете в сравнительном анализе влияния формы и параметров образцов, а также БВР (см. табл. 1) значения пределов прочности на сжатие приведенных литологий, полученные в 2023 – 2024 гг., в целом показывают высокую сходимость.

В 1984 г. значения предела прочности на растяжение для пород Баженовского месторождения не определялись. Сравнительный анализ результатов, полученных в 2023 – 2024 гг., выполнялся с результатами, полученными в 2005 г. (рис. 5).

Можно отметить высокую сходимость значений для всех литологических типов.

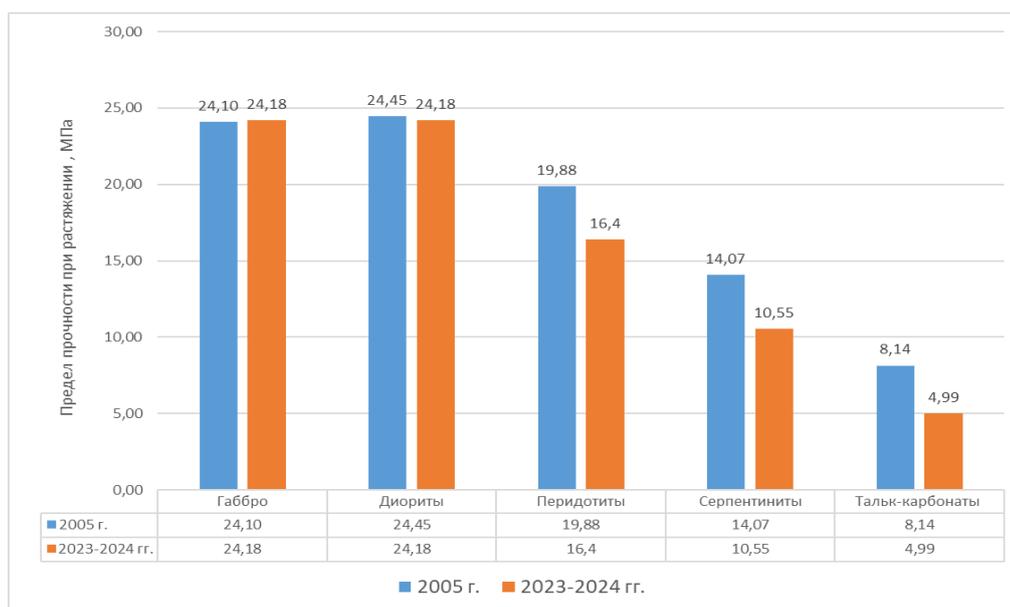


Рис. 5. Значения предела прочности на растяжение пород Баженовского месторождения, полученные в 2023 – 2024 гг. и 2005 г.

### Заключение

Произведен сравнительный анализ полученных результатов лабораторных испытаний в 2023 – 2024 гг. с ранее выполненными в 2005 и 1984 г. исследованиями прочностных характеристик горных пород Баженовского месторождения, который показал высокую сходимость значений для всех литологических типов.

Рост прочностных характеристик исследуемых пород по мере увеличения глубины разработки месторождения не наблюдается.

При сопоставлении средних значений по пробам, отобраным на карьерах, выявлено, что предел прочности на одноосное сжатие у проб, отобранных на Южном карьере, выше у диоритов на 15,57 %, серпентинитов на 27,1 %, тальк-карбонатов на 19,39 %, чем на Центральном. Значения предела прочности на растяжение у проб серпентинитов, отобранных на Южном карьере, выше на 32,72 %, чем на Центральном.

Прочностные характеристики пород являются одним из основных показателей, от которых зависят параметры БВР и качество подготовки горной массы. Выявленный разброс данных показателей на Южном и Центральном карьерах обуславливает необходимость применения косвенных методик экспресс-оценки предела прочности пород с целью мониторинга их изменчивости по мере ведения горных работ [8].

### Список литературы

1. Русских А.П., 2024 *Обоснование параметров взрывного разрушения, обеспечивающих снижение переизмельчения горной массы (на примере Баженовского месторождения)*: дис. ... кандидата технических наук. Екатеринбург, 187 с.
2. Русских А.П., 2021. Исследование дробимости и взрываемости горных пород, разрабатываемых на карьере "Ураласбест". *Взрывное дело*, № 130-87, С. 63-79.
3. Котяшев А.А., Корнилков М.В., Русских А.П., 2017. Изучение и оценка структурных изменений при взрывном разрушении скальных массивов в динамике развития асбестовых карьеров. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 6, С. 17-24.
4. Алексеев А.Ф., Грязнов О.Н., 2013. Физико-механические свойства метасоматитов серпентинитовой формации Баженовского месторождения хризотил-асбеста. *Инженерная геология*, № 4, С. 54-59.
5. ГОСТ 21153.0-75. *Породы горные. Отбор проб и общие требования к методам физических испытаний* = Rocks. Sampling and general requirements for the methods of physical testing: утв. Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 25 сентября 1975 г. № 2491 срок действия установлен с 01.07.1976 г.: дата введения 1976-07-01. Москва: Гос. комитет по стандартам, 1975, 3 с.
6. Ломтадзе В.Д., 1990. *Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований*. Ленинград: Недра, 328 с.
7. Алексеев А.Ф., 2005. *Инженерная петрология гипербазитов Баженовского и Джетыгаринского месторождений хризотил-асбеста*: специальность 25.00.08 "Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение": дис. ... кандидата геолого-минералогических наук. Екатеринбург, 192 с.
8. Харисов Т.Ф., 2020. Оценка предела прочности пород в образце с использованием молотка Шмидта. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 4, С. 304-314.

### References

1. Russkikh A.P., 2024 *Obosnovanie parametrov vzryvnogo razrusheniya, obespechivayushchikh snizhenie pereizmel'cheniya gornoj massy (na primere Bazhenovskogo mestorozhdeniya)* [Substantiation of the parameters of explosive destruction, ensuring a reduction in

the over-crushing of rock mass (using the example of the Bazhenovskoe deposit)]: dis. ... kandidata tekhnicheskikh nauk. Ekaterinburg, 187 p.

2. Russkikh A.P., 2021. Issledovanie drobimosti i vzryvaemosti gornyx porod, razrabatyvaemykh na kar'ere "Uralasbest" [Investigation of the fractionability and explosivity of rocks developed at the Uralasbest quarry]. Vzryvnoe delo, № 130-87, P. 63-79.

3. Kotyashov A.A., Kornilkov M.V., Russkikh A.P., 2017. Izuchenie i otsenka strukturnykh izmenenii pri vzryvnom razrushenii skal'nykh massivov v dinamike razvitiya asbestovykh kar'erov [Study and assessment of structural changes during the explosive destruction of rock massifs in the dynamics of the development of asbestos quarries]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal, № 6, P. 17-24.

4. Alekseev A.F., Gryaznov O.N., 2013. Fiziko-mekhanicheskie svoystva metasomatitov serpentinitovoi formatsii Bazhenovskogo mestorozhdeniya khrizotil-asbesta. Inzhenernaya geologiya [Physico-mechanical properties of metasomatites of the serpentinite formation of the Bazhenovskoe chrysotile-asbestos deposit], № 4, P. 54-59.

5. GOST 21153.0-75. Porody gornye. Otbor prob i obshchie trebovaniya k metodam fizicheskikh ispytaniy = Rocks. Sampling and general requirements for the methods of physical testing [GOST 21153.0-75. Mountain rocks. Sampling and general requirements for physical testing methods] = Rocks. Sampling and general requirements for the methods of physical testing]: utv. Postanovleniem Gosudarstvennogo komiteta standartov Soveta Ministrov SSSR ot 25 sentyabrya 1975 g. № 2491 srok deystviya ustanovlen s 01.07.1976 g.: data vvedeniya 1976-07-01. Moscow: Gos. komitet po standartam, 1975, 3 p.

6. Lomtadze V.D., 1990. Fiziko-mekhanicheskie svoystva gornyx porod. Metody laboratornykh issledovaniy [Physical and mechanical properties of rocks. Methods of laboratory research]. Leningrad: Nedra, 328 p.

7. Alekseev A.F., 2005. Inzhenernaya petrologiya giperbazitov Bazhenovskogo i Dzhetygarinskogo mestorozhdenii khrizotil-asbesta [Engineering petrology of Bazhenovskoe and Dzhetygarinskoe chrysotile asbestos deposits]: spetsial'nost' 25.00.08 "Inzhenernaya geologiya, merzlotovedenie i gruntovedenie" : dis. ... kandidata geologo-mineralogicheskikh nauk. Ekaterinburg, 192 p.

8. Kharisov T.F., 2020. Otsenka predela prochnosti porod v obrabotke s ispol'zovaniem molotka Shmidta [Assessment of the ultimate strength of rocks in a sample using a Schmidt hammer]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle, № 4, P. 304-314.

УДК 622.83:528.481

**Усанов Сергей Валерьевич**

заведующий лабораторией сдвижения горных пород,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [usv@igduran.ru](mailto:usv@igduran.ru)

**Коновалова Юлия Павловна**

старший научный сотрудник,  
лаборатория сдвижения горных пород, Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [lisjul@mail.ru](mailto:lisjul@mail.ru)

**Ногин Святослав Александрович**

младший научный сотрудник,  
лаборатория сдвижения горных пород, Институт горного дела УрО РАН,  
e-mail: [nsa@igduran.ru](mailto:nsa@igduran.ru)

**Зотов Денис Сергеевич**

инженер,  
лаборатория сдвижения горных пород,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [zotov@igduran.ru](mailto:zotov@igduran.ru)

**СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ДАННЫХ  
МНОГОЛЕТНЕГО МОНИТОРИНГА  
РАЗВИТИЯ СДВИЖЕНИЯ  
НА ПЕСЧАНСКОМ  
СКАРНОВО-МАГНЕТИТОВОМ  
МЕСТОРОЖДЕНИИ\****Аннотация:*

*Песчанское месторождение включает несколько рудных залежей: Северопесчанскую, Южную, Северную и Новопесчанскую. Месторождение разрабатывается подземным способом с 1968 года. При разработке Северопесчанской и Южной залежей процесс сдвижения развивался аномальным образом: имели место случаи сильного сдвижения лежачего бока и выхода обрушения на поверхность от одной камеры с глубины 450 м. Ожидаемые параметры процесса сдвижения на объекте приходилось неоднократно пересматривать, поскольку в каждый момент времени исследователи, в силу объективных причин, вынуждены были оперировать малыми наборами данных.*

*На данном этапе начаты работы по отработке запасов предохранительного целика под промплощадку шахты «Северопесчанская». В связи с этим для охраны объектов промплощадки реконструирована наблюдательная станция и начаты наблюдения за процессом сдвижения.*

*Для поиска возможных предикторов аномального развития сдвижения создана база данных, которая охватывает наблюдения с 1974 г. В научный оборот был введен массив данных наблюдений, ранее анализировавшийся лишь фрагментарно в силу достаточности 3–4 серий для удовлетворения требований нормативных документов.*

*Ключевые слова: сдвижение, исторические данные, мониторинг деформаций, деформации земной поверхности, наблюдательная станция, профильные линии, репер, геодинамика.*

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.025

**Usanov Sergey V.**

Head of Laboratory of rock displacement,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
58 Mamina-Sibiryaka Str.,  
620075 Ekaterinburg  
e-mail: [usv@igduran.ru](mailto:usv@igduran.ru)

**Konovalova Julia P.**

Senior Researcher,  
Laboratory of rock displacement,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [lisjul@mail.ru](mailto:lisjul@mail.ru)

**Nogin Svyatoslav A.**

Junior Researcher,  
Laboratory of rock displacement,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [nsa@igduran.ru](mailto:nsa@igduran.ru)

**Zotov Denis S.**

Engineer,  
Laboratory of rock displacement,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [zotov@igduran.ru](mailto:zotov@igduran.ru)

**DATABASE OF LONG-TERM  
INSTRUMENTAL OBSERVATIONS  
ON THE PROCESS OF EARTH'S SURFACE  
MOVEMENT DURING THE DEVELOPMENT  
OF THE PESCHANSKOYE  
SKARN-MAGNETITE DEPOSIT***Abstract:*

*The Peschanskoye deposit includes several ore ledges – Severopeschanskaya, Southern, Northern and Novopeschanskaya. The deposit has been developed by underground method since 1968. During the development of the Severopeschanskaya and the Southern ledges, the rock displacement developed in an anomalous manner: there were cases of significant displacement of the overlying side and caving to the surface from one mining chamber from a depth of 450 meters. The expected parameters of displacement had to be repeatedly revised because at each moment of time the researchers had to operate with small data sets due to objective reasons.*

*At this stage work has begun on the development of reserves of a safety pillar for the industrial site of the Severopeschanskaya mine. In this regard to protect the facilities of the industrial site the observation station was reconstructed and observations of the movement process began.*

*To search for possible predictors of anomalous shear development, a database was created that covers observations since 1974. An array of observation data previously analyzed only fragmentarily due to the sufficiency of 3–4 series to meet the requirements of regulatory documents was introduced into scientific circulation.*

*Key words: displacement, historical data, monitoring of deformations, deformations of the Earth's surface, observation station, profile lines, reference point, geodynamics.*

\* Исследования выполнены в рамках Госзадания №075-00410-25-00, тема 3 (FUWE-2025-0003), рег. №1022040300093-0-1.5.1.

## Введение

На земной поверхности в районах недропользования периодически происходят внезапные аномальные деформационные процессы, подвергающие опасности жизнь и здоровье людей, а также приводящие к повреждению зданий и сооружений [1]. Инструментальные наблюдения за деформациями анализируются, как правило, за промежуток не более 3-х лет, поскольку такой подход соответствует нормативным требованиям [2] и считается практически достаточным. Однако наиболее важные закономерности выявляются при анализе данных за временные циклы различной продолжительности, что требует привлечения больших объемов данных. Этот анализ помогает раскрыть взаимосвязи между пространственными и временными характеристиками деформационных параметров земной поверхности техногенной и природной обусловленности [3, 4].

Институт горного дела УрО РАН располагает обширной базой данных экспериментальных и аналитических исследований процессов сдвижения на месторождениях Урала и Казахстана [5, 6]. Одним из объектов с представительным объемом данных многолетних мониторинговых наблюдений является Песчанское скарново-магнетитовое месторождение, разрабатываемое с 1968 г. Оно включает несколько рудных залежей: Северопесчанскую, Южную, Северную и Новопесчанскую. При разработке Северопесчанской и Южной залежей процесс сдвижения развивался аномальным образом.

На данном этапе начаты работы по отработке предохранительного целика под промплощадку шахты «Северопесчанская». Организованы инструментальные наблюдения на промплощадке с целью охраны зданий и сооружений при отработке целика. В связи с этим для поиска возможных предикторов аномального развития сдвижения анализ предшествующих данных мониторинга для выявления пространственно-временных зависимостей распределения параметров сдвижений и деформаций по поверхности месторождения является важной задачей. Однако бумажный формат и разрозненность данных по отдельным отчетам не дают возможности анализа всего объема данных, содержащих большие перспективы для исследований геодинамики. В связи с этим цифровизация и систематизация многолетних наблюдений за деформационными процессами на месторождении является актуальной задачей, решение которой позволяет получить новые знания о пространственно-временных характеристиках геодинамической активности, которые можно использовать для повышения безопасности объектов недропользования путем учета опасных геодинамических явлений.

### *Исследуемый объект*

Песчанское скарново-магнетитовое месторождение, располагающееся в 10 км к югу от города Краснотурьинск в Свердловской области, было открыто в 1957 г., а уже в 1968 г. был выдан первый вагон руды.

Шахта «Северопесчанская» разрабатывает Песчанскую группу железорудных месторождений Северного Урала, которая включает Ново-Песчанское, представленное пластообразной залежью, Северопесчанское, основные запасы которого сосредоточены в крутопадающем рудном теле и примыкающем к нему Северном блоке, а также группой линзообразных тел, объединенных в Южнопесчанское месторождение.

Все рудные тела Песчанской группы месторождений – слепые с глубиной залегания от дневной поверхности от 25 до 600 м. Общая протяженность рудоносной толщи по простиранию составляет 3 км.

*Северопесчанская залежь* представляет собой слепое рудное тело сложной формы с размерами по простиранию до 1500 м и по падению до 800 м, в котором выделяются пологопадающие и крутопадающие участки. Центральная часть залежи, с которой в 1968 г. началась разработка, – крутопадающая, залегает ниже отметки -40 м (глубина 250 м). Мощность залежи достигает 100 м, местами 150 – 200 м, простирание близкое к

меридиональному, падение на восток под углом  $70 - 80^\circ$ . На флангах участка рудное тело выполаживается, а мощность его снижается до  $20 - 30$  м.

Лежачий бок Северопесчанской залежи ниже глубины  $410 - 490$  м сложен известняками, выше – порфиритами и их туфами с коэффициентом крепости  $f=10\div 12$ . Висячем боку ниже глубины  $410 - 450$  м залегают однородные диориты с коэффициентом крепости  $f=8\div 10$ . Выше диориты рассекаются многочисленными прослойками гранатовых и пироксенгранатовых скарнов и дайками диабазовых порфириров, контакты которых с окружающими породами, как правило, нарушены, а параметры залегания близки к параметрам основных тектонических нарушений [7].

*Южная залежь* представлена тремя изолированными рудными телами, самое крупное – № 1 расположено в центре, имеет размеры по простиранию  $270$  м, вкрест простирания –  $210$  м. Отметка кровли рудного тела  $-203$  м, почвы  $-420$  м. Рудные тела № 2 и 3 имеют незначительные размеры и залегают выше рудного тела № 1. Крепость руд по шкале Протодяконова –  $f=9-10$ . Вмещающими породами являются в юго-западной части мраморизированные известняки массивной текстуры, лишь на контакте с рудным телом в них слабо заметна полосчатость. Покрывающими и вмещающими по бокам являются диориты средней и мелкозернистой структуры, светло-серого цвета, имеющие склонность к быстрому выветриванию в горных выработках.

Анализ структурно-тектонического строения свидетельствует, что породный массив месторождения является типичным представителем иерархически блочных скальных массивов, характерных для большинства рудных месторождений Урала. Иерархичность его структурного строения проявляется на всех доступных для наблюдений масштабных уровнях.

В целом горно-геологические характеристики массива горных пород месторождения соответствуют средним показателям других железорудных месторождений Урала и Казахстана. Поэтому при проектировании большинство вопросов решалось в обычном порядке по аналогии с другими месторождениями без дополнительных исследований [6].

Добыча на месторождении ведется системами этажного и подэтажного обрушения и направлением отбойки по горизонтам – от центра к флангам.

#### *Сдвигение поверхности при разработке Северопесчанской залежи*

В 1973 г. в результате интенсивного развития процесса сдвижения пород лежачего бока и выполаживания углов сдвижения и разрывов до  $43 - 49^\circ$  против  $60^\circ$ , принятых в проекте, ряд охраняемых объектов промплощадки претерпел опасные деформации. Обеспечить безопасность капитальных объектов промплощадки удалось с помощью предохранительного целика в лежачем боку на протяжении всей промплощадки (оси  $7 - 16$ ), построенного по скорректированным углам сдвижения, и барьерного целика (оси  $8a - 10a$ ) на всю мощность рудного тела с шириной по простиранию  $100$  м (рис. 1).

В задачу входило поддержание пород лежачего бока и разделение выработанного пространства и зоны обрушения на два локальных участка, чтобы не допустить образования условий полной подработки вмещающих пород и дальнейшего выполаживания углов сдвижения [5]. Таким образом, аномальное развитие процесса сдвижения привело к консервации в целиках более  $22$  млн т руды. Однако в ходе дальнейшей отработки месторождения в 1974 – 1979 гг. процессы сдвижения породной толщи лежачего бока продолжали развиваться.

Как показали исследования прошлых лет [5], прочностные и структурные особенности массива горных пород не объясняют аномалий процесса сдвижения. Самые крутые углы сдвижения наблюдались в породах с небольшим коэффициентом крепости, и наоборот. Также не установлено зависимости величины углов сдвижения от трещиноватости пород висячего и лежачего боков.

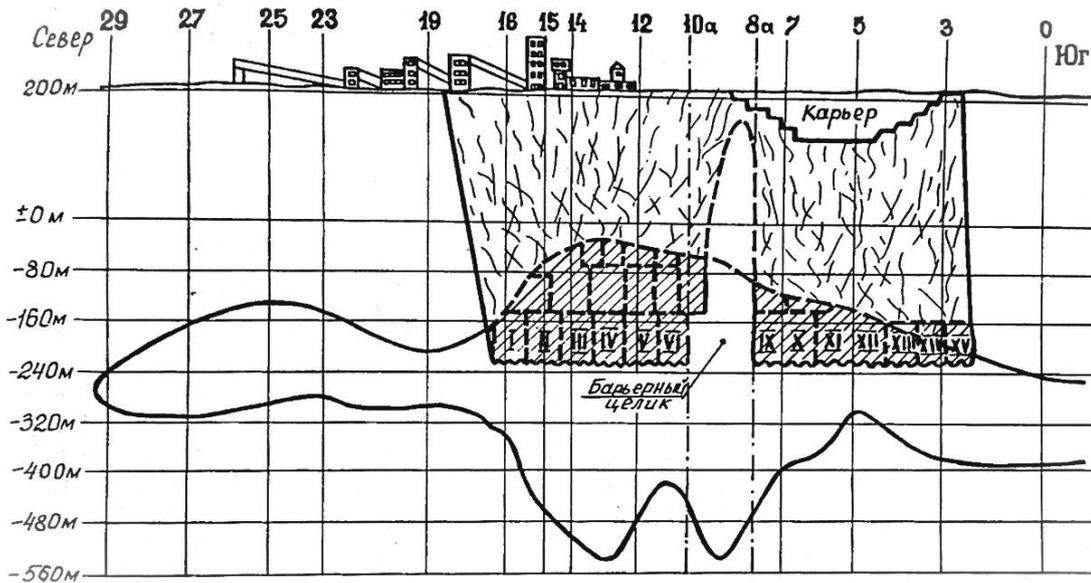


Рис. 1. Продольный разрез рудного тела Северопесчанского месторождения [5]

Наблюдения за сдвижением земной поверхности при отработке Северопесчанской залежи начали проводиться с 1974 г. Наблюдательная станция представлена профильными линиями 19, 15, 12 и 6, заложенными вкрест простирания рудного тела. В 1980 г. заложены линии вдоль простирания рудного тела: 0,8а и 9а (рис. 2). Для наблюдений за деформациями зданий и сооружений на территории промплощадки шахты оборудованы специальные наблюдательные станции в виде ственных реперов.

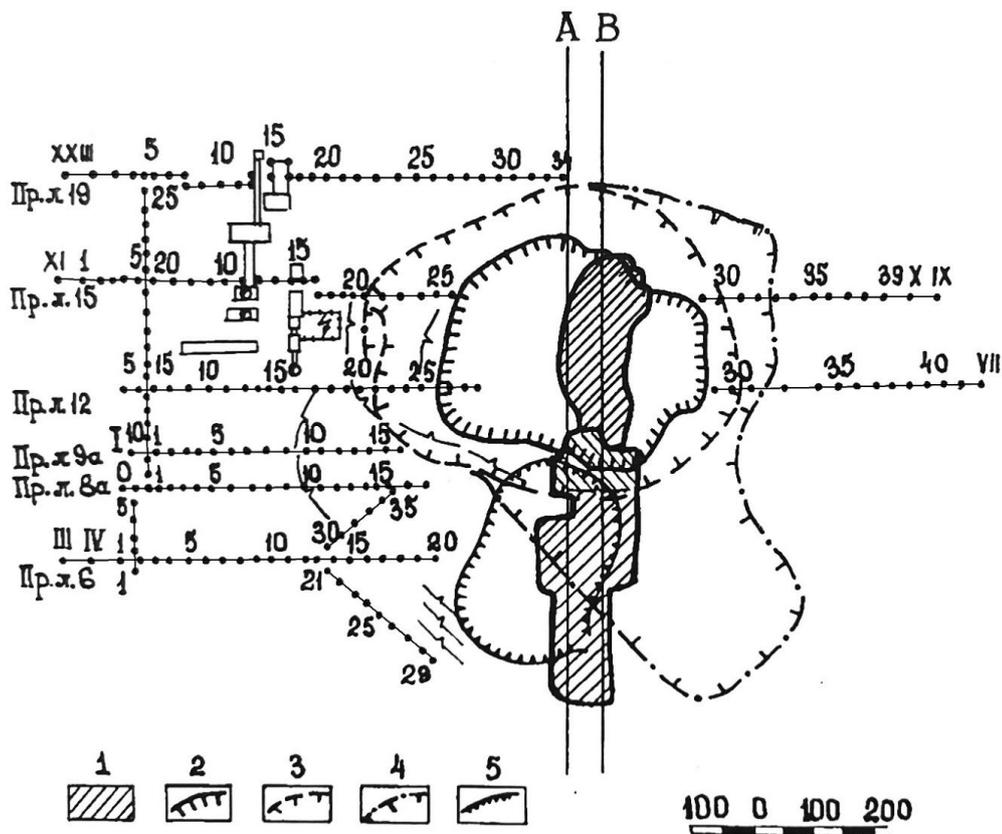


Рис. 2. Наблюдательная станция на Северопесчанском месторождении на момент начала наблюдений [5]:

1– отработанная площадь; 2– граница зоны обрушения на 1973 г.; 3– то же на 1974 г.; 4– то же на 1982 г.; 5– карьер



С учетом реальных условий местности наблюдательная станция над Южной залежью состояла из 32 рабочих и 10 опорных реперов (рис. 3). Инструментальные наблюдения проводились дважды в год с использованием как традиционных, так и спутниковых методов. Деформации и границы зон сдвижения определялись исходя из наблюдений по профильным линиям традиционными геодезическими методами, а также на пунктах организованного геодезического полигона, в котором были задействованы реперы профильных линий наблюдательной станции, а также реперы, располагающиеся за границей расчетной мульды сдвижения при отработке всего рудного тела № 1. Наблюдения на геодезическом полигоне проводились с помощью ГНСС методов. Результаты, полученные в течение четырех лет наблюдений, позволили выявить зоны, характеризующие активное развитие процесса сдвижения [9].

#### Современный этап развития сдвижения

В 2020 г. разработка Северопесчанского участка месторождения находилась в завершающей фазе. Отработаны и погашены запасы горизонтов: 40, –80, –160 и –240 м за исключением запасов, законсервированных в предохранительном целике, оставленном в процессе разработки месторождения для предотвращения вредного влияния подземных горных работ на стволы, здания и сооружения промплощадки шахты «Северопесчанская». Существующая наблюдательная станция к 2020 г. находилась в неудовлетворительном состоянии, большая часть реперов была уничтожена. В неполном количестве сохранились реперы профильной линии 12, а также часть реперов профильной линии ба. Сохранился ряд ственных реперов в 9 охраняемых объектах.

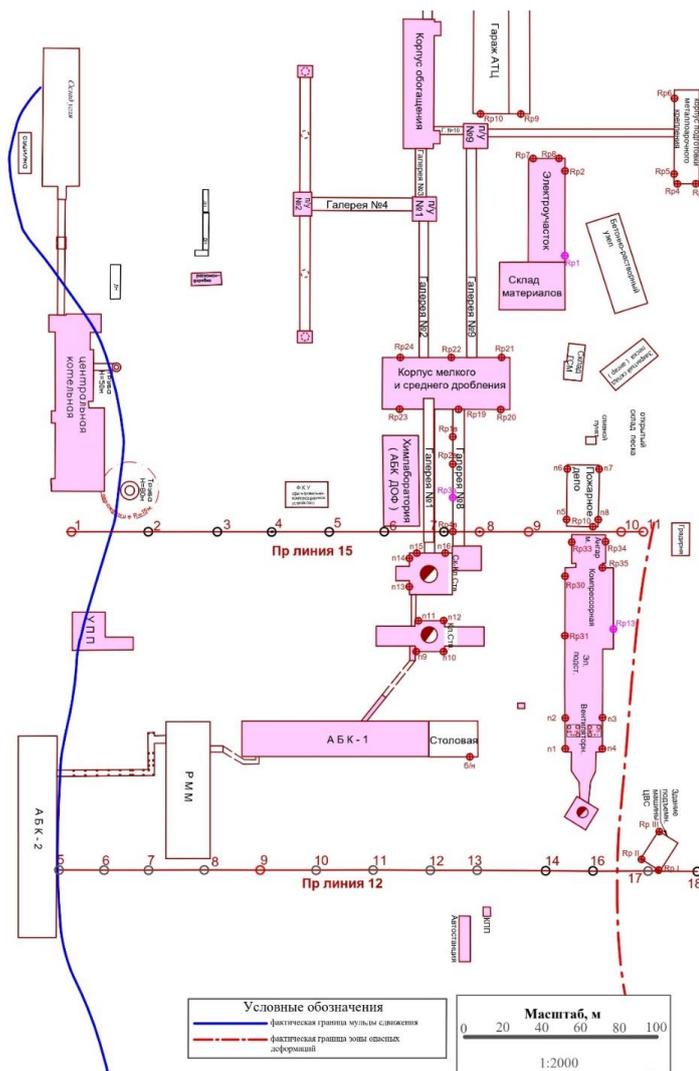


Рис. 4. Схема наблюдательной станции для мониторинга процесса сдвижения и охраны объектов промплощадки при отработке предохранительного целика на 2024 г.

В 2020 г. в связи с началом отработки предохранительного целика был разработан проект реконструкции наблюдательной станции. Проектом реконструкции предусматривается частичное восстановление наблюдательной грунтовой станции и специальных станций из стенных реперов на территории промплощадки шахты в лежащем боку Северопесчанской залежи вдоль разведочных осей, в пределах которых находятся все основные охраняемые сооружения и запланирована отработка предохранительного целика.

Станция состоит из двух восстановленных профильных линий (12 и 15) и специальных наблюдательных станций, состоящих из системы стенных и грунтовых реперов для контроля деформаций в охраняемых объектах промплощадки шахты. Профильные линии имеют протяженность от фактической границы мульды сдвижения, отстроенной по результатам инструментальных наблюдений, на западе промплощадки до границы зоны обрушения на востоке.

Общее количество реперов на линиях – 26 шт., из которых 17 шт. – новые реперы; общее количество стенных реперов – 69 шт., из которых 35 шт. являются вновь заложеными (рис. 4). На данный момент продолжаются работы в целике, наблюдения проводятся по реперам станции, предусмотренной проектом 2020 г.

#### *Новый подход к анализу данных мониторинга*

В условиях нового сложного этапа разработки запасов предохранительного целика критически важно учесть опыт прошлых лет, чтобы вовремя и адекватно реагировать на процессы сдвижения земной поверхности, в том числе аномального характера.

На основе базы данных [11], содержащей сведения о 745 НИР по объектам мониторинга сдвижения и деформаций земной поверхности под воздействием горных разработок, обработанных Институтом горного дела УрО РАН за период 1940 - 2024 гг., было выделено 28 работ с данными мониторинга сдвижения поверхности на Песчанском месторождении [12]. Часть из них, затрагивающая замеры после реконструкции 2020 г., была оцифрована ранее [13]. В рамках данной работы оцифрован основной массив данных более ранних лет – с 1974 г.

Согласно разработанной методике [14] в новый датасет для каждой серии наблюдений вносятся идентификаторы и наименования реперов, их высотные отметки и длины интервалов, полученные в результате первичной камеральной обработки результатов полевых наблюдений (рис. 5).

Разработанные принципы систематизации и организации данных многолетнего мониторинга процесса сдвижения [14] открывают возможности для оперативного математического анализа инструментальных наблюдений (статистического, гармонического и т.д.), который позволяет выявить пространственно-временные зависимости распределения деформационных параметров по поверхности месторождения, комплексно оценить воздействие природных и техногенных факторов на процессы сдвижения и установить особенности их взаимного влияния, способствующие возникновению аварийных деформационных явлений в толще массива и на поверхности.

Положительный опыт такого подхода к анализу данных наблюдений был получен на Сарановском хромитовом месторождении. Результатом применяемых методов стало районирование территории месторождения по риску возникновения внезапных геодинамических явлений.

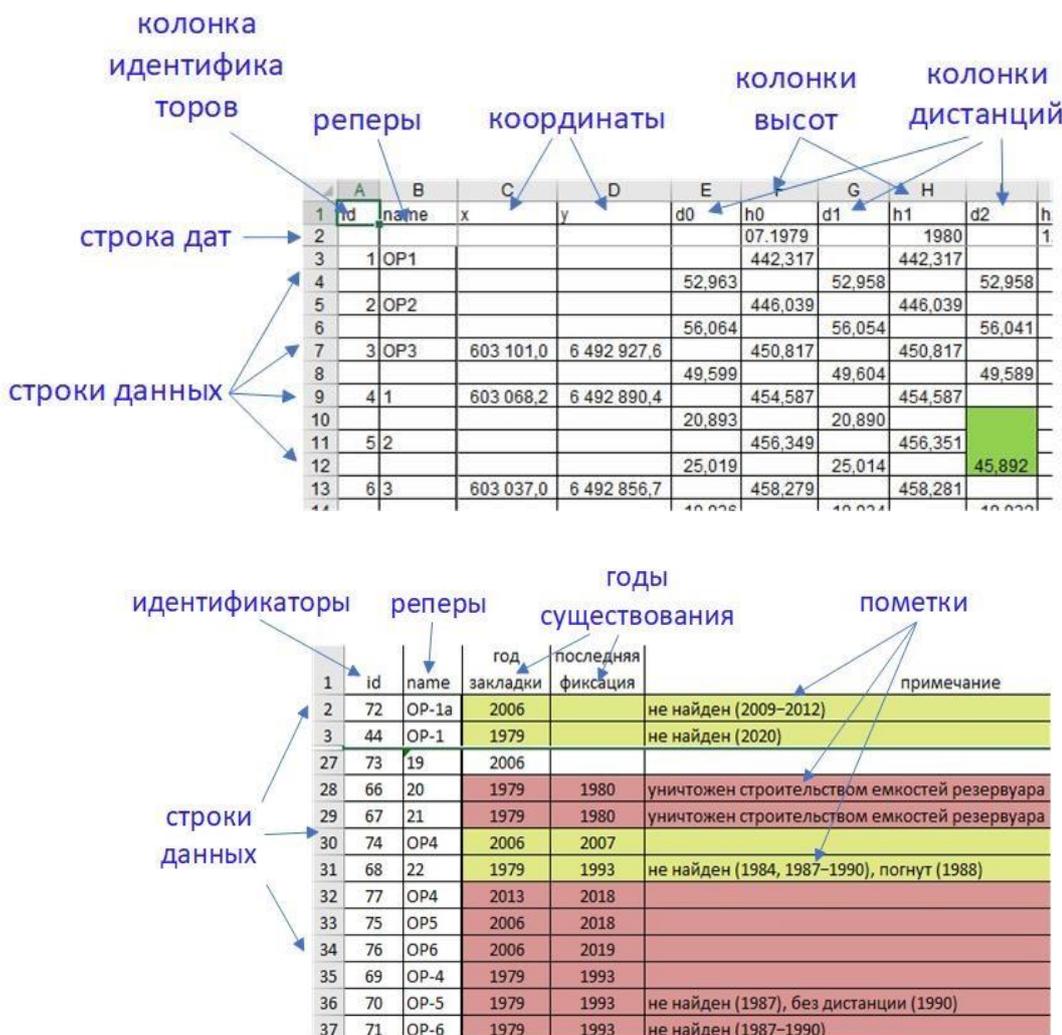


Рис. 5. Фрагмент организации базы данных инструментальных наблюдений [14]

### Заключение

За 50-летнюю историю разработки Песчанской группы месторождений накоплен большой опыт на основании значительного объема данных инструментальных наблюдений за развитием процесса сдвижения. Факты его аномального развития, представленные в статье, оставили открытым ряд вопросов, касающихся причин возникновения таких ситуаций. В связи с началом отработки предохранительного целика Северопесчанской залежи под промплощадку шахты эти вопросы вновь обрели свою значимость и актуальность.

Для учета опыта прошлых лет представляется важным проведение комплексного ретроспективного анализа инструментальных наблюдений на основе математических методов для выявления пространственно-временных зависимостей распределения деформационных параметров по поверхности месторождения. Для этого разработаны принципы систематизации и организации данных мониторинга, которые стали основой для создания базы данных Песчанской группы месторождений. Реализация такого подхода станет еще одним шагом в понимании природно-техногенных процессов при разработке месторождений.

### Список литературы

1. Усанов С.В., Коновалова Ю.П., Ефремов Е.Ю., Харисова О.Д., Усанова А.В., 2022. Внезапные деформационные процессы в горном массиве при недропользовании: факторы проявления и возможности предупреждения. *Горная промышленность*, 1S, № 111-118. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-111-118.
2. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений: утверждена Госгортехнадзором СССР 3 июля 1986 г. Москва: Недра, 1988, 112 с.
3. Space Geodesy Data Implementation for Earth System Geodynamics Monitoring: A Case Study of the Aegean Microplate. December 2024. *Civil and Environmental Engineering*, 20(2):1203-1220. DOI: 10.2478/cee-2024-0088. Daša Smrčková, Jakub Chromčák, Juraj Mužík, Jan Kostelecký.
4. Kuzmin Yu.O., 2016. Recent geodynamics of dangerous faults. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, V. 52, № 5, P. 709-722.
5. Сашурин А.Д., 1999. *Сдвигение горных пород на рудниках черной металлургии*. Ответственный редактор д.т.н. А.В. Зубков. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 268 с.
6. Борщ-Компониец В.И., Батугина И.М., Варлашкин В.М. и др., 1984. *Сдвигение горных пород и земной поверхности при подземных разработках*. Под общ. ред. В.А. Букринского, Г.В. Орлова. Москва: Недра, 247 с.
7. Тагильцев С.Н., Кибанова Т.Н., 2017. Закономерности поля тектонических напряжений в геологической среде Краснотурьинского рудного района. *Известия Уральского государственного горного университета*, № 2(46), С. 43-46. DOI 10.21440/2307-2091-2017-2-43-46. – EDN YSSFBN.
8. Сашурин А.Д., 2004. *Прогноз развития процесса сдвижения и положение границ зоны обрушения с целью минимизации размеров земельного отвода и оценки влияния горных работ на автодорогу и водопровод при отработке Южной залежи на их. «Северопесчанская»*. Отчет о НИР. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, С. 18.
9. Ручкин В.И., Коновалова Ю.П., 2016. Зависимость динамики напряженно-деформированного состояния геологической среды от техногенного воздействия на естественное тектоническое состояние массива горных пород на горнодобывающих предприятиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 1, С. 250-259.
10. Далатказин Т.Ш., Коновалова Ю.П., Ручкин В.И., Зуев П.И., 2019. Исследования по модернизации использования эманационной съемки в качестве экспресс-метода при геодинамической диагностике. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, №4, С. 206 –220.
11. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022622918 Российская Федерация. *База данных объектов мониторинга сдвижения и деформаций земной поверхности под воздействием горных разработок за 1940–2021 гг. на территории Российской Федерации*: № 2022622674 : заявл. 18.10.2022 : опубл. 16.11.2022 / С.В. Усанов, С.А. Ногин, Ю.П. Коновалова [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук.
12. Усанов С.В., Коновалова Ю.П., Ногин С.А., Панжина Н.А., 2023. К проблеме взаимосвязей между деформационными процессами земной поверхности природного и техногенного генеза. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 4, С. 286-295.
13. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023622239 Российская Федерация. *Данные наблюдений за процессом сдвижения на Северопесчанском месторождении хромитов за 2021–2022 гг* : № 2023621896 : заявл. 21.06.2023 : опубл. 05.07.2023 / С. В. Усанов, С. А. Ногин, Ю. П. Коновалова [и др.]; заявитель Фе-

деральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук.

14. Ногин С.А., 2024. Организация датасета на основе данных маркшейдерских наблюдений. *Проблемы недропользования*, № 4(43), С. 127-134. DOI 10.25635/2313-1586.2024.04.127.

## References

1. Usanov S.V., Konovalova Yu.P., Efremov E.Yu., Kharisova O.D., Usanova A.V., 2022. Vnezapnye deformatsionnye protsessy v gornom massive pri nedropol'zovanii: faktory proyavleniya i vozmozhnosti preduprezhdeniya [Sudden deformation processes in the mining environment during subsurface use: factors of manifestation and possibilities of prevention]. *Gornaya promyshlennost'*, 1S, № 111-118. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-111-118.

2. Instruktsiya po nablyudeniya za sdvizheniem gornyx porod i zemnoi poverkhnosti pri podzemnoi razrabotke rudnykh mestorozhdenii: utverzhdena Gosgortekhnadzorom SSSR 3 iyulya 1986 g. . [Instructions for monitoring the movement of rocks and the earth's surface during underground mining of ore deposits: approved by Gosgortekhnadzor of the USSR on July 3, 1986]. Moscow: Nedra, 1988, 112 p.

3. Space Geodesy Data Implementation for Earth System Geodynamics Monitoring: A Case Study of the Aegean Microplate. December 2024. *Civil and Environmental Engineering*, 20(2):1203-1220. DOI: 10.2478/cee-2024-0088. Daša Smrčková, Jakub Chromčák, Juraj Mužík, Jan Kostelecký.

4. Kuzmin Yu.O., 2016. Recent geodynamics of dangerous faults. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, V. 52, № 5, P. 709-722.

5. Sashurin A.D., 1999. Sdvizhenie gornyx porod na rudnikakh chernoi metallurgii [Displacement of rocks in the mines of ferrous metallurgy]. *Otvetstvennyi redaktor d.t.n. A.V. Zubkov. Ekaterinburg: Ural'skoe otделение RAN*, 268 p.

6. Borshch-Komponiets V.I., Batugina I.M., Varlashkin V.M. i dr., 1984. Sdvizhenie gornyx porod i zemnoi poverkhnosti pri podzemnykh razrabotkakh [Displacement of rocks and the earth's surface during underground mining]. Pod obshch. red. V.A. Bukrinskogo, G.V. Orlova. Moscow: Nedra, 247 p.

7. Tagil'tsev S.N., Kibanova T.N., 2017. Zakonomernosti polya tektonicheskikh napryazhenii v geologicheskoi srede Krasnotur'inskogo rudnogo raiona [Patterns of the tectonic stress field in the geological environment of the Krasnoturyinsky ore region]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, № 2(46), S. 43-46. DOI 10.21440/2307-2091-2017-2-43-46. – EDN YSSFBN.

8. Sashurin A.D., 2004. Prognoz razvitiya protsessa sdvizheniya i polozhenie granits zony obrusheniya s tsel'yu minimizatsii razmerov zemel'nogo otvoda i otsenki vliyaniya gornyx rabot na avtodorogu i vodoprovod pri otrabotke Yuzhnoi zalezhi na shkh. "Severopeschanskaya" [Forecast of development of the process of displacement and the location of the boundaries of the collapse zone in order to minimize the size of the land allotment and to assess the impact of mining operations on the highway and water supply during the development of the Southern deposit on the mine "Severopeschanskaya"]. *Otchet o NIR. Ekaterinburg: IGD UrO RAN*, P. 18.

9. Ruchkin V.I., Konovalova Yu.P., 2016. Zavisimost' dinamiki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya geologicheskoi sredy ot tekhnogenogo vozdeistviya na estestvennoe tektonicheskoe sostoyanie massiva gornyx porod na gornodobyvayushchikh predpriyatiyakh [Dependences in the dynamics of the stress-strain state of the geological environment for the technological impact on the natural tectonic state of the rock mass at mining enterprises]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 1, P. 250-259.

10. Dalatkazin T.Sh., Konovalova Yu.P., Ruchkin V.I., Zuev P.I., 2019. Issledovaniya po modernizatsii ispol'zovaniya emanatsionnoi s"emki v kachestve ekspress-metoda pri geodinamicheskoi diagnostike [Research on the modernization of the use of emanation survey as

an express method in geodynamic diagnostics]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, No4, P. 206–220.

11. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh № 2022622918 Rossiiskaya Federatsiya. Baza dannykh ob"ektov monitoringa sdvizheniya i deformatsii zemnoi poverkhnosti pod vozdeistviem gornykh razrabotok za 1940–2021 gg. na territorii Rossiiskoi Federatsii [Database of objects for monitoring the displacement and deformation of the Earth's surface under the influence of mining operations for 1940-2021 in the territory of the Russian Federation]: № 2022622674 : zayavl. 18.10.2022 : opubl. 16.11.2022 / S.V. Usanov, S.A. Nugin, Yu.P. Konovalova [i dr.]; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Institut gornogo dela Ural'skogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk .

12. Usanov S.V., Konovalova Yu.P., Nugin S.A., Panzhina N.A., 2023. K probleme vzaimosvyazei mezhdou deformatsionnymi protsessami zemnoi poverkhnosti prirodnogo i tekhnogen'nogo geneza [On the problem of the interrelationships between the deformation processes of the Earth's surface of natural and man-made origin]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 4, P. 286-295.

13. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh № 2023622239 Rossiiskaya Federatsiya. Dannye nablyudenii za protsessom sdvizheniya na Severopeschanskome mes-torozhdenii khromitov za 2021–2022 gg. [Observation data on the displacement process at the Severopeschansk chromite deposit for 2021-2022]: № 2023621896 : zayavl. 21.06.2023 : opubl. 05.07.2023 / S. V. Usanov, S. A. Nugin, Yu. P. Konovalova [i dr.]; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Institut gornogo dela Ural'skogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk.

14. Nugin S.A., 2024. Organizatsiya dataseta na osnove dannykh marksheiderskikh nablyudenii [Organization of a dataset based on the data of surveying observations]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4(43), P. 127-134. DOI 10.25635/2313-1586.2024.04.127.

УДК 622.833.5

**Ушаков Евгений Михайлович**

младший научный сотрудник,  
лаборатория геодинамики и горного давления,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [ushak@mail.ru](mailto:ushak@mail.ru)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОН КОНЦЕНТРАЦИИ  
НАПРЯЖЕНИЙ НА КОНТУРЕ  
ОЧИСТНЫХ ВЫРАБОТОК  
ПОЛИГОНАЛЬНОЙ ФОРМЫ  
ПРИ ОТРАБОТКЕ МОЩНЫХ РУДНЫХ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ\***

*Аннотация:*

Приведены результаты моделирования методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния массива горных пород, отрабатываемого выработками полигональной формы с закладкой выработанного пространства. Моделирование проводилось при разных гипотезах горного давления: гидростатической и геостатической, на разных стадиях отработки рудного массива.

Установлены параметры изменения НДС горного и закладочного массива на разных стадиях отработки выработками полигональной формы, расположенными в шахматном порядке.

*Ключевые слова:* первоначальное напряженное состояние, камерные системы отработки, полигональные выработки, конечно-элементное моделирование, массив горных пород, физико-механические свойства.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.036

**Ushakov Evgeniy M.**

Junior Researcher, laboratory of geodynamics and mining pressure,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
620075, Yekaterinburg,  
Mamin-Sibiryak st., 58  
e-mail: [ushak@mail.ru](mailto:ushak@mail.ru)

**INVESTIGATION OF STRESS  
CONCENTRATION ZONES ON  
THE CONTOUR OF POLYGONAL-SHAPED  
TREATMENT WORKINGS DURING  
THE DEVELOPMENT OF POWERFUL  
ORE DEPOSITS**

*Abstract:*

The results of finite element modeling of the stress-strain state of a rock massif mined by polygonal workings with backfilling of mined-out space are presented. Modeling was carried out under different hypotheses of rock pressure: hydrostatic and geostatic, at different stages of mining of the ore massif. The dependencies of the change in the stress-strain state of the rock massif and backfilling at different stages of mining by polygonal workings located in a checkerboard pattern were established.

*Key words:* slot unloading method, stress-strain state, observation station, stability, time-varying stresses, rock mass, physical and mechanical properties.

### Введение

Камерные системы разработки с закладкой выработанного пространства достаточно широко применяются в разработке рудных месторождений подземным способом и имеют богатую историю [1].

Одним из интересных решений в совершенствовании камерной системы разработки является применение камер полигональной формы с расположением добычных выработок в шахматном порядке. Такое расположение камер значительно снижает горное давление на борта и кровлю выработки и позволяет увеличить размеры камер, особенно в условиях высокого уровня напряжений горных пород, соответственно, увеличить и выемку запасов руды [2]. Так как верхняя часть камеры находится в закладочном целике ранее отработанных камер, а нижняя часть камеры – в нетронутым рудном массиве, то геомеханическая обстановка для горно-добычных работ более благоприятная и устойчивая. Также фактор смещения смежных камер по высоте практически исключает объединение недозакладов по каждой камере в общую зону, что позволяет минимизировать деформации налегающей толщи, обеспечивая устойчивое состояние земной поверхности и охраняемых объектов на ней (рис. 1).

\* Статья подготовлена в рамках Государственного задания №075-00410-25-00.  
Г.р.№ 1022040300093-0-1.5.1. Тема 3 (2025-2027). (FUWE-2025-0003).

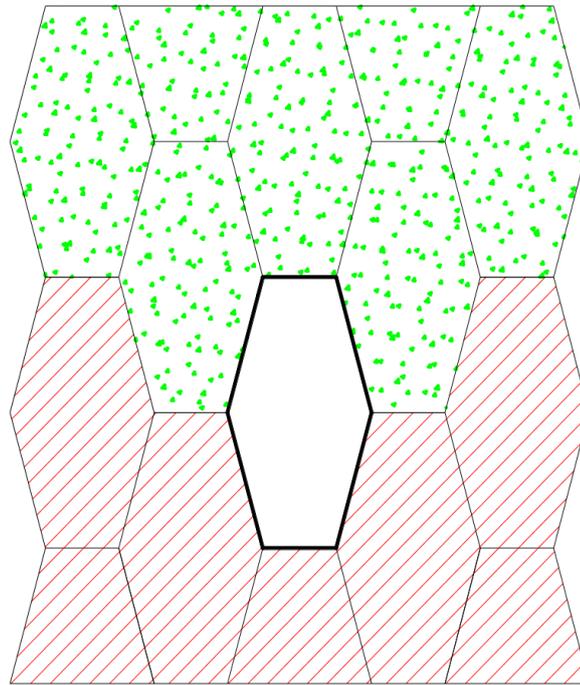


Рис. 1. Общая схема выемки запасов полигональными выработками в шахматном порядке [2]

Сводчатая форма верхней части камеры, формирующаяся в закладочном массиве, находится в более устойчивом состоянии по сравнению с прямоугольными камерами, так как представляет собой арочную конструкцию, работающую на сжатие, а не на срез, как при горизонтальном обнажении, а значит, требует меньшей прочности закладочного материала (рис. 2) [3 – 4].

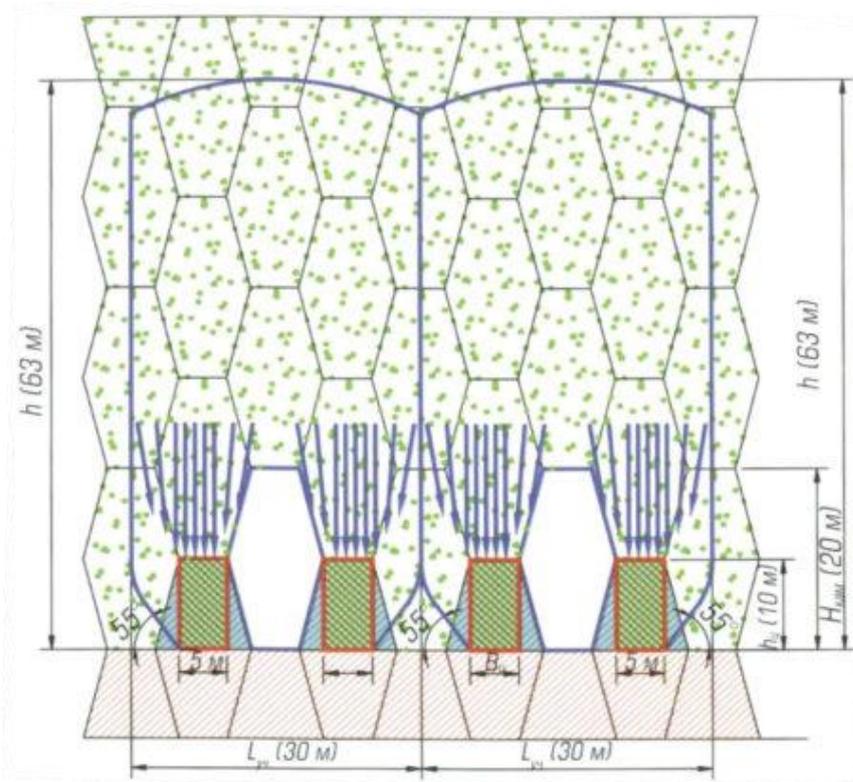


Рис. 2. Схема формирования свода давления [3]

Несмотря на большой накопленный опыт обоснования устойчивости очистных выработок, остается еще немало вопросов в формировании НДС рудного массива выработок полигональной формы. И дальнейшее совершенствование конструктивных элементов этих систем требует новых знаний в области формирования напряжений вокруг них на разных стадиях отработки при различных моделях НДС массива горных пород. Результатом решения этой задачи станет увеличение эффективности добычи, что позволит обеспечить безопасность при ведении подземных горных работ [5 – 6].

Идея работы состоит в рассмотрении и сравнении геомеханического состояния очистных выработок на разных стадиях отработки при различных моделях напряженного состояния массива горных пород – гидростатической и геостатической.

#### *Выбор и обоснование модели расчета при различном НДС рудного массива*

Из теории моделирования хорошо известно, что достоверность полученных результатов, в первую очередь, зависит от того, насколько адекватно принятая модель объекта отражает его наиболее важные для данного исследования свойства. Горные породы имеют весьма сложные деформационные характеристики, включающие, как правило, зону упругих деформаций, зону пластических деформаций и зону запредельного деформирования. Кроме того, массив горных пород никогда не бывает однородным по своим свойствам, поэтому создание модели, полностью отражающей его свойства, является едва ли выполнимой задачей. Однако опыт показывает, что даже применение более простых математических моделей хорошо согласуется с результатами практики [7, 8].

В рамках настоящей работы в качестве граничных условий последовательно были рассмотрены две распространенные гипотезы распределения поля первичных напряжений: гравитационная и гидростатическая. Характер разрушения массива в результате этого перераспределения (хрупкий, упругопластический и т.п.) лежит за рамками работы. Поэтому в нашем случае наиболее удобной будет являться модель упругой среды, позволяющая с минимальными вычислительными затратами выделить ситуации, при которых создаются условия для разрушения массива.

Исследование НДС должно учитывать естественное напряженное состояние рудного массива, влияние глубины ведения горных работ на изменение вертикальных и горизонтальных напряжений, прочностные и деформационные свойства вмещающих пород, руд и закладки, последовательность ведения горных работ и т.д. [9].

Моделирование проведено на примере условий горных пород месторождения магнетитов (табл. 1).

Таблица 1

#### **Физико-механические свойства горных пород**

Наименование пород	Плотность, т/м <sup>3</sup>	Модуль деформации, ГПа	Коэффициент Пуассона	Прочность на растяжение, МПа	Угол внутреннего трения, град	Сцепление МПа
Доломит, диабаз, сланец	2,8	86	0,27	13	34	17
Магнетит	2,9	64	0,2	6	32	15
Закладка	2,0	5	0,3	2,0	20	3,5

Для решения задач данного исследования применено компьютерное моделирование с использованием метода конечных элементов (МКЭ), реализованное в программном комплексе FEM, разработанном проф. Зотеевым О.В. Основой МКЭ является решение дифференциальных уравнений с частными производными. Для решения каж-

дой конкретной задачи модель можно идеализировать, сохранив при этом сходимость с реальным объектом исследования. Метод также позволяет изменять физико-механические свойства среды и учитывать различные стадии ведения горных пород [10].

При моделировании было рассмотрено четыре варианта стадийной выемки запасов: две стадии с рудной потолочиной и две с искусственной (рис. 3, 4).

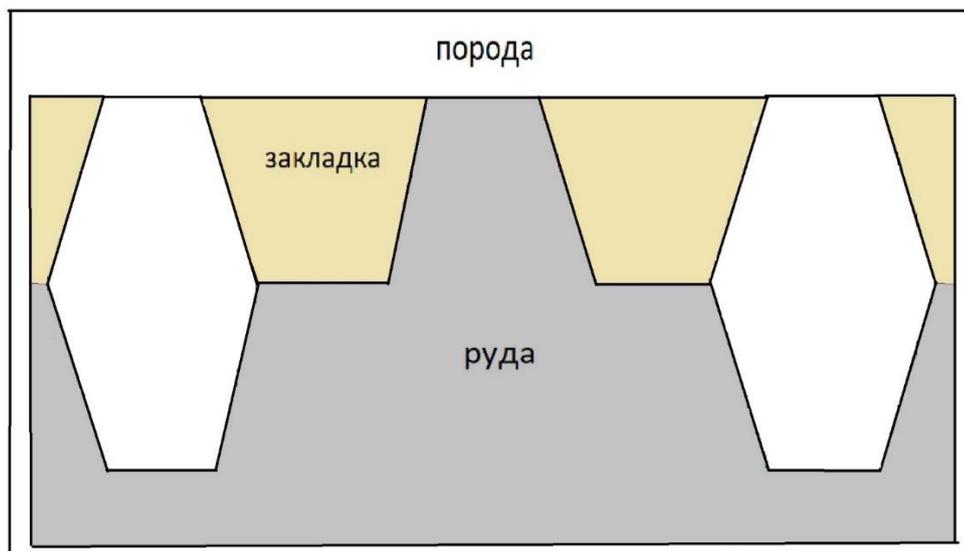


Рис. 3. Расчетная схема камер 1-й очереди

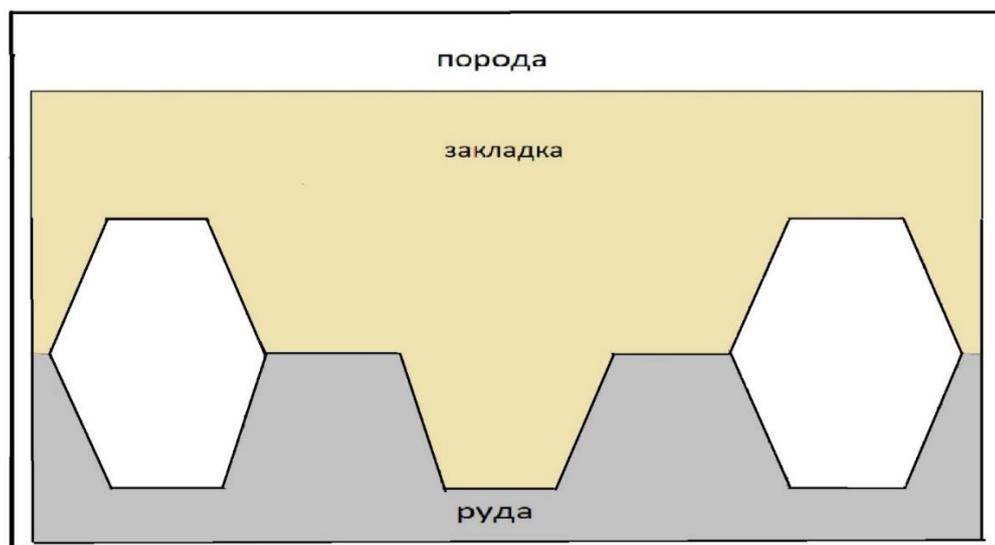


Рис. 4. Расчетная схема камер 4-й очереди

Численное моделирование очистной выемки выполнено в постановке решения плоской задачи. Для минимизации влияния граничных условий на распределение напряжений и деформаций в массиве рассматриваемый участок имел линейный размер по горизонтали 2800 м, а по вертикали – 1360 м.

Для уменьшения требуемых вычислений дискретизация модели предусматривала сгущение сетки конечных элементов вокруг очистных выработок с постепенным увеличением размера элемента по мере удаления к границам модели. Наименьший конечный элемент имеет размер 1 м.

Глубина заложения очистных камер – 300 м от поверхности.

В результате расчетов получены эпюры концентрации напряжений на контуре выработки. Однако в силу того что проведено большое количество расчетов, полученные результаты в виде эпюр составляют большой объем информации. Поэтому изменения напряженного состояния на контуре выработки решено было оценивать по трем характерным точкам А, В, С на контуре выработки (рис. 5, 6), где точка А расположена на середине стенки выработки, точка В – на наклонной рудной стенке, точка С – на почве выработки.

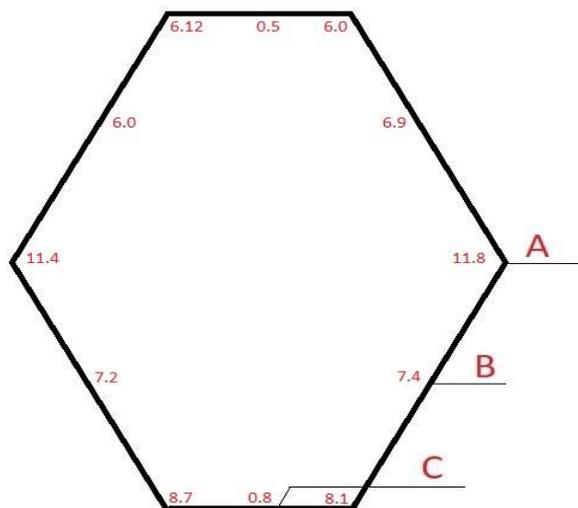


Рис. 5. Значения полных напряжений на контуре выработки при геостатическом НДС массива

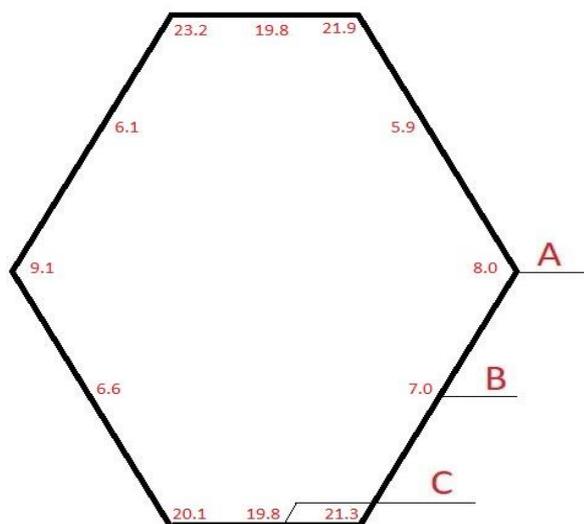


Рис. 6. Значения полных напряжений на контуре выработки при гидростатическом НДС массива

*Исследование влияния гидростатического и геостатического напряженного состояния массива на контур выработки на разных стадиях отработки рудного тела*

Результаты моделирования позволяют отметить следующее:

1. На всех полученных эпюрах концентраций напряжений на контуре выработки были получены сжимающие и отсутствие растягивающих напряжений.
2. При геостатическом напряженном состоянии горных пород на всех стадиях отработки происходит уменьшение вертикальных напряжений от середины камеры к

почве, где наблюдается их минимальное значение. А горизонтальные напряжения носят равномерный характер, находятся примерно на одном уровне, изменения их минимальны и находятся в пределах погрешности расчетов.

3. Вертикальная составляющая напряжений при гидростатической модели напряженного состояния показывает схожий характер по тренду и значениям с геостатической, а по горизонтальным напряжениям наблюдается резкое увеличение, почти в десять раз, на плоских участках почвы выработки. Это связано с тем, что верхняя часть камеры находится в разгруженном искусственном массиве, а нижняя часть испытывает повышенные горизонтальные напряжения через боковой распор рудного массива (табл. 2).

Таблица 2

**Расчетные напряжения в контрольных точках на контуре выработки при разных гипотезах горного давления, МПа**

Расчетные напряжения, МПа	А (середина стенки камеры)	В (наклонная стенка камеры)	С (почва камеры)
При гипотезе геостатических напряжений			
вертикальные	5,6	4,4	1
горизонтальные	1	1	1
напряжения на контуре	11,8	7,4	0,8
При гипотезе гидростатических напряжений			
вертикальные	8,2	5,2	0,8
горизонтальные	1	1	11,7
напряжения на контуре	8,0	7,0	19,8

*Выводы*

Анализ результатов моделирования геомеханической ситуации в процессе отработки позволил установить ряд закономерностей механизма передачи нагрузок на контур очистной выработки полигональной формы:

1. При исследовании напряженно-деформированного состояния искусственного и рудного массивов очистных камер установлено, что на их контуре везде отсутствуют растягивающие напряжения как при гидростатическом, так и при геостатическом напряженном состоянии.

2. При гидростатическом напряженном состоянии массива напряжения на стенках выработок имеют равномерный характер распределения за исключением плоских участков почвы и угловых частей камеры, находящихся в рудном массиве, где горизонтальные сжимающие напряжения увеличиваются почти в 10 раз. В связи с этим в дальнейшем возможно рассмотреть несколько иную форму дна очистной камеры для уменьшения возникающих напряжений.

3. При геостатическом напряженном состоянии вертикальные напряжения практически совпадают с гидростатической моделью НДС массива, а горизонтальные имеют минимальные значения и распределяются равномерно на контуре выработки.

4. При геостатической и гидростатической моделях напряженного состояния очистные камеры находятся в геомеханически устойчивом состоянии, в частности для условий данного месторождения магнетитов.

## Список литературы

1. Зубков А.В., 2001. *Геомеханика и геотехнология*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 333 с.
2. Котенков А.В., 2014. Камерная система разработки с закладкой для выемки руды в сложных горно-геологических условиях. *Известия вузов. Горный журнал*, № 5, С. 23-29
3. Дик Ю.А., Котенков А.В., Танков М.С., 2014. Геомеханическое обоснование камерной системы разработки с «шахматным» расположением ромбовидных камер и закладкой выработанного пространства. *Горный журнал*, № 9, С. 41-45.
4. Зилеев А.Г., Васильев Д.А., Тулин П.К., Нгуен Т.Т., Комолов В.В., 2022. Применение бутобетонной смеси при разработке рудных месторождений с искусственным поддержанием выработанного пространства. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 6-1, С. 21-34.
5. Денисова Т.А., Котенков А.В., 2021. Проведение опытно-промышленных испытаний системы разработки ромбовидными камерами с увеличенными параметрами на руднике «Айхал». *Комбинированная геотехнология: риски и глобальные вызовы при освоении и сохранении недр: труды международной научно-технической конференции*. Под ред. В.Н. Калмыкова, М.В. Рыльниковой. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, С. 154-155.
6. Булатов К.В., Дик Ю.А., Котенков А.В., Танков М.С., Кульминский А.С., Тишков М.В., 2022. *Новые технологические решения разработки кимберлитовых месторождений Якутии: монография*. Екатеринбург: Уральский рабочий, 600 с.
7. Криницын Р.В., 2022. *Разработка методики оценки влияния тектонического нарушения на вторичное поле напряжений в приконтурном массиве горизонтальной выработки*: специальность 25.00.20 "Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика": дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 85 с.
8. Мокешова А.Т., 2024. Современное программное обеспечение моделирования геомеханических процессов. *Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета*, Т. 24, № 8, С. 36-44. DOI 10.36979/1694-500X-2024-24-8-36-44.
9. Волков М.Н., Половов Б.Д., Прищепа Д.В., 2020. Компьютерные технологии комплексного моделирования геомеханических ситуаций. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 4, С. 40-53. DOI 10.21440/0536-1028-2020-4-40-53.
10. Зотеев О.В., 2003. Моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород численными методами. *Известия вузов. Горный журнал*, № 5.

## References

1. Zubkov A.V., 2001. *Geomechanika i geotekhnologiya* [Geomechanics and geotechnology]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 333 p.
2. Kotenkov A.V., 2014. *Kamernaya sistema razrabotki s zakladkoi dlya vyemki rudy v slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviyakh* [Chamber mining system with stowing for ore extraction in difficult mining and geological conditions]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*, № 5, P. 23-29
3. Dik Yu.A., Kotenkov A.V., Tankov M.S., 2014. *Geomekhanicheskoe obosnovanie kamernoi sistemy razrabotki s "shakhmatnym" raspolozheniem rombovidnykh kamer i zakladkoi vyrabotannogo prostranstva* [Geomechanical substantiation of a chamber development system with a "checkerboard" arrangement of diamond-shaped chambers and goaf stowing of the worked out space]. *Gornyi zhurnal*, № 9, P. 41-45.
4. Zileev A.G., Vasil'ev D.A., Tulin P.K., Nguen T.T., Komolov V.V., 2022. *Primenenie butobetonnoi smesi pri razrabotke rudnykh mestorozhdenii s iskusstvennym podderzhaniem vyrabotannogo prostranstva* [Use of rubble-concrete mixture in the development

of ore deposits with artificial maintenance of the worked out space]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 6-1, P. 21-34.

5. Denisova T.A., Kotenkov A.V., 2021. Provedenie opytно-promyshlennykh ispytaniy sistemy razrabotki rombovidnymi kamerami s uvelichennymi parametrami na rudnike "Aikhal" [Conducting pilot tests of the diamond-shaped chambers development system with increased parameters at the Aikhal mine]. *Kombinirovannaya geotekhnologiya: riski i global'nye vyzovy pri osvoenii i sokhranении neдр: trudy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Pod red. V.N. Kalmykova, M.V. Ryl'nikovoi. Magnitogorsk: Izdvo Magnitogorsk. gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova, P. 154-155.

6. Bulatov K.V., Dik Yu.A., Kotenkov A.V., Tankov M.S., Kul'minskii A.S., Tishkov M.V., 2022. Novye tekhnologicheskie resheniya razrabotki kimberlitovykh mestorozhdenii Yakutii: monografiya [New technological solutions for the development of kimberlite deposits in Yakutia: a monograph]. Ekaterinburg: Ural'skii rabochii, 600 p.

7. Krinitsyn R.V., 2022. Razrabotka metodiki otsenki vliyaniya tektonicheskogo narusheniya na vtorichnoe pole napryazhenii v prikonturnom massive gorizontnoi vyrabotki [Development of a methodology for assessing the impact of tectonic disturbance on the secondary stress field in a contour array of horizontal workings]: spetsial'nost' 25.00.20 "Geomekhanika, razrushenie gornyykh porod, rudnichnaya aerogazodinamika i gornaya teplofizika": dis. ... kand. tekhn. nauk. Ekaterinburg, 85 p.

8. Mokeshova A.T., 2024. Sovremennoe programmnoe obespechenie modelirovaniya geomekhanicheskikh protsessov [Modern software for modeling geomechanical processes]. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiiskogo Slavyanskogo universiteta*, Vol. 24, № 8, P. 36-44. DOI 10.36979/1694-500X-2024-24-8-36-44.

9. Volkov M.N., Polovov B.D., Prishchepa D.V., 2020. Komp'yuternye tekhnologii kompleksnogo modelirovaniya geomekhanicheskikh situatsii [Computer technologies for complex modeling of geomechanical situations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, № 4, P. 40-53. DOI 10.21440/0536-1028-2020-4-40-53.

10. Zoteev O.V., 2003. Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornyykh porod chislennymi metodami [Modeling of the stress-strain state of a rock mass by numerical methods]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*, № 5.

УДК 622.333

**Федорин Валерий Александрович**

доктор технических наук,  
главный научный сотрудник,  
Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН,  
650000, г. Кемерово, п-т Ленинградский, 10  
e-mail: [fedorinva@ficuuh.ru](mailto:fedorinva@ficuuh.ru).

**Шишков Роман Игоревич**

кандидат технических наук,  
Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН,  
e-mail: [rshis@yandex.ru](mailto:rshis@yandex.ru)

**Татарина Оксана Андреевна**

ведущий инженер,  
Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН,  
e-mail: [TatarinovaOA@yandex.ru](mailto:TatarinovaOA@yandex.ru)

### АНАЛИЗ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТЕРСИНСКОГО ГЭР КУЗБАССА\*

#### Аннотация:

При анализе авторы использовали традиционный подход, рекомендованный МПР России, для технологической оценки запасов угольных пластов в Терсинском геолого-экономическом районе Кузбасса. Дополнительно рассмотрены вопросы метода доступа к георесурсам и созданию производственной инфраструктуры угледобывающего комплекса «Увальный» Терсинского ГЭР.

*Ключевые слова:* запасы угля, технологическая оценка, Терсинский геолого-экономический район, метод доступа к георесурсам.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.044

**Fedorin Valeriy A.**

Doctor of Engineering Sciences, Chief Researcher,  
Institute of Coal,  
FRC for Coal and Coal Chemistry, SB of RAS,  
10 Leningradsky Av., 650000 Kemerovo  
e-mail: [fedorinva@ficuuh.ru](mailto:fedorinva@ficuuh.ru),

**Shishkov Roman I.**

Candidate of Technical Sciences, Institute of Coal,  
FRC for Coal and Coal Chemistry, SB of RAS  
e-mail: [rshis@yandex.ru](mailto:rshis@yandex.ru)

**Tatarinova Oksana A.**

Leading Engineer, Institute of Coal,  
FRC for Coal and Coal Chemistry, SB of RAS  
e-mail: [TatarinovaOA@yandex.ru](mailto:TatarinovaOA@yandex.ru)

### ANALYSIS FOR GEOTECHNOLOGICAL ESTIMATION OF KUZBASS COAL DEPOSIT RESOURCES OF TERSSINSKIY GEOLOGICAL AND ECOLOGICAL REGION

#### Abstract:

The authors used a traditional method recommended by the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation while carrying out the analysis of the geotechnological estimation for Kuzbass Terssinskiy geological and ecological region coal seam resources. Additionally, the issues of “access to geo-resources” method and of the building industrial infrastructure for “Uval’ny” coal production complex of Terssinskiy geological and ecological region.

*Key words:* Coal resources, technological estimation, Terssinskiy geological and ecological region, “access to geo-resources” method.

#### Введение

На основании выполненных исследований установлено, что состояние и воспроизводство ресурсной базы в угольной промышленности Кузбасса достаточно надежны, однако для эффективного развития угледобычи и обеспечения конкурентоспособности угля на внутреннем и внешнем рынках в ближайшие годы необходима переоценка сырьевого потенциала действующих шахт и резервных участков для нового шахтного строительства. Существуют проблемы, связанные с территориальным размещением, марочным составом углей и особенно с технологической оценкой отработки пластов угля в Кузбассе при применении новых технологий угледобычи.

Для анализа распределения угольных пластов по геолого-экономическим районам Кузбасса использована электронная база данных д.г.-м.н. Юзвickого А.З. [1], в создании которой принимали непосредственное участие сотрудники Института угля ФИЦ

\* Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0024 «Разработка эффективных технологий добычи угля роботизированными горнодобывающими комплексами без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ, систем управления и методов оценки технического состояния и диагностики их ресурса и обоснование обеспечения воспроизводства минерально-сырьевой базы. 2024-2025 гг.» (рег. № 1022041500010-0-1.5.1;2.7.5).

УУХ СО РАН [2, 3]. Геолого-промышленная карта Кузнецкого бассейна создана с пакетом прикладных информационных программ по марочному составу угля (ГОСТ 25543-88), геологической изученности, особенностям геологического строения, угленосности, перспективного освоения и воспроизводства угольной сырьевой базы Кузнецкого бассейна.

По качественным характеристикам запасы угля для подземного способа разработки разделяются на 3 группы: высокотехнологичные, технологичные и нетехнологичные (табл. 1) [4]. Из общего резерва выделяются, с одной стороны, категории наиболее рентабельных, или технологичных, запасов и, с другой, – категории нерентабельных, или нетехнологичных, запасов.

Таблица 1

**Распределение запасов угля для подземного способа разработки**

Группа запасов по технологичности разработки	Высокотехнологичные	Технологичные	Нетехнологичные
Угол падения, град	Менее 18	19 – 35	Более 35
Мощность пластов, м	2,0 – 7,0	1,2 – 2,0 Более 7,0	Менее 1,2
Разрывная нарушенность, км/км <sup>2</sup>	Менее 2,0	2,0 – 5,0	Более 5,0
Опасность пласта по внезапным выбросам угля и газа	Неопасный	С прогнозом выбросоопасности	Любая

Повышение планки группы высокотехнологичных запасов по мощности пластов до 7 м, а в отдельных случаях до 8,4 м (в один слой) связано с новым очистным оборудованием в длинном забое (Eickhoff SL 1000) с месячной производительностью до 1 млн т угля или с комплексом выпуска угля подкровельной толщи роботизированным комплексом [5]. В практике угледобычи пласты мощностью более 3,5 м (для подземного способа) и более 4,5 м (для открытого) считаются мощными.

Приведенный выше качественный анализ запасов угля по технологичности разработки показывает, что технологическая оценка угля, находящегося в недрах, является сложной и многоплановой задачей, требующей нестандартных решений, связанных с методологией оценки месторождений полезных ископаемых. Главными причинами такого состояния являются постоянно меняющаяся экономическая среда и особенности национального недропользования [6].

Научный подход к геолого-экономической оценке угольных месторождений начал формироваться благодаря усилиям академика Агошкова М.И. (ИПКОН РАН), академика Малышева Ю.Н. (АГН), д.т.н. Стрекачинского Г.А. (ИГД СО РАН), д.э.н. Краснянского Г.Л. (WMC-ROC), д.т.н. Зайденварга В.Е., д.т.н. Ковальчука А.Б. (ИНКРУ) и продолжается в Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН на основе мировых стандартов стоимостной оценки участков недр. Технологическая стоимость (technical value) определяется по результатам технологической оценки запасов угля по качественному составу (маркам) угля, горнотехнологическим системам разработки и, по возможности, освобождена от конъюнктурных и других показателей. Этот подход реализован в международном стандарте VALMIN, разработанном Австралийским институтом горного дела и металлургии (AusIMM), рекомендованном МПР России в Методических рекомендациях по технико-экономическому обоснованию кондиций для под-

счета запасов месторождений твердых полезных ископаемых (Угли и горючие сланцы) [ 7 ].

Для первоначальной оценки денежного потока (ДП), или Cash Flow (CF) по прибыли, использована формула  $П_{дп} = S(C_t - Z_t)/(1 + E)^t$ , где  $C_t$  – стоимость реализованной продукции соответствующей марки в  $t$ -м году с учетом обогащения;  $Z_t$  – полные затраты (включая налоги) с учетом геотехнологического способа разработки (открытый, подземный или комбинированный) в  $t$ -м году, руб.;  $E$  – ставка дисконтирования (норма дисконта времени), доли ед.

При расчете денежного потока приведение разновременных затрат и доходов к начальному периоду оценки осуществляется с использованием процедуры дисконтирования. Коэффициент дисконтирования  $g_t$  определяется по формуле  $g_t = 1/(1+E)^t$ , где  $t$  – номер расчетного года. Для расчета современной стоимости будущих денежных потоков в случае, если они равны для каждого года эксплуатации объекта, вместо коэффициента дисконтирования можно использовать так называемый коэффициент ежегодной ренты  $b_t$  (коэффициент аннуитета), рассчитанный по формуле  $b_t = (g^t - 1)/g^t(g - 1)$ , где  $g = (1 + E)$ ;  $t$  – срок эксплуатации объекта. Однако нами используется более адекватный по времени среднеинтегральный коэффициент обесценивания  $j$ -го участка, учитывающий не только срок эксплуатации ( $T$ ), но и время начала эксплуатации шахты или угольного разреза ( $T^H$ ) и его окончания ( $T^K$ ):

$$\beta_j = (T_j^K - T_j^H + 1)^{-1} \cdot \sum_{t=T_j^H}^{T_j^K} (1 + E_{н.н.})^{-t}, \quad j \in P.$$

Из-за сложности документального обоснования ставки дисконтирования  $E_{н.н.}$  обычно принимаются равными 0,1 и 0,15, а при обосновании эксплуатационных условий расчеты осуществляются, как правило, без дисконтирования или в соответствии с условиями кредитования.

Под технологической стоимостью понимается стоимость будущих доходов от эксплуатации угольных месторождений, рассчитанная без учета изменения стоимости денежных потоков во времени и освобожденная от иных составляющих (премия за риски, прогноз цен на уголь и составляющие материальных затрат, налоги и прочие обязательные платежи). Технологическая стоимость определяется по результатам технологической оценки запасов угля (технико-экономическое обоснование условий), которая представляет исходную информацию (прогноз капитальных вложений и операционных затрат) для стоимостной оценки запасов угля. Технологическая стоимость (technical value) и формирующие ее факторы связаны преимущественно с качеством угля, горно-геологическими условиями месторождения и применяемой технологией добычи и обогащения угля и, насколько это возможно, освобождены от конъюнктурных и других показателей.

Первоначальная исходная информация по группам технологичности запасов угля разбивается на участки по площади (углеплотность), которая выражается в количестве запасов угля, заключенных в угленосной формации (свите, горизонте) по мощности и маркам угля, на единицу площади ( $\text{км}^2$ ) ее общего распространения или в принятых границах технологической оценки.

На рис. 1 представлено распределение углеплотности (млн т/кв. км) и удельной по площади ценности запасов угля (млрд руб / кв. км) Терсинского ГЭР ( $P_n$  в координатах  $x, y$ ), где выделяются две области (юго-западная и восточная) с максимальными значениями удельной ценности запасов угля по мощности пластов и марочному составу [8].

Проблема стоимостной оценки запасов угля является сравнительно новой, а ее решение еще недостаточно проработано как в теоретическом, так и в практическом плане, особенно с запасов угля даже для простых в геологическом и хорошо разведанных месторождений составляет не менее 20 %, а в большинстве типичных случаев она

значительно выше. Схемы разработки месторождений могут быть весьма разнообразны, а расчетные показатели производительности существенно отличаются от реальных значений и технологической оценки.

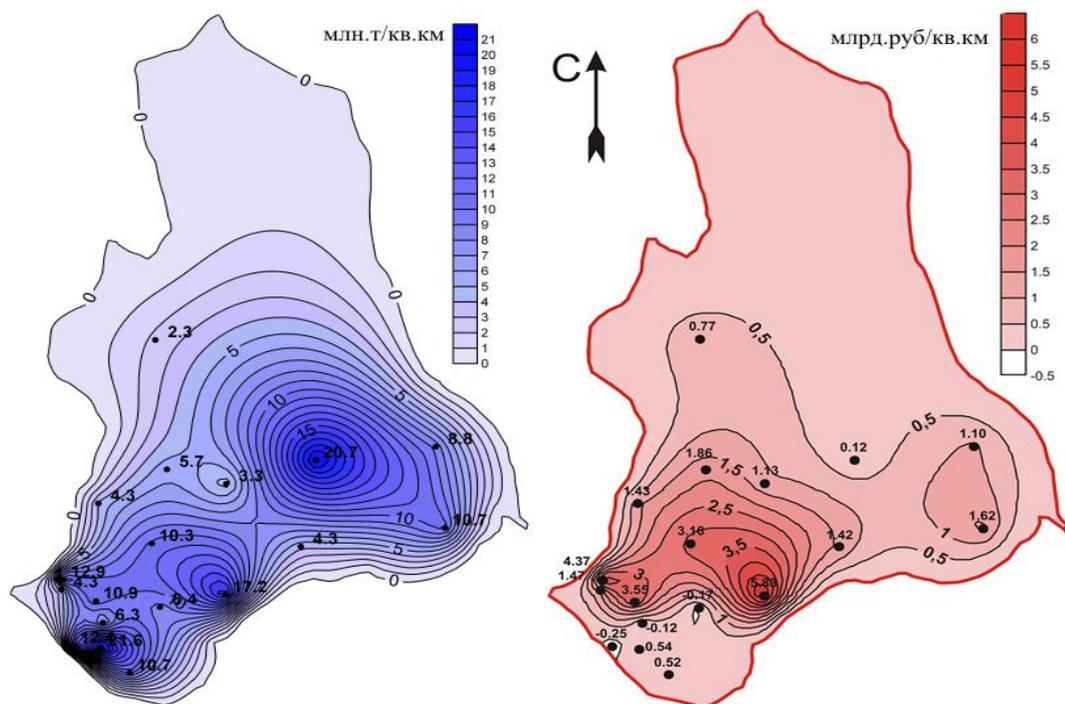


Рис. 1. Распределение углеплотности (млн т/кв. км) и удельной по площади ценности запасов угля (млрд руб/кв. км) Терсинского ГЭР

Определить стоимость конкретного месторождения можно лишь путем имитационного моделирования всего процесса разведки, разработки, обустройства месторождения, добычи и реализации продукции (включая процесс обогащения). При этом должны быть обоснованы геологические, технологические, экологические, экономические и другие показатели, характеризующие этот процесс с учетом оценки устойчивости и обоснованности принимаемых решений.

При оценке угольных месторождений предлагается использовать метод пооперационного моделирования параметров технологических схем и процессов. Этот метод был использован авторами при анализе производственной инфраструктуры угледобывающего комплекса «Увальный» Терсинского геолого-экономического района Кузбасса [9].

Создание транспортных коридоров и введение самого понятия стало в последнее время поистине мировой тенденцией. Основная задача транспортной логистики заключается в создании оптимальных транспортных маршрутов и разработке транспортных цепочек, с помощью которых будет доставляться груз. Транспортная задача в классической постановке не дает возможности учитывать многие факторы, от которых зависит в итоге эффективность организации перевозок. Учет всех факторов отражает тот важный факт, что планирование, организация перевозки должны быть построены на основе того представления, что логистика является динамической категорией [10].

Сложностью освоения Терсинского ГЭР является его отдаленность и недостаточно развитая инфраструктура, а также важной особенностью района является то, что на севере и востоке района нет промышленно развитых соседей. Требования охраны природы являются одним из важнейших факторов, влияющих на условия развития и размещения объектов на территории района.

Для нормального функционирования угледобывающего предприятия необходимо до его ввода в эксплуатацию создать инженерно-техническую инфраструктуру осваиваемого региона, которая должна финансироваться за счет средств федерального бюджета. Прежде всего это объекты энергохозяйства, железнодорожного хозяйства и автодороги.

Следует добавить, что интенсивное освоение угольных месторождений невозможно без соответствующей транспортной инфраструктуры, основанной на принципах транспортной логистики [11]. Основным из принципов логистики является принцип оптимальности, определяющий характеристику уровня качества (оптимальное решение задачи, оптимальный план, оптимальное управление). Задача заключается не в том, чтобы найти решение лучше существующего, а в том, чтобы найти самое лучшее решение из всех возможных. Поэтому в работе использован принцип динамической оптимизации трасс подъездных путей и наземных грузоперевозок, основанный на методе динамического программирования (Р. Беллман) в сочетании с подземными грузоперевозками. В результате анализа степени влияния факторов выделены наиболее существенные и получена оптимизационная модель следующего вида:

$$F_i = \min_j \{f_{ij} + F_j\}, i > j, i = 1, \dots, N;$$

$$F_{ij} = C_p \frac{L_{ij}}{\cos(\arctg K)} + C_g V_{ij} + EQ,$$

где  $C_p$  – удельные затраты на строительство и эксплуатацию коммуникационного коридора, руб/м;

$C_g$  – удельные приведенные затраты на земляные работы, руб/м<sup>3</sup>;

$L_{ij}$  – длина отрезка коммуникационного коридора, м;

$V_{ij}$  – объем земляных работ между  $i$ -й и  $j$ -й точками трассы, м<sup>3</sup>;

$K$  – руководящий уклон для коммуникационного коридора;

$E$  – экономический ущерб от консервации запасов в целике под коммуникационный коридор, руб/т;

$Q_{ij}$  – объем консервируемых запасов угля, т.

В этом случае все затраты по работе транспорта будут минимальными. Минимизация функции по простиранию пласта (с транспортом на поверхности) двукрылое шахтное поле превращает в модульный шахтоучасток-лаву с односторонней схемой вскрытия, по которой и произведены расчеты капитальных вложений в строительство и затраты на развитие инженерно-технологической инфраструктуры.

Предварительное освоение Терсинского ГЭР было рекомендовано начать с участка «Увальный» Южный (рис. 2). И на основе анализа построенной транспортно-технологической характеристики всего Терсинского ГЭР были определены участки для первоочередного освоения и оптимальная трасса коммуникационного коридора на территории ГЭР, обеспечивающая доступ к месторождениям полезных ископаемых, пригодным для промышленного освоения.

Освоение и эксплуатация участков «Увальных» не является исключением и требует развития инженерно-технической инфраструктуры на основе метода динамической оптимизации доступа к георесурсам, что было подробно рассмотрено в предыдущем разделе данной работы. Для выбора эффективного пути развития был предложен вариант возможного развития железнодорожного хозяйства, автодорог и объектов электроснабжения. В данном разделе работы для рассмотренных вариантов определены необходимые капитальные вложения на их реализацию, расчеты сведены в табл. 2.

Минимизация функции по простиранию пласта (с транспортом на поверхности) двукрылое шахтное поле превращает в модульный шахтоучасток (шахта-лава) [12] с односторонней схемой вскрытия (рис. 3), по которой и произведены расчеты капитальных вложений в строительство и затраты на развитие инженерно-технологической инфраструктуры.

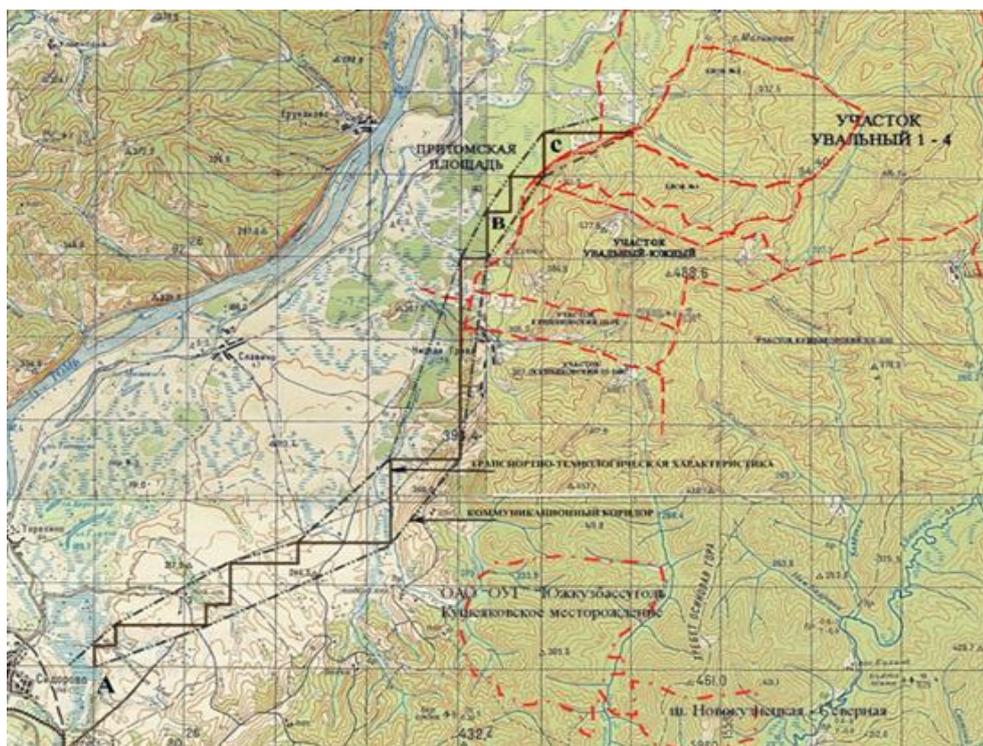


Рис. 2. Транспортно-технологическая характеристика на поверхности поля УДК «Увальный»

Таблица 2

**Капитальные затраты на развитие инженерно-технической инфраструктуры**

Наименование объектов	Протяженность, км	Стоимость, тыс. руб.
Железные дороги	30	2851704
Автомобильные дороги	30	842164
ЛЭП	30	240898
Подстанции ЛЭП		253178
Неучтенные затраты, 3 %		118412
<b>Общие затраты</b>		<b>4065482</b>

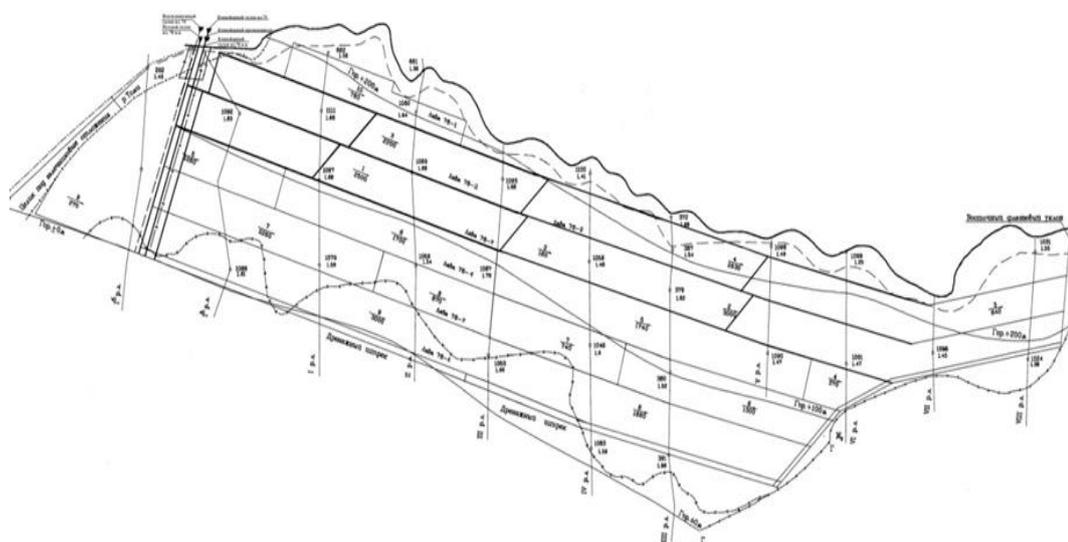


Рис. 3. Схема размещения вскрывающих и подготовительных выработок пласта 78 н.п. на участке Увальный Южный

### Заключение

Из представленных данных следует, что удельные капитальные вложения на инженерно-технические сооружения при освоении Терсинского ГЭР составят в среднем 536 – 666 руб. на тонну производственной мощности. Эти вложения были использованы в ТЭО обоснования кондиций угольных запасов шахты «Увальная», построенной в 2017 г. по проектной документации Института ОАО Кузбассгипрошахт с корректировкой технологических решений в границах северо-восточного блока пласта 67. При формировании подхода к стоимостной оценке георесурсного потенциала угольных месторождений должны в обязательном порядке оцениваться варианты доступа к георесурсам, технология обогащения и переработки угля [13, 14].

На основе анализа построенной транспортно-технологической характеристики всего Терсинского ГЭР были определены участки для первоочередного освоения и оптимальных трасс коммуникационного коридора на территории ГЭР, обеспечивающих доступ к месторождениям полезных ископаемых, пригодных для промышленного освоения и выбора оптимальных схем вскрытия для данных горно-геологических условий месторождения.

В 2023 г. шахта «Увальная» (в составе УК «Сибирская» с обогатительной фабрикой) вышла на добычу 6,4 млн т высококачественного угля марок ГЖ и Ж себестоимостью 1365 руб. за тонну со средней производительностью труда на одного рабочего 443,5 т. По рейтингу шахта «Увальная» – лучшее угольное предприятие в Кемеровской области в составе УК «Сибирская» (Новокузнецкий административный район) – победитель в номинации «Угольная компания Кузбасса – 2023».

Дальнейшая работа предполагается на базе АООН «НАЭН» (Национальная ассоциация по экспертизе недр), при которой в конце 2024 г. сформирован Угольный комитет, члены правления и экспертный совет. Создание Угольного комитета позволяет консолидировать усилия ведущих специалистов, представителей компаний и органов власти для решения ключевых задач в угольной отрасли.

### Список литературы

1. *Геолого-промышленная карта Кузнецкого бассейна*. М-б 1:100 000. Объяснительная записка. Под ред. А.З. Юзвickого. Новосибирск: СНИИГГиМС, 2000, 128 с.
2. Юзвickий А.З., Станкус В.М., Шаклеин С.В. и др., 1999. Угольные ресурсы Сибири и их рациональное использование. *Минеральные ресурсы России: экономика и управление*, № 3, С. 11-20.
3. Станкус В.М., Анферов Б.А., Кузнецова Л.В., 2006. Состояние и перспективы освоения Терсинского геолого-экономического района Кузбасса. *Уголь*, №11, С.37-40.
4. Краснянский Г.Л., Зайденварг В.Е., Ковальчук А.Б., Скрыль А.И., 2010. *Уголь в экономике России*. Под общ. ред. Г.Л. Краснянского. Москва: Экономика, 383 с.
5. Клишин В.И., Анферов Б.А., Кузнецова Л.В., 2023. Разработка мощного пологого пласта с выпуском угля подкровельной толщи роботизированным комплексом. *Горная промышленность*, №S2, С. 26-31.
6. Шулятьева Л.И., 2024 Оценка угольных месторождений: проблемы и методы решения. Часть 1, *Уголь*, № 3, С. 110-116.
7. *Методические рекомендации по технико-экономическому обоснованию кондиций для подсчета запасов месторождений твердых полезных ископаемых. Угли и горючие сланцы*. № 37-р от 05.06.2007 г. Москва: Министерство природных ресурсов РФ, 49 с.
8. Клишин В.И., Федорин В.А., Борисов И.Л., 2014. *Перспективы освоения Терсинского геолого-экономического района Кузбасса. Перспективы инновационного развития регионов России: Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции*. Прокопьевск: Изд-во КузГТУ в г. Прокопьевске, С. 136-140.

9. Федорин В.А., Татарина О.А., 2014. Оптимальное расположение коммуникационного коридора с учетом очередности освоения геологических участков и схем вскрытия угольных пластов. *Вестник КузГТУ*, № 4, С. 49 – 53.

10. Доенин В.В., 2010. *Динамическая логистика транспортных процессов*. Москва: Издательство «Спутник+», 246 с.

11. Федорин В.А., Татарина О.А., 2022. Цифровой метод в задачах оптимизации доступа к георесурсам. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 12-1. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_121\_0\_134.

12. *Программа развития угольной промышленности России до 2035 года* (распоряжение Правительства РФ от 13 июня 2020 г. № 1582-р). URL: <http://static.government.ru/media/files/OoKX6PriWgDz4CNNAxwIYZEE6zm6I52S.pdf> (дата обращения 28.02.2025)

13. Бурдин Д.Б., 2021. Концептуальные подходы к классификации запасов и ресурсов ТПИ. *Международный научно-технический журнал «Недропользование XXI век»*, № 3-4, С. 4-8.

14. Бурдин Д.Б., 2024. Формирование принципов оценки георесурсного потенциала месторождений ТПИ. *Международный научно-технический журнал «Недропользование XXI век»*, № 3-4, С. 21-29.

### References

1. Geologo-promyshlennaya karta Kuznetskogo basseina [Geological and industrial map of Kuzbass basin]. M-b 1:100 000 . Ob"yasnitel'naya zapiska. Pod red. A.Z. Yuzvitskogo. Novosibirsk: SNIIGGiMS, 2000,128 p.

2. Yuzvitskii A.Z., Stankus V.M., Shaklein S.V. i dr., 1999. Ugol'nye resursy Sibiri i ikh ratsional'noe ispol'zovanie [Siberian Coal resources and their rational utilization]. *Mineral'nye resursy Rossii: ekonomika i upravlenie*, № 3, P. 11-20.

3. Stankus V.M., Anferov B.A., Kuznetsova L.V., 2006. Sostoyanie i perspektivy osvoeniya Tersinskogo geologo-ekonomicheskogo raiona Kuzbassa [State and perspectives of exploration for Tersinskiy geological and ecological region of the Kuzbass]. *Ugol'*, №11, P.37-40.

4. Krasnyanskii G.L., Zaidenvarg V.E., Koval'chuk A.B., Skryl' A.I., 2010. *Ugol' v ekonomike Rossii* [Coal in the economy of Russia]. Pod obshch. red. G.L. Krasnyanskogo. Moscow: Ekonomika, 383 p.

5. Klishin V.I., Anferov B.A., Kuznetsova L.V., 2023. Razrabotka moshchnogo pologogo plasta s vypuskom uglia podkrovel'noi tolshchi robotizirovannym kompleksom [Development of thick flat-lying seam with roof coal release by robotic complex]. *Gornaya promyshlennost'*, №S2, P. 26-31.

6. Shulyat'eva L.I., 2024 Otsenka ugot'nykh mestorozhdenii: problemy i metody resheniya. Chast' 1 [Estimating coal deposits: problems and solution methods. Part 1], *Ugol'*, № 3, P. 110-116.

7. Metodicheskie rekomendatsii po tekhniko-ekonomicheskomu obosnovaniyu konditsii dlya podscheta zapasov mestorozhdenii tverdykh poleznykh iskopaemykh . Ugli i goryuchie slantsy [Methodological recommendations on technical and economical substantiation of conditions for calculating the solid mineral deposit resources. Coals and pyrobituminous shale]. № 37-г от 05.06.2007 г. Moscow: Ministerstvo prirodnnykh resursov RF, 49 p.

8. Klishin V.I., Fedorin V.A., Borisov I.L., 2014. Perspektivy osvoeniya Tersinskogo geologo-ekonomicheskogo raiona Kuzbassa [Exploration perspectives for Tersinskiy geological and economical region of the Kuzbass]. *Perspektivy innovatsionnogo razvitiya regionov Rossii: Sbornik trudov IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Prokop'evsk: Izd-vo KuzGTU v g. Prokop'evske, P. 136-140.

9. Fedorin V.A., Tatarinova O.A., 2014. Optimal'noe raspolozhenie kommunikatsionnogo koridora s uchetom ocherednosti osvoeniya geologicheskikh uchastkov i skhem

vsкрыtiya ugol'nykh plastov [Optimal positioning of the service corridor taking into account the order of geological sections opening up and coal seams opening schemes]. Vestnik KuzGTU, № 4, P. 49 – 53.

10. Doenin V.V., 2010. Dinamicheskaya logistika transportnykh protsessov [Dynamic logistics for transportation processes]. Moscow: Izdatel'stvo "Sputnik", 246 p.

11. Fedorin V.A., Tatarinova O.A., 2022. Tsifrovoy metod v zadachakh optimizatsii dostupa k georesursam [Digital method in tasks of optimization of the access to georesources]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 12-1. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_121\_0\_134.

12. Programma razvitiya ugol'noi promyshlennosti Rossii do 2035 goda [The program for coal industry development in Russia till 2035] (rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 13 iyunya 2020 g. № 1582-r) . URL: <http://static.government.ru/media/files/OoKX6PriWgDz4CNNAxwIYZEE6zm6I52S.pdf> (data obrashcheniya 28.02.2025)

13. Burdin D.B., 2021. Kontseptual'nye podkhody k klassifikatsii zapasov i resursov TPI [Conceptual approach to classifying solid mineral reserves and resources]. Mezhdunarodnyi nauchno-tehnicheskii zhurnal "Nedropol'zovanie XXI vek", № 3-4, P. 4-8.

14. Burdin D.B., 2024. Formirovanie printsipov otsenki georesurnogo potentsiala mestorozhdenii TPI [Forming principles for solid mineral georesources potential estimation]. Mezhdunarodnyi nauchno-tehnicheskii zhurnal "Nedropol'zovanie XXI vek", № 3-4, P. 21-29.

УДК 622.831

**Ломов Михаил Андреевич**  
младший научный сотрудник,  
Институт горного дела ДВО РАН,  
680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51  
e-mail: [9241515400@mail.ru](mailto:9241515400@mail.ru)

**Бурдинская Алёна Ариандовна**  
старший инженер,  
Институт горного дела ДВО РАН

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРООПАСНОСТИ НА РУДНИКАХ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА\*

*Аннотация:*

Освоение месторождений твердых полезных ископаемых на современном этапе происходит в постоянно усложняющихся горно-геологических и геомеханических условиях и сопровождается проявлением таких опасных геодинамических явлений, как горные удары, внезапные выбросы породы и газа, техногенные землетрясения, часто имеющие катастрофические последствия. В статье представлены результаты исследований динамических проявлений горного давления и удароопасности за период с января по ноябрь 2024 г. на полиметаллических рудниках Дальневосточного региона, включая Южное и Николаевское месторождения. Объектом анализа стала геомеханическая обстановка, характеризующаяся высокой интенсивностью сейсмоакустической активности и частыми проявлениями горного давления. Основное внимание уделено геомеханическому мониторингу с применением автоматизированной системы контроля горного давления (АСКГД) «Prognoz-ADS», обеспечивающей регистрацию параметров акустической эмиссии в диапазоне 0,5–12 кГц.

Анализ данных позволил выявить пространственно-временные закономерности сейсмоакустической активности и определить ключевые факторы, влияющие на удароопасность. Установлено, что наибольшее число динамических проявлений связано с пересечением крупных тектонических разломов, таких как разлом «Рудный», с зонами разрывных нарушений, а также с накоплением сжимающих напряжений вблизи рудных тел. Напряженно-деформированное состояние массива Южного месторождения осложняется наличием оставленных целиков забалансовых руд, межэтажных целиков и непогашенного выработанного пространства, что создает условия для реализации горно-тектонических ударов.

Предложены рекомендации по дальнейшему

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.053

**Lomov Mikhail A.**  
Junior Researcher,  
Mining Institute, FEB RAS,  
680000 Khabarovsk, 51 Turgenev Str.  
e-mail: [9241515400@mail.ru](mailto:9241515400@mail.ru)

**Burdinskaya Alena A.**  
Senior Engineer,  
Mining Institute, FEB RAS

### EXPERIMENTAL STUDIES OF IMPACT HAZARD IN THE MINES OF THE FAR EASTERN REGION

*Abstract:*

The development of solid mineral deposits at the present stage takes place with an ever-increasing complexity of mining, geological and geomechanical conditions and is accompanied by the manifestation of such dangerous geodynamic phenomena as mountain impacts, sudden emissions of rock and gas, man-made earthquakes, often with catastrophic consequences. The article presents the results of studies of dynamic manifestations of rock pressure and impact hazard for the period from January to November 2024 at polymetallic mines in the Far Eastern region, including the Yuzhnoye and Nikolaevskoye deposits. The object of the analysis was the geomechanical situation, characterized by a high intensity of seismic activity and frequent manifestations of mountain pressure. The main attention is paid to geomechanical monitoring using the "Prognoz-ADS" automated mountain pressure monitoring system, which records acoustic emission parameters in the range of 0.5–12 kHz. Data analysis made it possible to identify spatio-temporal patterns of seismic activity and identify key factors affecting impact hazard. It has been established that the greatest number of dynamic manifestations is associated with the intersection of large tectonic faults, such as the Rudny fault, with zones of discontinuous faults, as well as with the accumulation of compressive stresses near ore bodies. The stress-strain state of the Yuzhnoye deposit massif is complicated by the presence of abandoned pillars of off-balance ores, interstory pillars and outstanding depleted space, which creates conditions for the implementation of mining and tectonic impacts.

Recommendations for further improvement of the monitoring and risk management system related to dynamic manifestations are proposed. The conclusions emphasize the need for an integrated approach, including instrumental monitoring, stress-strain modeling, and regular impact hazard analysis. These measures are aimed at improving the

\* Исследования проведены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием "Центр обработки и хранения научных данных ДВО РАН", финансируемого Российской Федерацией в лице Минобрнауки России по соглашению № 075-15-2021-663.

совершенствованию системы мониторинга и управления рисками, связанными с динамическими проявлениями. Выводы подчеркивают необходимость комплексного подхода, включающего инструментальный мониторинг, моделирование напряженно-деформированного состояния и регулярный прогноз удароопасности. Эти меры направлены на повышение безопасности ведения горных работ и минимизацию рисков на месторождениях, характеризующихся высокой сейсмоакустической активностью.

*Ключевые слова:* геомеханика, горное давление, напряженное состояние, горные удары, прогноз, методы, контроль.

*safety of mining operations and minimizing risks in fields characterized by high seismic activity.*

*Key words:* geomechanics, rock pressure, state of stress, rock bursts, prediction, methods, control.

### *Введение*

Динамические проявления горного давления остаются одной из важнейших проблем безопасности и эффективности горных работ во всем мире. Такие явления особенно характерны для регионов со сложными геологическими структурами, таких как Дальний Восток России. Изучение сейсмоакустических событий и динамики горного давления на данном участке представляет собой уникальную возможность для оценки мировых методов и технологий, разработанных для оценки и уменьшения рисков проявлений горного давления [1, 2].

Исследования напряженно-деформированного состояния горного массива значительно продвинулись за последние десятилетия в мировой науке с заметными достижениями в области технологий мониторинга, таких как автоматизированные сейсмические системы и датчики давления в реальном времени. Такие страны, как Канада, Австралия и Южно-Африканская Республика, являющиеся лидерами в горной добыче твердых пород, стали пионерами стратегий, интегрирующих геомеханическое моделирование, системы раннего предупреждения и мониторинг динамических проявлений горного давления. Эти мировые практики все чаще адаптируются в России для решения специфических проблем, связанных с уникальными геомеханическими условиями региона. Опыт, полученный в результате этих международных подходов, становится основой для разработки более усовершенствованных методов смягчения рисков в России [3 – 5].

#### *Анализ динамических проявлений горного давления при отработке Николаевского и Южного месторождений*

Южное полиметаллическое месторождение расположено в Восточном Приморье, и с 1986 г. отнесено к опасным по горным ударам [6]. За годы эксплуатации здесь зарегистрировано более 2,1 тыс. динамических проявлений горного давления, а первые горные удары с тяжелыми последствиями произошли на глубинах 150 – 170 м [7 – 10]. Формы и количество проявлений горного давления представлены на рис. 1, 2.

Анализ геомеханической обстановки, складывающейся на Южном месторождении в последние годы, показал необходимость более углубленных исследований удароопасности, в том числе с применением современных методов и средств геомониторинга. С этой целью в 2022 г. на нижних горизонтах Южного месторождения была установлена 1 очередь автоматизированной системы контроля горного давления (АСКГД) «Prognoz-ADS», обеспечивающей регистрацию и определение параметров сейсмоакустических событий в частотном диапазоне 0,5...12 кГц [11].

За период с января по ноябрь 2024 г. на Южном месторождении горные работы велись преимущественно в пределах блоков 7 и 6 в этаже 411 – 427 м. Результаты сейсмоакустического мониторинга в 2024 г. представлены на рис. 3. Всего за этот период зарегистрировано 4130 сейсмоакустических событий.

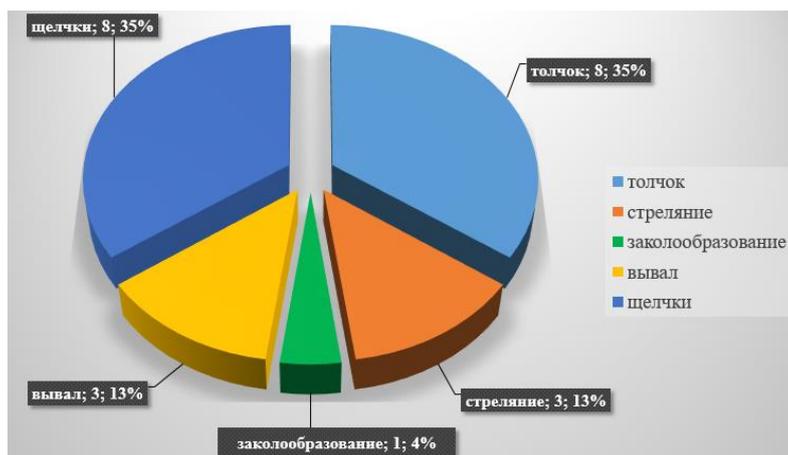


Рис. 1. Динамические проявления горного давления, зарегистрированные за период с января по ноябрь 2024 г. на месторождении Южное

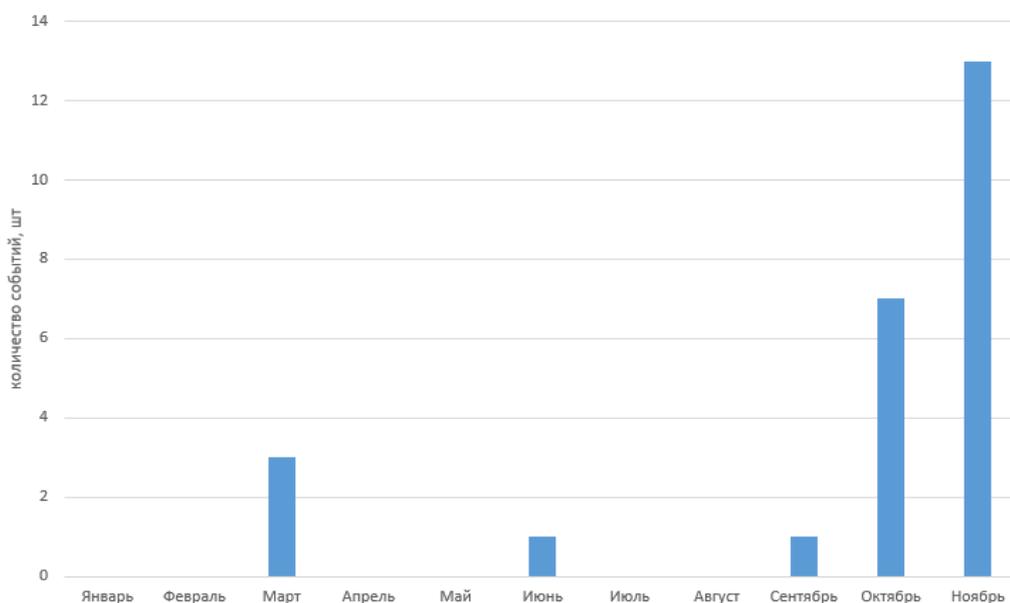


Рис. 2. Помесячное распределение проявлений горного давления в период с января по ноябрь 2024 г.

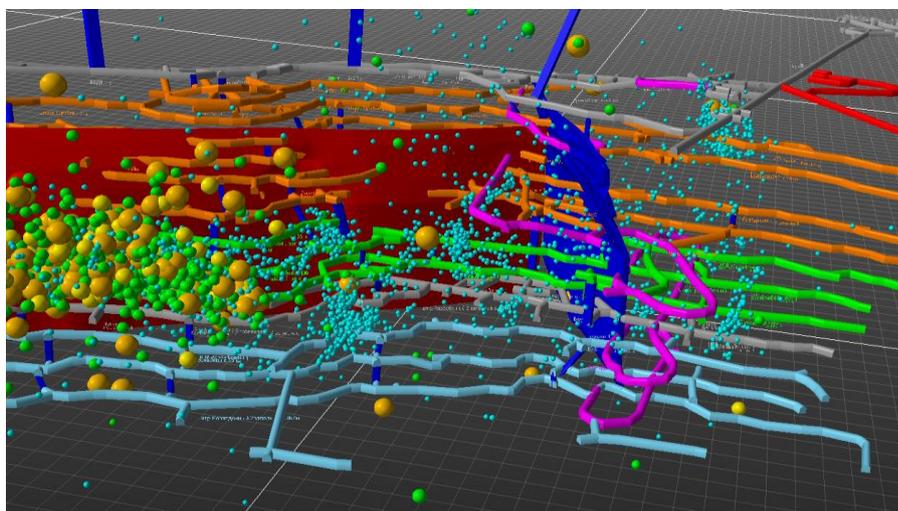


Рис. 3. Результаты сейсмоакустического мониторинга участка массива месторождения Южное в 2024 г. в 3D модели

Распределение количества и суммарной энергии АЭ-событий, зарегистрированных системой «Prognoz-ADS», показано на рис. 4. Снижение сейсмоакустической активности в первой половине 2024 г. связано со значительным сокращением объемов добычи в эти месяцы.

Наиболее высокая сейсмоакустическая активность массива горных пород с выделением значительной энергии на месторождении наблюдалась в период август – ноябрь 2024 г.

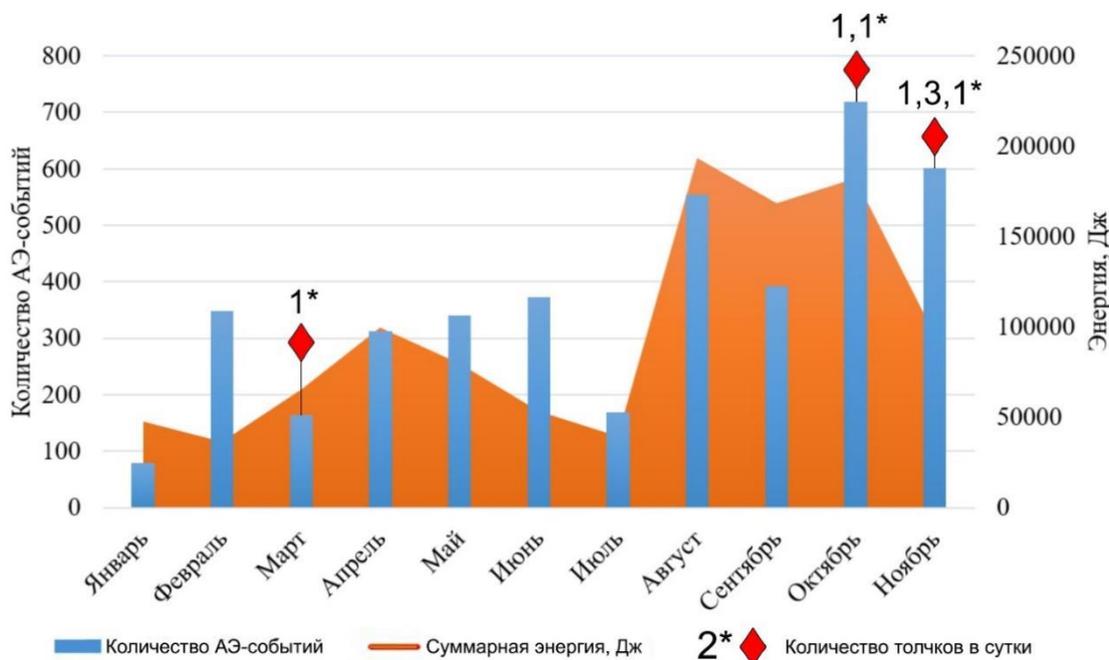


Рис. 4. Помесячное распределение количества и суммарной энергии АЭ-событий и толчков в массиве месторождения Южное за период с января по ноябрь 2024 г.

На Николаевском полиметаллическом месторождении в 2024 г. горные работы также сопровождалась динамическими проявлениями горного давления и внешними признаками удароопасности. Всего было задокументировано 68 проявлений, наибольшее их количество представлено щелчками и вывалами (рис. 5).

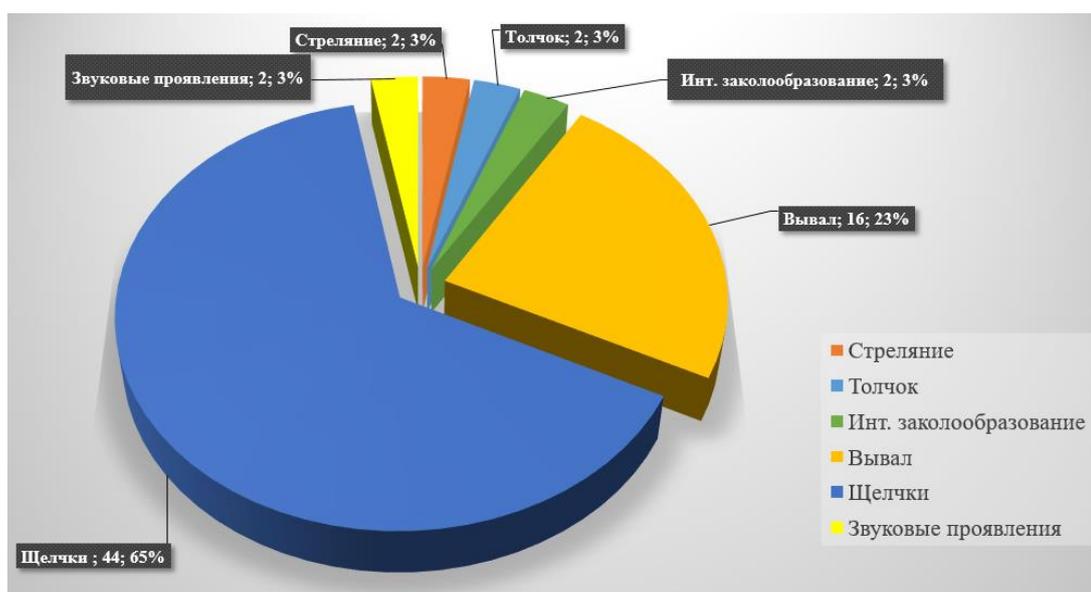


Рис. 5. Динамические проявления горного давления, зарегистрированные за период с января по ноябрь 2024 г. на Николаевском месторождении

В 2024 г. на Николаевском полиметаллическом месторождении зарегистрировано 2 толчка (рис. 6). Наибольшее число проявлений горного давления наблюдалось в феврале 2024 г.

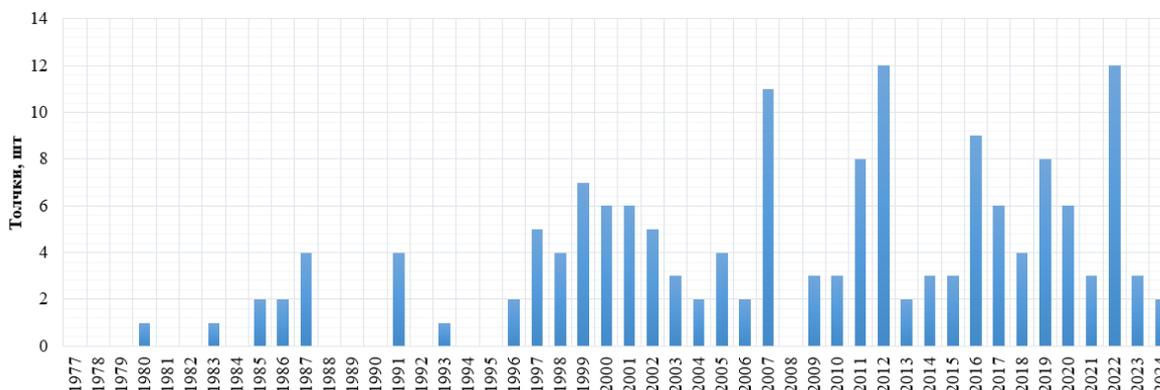


Рис. 6. Толчки, зарегистрированные на Николаевском месторождении с 1977 по 2024 г.

Первый толчок был зафиксирован 17.01.2024 в 11:51 на уклоне Буровой 1 подэтажа -444... -460 м от маркшейдерской точки № 29 до сопряжения с Водозаборником 1. Толчок сопровождался сильным звуковым эффектом, сотрясением массива и образованием пыли, что было отмечено работниками по всему шахтному полю от гор. -220 м до подэтажа -460 м, а также в здании АБК поверхностного комплекса, в зоне влияния дайки диабазовых порфиристов. После динамического проявления наблюдалось падение заколов: на подэтаже -460 м (уклон Буровой 1, камера Вспомогательной насосной); заезд на подэтаж -446 м; уклоне Буровом -433... -446 м; а также в разведочной рассечке 2 подэтажа -433 м. Гипоцентр толчка находился на отметке -460 м.

Второе сейсмическое событие произошло 06.02 в 02:30. Толчок сопровождался сильным звуковым эффектом, сотрясением массива и образованием пыли, что было отмечено работниками на подэтажах -360, -375 и -390 м. После динамического проявления наблюдалось падение заколов на подэтажах -360, -375, -390 м. Гипоцентр толчка находился на подэтаже -375 м, блок 7, камера 6, квершлаг 8-2, район маркшейдерской точки № 8-1, блок Крайний.

В текущем году большая часть событий регистрировалась в районе блока Крайний, где велись очистные работы.

#### *Результаты сейсмоакустического контроля удароопасности при разработке Южного месторождения*

Большинство зарегистрированных за период с января по ноябрь 2024 г. сейсмоакустических событий произошло в октябре – декабре в районе пересечения геологического разлома «Рудный» и зон разрывных нарушений, где велись горные работы.

29 октября 2024 г. в 04:55 был зарегистрирован толчок с энергией 17620 Дж, а 30 октября в 12:59 – толчок с меньшей энергией. Посуточное распределение количества и суммарной энергии АЭ-событий, зарегистрированных системой «Prognoz-ADS» в октябре 2024 г., представлено на рис. 7.

По данным СППГУ участка «Южный» рудника «2-й Советский» 29.10.2024 г. в I смену после проведения взрывных работ по вторичному дроблению негабаритных кусков горной массы на штреке Разведочном 4 подэтажа 419 м в Блоке 6-411 произошло динамическое проявление горного давления в форме толчка. Во II смену 29.10.2024, после проведения визуального осмотра, были выявлены обрушения породы в горных выработках Блока 6-411 на подэтажах 411, 419, 427 м. Обрушения зафиксированы на штреке Разведочном 3 подэтажа 427 м, штреке Разведочном 4 подэтажа 419 м, штреке Разведочном 2 подэтажа 411 м. Общий объем обрушений составил более 200 м<sup>3</sup> (рис. 8).

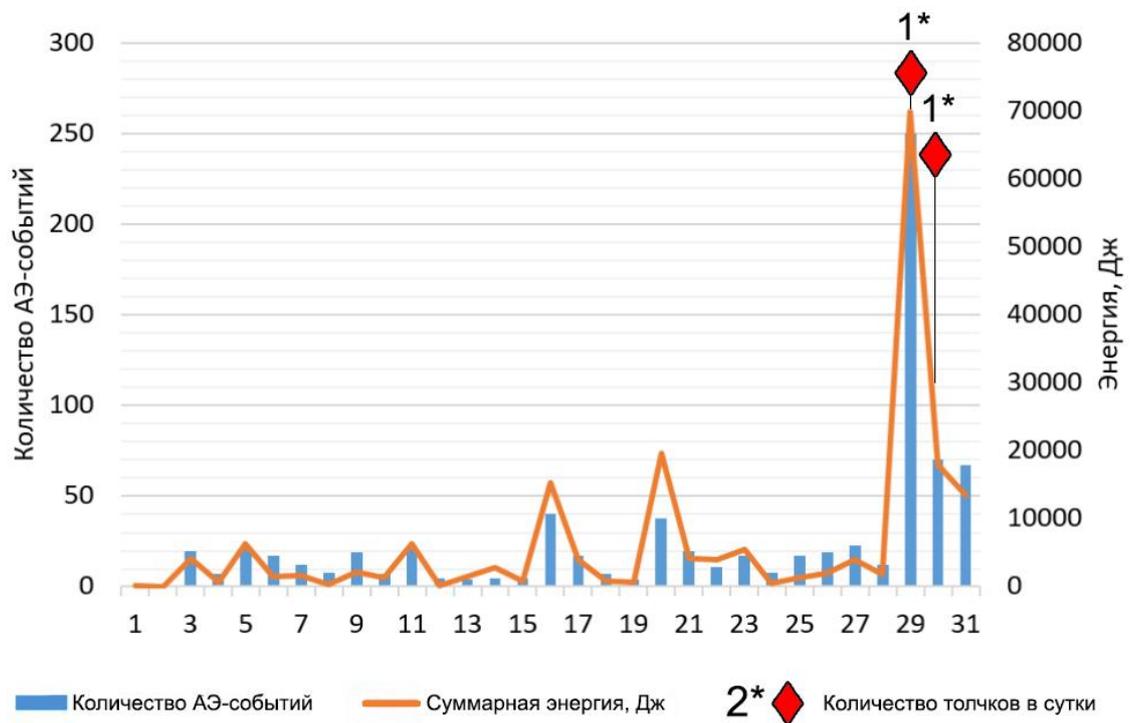


Рис. 7. Посуточное распределение количества и суммарной энергии АЭ-событий в октябре 2024 г. на месторождении Южное



Рис. 8. Последствия динамического проявления горного давления в форме толчка

Также во время осмотра горных выработок наблюдалось интенсивное заколообразование по вышеуказанным штрекам, слышались треск и щелчки в приконтурных частях горного массива, реже – толчки в глубине массива. По результатам замеров прибором локального контроля горного давления «Prognoz-L» по всему Блоку 6-411 в указанных подэтажах введена категория удароопасности «Опасно». Было отмечено, что количество импульсов акустической эмиссии горных пород увеличивалось с глубиной: меньшие значения регистрировались на подэтаже 427 м; более высокие – на подэтажах 419 и 411 м. Самое большое количество АЭ событий зафиксировано было на

подэтаже 411 м, где интенсивность АЭ более чем в 10 раз превысила критический уровень.

Динамические проявления горного давления продолжались в течение 5 суток. Служба ППГУ и горный надзор рудника ежедневно проводили визуальные осмотры горных выработок Блока 6-411 и замеры прибором локального контроля горного давления. За это время наблюдалось постепенное снижение визуальных признаков удароопасности и количества сейсмоакустических событий, регистрируемых системой «Prognoz-ADS». После очередного обследования горных выработок в Блоке 6-411 03.11.2024 г. службой ППГУ было выдано разрешение на ведение горных работ.

Изменение показателя удароопасности  $K_{уд}$  и распределение количества и суммарной энергии АЭ-событий в период 29 и 30 октября представлены на рис. 9 и 10. За несколько суток до события зафиксирована повышенная скорость миграции АЭ-событий, а 16, 20 и 27 октября превышение порогового значения  $K_{уд}$ , что может служить предвестником проявлений горного давления.

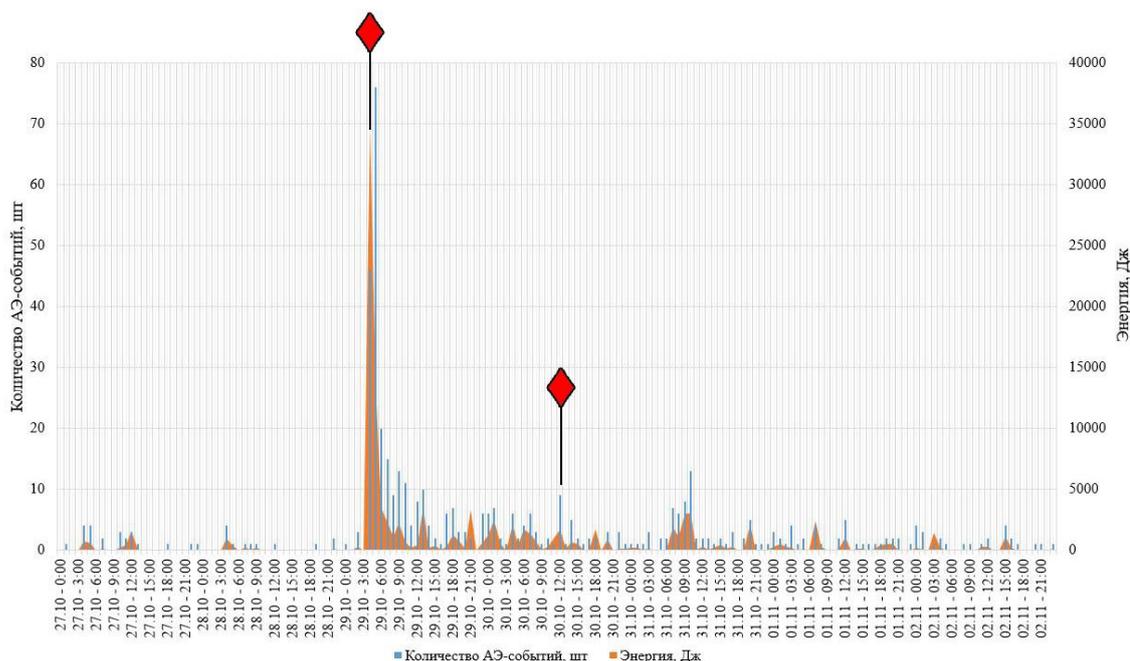


Рис. 9. Почасовое распределение количества и суммарной энергии АЭ-событий перед толчками 29 и 30 октября 2024 г.

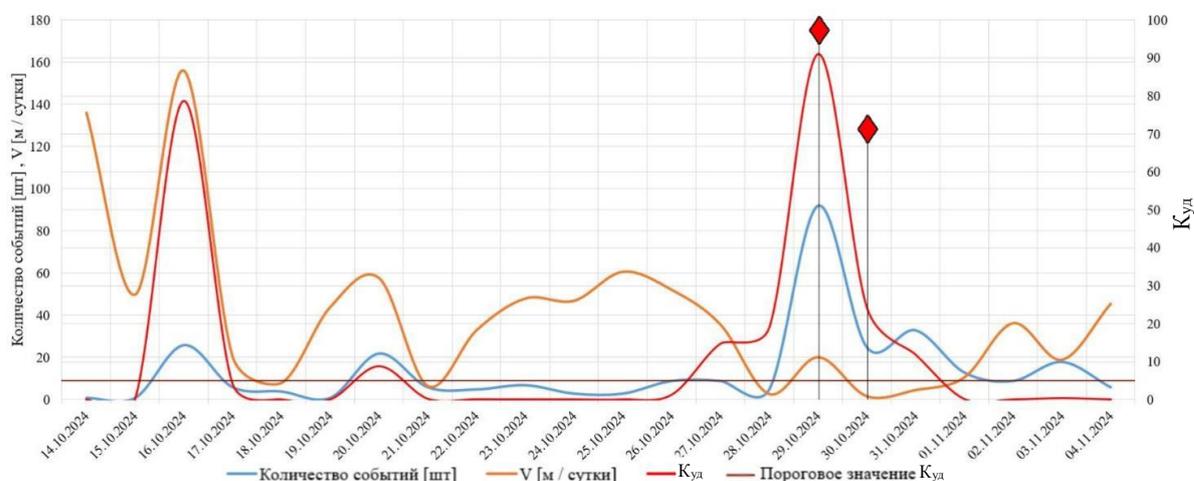


Рис. 10. Изменение показателя удароопасности  $K_{уд}$  перед толчками 29 и 30 октября 2024 г.

12 ноября 2024 г. в 11:10 было зарегистрировано АЭ-событие с энергией 274 Дж. Изменение показателя удароопасности  $K_{уд}$  и распределение количества и суммарной энергии АЭ-событий в период с 29 по 30 октября представлены на рис. 11 и 12. Невысокие значения рассчитанной энергии обусловлены процессами затухания сигналов от удаленных от датчиков АСКГД очагов АЭ-событий.

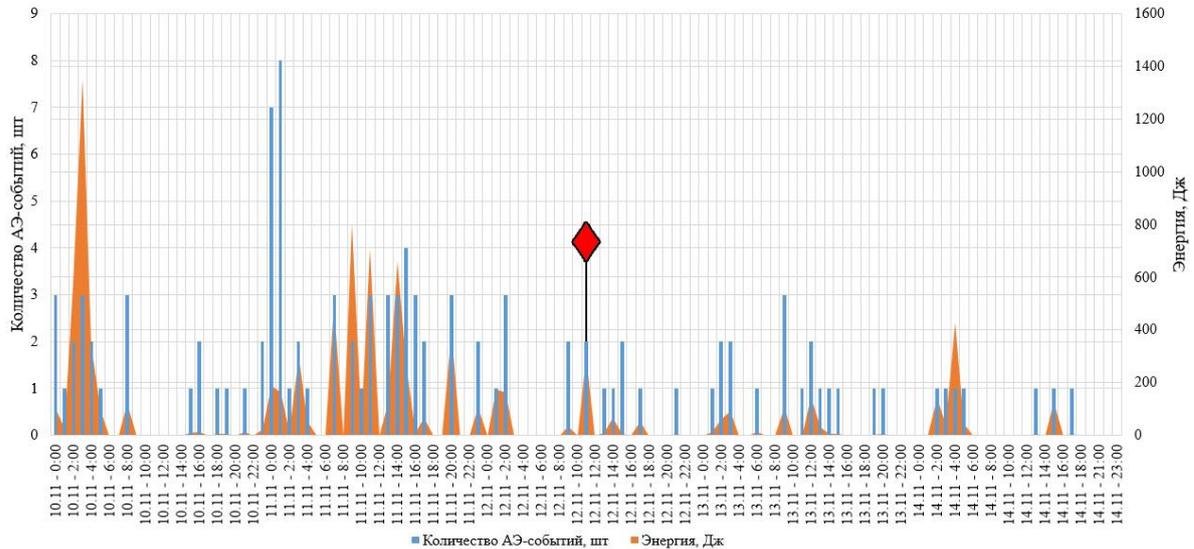


Рис. 11. Почасовое распределение количества и суммарной энергии АЭ-событий перед толчком 12 ноября 2024 г.

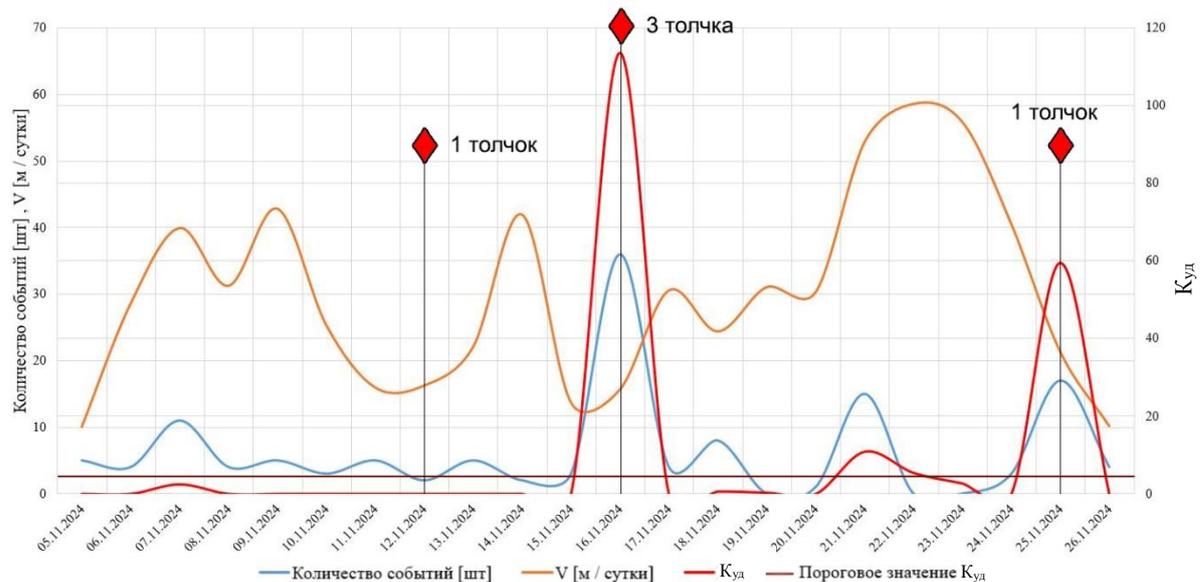


Рис. 12. Изменение показателя удароопасности  $K_{уд}$  перед толчками 12, 16 и 25 ноября 2024 г.

Положение очагов АЭ-событий в массиве горных пород Южного месторождения показано на рис. 13 и 14. Наибольшая концентрация АЭ-событий наблюдалась в районе блока № 1 – 3 в месте пересечения горных выработок с разломом «Рудный», расположенным в основном соосно простиранию рудной жилы № 4 и пересекающим ее на отдельных участках, а также зоной разрывных нарушений «Солнечная» и другими тектоническими нарушениями северо-западного и северо-восточного направлений падения.

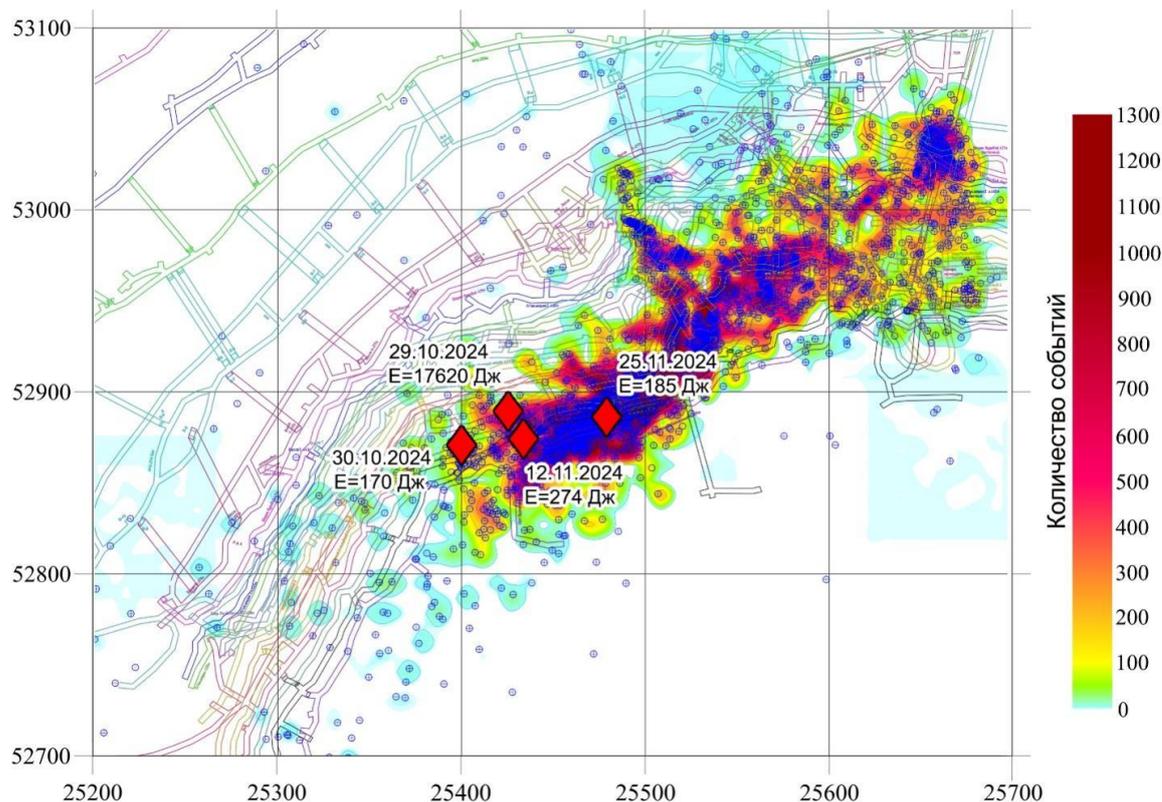


Рис. 13. Карта сейсмоакустической активности и толчки, зарегистрированные в массиве Южного месторождения за период с января по ноябрь 2024 г. в проекции на совмещенный план горизонтов

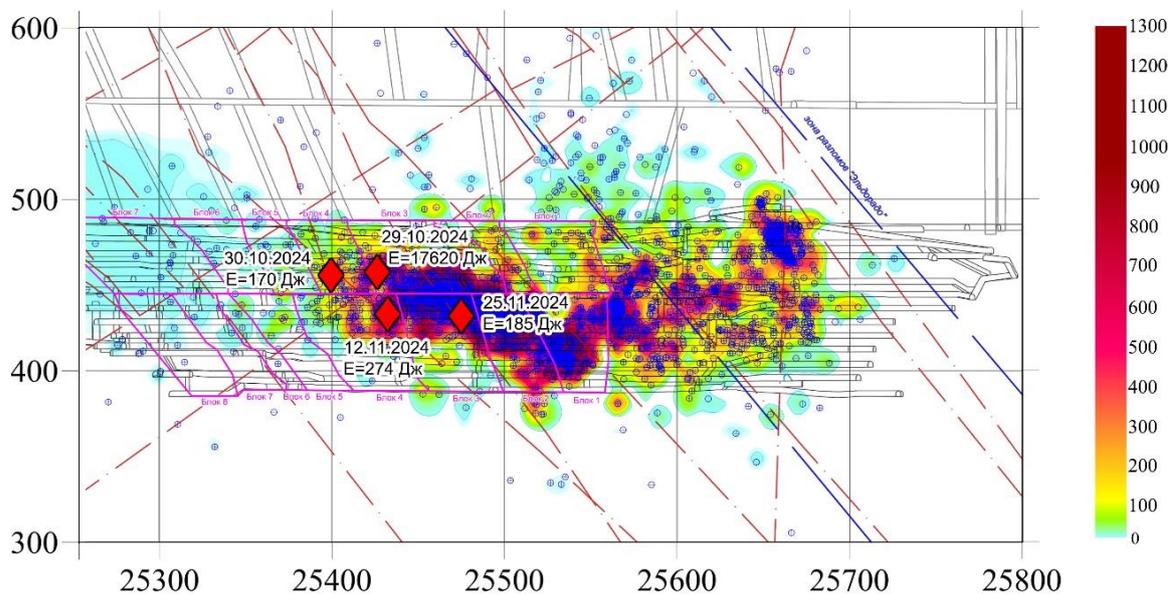


Рис. 14. Карта сейсмоакустической активности и толчки, зарегистрированные в массиве Южного месторождения за период с января по ноябрь 2024 г. в проекции на плоскость XZ

#### Выводы

По результатам инструментальных измерений параметров сейсмоакустической активности с применением АСКГД «Prognoz-ADS» в массиве горных пород Южного месторождения получены новые экспериментальные данные, позволяющие оценить характер и возможную причину возникающих в массиве динамических проявлений

горного давления. Отсутствие фиксации толчка 3 марта и серии из 3-х толчков 16 ноября системой «Prognoz-ADS» связано со значительным отдалением места их реализации от зоны мониторинга. В связи с этим настоятельно рекомендуется расширить зону мониторинга автоматизированной системы контроля горного давления «Prognoz-ADS» в юго-западном направлении для повышения качества оценки влияния очистной выемки на активизацию зон тектонических нарушений «Солнечная», «Эльдорадо» и «Восточная», разлома «Рудный» и других разрывных нарушений, подвижки вдоль которых могут являться одной из причин наблюдающейся здесь техногенной сейсмичности. Результаты дальнейших исследований могут послужить основой для научного обоснования способов предотвращения горных ударов, оптимизации параметров разгрузочных мероприятий, а также охраны и поддержания горных выработок при обработке удароопасных участков месторождения.

Комплексный анализ данных сейсмоакустического контроля показал, что одной из причин проявлений горного давления в динамической форме на месторождении Николаевское является блочность массива месторождений, которая обусловлена пересечением субширотного разлома зонами субмеридиональных разрывных нарушений ТН1, ТН2, ТН3. Зоны нарушений на месторождениях прослежены на длину более 10 км и представлены хорошо выраженными сместителями со следами смещений по простиранию.

### Список литературы

1. Ломов М.А., 2024. Исследование условий возникновения динамических проявлений горного давления на месторождении Южное (Приморский край) с применением цифровых моделей природно-технических систем. *Проблемы недропользования*, № 3(42), С. 32-40.
2. Ломов М.А., 2024. Исследование условий возникновения динамических проявлений горного давления потенциально удароопасных участков Николаевского месторождения (Приморский край). *Молодые ученые - Хабаровскому краю: Материалы XXVI краевого конкурса молодых ученых, Хабаровск, 16–22 января 2024 года*. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, С. 52-56.
3. Besimbayeva O.G., Khmyrova E.N., Tutanova M.S. et al., 2023. Modern data analysis technologies used for geomechanical monitoring. Review. *Комплексное использование минерального сырья*, No. 3(326), P. 5-15.
4. Polo Salinas J., Marquina Araujo J.J. & Cotrina Teatino M.A., 2024. Uncertainty in underground mining operations: a bibliometric and systematic literature review analysis. *World Journal of Engineering*. URL: <https://doi.org/10.1108/WJE-07-2024-0388> (дата обращения 25.03.2025)
5. Castro L.B., Bewick R. & Carter T., 2012. *An overview of numerical modelling applied to deep mining*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/281315896> (дата обращения 27.03.2025)
6. Рассказов И.Ю., Батугин А.С., Федотова Ю.В., Потапчук М.И., 2023. Оценка склонности месторождения к проявлению горно-тектонических ударов (на примере месторождения Южное). *Горный журнал*, № 1, С.74-78
7. Рассказов И.Ю., 2008. *Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона*. Москва: Издательство «Горная книга», 329 с.
8. Sidorov D.V., Ponomarenko T.V., 2020. Estimation methodology for geodynamic behavior of nature-and-technology systems in implementation of mineral mining projects. *Gornyi Zhurnal*, № 1, С. 49-52. doi:10.17580/gzh.2020.01.09
9. Potapchuk M. I., Kursakin G.A., Sidlyar A.V., 2014. Improvement of safety of development of bump hazardous vein deposits of Eastern Primorye. *Eurasian Mining*, No. 1, P. 18-22.
10. Потапчук М.И., Курсакин Г.А., Сидляр А.В., 2013. Повышение безопасности

разработки удароопасных жильных месторождений Восточного Приморья. *Горный журнал*, № 10, С. 30-34.

11. Ломов М.А., Сидляр А.В., Константинов А.В., Грунин А.П., 2023. Геомеханические проблемы отработки нижних горизонтов месторождения Южное (Приморский край). *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 12-2, С. 87-99.

## References

1. Lomov M.A., 2024. Issledovanie uslovii vozniknoveniya dinamicheskikh proyavlenii gornogo davleniya na mestorozhdenii Yuzhnoe (Primorskii kraj) s primeneniem tsifrovyykh modelei prirodno-tekhnicheskikh system [Investigation of the conditions of occurrence of dynamic manifestations of rock pressure at the Yuzhnoye deposit (Primorsky Krai) using digital models of natural and technical systems]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 3(42), P. 32-40.

2. Lomov M.A., 2024. Issledovanie uslovii vozniknoveniya dinamicheskikh proyavlenii gornogo davleniya potentsial'no udaroopasnykh uchastkov Nikolaevskogo mestorozhdeniya (Primorskii kraj) [Investigation of the conditions of occurrence of dynamic manifestations of rock pressure in potentially explosive areas of the Nikolaevsky deposit (Primorsky Krai)]. *Molodye uchenye - Khabarovskomu krayu: Materialy KhKhVI kraevogo konkursa molodykh uchenykh, Khabarovsk, 16–22 yanvarya 2024 goda. Khabarovsk: Tikhookeanskii gosudarstvennyi universitet*, P. 52-56.

3. Besimbayeva O.G., Khmyrova E.N., Tutanova M.S. et al., 2023. Modern data analysis technologies used for geomechanical monitoring. Review. *Комплексное использование минерального сырья*, No. 3(326), P. 5-15.

4. Polo Salinas J., Marquina Araujo J.J. & Cotrina Teatino M.A., 2024. Uncertainty in underground mining operations: a bibliometric and systematic literature review analysis. *World Journal of Engineering*. URL: <https://doi.org/10.1108/WJE-07-2024-0388> (data obrashcheniya 25.03.2025)

5. Castro L.B., Bewick R. & Carter T., 2012. *An overview of numerical modelling applied to deep mining*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/281315896> (data obrashcheniya 27.03.2025)

6. Rasskazov I.Yu., Batugin A.S., Fedotova Yu.V., Potapchuk M.I., 2023. Otsenka sklonnosti mestorozhdeniya k proyavleniyu gorno-tektonicheskikh udarov (na primere mestorozhdeniya Yuzhnoe) [Assessment of the deposit's propensity to exhibit mining and tectonic impacts (using the example of the Yuzhnoye deposit)]. *Gornyi zhurnal*, № 1, P.74-78

7. Rasskazov I.Yu., 2008. Kontrol' i upravlenie gornym davleniem na rudnikakh Dal'nevostochnogo regiona [Control and management of rock pressure in the mines of the Far Eastern region]. Moscow: Izdatel'stvo "Gornaya kniga", 329 p.

8. Sidorov D.V., Ponomarenko T.V., 2020. Estimation methodology for geodynamic behavior of nature-and-technology systems in implementation of mineral mining projects. *Gornyi Zhurnal*, № 1, P. 49-52. doi:10.17580/gzh.2020.01.09

9. Potapchuk M. I., Kursakin G.A., Sidlyar A.V., 2014. Improvement of safety of development of bump hazardous vein deposits of Eastern Primorye. *Eurasian Mining*, No. 1, P. 18-22.

10. Potapchuk M.I., Kursakin G.A., Sidlyar A.V., 2013. Povyshenie bezopasnosti razrabotki udaroopasnykh zhil'nykh mestorozhdenii Vostochnogo Primor'ya [Improving the safety of the development of high-impact vein deposits in Eastern Primorye]. *Gornyi zhurnal*, № 10, P. 30-34.

11. Lomov M.A., Sidlyar A.V., Konstantinov A.V., Grunin A.P., 2023. Geomekhanicheskie problemy otrabotki nizhnikh gorizontov mestorozhdeniya Yuzhnoe (Primorskii kraj) [Geomechanical problems of mining the lower horizons of the birthplace of Yuzhnoye (Primorsky Krai)]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 12-2, P. 87-99.



**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ  
И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ**

УДК 622.834

**Дрибан Виктор Александрович**

доктор технических наук,  
старший научный сотрудник,  
и.о. директора ФГБНУ «Республиканский  
академический научно-исследовательский и  
проектно-конструкторский институт  
горной геологии, геомеханики, геофизики и  
маркшейдерского дела» (ФГБНУ "РАНИМИ"),  
г. Донецк, ул. Челюскинцев, 291  
e-mail: [viktor-driban@yandex.ru](mailto:viktor-driban@yandex.ru)

**Хохлов Борис Валентинович**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
заведующий отделом горного давления,  
Республиканский академический  
научно-исследовательский и  
проектно-конструкторский институт горной  
геологии, геомеханики, геофизики  
и маркшейдерского дела (ФГБНУ "РАНИМИ")  
e-mail: [hbv@bk.ru](mailto:hbv@bk.ru)

**Антипенко Антон Викторович**

младший научный сотрудник,  
отдел горного давления,  
Республиканский академический  
научно-исследовательский и  
проектно-конструкторский институт горной  
геологии, геомеханики, геофизики и маркшей-  
дерского дела (ФГБНУ "РАНИМИ")  
e-mail: [ministrxp@mail.ru](mailto:ministrxp@mail.ru)

**ОЦЕНКА РИСКОВ  
ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЯ  
ПРИ ЗАТОПЛЕНИИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ***Аннотация:*

В приведенной статье представлены данные геодинамического наблюдения за горным отводом шахты «Антрацит», проводимого в условиях неконтролируемого поступления шахтных вод в выработанное пространство и горные выработки.

Добыча полезных ископаемых, в частности, каменного угля, приводит к формированию обширных территорий земной поверхности с повышенной техногенной нагрузкой. Данная тенденция характерна для различных месторождений, будь то Кузнецкий, Печерский или Донецкий угольные бассейны.

Среди наиболее актуальных проблем, вызванных подъемом уровня грунтовых вод и затоплением выработанных пространств в связи с прекращением работы шахтных водоотливов, создающих угрозу безопасности людей и сохранности имущества, можно выделить следующие:

- подтопление застроенных территорий и сельскохозяйственных угодий, приводящее к их заболачиванию;
- проникновение газа в подвалы жилых зданий и подземные сооружения промышленных объектов.;
- перемещение токсичных веществ и высокоминерализованной шахтной воды в подработанных горных породах с последующим выходом их на земную поверхность;
- возобновление процессов сдвижения горных пород над выработками, что приводит к образованию про-

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.065

**Driban Viktor A.,**

Doctor of Technical Sciences,  
Senior Researcher,  
Acting Director of "Republican Academic  
Research and Design Institute of Mining Geology,  
Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying",  
Donetsk, 291 Chelyuskintsev Str.  
e-mail: [viktor-driban@yandex.ru](mailto:viktor-driban@yandex.ru)

**Khokhlov Boris V.**

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Researcher,  
Head of the Rock Pressure Department,  
Republican Academic Research  
and Design Institute of Mining Geology,  
Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying  
e-mail: [hbv@bk.ru](mailto:hbv@bk.ru)

**Antipenko Anton V.**

Junior Researcher,  
Department of Rock Pressure,  
Republican Academic Research and Design  
Institute of Mining Geology, Geomechanics,  
Geophysics and Mine Surveying  
e-mail: [ministrxp@mail.ru](mailto:ministrxp@mail.ru)

**ASSESSMENT OF RISKS OF SINKHOLES  
FORMATION DURING FLOODING  
OF COAL MINES***Abstract:*

The article presents data from geodynamic monitoring of the mining allotment of the Antratsit mine, conducted under conditions of uncontrolled flow of mine water into the mined-out space and mine workings.

Extraction of minerals, in particular coal, leads to the formation of vast areas of the earth's surface with increased technogenic load. This trend is typical for various deposits, be it the Kuznetsk, Pechersk or Donetsk coal basins.

Among the most pressing problems caused by rising groundwater levels and flooding of mined-out spaces due to the cessation of mine drainage operations, which pose a threat to human safety and property, the following can be highlighted:

- flooding of built-up areas and agricultural lands, leading to their swamping;
  - gas penetration into basements of residential buildings and underground structures of industrial facilities;
  - movement of toxic substances and highly mineralized mine water in worked-out rocks with their subsequent exit to the earth's surface;
  - resumption of rock displacement processes above workings, which leads to the formation of surface failures in areas where such processes have long since ended.
- During the work, calculations and mapping of near-surface zones characterized by increased failure hazard were performed, both according to the normative methodology and using a neural algorithm. The use of the

валов земной поверхности в тех районах, где подобные процессы давно завершились.

При выполнении работы произведены расчеты и картографирование приповерхностных зон, характеризующихся повышенной провалоопасностью, как по нормативной методике, так и с применением нейронного алгоритма. Использование нормативного подхода позволило определить 21 зону, представляющую опасность в части образования провалов земной поверхности. Учитывая тот факт, что значительная часть выявленных зон располагается на территориях жилой застройки или сельскохозяйственных угодий, был осуществлен прогноз их провалоопасности с использованием нейросетевого моделирования. Результаты прогноза показали сокращение количества зон, опасных по возникновению провалов в течение ближайших 20 лет до 11, а также уменьшение их общей площади в 2,5 раза. Данный прогноз позволяет оптимизировать расходы на реализацию мероприятий по защите земной поверхности от негативного воздействия горных работ.

*Ключевые слова:* горный отвод, обводненный массив, провалы земной поверхности, горные выработки.

*normative approach made it possible to identify 21 zones that pose a danger in terms of the formation of surface failures. Considering the fact that a significant part of the identified zones is located in residential areas or agricultural lands, a forecast of their failure hazard was made using neural network modeling. The results of the forecast showed a reduction in the number of zones dangerous for the occurrence of failures over the next 20 years to 11, as well as a decrease in their total area by 2.5 times. This forecast allows optimizing the costs of implementing measures to protect the earth's surface from the negative impact of mining operations.*

*Key words:* mine allotment, flooded massif, dips in the Earth surface, mine workings.

## Введение

Добыча полезных ископаемых, в частности, каменного угля, приводит к формированию обширных территорий земной поверхности с повышенной техногенной нагрузкой. Данная тенденция характерна для различных месторождений, будь то Кузнецкий, Печерский или Донецкий угольные бассейны.

Добыча каменного угля в Донецком угольном бассейне ведется свыше двухсот лет. В начале XX века в регионе функционировало около двух тысяч шахт, подавляющее большинство которых (95 %) было расположено на глубине до ста метров. После окончания Великой Отечественной войны для ускоренного восстановления угольной промышленности в Донецком бассейне было построено более шестисот мелких наклонных шахт. Они осуществляли добычу угля как вручную, так и с применением механизированных технологий, непосредственно от выходов пластов на поверхность или с границ пригодных для добычи участков на малых глубинах [1]. В результате такой интенсивной деятельности практически вся территория региона, включающая западную, центральную и восточную части Донбасса, оказалась подработанной на малых глубинах.

С 1994 года в Российской Федерации реализуются масштабные мероприятия по реорганизации угольной промышленности [2]. Основным методом закрытия убыточных шахт является так называемая «мокрая консервация» – полное затопление выработанного пространства и горных выработок. Водонасыщение породного массива приводит к изменению физико-механических свойств горных пород, способствует активизации процессов сдвижения и увеличению рисков провалообразования на земной поверхности. *Риск провалообразования* – это вероятностный показатель опасности образования провалов и оседаний земной поверхности. Такие явления наблюдаются практически во всех горнодобывающих районах страны. Добыча полезных ископаемых привела к понижению уровня земной поверхности, что способствовало подъему уровня грунтовых вод. Это, в свою очередь, создает ряд негативных последствий и реальные угрозы для территорий, прилегающих к ликвидированным шахтам [3, 4].

Среди наиболее актуальных проблем, вызванных подъемом уровня грунтовых вод и затоплением выработанных пространств в связи с прекращением работы шахтных водоотливов, можно выделить следующие:

- подтопление застроенных территорий и сельскохозяйственных угодий, приводящее к их заболачиванию;
- проникновение газа в подвалы жилых зданий и подземные сооружения промышленных объектов;
- перемещение токсичных веществ и высокоминерализованной шахтной воды в подработанных горных породах с последующим выходом их на земную поверхность;
- возобновление процессов сдвижения горных пород над выработками, что приводит к образованию провалов земной поверхности в тех районах, где подобные процессы давно завершились.

В результате вышеуказанных факторов значительно возрастает вероятность нарушения условий эксплуатации зданий и сооружений. Это может повлечь за собой невозможность их полноценного использования, привести к повреждениям, а в худшем случае – к полному разрушению, что, несомненно, создаст угрозу для жизни и безопасности людей.

Кроме того, рентабельные глубокие шахты сталкиваются с дополнительной проблемой при затоплении брошенных шахт, расположенных на верхних горизонтах. Им приходится функционировать в условиях обводнения горного массива. Данная проблема распространена практически во всех угольных районах Донбасса [5]. Актуальность данной проблемы выходит за рамки территории Донецкого бассейна и затрагивает все техногенно-нагруженные и подработанные территории.

ФГБНУ «РАНИМИ» занимается разработкой теоретических основ поведения и взаимодействия обводненных породных массивов с горными выработками. В ходе исследований созданы модели формирования и изменения напряженного состояния обводненного массива горных пород, а также модели взаимодействия крепи выработок с горными породами при отработке свиты пластов. Ведутся работы по разработке методов и средств активного управления горным давлением и гидроизоляции в подземных горных выработках. Кроме того, разработан новый метод прогнозирования образования провалов в приповерхностной зоне, основанный на методах искусственного интеллекта.

Новый метод прогнозирования рисков образования провалов в приповерхностной зоне водонасыщенных массивов основывается на двухэтапном подходе. На первом этапе на планах поверхности осуществляется построение и картирование провалоопасных зон по нормативной методике. Далее с помощью нейронной сети для выделенных зон производится оценка рисков возникновения провалов в ближайшее время.

Площадь участков земной поверхности, опасных по образованию провалов достаточно велика, и составляет до 30 % относительно общей площади шахтного поля. При этом достаточно часто эти зоны находятся под жилой или промышленной застройкой и сельхозугодиями. Поэтому для обеспечения безопасности необходим точный прогноз развития опасных деформаций поверхности земли и формирования провалов.

Правильная оценка вероятности возникновения провала и определение времени его возможного появления позволит своевременно принять меры по минимизации ущерба подземным коммуникациям и наземным объектам [6, 7]. Также точная локализация зоны риска и понимание периода, в течение которого выработка представляет угрозу земной поверхности, поможет минимизировать площади, выводимые из эксплуатации.

Целью данной работы является геодинамический мониторинг горного отвода шахты «Антрацит».

*Задача исследования:* определение объектов, над которыми возможно формирование провалов земной поверхности; расчет провалоопасных зон и их картирование, обследование и проведение геодинамического мониторинга на горном отводе шахты, определение степени опасности выделенных провалоопасных зон.

### Метод построения провалоопасных зон земной поверхности

Для реализации поставленной цели была применена «Методика построения и обследования зон, опасных по провалам» [8]. В ее основе лежат следующие принципы:

1. У вертикальных горных выработок (стволов, шурфов и технических скважин) диаметром более 2,0 м зона, опасная по образованию провалов земной поверхности, ограничивается окружностью радиусом  $R_0 = 40$  м от центра выработки.

2. У вертикальных горных выработок (стволов, шурфов и технических скважин) диаметром до 2,0 м зона, опасная по образованию провалов земной поверхности, ограничивается окружностью радиусом  $R_0 = 20$  м от центра выработки.

3. Над наклонными и крутонаклонными вскрывающими и подготовительными выработками границы зоны, опасной по образованию провалов земной поверхности, устанавливаются:

– возле устья выработки со стороны восстания – линией, перпендикулярной оси выработки и удаленной от ее устья на 10 м плюс 5 м бермы;

– со стороны падения – линией, перпендикулярной оси выработки и проходящей через проекцию на земную поверхность точки, находящейся на глубине, равной  $H_{\text{п}}$ , вычисляемой по формуле

$$H_{\text{п}} = \frac{2,5h_{\text{в}}}{k_{\text{р}} - 1}, \quad (1)$$

где  $h_{\text{в}}$  – высота выработки вчерне, м;

$k_{\text{р}}$  – коэффициент остаточного разрыхления, который для однородной толщи пород кровли принимается равным: 1,15 – для аргиллитов, 1,20 – для алевролитов, 1,25 – для песчаников. Для слоистого массива горных пород, залегающих выше выработки, значение коэффициента  $k_{\text{р}}$  рассчитывается по формуле

$$k_{\text{р}} = \frac{1,15 \sum m_{\text{арг}} + 1,20 \sum m_{\text{ал}} + 1,25 \sum m_{\text{пес}}}{\sum m_{\text{арг}} + \sum m_{\text{ал}} + \sum m_{\text{пес}}}, \quad (2)$$

где  $\sum m_{\text{арг}}$ ,  $\sum m_{\text{ал}}$ ,  $\sum m_{\text{пес}}$  – суммарная мощность слоев аргиллита, алевролита и песчаника, расположенных в кровле выработки, м;

– вдоль продольной оси выработки – прямыми линиями, удаленными от оси со стороны падения на  $l_{\text{п}} = 10h_{\text{в}}$  плюс 5 м бермы, где  $h_{\text{в}}$  – высота выработки вчерне, м (при отсутствии фактических данных высота выработки вчерне принимается равной 2,5 м) и со стороны устья на 10 м плюс 5 м бермы.

4. Над подготовительными или одиночными выработками провалы земной поверхности могут образовываться, если глубина кровли выработки  $H_{\text{гв}}$  от поверхности карбона меньше высоты распространения обрушения пород над выработкой  $H_{\text{п}}$  в метрах, которая определяется по формуле (1). Граница провалоопасной зоны на земной поверхности ограничивается контуром горной выработки, увеличенным на 5 м со стороны падения и простирающегося пласта. Со стороны восстания угольного пласта граница зоны строится от пятиметровой бермы под углом сдвижения –  $\gamma$ .

5. Над очистными выработками при разработке пластов с углами падения  $\alpha \leq 45^\circ$  границы зоны возможных провалов на земной поверхности ограничиваются контуром горной выработки, увеличенным на 5 м в каждую сторону. Если нижняя граница горной выработки располагается на глубине более  $12m$  (где  $m$  – вынимаемая мощность угольного пласта в метрах), то граница провалоопасной зоны со стороны падения угольного пласта строится на расстоянии 5 м по падению от проекции изогипсы пласта, проведенной на глубине  $12m$ . Со стороны восстания пласта граница провалоопасной зоны строится от пятиметровой бермы под углом сдвижения –  $\gamma$ .

#### Обследование горного отвода шахты «Антрацит»

Шахта «Антрацит» (№ 15/16, «Платовская») – угледобывающее предприятие, расположенное в г. Гуково (Ростовская область). До закрытия в 1997 году входила в

состав ОАО «Гуковуголь». Была введена в эксплуатацию в 1931 году с проектной мощностью 450 тыс. т угля в год и вела отработку угольных пластов  $k_2^{1B}$ ,  $k_2$  и  $i_3^H$ .

После закрытия шахта «Антрацит» была реорганизована в участок «Водоотлив-Запад» шахты «Ростовская» с целью предотвращения дополнительного притока шахтных вод.

В начале марта 2016 года работа подземного водоотлива шахты «Антрацит» была остановлена работниками в связи с задолженностью по выплате заработной платы, что привело к началу неконтролируемого затопления горных выработок. В настоящее время шахта затоплена до отметки + 226,9 м. Уровень воды поддерживается за счет работы водоотливного комплекса шахты «Ростовская».

Шахтное поле находится в северном крыле Должано-Сулино-Садкинской синклинали. Административно шахта расположена на территории Красносулинского района и города Гуково Ростовской области. При этом восточная часть шахтного поля расположена непосредственно под жилой застройкой города Гуково. В результате обследования горного отвода шахты «Антрацит» зафиксировано 37 горных выработок, имеющих выход на земную поверхность, из них стволов вертикальных – 5, наклонных стволов и сбоек – 11, шурфов вертикальных – 21 (табл. 1).

В соответствии с «Методикой построения и обследования зон, опасных по провалам» [8], на поле шахты «Антрацит» выделен 21 участок земной поверхности, опасный по возникновению провалов. Дополнительно была определена площадь каждого из таких участков (см. табл. 1). Так, провалоопасные зоны занимают порядка 3 % (0,4 км<sup>2</sup>) из 12,65 км<sup>2</sup> площади горного отвода шахты. При этом суммарная площадь зон, опасных по провалам земной поверхности, расположенных под сельскохозяйственными угодьями и под жилой застройкой, составляет 54,5 % или 219 621 м<sup>2</sup>. Учитывая этот факт, а также то, что нормативная методика [8] не предусматривает изменения физико-механических свойств массива горных пород при его увлажнении, для выделенных зон был выполнен прогноз провалоопасности с применением нейронной сети.

Таблица 1

**Выработки, имеющие выход на земную поверхность  
в пределах горного отвода шахты «Антрацит»**

№ п.п	Наименование выработки	Год ликвидации	Глубина, м	Угол наклона, градус	Состояние устья
1	2	3	4	5	6
1	Главный ствол № 1	2001	140,7	90	Удовлетворительное
2	Вспомогательный ствол	–	136,7	90	Удовлетворительное
3	Шурф № 20 пл. $k_2^{1-B}$	1996	50,0	90	Удовлетворительное
4	Вент. ствол № 20 пл. $k_2^{1-B}$	1963	127	17	Удовлетворительное
5	Шурф шах. № 17 пл. $k_2^{1-B}$	1932	36,9	90	Удовлетворительное
6	Шурф № 18 пл. $k_2^{1-B}$	1996	70	90	Удовлетворительное
7	Накл. ств. шах. № 25 пл. $k_2^{1-B}$	1951	90	15	Удовлетворительное
8	Вент. шурф пл. $k_2^{1-B}$	1951	24,5	90	Удовлетворительное
9	Шурф № 3 пл. $k_2^{1-B}$	1945	30	90	Удовлетворительное
10	Шурф № 9 пл. $k_2^{1-B}$	1945	24	90	Удовлетворительное
11	Наклонный ствол пл. $k_2^{1-B}$	1949	150	15	Удовлетворительное
12	Шурф № 7 пл. $k_2^{1-B}$	1946	25	90	Удовлетворительное
13	Наклонный ствол пл. $k_2^{1-B}$	1946	100	17	Удовлетворительное
14	Шурф № 5 пл. $k_2^{1-B}$	До 1941	20	90	Удовлетворительное
15	Шурф № 3 пл. $k_2^{1-B}$	До 1941	25	90	Удовлетворительное
16	Шурф б/н пл. $k_2^{1-B}$	До 1941	30	90	Удовлетворительное
17	Уклон № 1 пл. $k_2^{1-B}$	До 1941	80	15	Удовлетворительное
18	Старый шурф пл. $k_2^{1-B}$	До 1941	15	90	Удовлетворительное
19	Наклонный ствол №16 пл. $k_2$	До 1941	125	17	Удовлетворительное

1	2	3	4	5	6
20	Шурф б\н пл. $k_2^{1-B}$	До 1941	25	90	Удовлетворительное
21	Накл. ств. № 15-бис пл. $k_2^{1-B}$	До 1941	45	19	Удовлетворительное
22	Уклон пл. $k_2^{1-B}$	До 1941	40	18	Удовлетворительное
23	Накл. ств. пл. $k_2^{1-B}$	До 1941	80	18	Удовлетворительное
24	Шурф № 4 пл. $k_2^{1-B}$	До 1941	25	90	Удовлетворительное
25	Шурф № 6 пл. $k_2^{1-B}$	До 1941	25	90	Удовлетворительное
26	Шурф № 3 пл. $k_2$	До 1941	38	90	Удовлетворительное
27	Шурф № 13 пл. $k_2$	До 1941	35	90	Удовлетворительное
28	Шурф № 1 пл. $k_2$	До 1941	25	90	Удовлетворительное
29	Шурф № 2 пл. $k_2$	До 1941	25	90	Удовлетворительное
30	Шурф № 4 пл. $k_2$	До 1941	75	90	Удовлетворительное
31	Шурф № 14 пл. $k_2$	До 1941	30	90	Удовлетворительное
32	Шурф № 6=бис пл. $k_2$	1987	88	90	Удовлетворительное
33	Наклонный ствол № 01 пл. $i_3^H$	2018	466	25	Удовлетворительное
34	Конв. накл. ств. № 01 пл. $i_3^H$	2018	144	11	Удовлетворительное
35	Вертик. ствол шх. № 26	1960	61	90	Удовлетворительное
36	Гл. ств. шх № 24	1960	64	90	Удовлетворительное
37	Вспом. ств. шх. № 24	1960	64	90	Удовлетворительное
Всего выработок – 37, в том числе ранее ликвидированных – 36					

#### *Оценка рисков повреждения земной поверхности с применением нейросети*

Для оценки рисков провалообразования на основе исследований [9 – 16] и нормативных документов [17 – 21] была разработана нейронная сеть [22]. Полученная система, основанная на принципах искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов, обеспечивает прогноз вероятности возникновения провалов земной поверхности с точностью до 94,6 %. В качестве факторов, способствующих повреждению земной поверхности над старыми горными выработками, были выбраны следующие параметры:

- глубина залегания выработки;
- степень диагенеза вмещающих пород;
- возраст выработки;
- углы наклона породных слоев и самой выработки;
- комплексный параметр, учитывающий взаимодействие смежных выработок, влияние зон повышенного горного давления, обводненность, наличие плывунов и других негативных факторов, повышающих вероятность образования провалов.

Нейронная сеть была создана на основе модели перцептрона с использованием генетического алгоритма. Ее архитектура включает шесть входных, семь промежуточных и два выходных нейрона. Алгоритм работы нейронной сети следующий.

В качестве входных данных для шести нейронов используется набор основных факторов, которые оказывают влияние на процесс долговременного снижения устойчивости массива горных пород над старой горной выработкой. Первый нейрон получает информацию о глубине залегания выработки. Второй нейрон обрабатывает данные о степени диагенеза горных пород. Третий нейрон анализирует временной интервал между проведением выработки и моментом возникновения провала (или до настоящего времени, если провал не зафиксирован). Четвертый нейрон получает данные об угле залегания пород. Пятый нейрон обрабатывает информацию об угле наклона выработки. Наконец, шестой нейрон анализирует факторы, связанные с условиями эксплуатации выработки.

Нейронная сеть включает два скрытых слоя, состоящих из нейронов 7 – 13. Данные нейроны предназначены для моделирования процессов потери устойчивости нагруженного собственным весом массива горной породы. Нейроны 14 и 15 генериру-

ют выходные данные, представленные в виде оценки вероятности провала и прогноза момента его возникновения.

Из структуры сети очевидно, что она реализует глубокое взаимодействие всех факторов через взаимные нейронные связи-синапсы, гарантирующие восприятие процесса провала как следствие взаимодействия всех входящих факторов. Это повышает надежность решения задачи достоверного прогноза провала земной поверхности. Степень взаимодействия выбирается самой сетью. Так, величины весовых коэффициентов  $\omega$  между нейронами, которые взаимодействуют сильнее, будут больше, чем между теми, которые взаимодействуют слабее. Характер связи учитывается знаком коэффициента, а нелинейность связи моделируется нелинейной формой сигмоидальной пороговой функции.

Предложенная методика была проверена на шахтах Донецко-Макеевского и Торезско-Снежнянского районов Донбасса [23].

Оценка опасности провала участков приповерхностной зоны осуществлялась в три этапа. На начальном этапе выполнялись предварительные построения. С использованием графического редактора на цифровую копию плана поверхности накладывались цифровые планы горных выработок по всем пластам, обрабатывавшимся шахтой «Антрацит». Линии выхода пластов под наносы переносились на план поверхности. Затем эти линии копировались в направлении падения пласта с интервалами, соответствующими величине угла падения, который варьировался от 15 до 18°. В результате на плане поверхности была сформирована дополнительная поверхность, соответствующая поверхности угольного пласта по карбону с шагом 80 м по глубине.

На следующем этапе над горными выработками строились нейрозоны. При этом соблюдались следующие критерии:

- по интервалу глубин выработки делились на два диапазона: 0 – 80 м и 80 - 160 м;
- по возрасту выработки группировались с разницей не более чем в 5 – 6 лет, но в отдельных случаях допускалось различие до 10 лет;
- основные наклонные выработки выделялись в отдельные зоны.

На рис. 1 приведен пример построения нейрозон на плане земной поверхности.

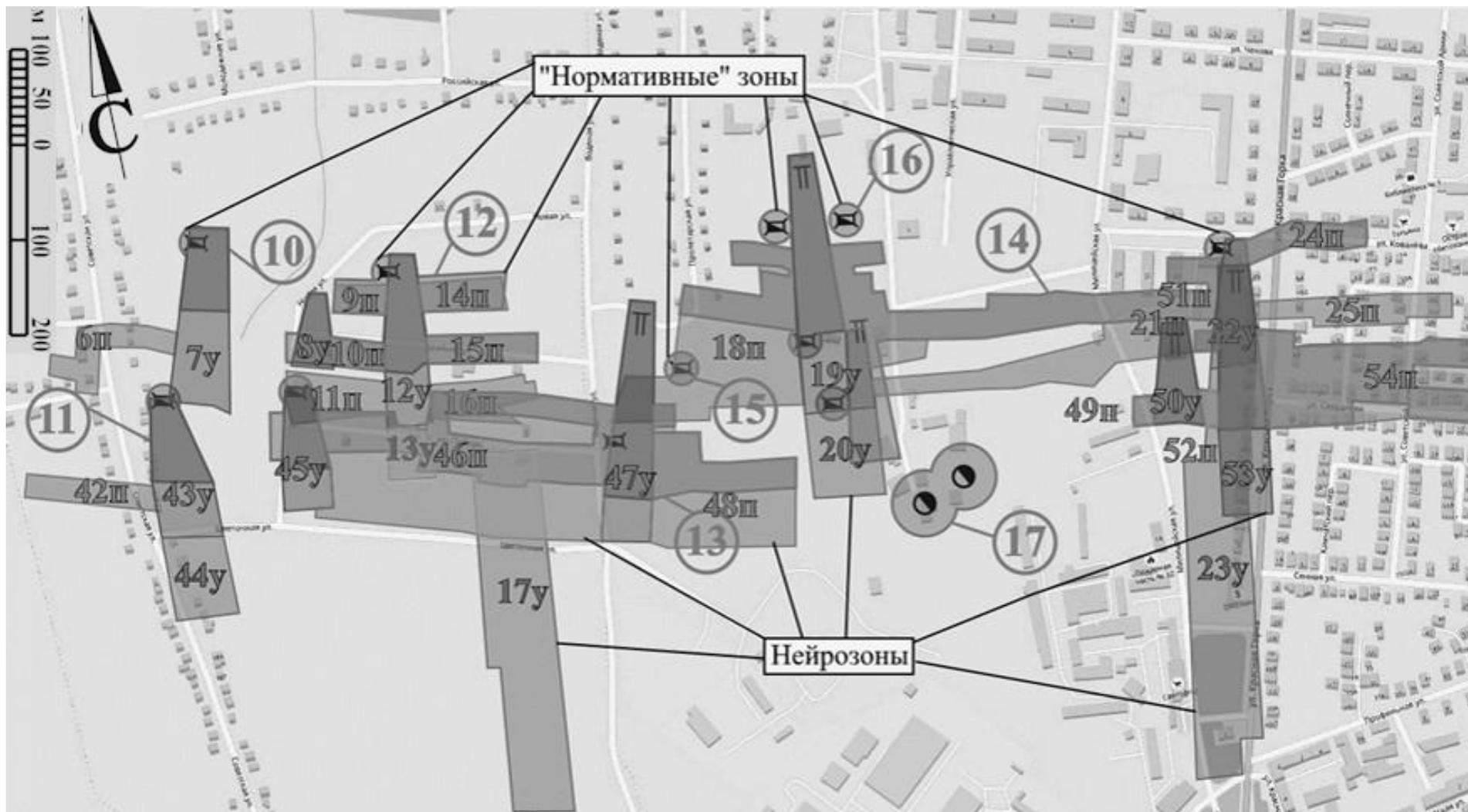
На заключительном этапе исследований был выполнен расчет в таких условиях поддержания горных выработок, при которых они представляют наибольшую опасность для земной поверхности. Рассматривались следующие параметры:

- угол падения пород 15°,
- угол наклона выработки до 30°,
- глубина залегания выработок до 160 м,
- совокупность негативных факторов.

Для каждой нейрозоны были определены интервалы глубин по карбону, средний возраст выработок, а также рассчитано время образования провалов с учетом комплекса негативных факторов.

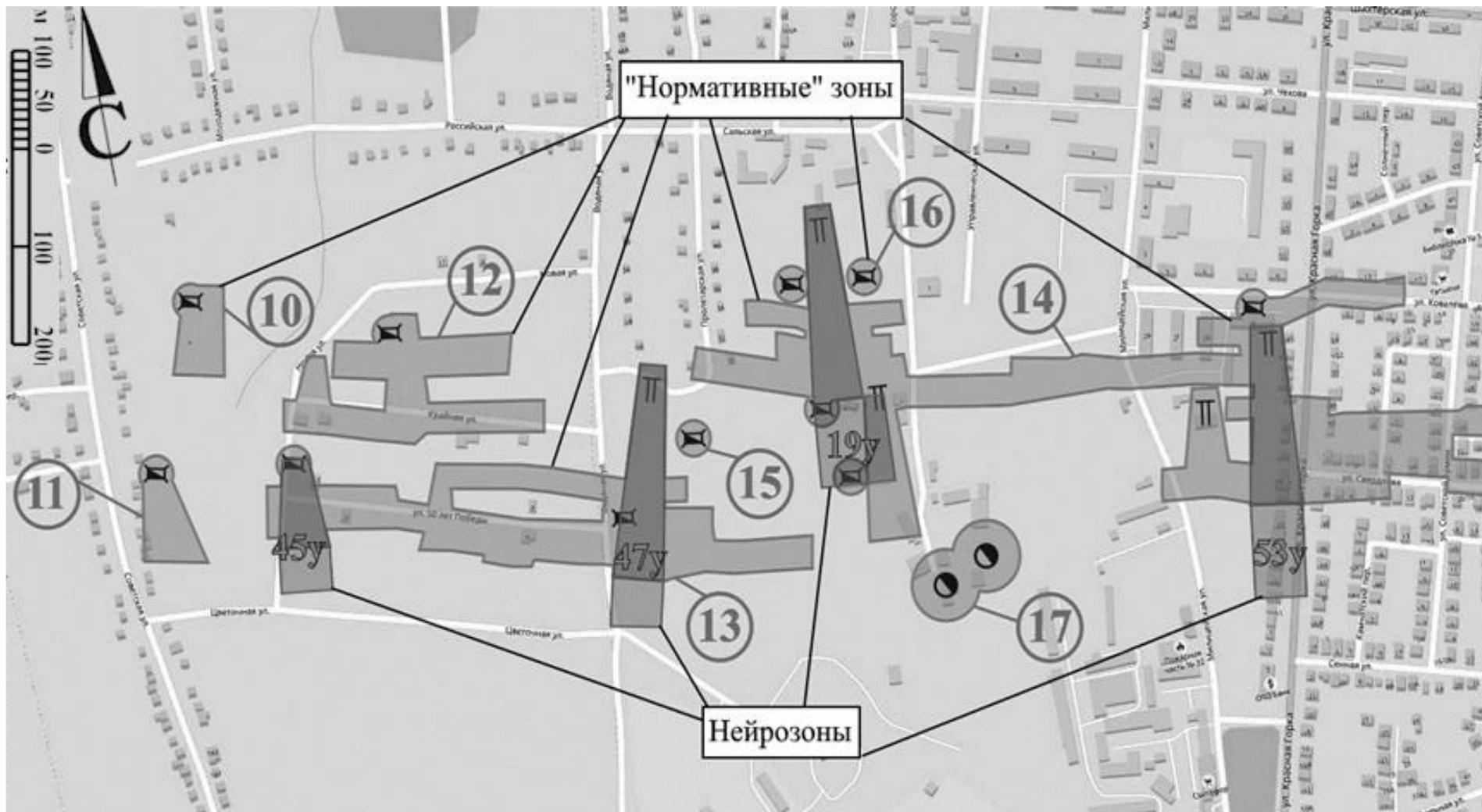
В контексте данного исследования, учитывая временной горизонт прогноза возникновения провалов земной поверхности в 20 лет с момента проведения анализа, количество провалоопасных зон было уменьшено до 11. При этом прогнозируемая площадь провалоопасных участков земной поверхности в течение ближайших двух десятилетий составляет 160 649 м<sup>2</sup>. Эта величина соответствует 39,9 % от общей площади зон, выделенных провалоопасными согласно нормативной [8] методике (рис. 2).

Анализ данных показывает, что площадь зон, опасных по провалам земной поверхности на сельскохозяйственных угодьях, уменьшилась с 99 156 до 46 853 м<sup>2</sup> (на 47,3 %). Сокращение площади провалоопасных зон в жилых районах составило с 120 465 до 40 004 м<sup>2</sup> (33 %), а на неиспользуемых землях и промышленных площадках шахтных стволов – с 183 425 до 73 792 м<sup>2</sup> (на 40,2 %).



Условные обозначения: ● -вертикальный ствол, ▤ -вертикальный шурф, ∟ -наклонный ствол

Рис. 1. Фрагмент плана поверхности шахты «Антрацит» с зонами, опасными по образованию провалов земной поверхности, построенными как по нормативной методике, так и с применением нейронного алгоритма



Условные обозначения:  -вертикальный ствол,  -вертикальный шурф,  -наклонный ствол

Рис. 2. Фрагмент плана поверхности шахты «Антрацит» с «нормативными» зонами, опасными по образованию провалов земной поверхности, и нейрозонами, представляющими угрозу провалообразования в ближайшие 20 лет

Таким образом, из 21 провалоопасной зоны, определенной по нормативной методике, в ближайшие два десятилетия непосредственную угрозу представляют только 11 и на существенно меньших территориях.

#### Выводы

В ходе геодинамического мониторинга горного отвода шахты «Антрацит» по нормативной методике были выполнены расчет и построение 21 провалоопасной зоны земной поверхности. Учитывая, что значительная часть этих зон расположена на сельскохозяйственных угодьях и в жилых районах, а также тот факт, что затопление шахты повлекло изменение физико-механических свойств горных пород, был дополнительно проведен прогноз провалоопасности этих зон с использованием нейронной сети.

На основании проведенных исследований установлено, что на территории горного отвода шахты «Антрацит» участки, опасные по образованию провалов земной поверхности в ближайшие два десятилетия, находятся над наклонными выработками глубиной до 80 м, а их количество уменьшилось до 11, их суммарная площадь сократилась в 2,5 раза.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что применение нейронной сети повышает точность определения зон земной поверхности, подверженных риску образования провалов, а также позволяет прогнозировать примерный период времени, в течение которого эти зоны представляют наибольшую опасность. Дальнейшее использование нейросетевых моделей для оценки провалоопасности позволит уменьшить размеры провалоопасных зон и оптимизировать расходы на мероприятия по защите земной поверхности от негативного воздействия горных работ.

Исследования проведены в рамках выполнения фундаментальной научно-исследовательской работы FRSR – 20230006 «Исследование устойчивости и трансформации напряженно-деформированного состояния обводненных массивов горных пород».

#### Список литературы

1. Гавриленко Ю.Н., Ермаков В.Н., Кренида Ю.Ф. и др., 2004. *Техногенные последствия закрытия угольных шахт Украины: монография*. Донецк: Изд-во «Норд-Пресс», 631 с.
2. Жукова И.А., Лобунец В.С., 2014. Состояние угольной промышленности Ростовской области: проблемы и перспективы ее развития. *Terra Economicus*, Т. 12, № 2-3, С. 174-177.
3. Славиковская Ю.О., 2021. Техногенные пустоты недр как фактор негативного воздействия на окружающую среду при разработке месторождений твердых полезных ископаемых. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 2, С. 33-44.
4. Соколова И.Н., Великанов А.Е., 2020. Современный мониторинг сейсмических событий из района испытательного полигона Лобнор по данным сети ИГИ РК. *Вестник НЯЦ РК*, Вып. 3, С. 24-32.
5. Славиковская Ю.О., 2020. Техногенные пустоты недр как источник негативного воздействия на окружающую среду предприятий горнопромышленного комплекса. *Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов: Труды VIII Международной конференции, Екатеринбург, 07 апреля 2020 г.* Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, С. 275-279.
6. Mikhailova I.N., Sokolova I.N., 2019. Monitoring System of the Institute of Geophysical Research of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan. *Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre*, Volume 53, Issue 1, P. 27–38.
7. Кирков А.Е., Федосеев В.В., Кужим О.М., 2022. Превентивное обнаружение и локализация провалов подработанной земной поверхности – основа решения региональных проблем моногородов в горнопромышленных регионах. *Золото. Полиметаллы. XXI век: Устой-*

чивое развитие: *Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Челябинск, 02–03 марта 2022 года*. Челябинск: Институт проблем комплексного освоения недр РАН, С. 49-51.

8. Хохлов Б.В., Дрибан В.А., Голдин С.В., Терлецкий А.М., Рожко М.Д., 2019. Методика построения и обследования зон, опасных по провалам. *Труды РАНИМИ: сб. науч. тр., Донецк, № 7 (22)*, С. 142-157.

9. Driban V., Nazimko V., Feofanov A., Khalymendyk I., 2010. Vorhersage des erdoberflächeabsturzes oberhalb der alten kohlegrubenräumen. *Altbergbau – Kolloquium, Freiberg, 04. bis 06, November 2010*, P. 391-400.

10. Gan F., He B., Qin Z, Li Wu., 2020. Role of rock dip angle in runoff and soil erosion processes on dip/anti-dip slopes in a karst trough valley. *Journal of Hydrology, Volume 588*.

11. Zeng X., Peng X., Liu T., Dai Q., Chen X., 2024. Runoff generation and erosion processes at the rock–soil interface of outcrops with a concave surface in a rocky desertification area. *CATENA, Volume 239*.

12. Peng X., Dai Quanhou, 2022. Drivers of soil erosion and subsurface loss by soil leakage during karst rocky desertification in SW China. *International Soil and Water Conservation Research, Volume 10, Issue 2*, P. 217-227.

13. Постоев Г.П., 2020. Модели механизма формирования и расчета параметров провалов земной поверхности над подземными полостями. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология, № 4*, С. 36-47.

14. Хамидуллина Н.В., Прокопова М.В., Прокопов А.Ю., 2019. Физическое моделирование провалов земной поверхности. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения, № 2(74)*, С. 124-131.

15. Гавриленко Ю.Н., Петрушин А.Г., 2003. Основные принципы моделирования сдвижений и деформаций земной поверхности методом конечных элементов. *Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-геологічна, Донецьк, Випуск 62*, С. 100 – 114.

16. Усанов С.В., Мельник В.В., Замятин А.Л., 2013. Мониторинг трансформации структуры горного массива под влиянием процесса сдвижения. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, № 6*, С. 83-89.

17. *Методическое руководство «О порядке выделения провалоопасных зон и выбора комплекса технических мероприятий по выявлению и ликвидации пустот на ликвидируемых шахтах Восточного Донбасса»*. Москва: ИПКОН РАН, 2007, 34 с.

18. *НПАОТ 10.0-1.01-16 Правила безопасности в угольных шахтах. – опубл. 20.05.2016 г. с изменениями, внесенными на основании Приказа Министерства угля и энергетики Донецкой Народной Республики, Государственного Комитета горного и технического надзора Донецкой Народной Республики от 07.07.2016 г. № 63/319, от 20.06.2017 г. № 157/291. Донецк, 2016, 217 с.*

19. *Методическое руководство по прогнозу гидрогеологических условий ликвидации угольных шахт и обоснованию мероприятий, обеспечивающих предотвращение негативных экологических последствий*. Санкт-Петербург: ВНИМИ, 2007, 79 с.

20. *Методические положения по решению гидрогеологических задач при разработке проекта ликвидации шахты (пособие проектировщику) РТМ 6.04.95*. Донецк: Донгипрошахт, 1995, 17 с.

21. *Расположение, охрана и поддержание горных выработок при отработке угольных пластов на шахтах. Руководящий документ / РАНИМИ. Утв. Мин. угля и энергетики ДНР 15.04.21*. Донецк, 2021. 267 с.

22. Дрибан В.А., Феофанов А.Н., Назимко И.В., 2009. Разработка системы прогноза обрушений земной поверхности над погашенными горными выработками. *Проблеми гірського тиску: зб. наук. пр., Донецьк, №17*, С. 22 – 57.

23. Дрибан В.А., Хохлов Б.В., Хламов Д.М., Антипенко А.В., 2023. Прогноз провалоопасности подработанных территорий при затоплении горных выработок шахт

Торезско-Снежнянского района на основе методов искусственного интеллекта. *Труды РАНИМИ*, № 20-21 (35-36), С. 47-65.

### References

1. Gavrilenko Yu.N., Ermakov V.N., Krenida Yu.F. i dr., 2004. Tekhnogennye posledstviya zakrytiya ugol'nykh shakht Ukrainy: monografiya [Man-made consequences of the closure of coal mines in Ukraine: monograph]. Donetsk: Izd-vo "Nord-Press", 631 p.
2. Zhukova I.A., Lobunets V.S., 2014. Sostoyanie ugol'noi promyshlennosti Rostovskoi oblasti: problemy i perspektivy ee razvitiya [The state of the coal industry in the Rostov region: problems and prospects for its development]. *Terra Economicus*, Vol. 12, № 2-3, P. 174-177.
3. Slavikovskaya Yu.O., 2021. Tekhnogennye pustoty neдр как faktor negativnogo vozdeistviya na okruzhayushchuyu sredu pri razrabotke mestorozhdenii tverdykh poleznykh iskopaemykh [Man-made voids in the subsoil as a factor in the negative impact on the environment during the development of solid mineral deposits]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 2, P. 33-44.
4. Sokolova I.N., Velikanov A.E., 2020. Sovremennyyi monitoring seismiche-skikh sobytii iz raiona ispytatel'nogo poligona Lobnor po dannym seti IGI RK [Modern monitoring of seismic events from the Lobnor test site area based on the IGI RK network data]. *Vestnik NIaTs RK*, Vyp. 3, P. 24-32.
5. Slavikovskaya Yu.O., 2020. Tekhnogennye pustoty neдр как istochnik negativnogo vozdeistviya na okruzhayushchuyu sredu predpriyatii gornopromyshlennogo kompleksa [Man-made voids in the subsoil as a source of negative impact on the environment of mining enterprises]. *Ekologicheskaya i tekhnosfernaya bezopasnost' gornopromyshlennykh regionov: Trudy VIII Mezhdunarodnoi konferentsii, Ekaterinburg, 07 aprelya 2020 g. Ekaterinburg: Ural'skii gosudarstvennyi gornyi universitet*, P. 275-279.
6. Mikhailova I.N., Sokolova I.N., 2019. Monitoring System of the Institute of Geophysical Research of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan. *Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre*, Volume 53, Issue 1, P. 27–38.
7. Kirkov A.E., Fedoseev V.V., Kuzhim O.M., 2022. Preventivnoe obnaruzhenie i lokalizatsiya provalov podrobotannoi zemnoi poverkhnosti – osnova resheniya regional'nykh problem mono-gorodov v gornopromyshlennykh regionakh. [Preventive detection and localization of failures of the underworked earth's surface as the basis for solving regional problems of single-industry towns in mining regions]. *Zoloto. Polimetally XXI vek: Ustoichivoe razvitiye: Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Chelyabinsk, 02–03 marta 2022 goda. Chelyabinsk: Institut problem kompleksnogo osvoeniya neдр RAN*, P. 49-51.
8. Khokhlov B.V., Driban V.A., Goldin S.V., Terletskii A.M., Rozhko M.D., 2019. Metodika postroeniya i obsledovaniya zon, opasnykh po provalam [Methodology for constructing and surveying zones hazardous for failures]. *Trudy RANIMI: sb. nauch. tr., Donetsk*, № 7 (22), P. 142-157.
9. Driban V., Nazimko V., Feofanov A., Khalymendyk I., 2010. Vorhersage des erdoberflächeabsturzes oberhalb der alten kohlegrubenräumen. *Altbergbau – Kolloquium, Freiberg, 04. bis 06, November 2010*, P. 391-400.
10. Gan F., He B., Qin Z, Li Wu., 2020. Role of rock dip angle in runoff and soil erosion processes on dip/anti-dip slopes in a karst trough valley. *Journal of Hydrology*, Volume 588.
11. Zeng X., Peng X., Liu T., Dai Q., Chen X., 2024. Runoff generation and erosion processes at the rock–soil interface of outcrops with a concave surface in a rocky desertification area. *CATENA*, Volume 239.
12. Peng X., Dai Quanhou, 2022. Drivers of soil erosion and subsurface loss by soil leakage during karst rocky desertification in SW China. *International Soil and Water Conser-*

vation Research, Volume 10, Issue 2, P. 217-227.

13. Postoev G.P., 2020. Modeli mekhanizma formirovaniya i rascheta parametrov provalov zemnoi poverkhnosti nad podzemnymi polostyami [Models of the mechanism of formation and calculation of parameters of failures of the earth's surface above underground cavities]. Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya, № 4, P. 36-47.

14. Khamidullina N.V., Prokopova M.V., Prokopov A.Yu., 2019. Fizicheskoe modelirovanie provalov zemnoi poverkhnosti [Physical modeling of failures of the earth's surface]. Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya, № 2(74), P. 124-131.

15. Gavrilenko Yu.N., Petrushin A.G., 2003. Osnovnye printsipy modelirovaniya sdvizhenii i deformatsii zemnoi poverkhnosti metodom konechnykh elementov. Naukovi pratsi DonNTU. [Basic principles of modeling displacements and deformations of the earth's surface by the finite element method. Scientific Works of DonNTU]. Seriya girnichogeologichna, Donets'k, Vipusk 62, P. 100 – 114.

16. Usanov S.V., Mel'nik V.V., Zamyatin A.L., 2013. Monitoring transformatsii struktury gornogo massiva pod vliyaniem protsessa sdvizheniya [Monitoring the transformation of the structure of a rock massif under the influence of the displacement process]. Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh, № 6, P. 83-89.

17. Metodicheskoe rukovodstvo "O poryadke vydeleniya provaloopasnykh zon i vybora kompleksa tekhnicheskikh meropriyatii po vyyavleniyu i likvidatsii pustot na likvidiruemyykh shakhtakh Vostochnogo Donbassa" [Methodological guide "On the procedure for identifying collapse-hazardous zones and selecting a set of technical measures to identify and eliminate voids in liquidated mines of the Eastern Donbass"]. Moscow: IPKON RAN, 2007, 34 p.

18. NPAOT 10.0-1.01-16 Pravila bezopasnosti v ugol'nykh shakhtakh. – opubl. 20.05.2016 g. s izmeneniyami, vnesennymi na osnovanii Prikaza Ministerstva uglya i energetiki Donetskoi Narodnoi Respubliki [NPAOT 10.0-1.01-16 Safety rules in coal mines], Gosudarstvennogo Komiteta gornogo i tekhnicheskogo nadzora Donetskoi Narodnoi Respubliki ot 07.07.2016 g. № 63/319, ot 20.06.2017 g. № 157/291. Donetsk, 2016, 217 p.

19. Metodicheskoe rukovodstvo po prognozu gidrogeologicheskikh uslovii likvidatsii ugol'nykh shakht i obosnovaniyu meropriyatii, obespechivayushchikh predotvrashchenie negativnykh ekologicheskikh posledstviy [Methodological guidelines for forecasting hydrogeological conditions for the liquidation of coal mines and substantiation of measures to prevent negative environmental consequences]. Sankt-Peterburg: VNIMI, 2007, 79 p.

20. Metodicheskie polozheniya po resheniyu gidrogeologicheskikh zadach pri razrabotke proekta likvidatsii shakhty (posobie proektirovshchiku) [Methodological provisions for solving hydrogeological problems when developing a mine liquidation project (designer's manual)] RTM 6.04.95 . Donetsk: Dongiproshakht, 1995, 17 p.

21. Raspolozhenie, okhrana i podderzhanie gornykh vyrabotok pri otrabotke ugol'nykh plastov na shakhtakh Rukovodyashchiiy dokument [Location, protection and maintenance of mine workings during the development of coal seams in mines. Guidance document] / RANIMI. Utv. Min. uglya i energetiki DNR 15.04.21. Donetsk, 2021. 267 p.

22. Driban V.A., Feofanov A.N., Nazimko I.V., 2009. Razrabotka sistemy prognoza obrusheniya zemnoi poverkhnosti nad pogashennymi gornymi vyrabotkami . [Development of a system for predicting landslides over abandoned mine workings]. Problemi girs'kogo tisku: zb. nauk. pr., Donets'k, №17, P. 22 – 57.

23. Driban V.A., Khokhlov B.V., Khlamov D.M., Antipenko A.V., 2023. Prognoz pro-valoopasnosti podrobotannykh territorii pri zatoplenii gornykh vyrabotok shakht Torezsko-Snezhnyanskogo raiona na osnove metodov iskusstvennogo intellekta . [Forecasting the collapse hazard of underworked territories during flooding of mine workings in the Torez-Snezhny district based on artificial intelligence methods]. Trudy RANIMI, № 20-21 (35-36), P. 47-65.

УДК 622.831:550.834

**Константинов Александр Викторович**

научный сотрудник,  
Институт горного дела ДВО РАН,  
680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51  
e-mail: [alex-sdt@yandex.ru](mailto:alex-sdt@yandex.ru)

**Ломов Михаил Андреевич**

младший научный сотрудник,  
Институт горного дела ДВО РАН  
e-mail: [9241515400@mail.ru](mailto:9241515400@mail.ru)

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ЗОН

*Аннотация:*

*В статье представлены результаты исследования по применению методов кластерного анализа для решения задачи выделения акустически активных зон на удароопасных месторождениях. Данные, полученные с помощью сейсмоакустической системы «Prognoz-ADS», использовались для анализа процессов разрушения в породном массиве, проявляющихся в повышенной концентрации событий акустической эмиссии. Основным инструментом анализа выбран алгоритм DBSCAN, позволяющий идентифицировать кластеры произвольной формы с учетом пространственно-временных характеристик событий. Для оптимизации параметров алгоритма был применен индекс Дэвиса-Болдина, что позволило определить оптимальный радиус окрестности событий (7 м) и минимальное количество соседей (13). В результате проведенного анализа данных месторождения Южное было выделено 20 акустически активных зон, характеризующих участки повышенного горного давления. Анализ кластеров по временным и пространственным характеристикам позволил исключить из рассмотрения события, связанные с ошибками локации и техногенными помехами, а также выявить закономерности развития очагов разрушения. Разработанные программно-методические средства обеспечивают качественную идентификацию зон разрушения с точным определением границ и наблюдение за их развитием. Выделенные зоны рекомендованы для приоритетного мониторинга, что позволит минимизировать риски аварийных ситуаций. Разработанный подход доказал свою универсальность и может быть применен для анализа сейсмоакустических данных других удароопасных рудников. Практическая значимость работы заключается в возможности своевременного прогнозирования и предотвращения опасных динамических проявлений горного давления, что подчеркивает важность сочетания современных методов кластеризации и инструментов геомеханического мониторинга для повышения безопасности горных работ.*

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.078

**Konstantinov Alexander V.**

Researcher,  
Mining Institute, FEB of RAS,  
680000 Khabarovsk, 51 Turgeneva Str.  
e-mail: [alex-sdt@yandex.ru](mailto:alex-sdt@yandex.ru)

**Lomov Michail A.,**

Junior Researcher,  
Mining Institute, FEB of RAS  
e-mail: [9241515400@mail.ru](mailto:9241515400@mail.ru)

## APPLICATION OF CLUSTER ANALYSIS METHODS FOR IDENTIFYING ACOUSTIC ACTIVE ZONES

*Abstract:*

*The article presents the results of a study on the application of cluster analysis methods to identify acoustically active zones (AAZ) in hazardous mining sites. Data obtained using the "Prognoz-ADS" seismic-acoustic system were utilized to analyze destruction processes in the rock mass, which manifest as a high concentration of acoustic emission events. The primary analytical tool used was the DBSCAN algorithm, which allows for the identification of clusters with arbitrary shapes, considering the spatial and temporal characteristics of the events. To optimize the algorithm's parameters, the Davies-Bouldin Index was applied, enabling the determination of the optimal neighborhood radius (7 m) and the minimum number of neighbors (13). As a result of analyzing data from the Yuzhnoe deposit, 20 acoustically active zones were identified, representing areas of elevated rock pressure. The analysis of clusters based on their spatial and temporal characteristics enabled the exclusion of events related to localization errors and anthropogenic noise, as well as the identification of patterns in the development of destruction foci. The developed software and methodological tools ensure accurate identification of destruction zones, precise delineation boundaries, and monitoring of their evolution. This study's practical value stems from its ability to forecast and prevent hazardous dynamic manifestations of rock pressure. The identified zones are recommended for priority monitoring to minimize the risks of emergency situations. The proposed approach has demonstrated its versatility and can be applied to analyze seismic-acoustic data from other hazardous mining sites. This work highlights the importance of integrating modern clustering methods with geomechanical monitoring tools to enhance the safety of mining operations.*

*Ключевые слова: геомеханика, сейсмоакустический мониторинг, кластерный анализ, DBSCAN, сейсмоакустические события, очаг разрушения, удароопасность, горное давление.*

*Key words: geomechanics, seismoacoustic monitoring, cluster analysis, DBSCAN, seismoacoustic events, destruction focus, shock hazard, rock pressure.*

### *Введение*

Геомеханический мониторинг удароопасных месторождений требует решения задачи идентификации очагов разрушения в породном массиве [1, 2]. Сейсмоакустический метод позволяет определять участки с повышенной плотностью событий акустической эмиссии, что обеспечивает локализацию потенциальных зон разрушения в массиве горных пород [3, 4]. Однако сложности, связанные с формой этих зон, ошибками локации и неравномерностью их формирования, создают необходимость разработки новых подходов для качественного определения источников разрушения [5].

Современные системы мониторинга, такие как «Prognoz-ADS», способны фиксировать события акустической эмиссии в реальном времени, но задача их объединения в акустически активные зоны остается недостаточно решенной [6]. Анализ акустически активных зон позволяет исследовать динамику излучения акустической эмиссии на разных этапах эволюции очагов разрушения [7, 8].

Целью исследования является разработка метода, который обеспечивает автоматический подбор параметров кластеризации для выделения акустически активных зон и оценку полученных кластеров событий. Рассматриваемый подход учитывает особенности пространственно-временного распределения событий и позволяет повысить точность локализации очагов разрушения. Ожидается, что предложенный метод улучшит эффективность геомеханического мониторинга, способствуя более точному прогнозированию горных ударов и других динамических проявлений горного давления.

#### *Обоснование методов исследования для выделения акустически активных зон*

Существует широкий спектр алгоритмов для объединения объектов на основе их количественных и качественных характеристик. Однако наиболее подходящим для анализа процессов трещинообразования является кластерный анализ. Его ключевая особенность заключается в том, что состав кластеров изначально не задан, а в некоторых алгоритмах не определяется даже их количество [9]. Применение кластерного анализа предполагает итеративный расчет метрики сходства объектов по выбранным признакам с последующей оценкой результатов для формирования четких границ между кластерами.

На сегодняшний день в мировой практике используется большое разнообразие алгоритмов кластеризации, адаптированных для различных типов данных. Среди наиболее популярных – метод k-средних (k-means) [10] и алгоритм DBSCAN (Density-based spatial clustering of applications with noise) [11].

Метод k-средних направлен на минимизацию суммарного квадратичного отклонения объектов от центров соответствующих кластеров. Пример работы этого алгоритма на тестовой выборке представлен на рис. 1, где видно, что алгоритм корректно обрабатывает данные с четко локализованными точками.

Алгоритм k-means имеет несколько значительных ограничений. Во-первых, его применение требует заранее заданного количества кластеров, что затрудняет его использование при анализе параметров сейсмоакустических событий, зарегистрированных системой «Prognoz-ADS», где это количество заранее неизвестно. Во-вторых, алгоритм не учитывает наличие шума в данных, что может быть вызвано регистрацией случайных событий, техногенных помех или ошибками в определении локации. Также k-means плохо справляется с кластеризацией данных со сложной геометрией распределения, что особенно важно в случаях сложной формы поверхности разрушения.

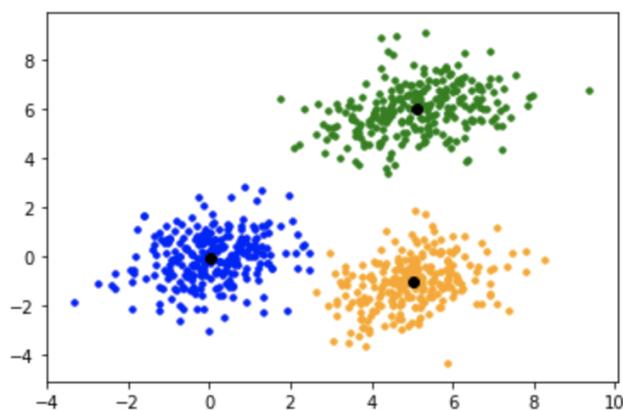


Рис. 1. Результат работы алгоритма k-means на тестовой выборке

На рис. 2 показаны примеры некорректной работы алгоритма k-means на специфических тестовых выборках.

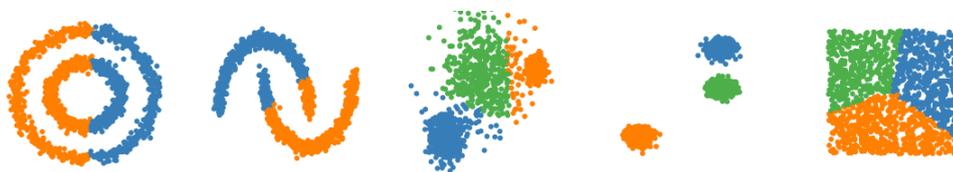


Рис. 2. Результат работы алгоритма k-means на выборках со специфическим распределением точек

Алгоритм DBSCAN лишен недостатков, присущих k-means, и предоставляет возможность выделения кластеров произвольной формы в многомерных данных. Он основывается на концепциях плотности и близости для определения кластеров. На рис. 3 показано, как DBSCAN работает с выборками, имеющими специфическое распределение точек.



Рис. 3. Результат работы алгоритма DBSCAN на выборках со специфическим распределением точек

Основными параметрами алгоритма являются радиус  $\mathcal{E}$ -окрестности и минимальное количество точек  $n_p$ , необходимое для формирования кластера. Радиус  $\mathcal{E}$ -окрестности определяет максимальное расстояние между двумя объектами, чтобы они считались соседними, а  $n_p$  задает минимальное количество точек, необходимое для формирования плотного региона (кластера).

Алгоритм выделяет три типа точек. Первым типом являются точки ядра (Core Points). Точка считается точкой ядра, если в ее  $\mathcal{E}$ -окрестности содержится не менее  $n_p$  точек, включая ее саму. Это условие можно выразить следующим образом:

$$|N_{\mathcal{E}}(p)| \geq n_p. \quad (1)$$

Окрестность точки  $N_\varepsilon(p)$  определяется выражением:

$$N_\varepsilon(p) = \{q \in D \mid d(p, q) \leq \varepsilon\}, \quad (2)$$

где  $D$  – множество всех кластеризуемых точек;

$q$  – произвольная точка, принадлежащая набору данных  $D$ ;

$d(p, q)$  – функция расстояния между двумя точками, в большинстве случаев используется евклидово расстояние;

$\varepsilon$  – радиус окрестности точки ядра.

Второй тип – это граничные точки (Border Points), которые сами не являются точками ядра, но находятся в окрестности другой точки ядра. Третий тип – шумовые точки (Noise Points), которые не принадлежат ни к точкам ядра, ни к граничным точкам.

Схема работы алгоритма DBSCAN представлена на рис. 4 и включает следующие этапы:

1. Для каждой точки в наборе определяется количество соседей в ее окрестности.
2. Проверяется принадлежность точки к кластеру:
  - если точка является точкой ядра, она становится начальной точкой нового кластера;
  - все точки в ее  $\varepsilon$ -окрестности добавляются в этот кластер;
  - для каждой новой точки ядра добавляются точки из ее  $\varepsilon$ -окрестности.
3. Кластер продолжает расти, пока возможно добавление новых точек.
4. После завершения формирования текущего кластера алгоритм переходит к следующей точке.

В результате работы алгоритма DBSCAN формируются кластеры точек с высокой плотностью, а также выделяются шумовые точки, не принадлежащие ни одному кластеру.

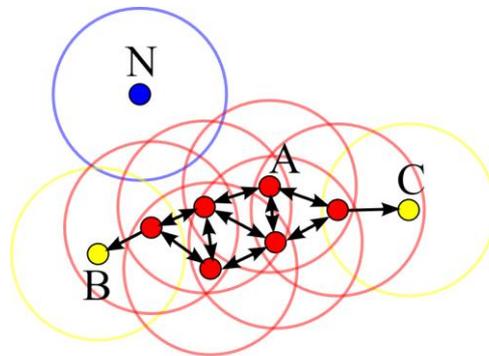


Рис. 4. Процесс выполнения алгоритма DBSCAN.

Представлено минимальное количество точек, равное 4. Точка A и другие красные точки являются основными, поскольку область с радиусом  $\varepsilon$ , окружающая эти точки, содержит по меньшей мере 4 точки (включая саму точку). Поскольку все они достижимы друг из друга, точки образуют один кластер. Точки B и C основными не являются, но достижимы из A (через другие основные точки), и также принадлежат кластеру.

Точка N является шумовой, так как она не является ни основной точкой, ни достижимой

На рис. 5 приведен практический пример кластеризации с использованием алгоритма DBSCAN. Визуализированы шумовые точки, отмеченные серым цветом, которые не вошли ни в один из кластеров. Также показано, что точки, находящиеся на границах кластеров, выделяются отдельно, что дает возможность анализировать форму отдельных кластеров сейсмоакустических событий и проводить более точный подбор параметров кластеризации.

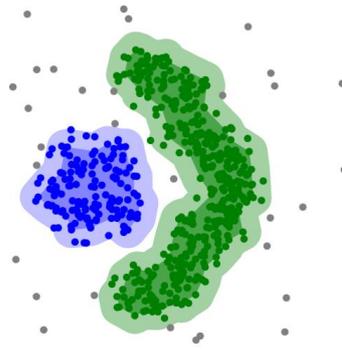


Рис. 5. Пример кластеризации алгоритмом DBSCAN

Подбор и оценка качества кластеризации может быть трудоемким процессом особенно при сложной форме кластеров, которой, в частности, обладают сейсмоакустические очаги. Выбор оптимальных параметров для кластеризации событий можно производить по матрице значений расстояния и минимального количества точек в окрестности, итерационно кластеризуя события и оценивая полученные кластеры. В качестве оценочной характеристики предлагается применять такую метрику внутрикластерного расстояния, как индекс Дэвиса-Болдина (Davies-Bouldin Index) [12, 13]. Основная цель этой метрики – минимизация расстояния между объектами внутри одного кластера и максимизация расстояния между различными кластерами. Таким образом, более низкие значения указывают на лучшее качество кластеризации. Концептуально данный индекс измеряет «сходство» между каждым кластером и кластером, наиболее похожим на него. Дополнительным достоинством этой метрики является отсутствие предварительного знания об истинном количестве кластеров, что согласуется с алгоритмом DBSCAN и позволяет применять их совместно.

Индекс Дэвиса-Болдина вычисляется следующим образом:

1. Для каждого кластера  $C_i$  определяется центроид, т. е. среднее значение всех точек в кластере:

$$\mu_i = \frac{1}{|C_i|} \sum_{x \in C_i} x, \quad (3)$$

где  $|C_i|$  – это количество точек в кластере  $C_i$ ;

$x$  – точка, принадлежащая кластеру  $C_i$ .

2. Вычисление внутрикластерного расстояния как среднего расстояния от каждой точки в кластере до центроида этого кластера:

$$S_i = \frac{1}{|C_i|} \sum_{x \in C_i} \|x - \mu_i\|. \quad (4)$$

3. Вычисление межкластерных расстояний как расстояний между центроидами:

$$M_{ij} = \|\mu_i - \mu_j\|. \quad (5)$$

4. Для каждого кластера  $i$  и  $j$  вычисление коэффициента сходства как суммы внутрикластерных расстояний, деленное на межкластерное расстояние:

$$R_{ij} = \frac{S_i + S_j}{M_{ij}}. \quad (6)$$

5. Определение для каждого кластера максимального значения коэффициента сходства с любым другим кластером, т. е. наихудшего:

$$R_i = \max_{j \neq i} R_{ij}. \quad (7)$$

6. Расчет индекса Дэвиса-Болдина как среднего значения коэффициента сходства  $R_i$  по всем кластерам:

$$DB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i, \quad (8)$$

где  $N$  – общее количество кластеров.

*Применение алгоритма DBSCAN для кластеризации сейсмоакустических событий на удароопасном месторождении*

В качестве исходных данных использовались сейсмоакустические события, зарегистрированные системой «Prognoz-ADS» на месторождении Южное и характеризующие естественные процессы разрушения [14].

Как отмечалось ранее, кластеризация с использованием алгоритма DBSCAN требует выбора двух ключевых параметров: метрики расстояния и минимального количества точек в окрестности базовой точки. Для определения оптимального значения расстояния рекомендуется строить график средних расстояний между ближайшими точками. Указанная зависимость для данных, зарегистрированных на месторождении Южное, представлена на рис. 6. Оптимальный интервал расстояний выбирается в месте изгиба графика. В данном случае выберем интервал от 5 до 20 м.

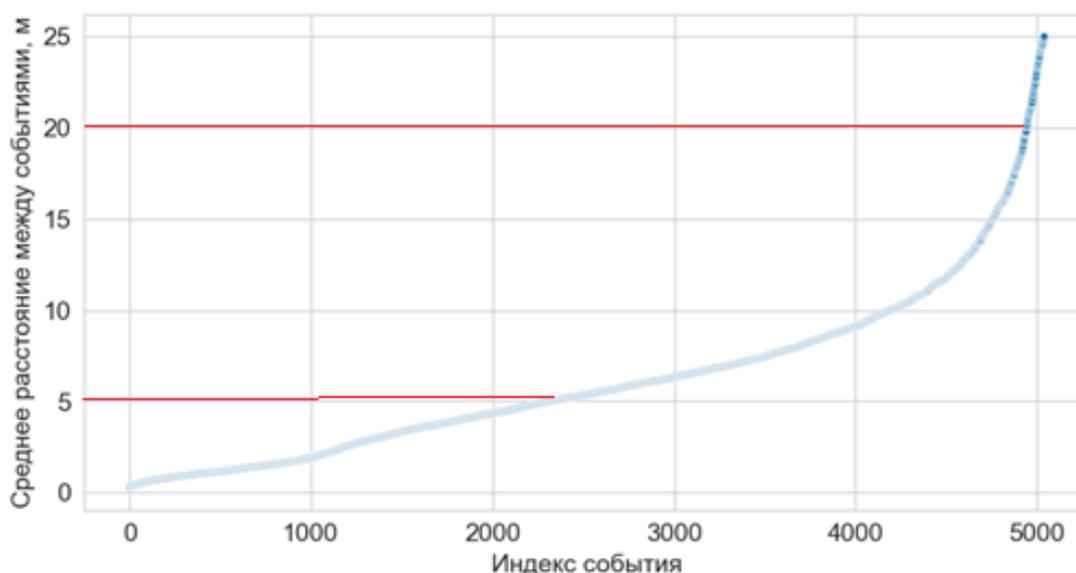


Рис. 6. График распределения среднего расстояния между событиями

Для оптимизации параметров алгоритма DBSCAN была рассчитана матрица значений индекса Дэвиса-Болдина, варьирующихся в диапазоне от 0,37 до 0,97. Результаты представлены в виде тепловой карты на рис. 7.

Анализ рассчитанных значений индекса Дэвиса-Болдина и визуализации кластеров позволил сформулировать следующие выводы:

- использование параметров, при которых индекс принимает более высокие значения, приводит к объединению множества событий в один кластер, что свидетельствует о перекластеризации;
- при более низких значениях индекса наблюдается значительное количество событий, которые алгоритм определяет как шум, что может приводить к потере данных;

– оптимальными являются параметры кластеризации, соответствующие значениям индекса в диапазоне от 0,5 до 0,55. В этих случаях наблюдается выраженная кластерная структура без чрезмерного дробления на мелкие очаги.

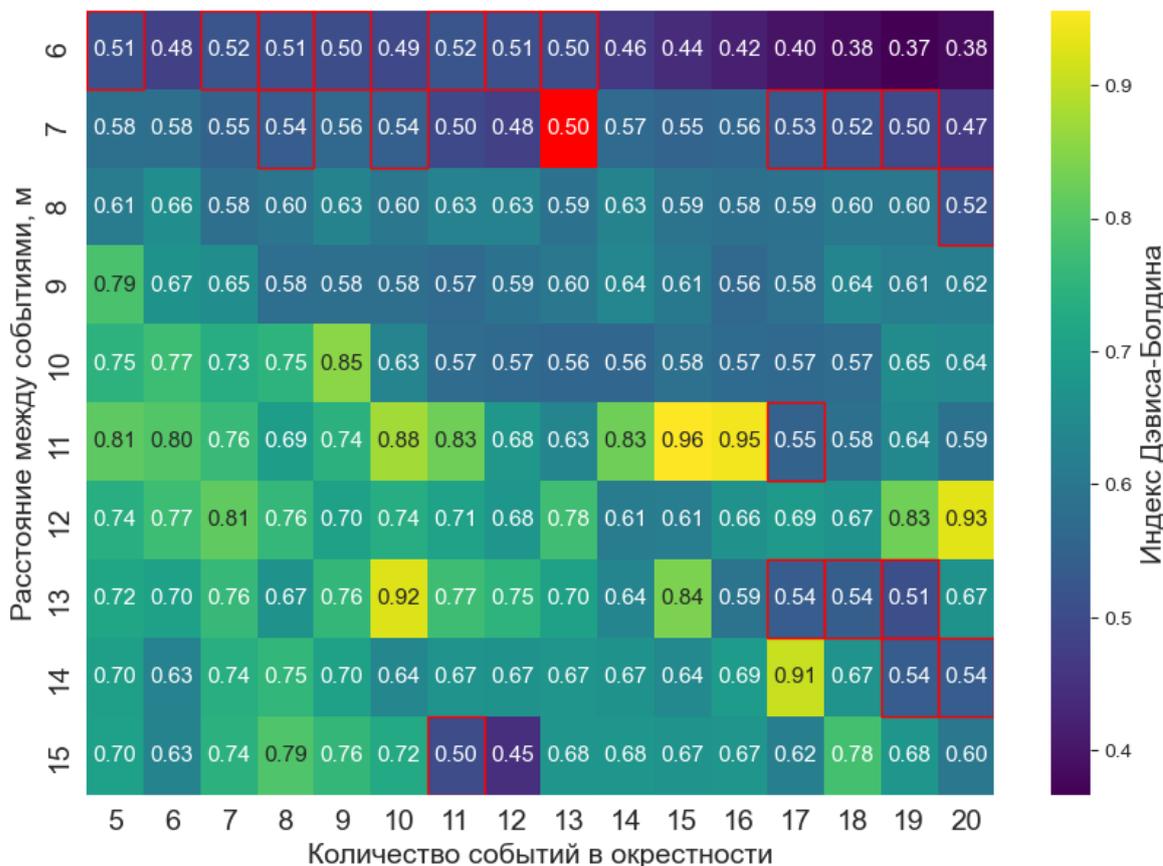


Рис. 7. Матрица значений индекса Дэвиса-Болдина, рассчитанных для кластеров, определенных с использованием параметров расстояния между событиями и количеством событий в окрестности

В результате анализа параметров кластеризации были выбраны значения расстояния между событиями внутри кластера и минимального количества событий в окрестности, равные 7 м и 13, соответственно. При этих параметрах значение индекса составило 0,5, и в результате кластеризации по пространственным признакам было выделено 20 кластеров.

Для дальнейшего уточнения временных характеристик кластеров они были проанализированы по времени регистрации событий, чтобы исключить наличие длительных разрывов в данных. Это позволило более точно определить временные границы начала и окончания формирования акустически активных зон (ААЗ). Следует отметить, что некоторые временные разрывы, такие как с 23 по 28 февраля 2023 года и с 1 по 27 января 2024 года, связаны с техническими неполадками оборудования, а не с особенностями регистрируемых данных.

В рамках анализа временной динамики событий в кластерах для ряда ААЗ, представленных на рис. 8, было выявлено, что часть событий с более поздним временем регистрации заметно выбивается из общей динамики. Это может быть связано с остаточными процессами разгрузки или ошибочным определением локации, поэтому такие события были исключены из состава кластеров. Всего из анализируемых 8 кластеров было удалено 30 событий.

Итоговое распределение событий по кластерам представлено графически на рис. 9, а численные параметры – в табл. 1.

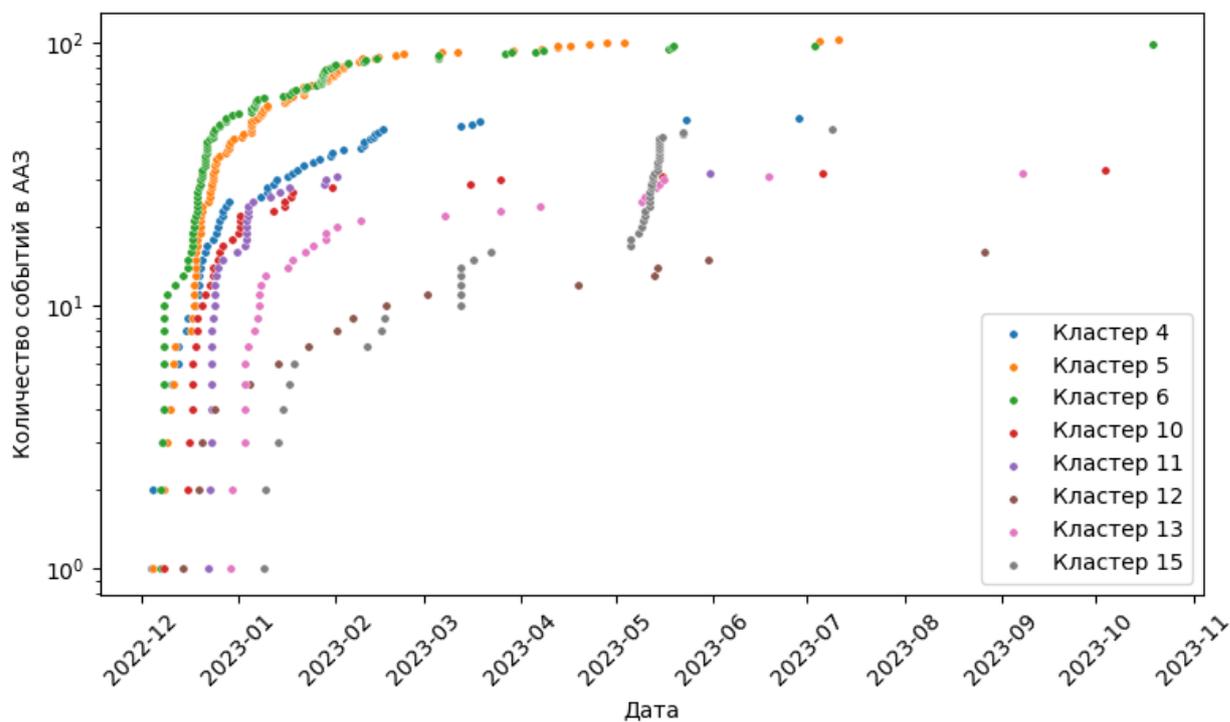


Рис. 8. Количество событий для ряда кластеров, где наблюдаются разрывы в регистрации данных

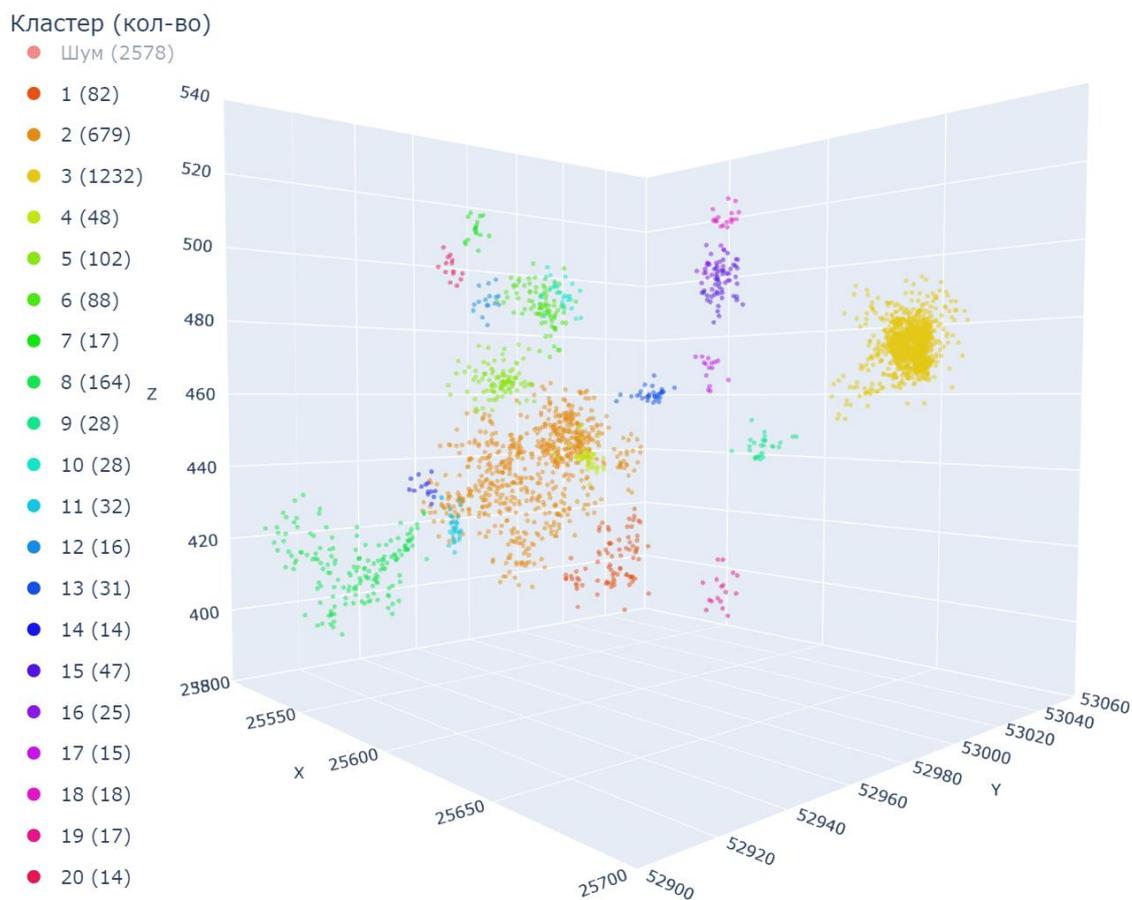


Рис. 9. Пространственное расположение ААЗ, выделенных в условиях месторождения Южное

Таблица 1

**Сводная таблица параметров акустически активных зон на момент последнего зарегистрированного в них события**

№	Дата регистрации		Количество событий	Суммарная энергетическая характеристика	Среднее расстояние между соседними событиями, м
	первого события	последнего события			
1	15.12.2022	28.12.2023	82	15308,82	4,47
2	03.12.2022	08.02.2024	679	20013,77	4,17
3	04.12.2022	08.02.2024	1232	20343,52	1,75
4	03.12.2022	15.02.2023	48	25492,72	3,50
5	03.12.2022	03.05.2023	102	2536,91	4,46
6	07.12.2022	14.02.2023	88	2381,63	4,72
7	07.12.2022	07.09.2023	17	3291,98	4,18
8	11.12.2022	08.02.2024	164	3634,81	4,43
9	14.12.2022	30.11.2023	28	139,03	3,76
10	08.12.2022	18.01.2023	28	342,45	5,33
11	17.12.2022	01.02.2023	32	277,49	3,57
12	12.12.2022	30.05.2023	16	410,49	6,16
13	20.12.2022	16.05.2023	31	308,41	3,13
14	04.12.2022	30.01.2024	14	131,56	5,27
15	03.01.2023	22.05.2023	47	6261,09	4,72
16	08.12.2022	15.08.2023	25	701,69	5,42
17	17.12.2022	25.12.2023	15	134,20	4,96
18	03.12.2022	13.08.2023	18	938,83	5,21
19	19.12.2022	08.12.2023	17	117,45	5,41
20	20.12.2022	11.10.2023	14	563,60	4,90

*Заключение*

На основе проведенного анализа сейсмоакустических событий месторождения Южное были выявлены акустически активные зоны, возникающие в результате процессов трещинообразования в породном массиве. Эти зоны проявляются в виде локальной концентрации источников акустического излучения и отражают динамику изменения напряженно-деформированного состояния массива.

Для определения пространственных характеристик очагов разрушения использовался алгоритм кластеризации DBSCAN. Подбор его параметров осуществлялся с использованием индекса Дэвиса-Болдина, что позволило оптимизировать значения радиуса окрестности события (7 м) и минимального количества соседей в кластере (13). Применение такого подхода обеспечило точное выделение кластеров событий, соответствующих акустически активным зонам.

В результате кластерного анализа данных удалось выделить 20 акустически активных зон в массиве месторождения Южное. Полученные пространственно-временные характеристики этих зон позволяют локализовать очаги разрушения, оценить их размеры и проанализировать динамику их формирования и развития.

Таким образом, разработанные программно-методические средства кластеризации сейсмоакустических событий показали свою эффективность в задаче идентификации очагов разрушения. Выявленные участки породного массива требуют постоянного мониторинга, включающего анализ как абсолютных, так и относительных параметров

сейсмоакустических данных, что необходимо для выявления закономерностей формирования и прогнозирования опасных динамических проявлений горного давления.

### Список литературы

1. Козырев А.А., Семенова И.Э., Жукова С.А., Журавлева О.Г., 2022. Факторы изменения сейсмического режима и локализации опасных зон при крупномасштабном техногенном воздействии. *Горная промышленность*, № 6, С. 95-102. DOI 10.30686/1609-9192-2022-6-95-102.
2. Еременко А.А., Мулев С.Н., Штирц В.А., 2022. Мониторинг геодинамических явлений микросейсмическим методом при освоении удароопасных месторождений. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 1, С. 12–22. DOI 10.15372/FTPRI20220102.
3. Gladyr A., Rasskazov M., Konstantinov A., Tereshkin A., 2019. Algorithm for calculating hazard areas of a rock massif based on geomechanical data. *E3S Web of Conferences*, Vol. 129, P. 01002. DOI 10.1051/e3sconf/201912901002.
4. Gladyr A.V., Tereshkin A.A., Rasskazov M.I., Konstantinov A.V., 2019. Application of probabilistic clustering analysis to rockburst hazard assessment of rock mass. *IOP Conference series*, Vol. 773, P. 012061. DOI 10.1088/1755-1315/773/1/012061.
5. Рассказов И.Ю., Федотова Ю.В., Аникин П.А. и др., 2023. Совершенствование методов и средств геомеханического мониторинга на основе цифровых технологий. *Горная промышленность*, № S5, С. 18-24. DOI 10.30686/1609-9192-2023-S5-18-24.
6. Семенова И.Э., Журавлева О.Г., Жукова С.А., 2023. О механизмах разрушения массива горных пород и закономерностях формирования опасных зон в окрестности элементов горной технологии. *Горная промышленность*, № S1, С. 69-74. DOI 10.30686/1609-9192-2023-S1-69-74.
7. Zhu Z., Jiang Z., Accornero F., Carpinteri A., 2024. Correlation between seismic activity and acoustic emission on the basis of in-situ monitoring. *EGUsphere* [preprint]. DOI 10.5194/egusphere-2024-688.
8. Mendecki M., Pakosz R., Wojtecki Ł., Zuberek W., 2021. Spatiotemporal analysis of elastic and inelastic deformations in roof-rocks from seismological observations. *International Journal of Mining Science and Technology*, Vol. 31, P. 241–251. DOI 10.1016/j.ijmst.2020.12.001.
9. Jain A., Murty M., Flynn P., 1999. Data clustering: A review. *ACM Computing Surveys*, Vol. 31, no. 3, P. 264–323.
10. Arthur D., Vassilvitskii S., 2006. How slow is the k-means method? *Proceedings of the Twenty-Second Annual Symposium on Computational Geometry, Sedona, Arizona, USA*. New York, USA: Association for Computing Machinery, P. 144–153. DOI 10.1145/1137856.1137880.
11. Schubert E., Sander J., Ester M. et al., 2017. DBSCAN revisited, revisited: Why and how you should (still) use DBSCAN. *ACM Transactions on Database Systems*, Vol. 42, no. 3, P. 1–21.
12. Davies D., Bouldin D., 1979. A cluster separation measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-1, no. 2, P. 224–227. DOI 10.1109/TPAMI.1979.4766909.
13. Zhang W., 2023. An improved DBSCAN algorithm for hazard recognition of obstacles in unmanned scenes. *Soft Computing*, Vol. 27, P. 18585–18604.
14. Константинов А.В., Рассказов И.Ю., 2024. Разработка комплекса нейросетевых моделей для идентификации типа источника акустического излучения на удароопасном месторождении. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11, С. 23–36. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_11\_0\_23.

## References

1. Kozyrev A.A., Semenova I.E., Zhukova S.A., Zhuravleva O.G., 2022. Faktory izmeneniya seismicheskogo rezhima i lokalizatsii opasnykh zon pri krupnomasshtabnom tekhnogennom vozdeistvii [Factors of changes in the seismic regime and localization of hazardous areas under large-scale anthropogenic impact]. *Gornaya promyshlennost'*, № 6, P. 95–102. DOI 10.30686/1609-9192-2022-6-95-102.
2. Eremenko A.A., Mulev S.N., Shtirts V.A., 2022. Monitoring geodinamicheskikh yavlenii mikroiseimicheskim metodom pri osvoenii udaroopasnykh mestorozhdenii [Microseismic monitoring of geodynamic phenomena during the development of high-impact deposits]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 1, P. 12–22. DOI 10.15372/FTPPI20220102.
3. Gladyr A., Rasskazov M., Konstantinov A., Tereshkin A., 2019. Algorithm for calculating hazard areas of a rock massif based on geomechanical data. *E3S Web of Conferences*, Vol. 129, P. 01002. DOI 10.1051/e3sconf/201912901002.
4. Gladyr A.V., Tereshkin A.A., Rasskazov M.I., Konstantinov A.V., 2019. Application of probabilistic clustering analysis to rockburst hazard assessment of rock mass. *IOP Conference series*, Vol. 773, P. 012061. DOI 10.1088/1755-1315/773/1/012061.
5. Rasskazov I.Yu., Fedotova Yu.V., Anikin P.A. i dr., 2023. Sovershenstvovanie metodov i sredstv geomekhanicheskogo monitoringa na osnove tsifrovyykh tekhnologii [Improvement of methods and means of geomechanical monitoring based on digital technologies]. *Gornaya promyshlennost'*, № S5, P. 18–24. DOI 10.30686/1609-9192-2023-5S-18-24.
6. Semenova I.E., Zhuravleva O.G., Zhukova S.A., 2023. O mekhanizmaxh razrushe-niya massiva gornyykh porod i zakonomernostyakh formirovaniya opasnykh zon v okrestnosti elementov gornoj tekhnologii . [On the mechanisms of destruction of a rock mass and the patterns of formation of dangerous zones in the vicinity of elements of mining technology]. *Gornaya promyshlennost'*, № S1, P. 69–74. DOI 10.30686/1609-9192-2023-S1-69-74.
7. Zhu Z., Jiang Z., Accornero F., Carpinteri A., 2024. Correlation between seismic activity and acoustic emission on the basis of in-situ monitoring. *EGUsphere* [preprint]. DOI 10.5194/egusphere-2024-688.
8. Mendecki M., Pakosz R., Wojtecki Ł., Zuberek W., 2021. Spatiotemporal analysis of elastic and inelastic deformations in roof-rocks from seismological observations. *International Journal of Mining Science and Technology*, Vol. 31, P. 241–251. DOI 10.1016/j.ijmst.2020.12.001.
9. Jain A., Murty M., Flynn P., 1999. Data clustering: A review. *ACM Computing Surveys*, Vol. 31, no. 3, P. 264–323.
10. Arthur D., Vassilvitskii S., 2006. How slow is the k-means method? *Proceedings of the Twenty-Second Annual Symposium on Computational Geometry*, Sedona, Arizona, USA. New York, USA: Association for Computing Machinery, P. 144–153. DOI 10.1145/1137856.1137880.
11. Schubert E., Sander J., Ester M. et al., 2017. DBSCAN revisited, revisited: Why and how you should (still) use DBSCAN. *ACM Transactions on Database Systems*, Vol. 42, no. 3, P. 1–21.
12. Davies D., Bouldin D., 1979. A cluster separation measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-1, no. 2, P. 224–227. DOI 10.1109/TPAMI.1979.4766909.
13. Zhang W., 2023. An improved DBSCAN algorithm for hazard recognition of obstacles in unmanned scenes. *Soft Computing*, Vol. 27, P. 18585–18604.
14. Konstantinov A.V., Rasskazov I.Yu., 2024. Razrabotka kompleksa neurosetevykh modelei dlya identifikatsii tipa istochnika akusticheskogo izlucheniya na udaroopasnom mestorozhdenii [Development of a complex of neural network models to identify the type of acoustic radiation source in an impact-prone field]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 11, P. 23–36. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_11\_0\_23.

УДК 550.461(571.63)

**Потурай Валерий Алексеевич**

кандидат геолого-минералогических наук,  
старший научный сотрудник,  
заведующий лабораторией экологии,  
генетики и эволюции,  
Институт комплексного анализа  
региональных проблем ДВО РАН,  
679016, г. Биробиджан,  
ул. Шолом-Алейхема, 4  
e-mail: [poturay85@yandex.ru](mailto:poturay85@yandex.ru)

## СОСТАВ УГЛЕВОДОРОДОВ В УГЛЕКИСЛЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОДАХ\*

*Аннотация:*

Исследование углеводородов и их производных в углекислых минеральных водах представляет значительный интерес, так как углекислый газ, находясь в сверхкритическом состоянии, может формировать уникальный состав органического вещества в подземных водах. В настоящей работе состав органических компонентов средней летучести в углекислых минеральных водах рассматривается на примере Шмаковских источников, которые находятся в Приморском крае (Дальний Восток России). Методом твердофазной экстракции, которая осуществлялась на месте отбора при помощи полевой установки, и капиллярной газовой хроматографии в сочетании с масс-спектрометрией в Шмаковских минеральных углекислых водах были найдены разнообразные углеводороды и их производные. Установленные соединения обладают молекулярной массой от 90 до 550 а.э.м. и летучестью от 70 до 550 °С. Среди идентифицированных компонентов преобладают алифатические углеводороды, представленные в основном нормальными и разветвленными алканами. Кислородсодержащие органические соединения (карбоновые кислоты, эфиры, альдегиды и спирты) имеют подчиненное значение, а ароматические углеводороды, включающие арены, полициклические ароматические углеводороды и гетероароматические соединения, распространены незначительно. Установленные органические соединения, вероятно, имеют бактериальное происхождение, включая трансформацию остатков органической природы микробиологического генезиса под действием сверхкритического флюида CO<sub>2</sub>. Кроме этого, минеральные воды Восточно-Уссурийского участка предположительно испытывают на себе антропогенное влияние. На это указывает присутствие в составе органического вещества хлоруглеводородов и фталатов, особенности молекулярно-массового распределения нормальных алканов и микробиологические исследования, которые были проведены ранее другими исследователями. Полученные результаты могут быть использованы бальнеологическими службами для определения соединений, благотворно влияющих на организм человека или наносящих вред. Кроме этого, данные анализов органических микропримесей могут быть оценены для выявления техногенного загрязнения минеральных вод, используемых для лечения людей.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.089

**Poturay Valery A.**

Candidate of Geological  
and Mineralogical Sciences,  
Senior Researcher, Head of the Laboratory,  
Laboratory of ecology, genetics and evolution,  
Institute for Complex Analysis  
of Regional Problems FEB RAS,  
679000 Birobidzhan, 4 Sholom-Aleikhem Str.  
e-mail: [poturay85@yandex.ru](mailto:poturay85@yandex.ru)

## COMPOSITION OF HYDROCARBONS IN CARBONACEOUS MINERAL WATERS

*Abstract:*

The study of hydrocarbons and their derivatives in carbonaceous mineral waters is of considerable interest because the carbon dioxide, being in a supercritical state, can form a unique composition of organic matter in groundwater. In the paper, the composition of organic components of medium volatility in carbonaceous mineral waters is considered, using the example of the Shmakovka springs, located in the Primorsky region (Russian Far East). A variety of hydrocarbons and their derivatives were found in Shmakovskiye carbonic waters by solid-phase extraction, performed at the sampling site using a field unit, and capillary gas chromatography combined with mass spectrometry. The identified compounds have molecular weights between 90 and 550 dalton and volatilities between 70 and 550 °C. The identified components are dominantly aliphatic hydrocarbons, mainly represented by normal and branched alkanes. Oxygenated organic compounds (carboxylic acids, esters, aldehydes and alcohols) are of minor importance and aromatic hydrocarbons, including arenes, polycyclic aromatic hydrocarbons and heteroaromatic compounds, are not widespread. The organic compounds identified are probably of bacterial origin, including the transformation of residues of organic nature of microbiological genesis under the action of supercritical fluid CO<sub>2</sub>. In addition, the mineral waters of the Vostochno-Ussursky area are suspected of being anthropogenically influenced. This is suggested because of the presence of chlorinated hydrocarbons and phthalates in the organic matter, the molecular weight distribution characteristics of normal alkanes, and microbiological studies previously carried out by others. The results obtained can be used by balneological services to identify compounds that are beneficial or harmful to the human body. In addition, data from analyses of trace organic impurities can be used to detect anthropogenic contamination of mineral waters used for human treatment.

\* Исследование выполнено в рамках государственного задания Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН и финансировалось за счет средств его бюджета

*Ключевые слова:* углекислые минеральные воды, углеводороды, органическое вещество, генезис, сверхкритический флюид  $CO_2$ , Шмаковка, техногенное загрязнение.

*Key words:* carbonaceous mineral waters, hydrocarbons, organic matter, genesis, supercritical fluid  $CO_2$ , Shmakovka, anthropogenic pollution.

### *Введение*

Состав углеводородов (УВ) и их производных в минеральных водах России начали изучать примерно с середины прошлого века. К настоящему времени было определено общее содержание органического вещества (ОВ) и установлены его основные классы, среди которых преобладают УВ, карбоновые кислоты, их эфиры и другие кислородсодержащие органические соединения [1– 6]. Особое внимание в аспекте изучения водорастворимой органической составляющей минеральных источников заслуживают воды с высоким содержанием углекислого газа. Особенность этого газа состоит в его способности переходить в сверхкритическое состояние при сравнительно невысокой температуре (около 31 °С) и давлении около 7,3 МПа [2, 7], что возможно уже при небольших глубинах в земной коре (~ 500 – 700 м).  $CO_2$  в виде сверхкритического флюида обладает высокой растворяющей способностью, что приводит к экстрагированию ОВ из водовмещающих пород и переносу его ближе к поверхности. В результате этого в углекислых водах может формироваться уникальный состав ОВ.

Исследования ОВ в углекислых минеральных водах немногочисленны, тем не менее изучение УВ проводилось в углекислых источниках Ессентукского и Нагутского месторождений [1], горноскладчатых областях Центральной Азии [6], Витимского Платогорья и Восточного Саяна [2, 3]. В этих работах приводится концентрация общего углерода органического, описываются основные классы и индивидуальные органические соединения и отмечается особая роль сверхкритического флюида  $CO_2$ .

В настоящей работе состав УВ и их производных в углекислых минеральных водах будет обсуждаться на примере Шмаковского месторождения в Приморском крае. Шмаковка – один из самых крупных бальнеологических курортов на Дальнем Востоке, который представлен 3-мя санаториями («Шмаковский», «Изумрудный» и «Имени 50-летия Октября»). Воды этого месторождения относятся к бальнеологической группе лечебно-столовых холодных углекислых слабоминерализованных гидрокарбонатно-магниево-кальциевых вод, обогащенных кремниевой кислотой. Различные геологические и гидрогеологические аспекты, химический, газовый, изотопный и микробиологический составы этих вод хорошо изучены [8 – 11]. Однако состав ОВ в них до сих пор не изучался. В ходе наших предыдущих исследований было изучено ОВ средней летучести в горячих (температура 46 – 73 °С), холодных подземных (пресных) и поверхностных водах геотермальных месторождений континентальной части Дальнего Востока [12 – 16].

Цель работы – оценить состав органического вещества в углекислых минеральных водах Шмаковского месторождения и его генезис. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Определить индивидуальный состав углеводородов и их производных в воде из скважин четырех участков Шмаковского месторождения.
2. Оценить молекулярно-массовое распределение нормальных алканов.
3. Определить генезис установленных соединений.
4. Выявить соединения – индикаторы техногенного загрязнения.

### *Объекты и методы исследования*

Шмаковское месторождение углекислых минеральных вод расположено в западной части Приморского края, практически на границе Российской Федерации с КНР (рис. 1). Оно приурочено к разломам Павло-Федоровского горста. Водовмещающими породами являются палеозойские гранитоиды, перекрытые сверху маломощным слоем

аллювиальных отложений [10, 11]. Это воды с высоким содержанием углекислого газа (до 99 %) и минерализацией около 1 – 3 г/дм<sup>3</sup> [9, 11]. По изотопам углерода и соотношению CO<sub>2</sub>/<sup>3</sup>He – углекислый газ здесь имеет мантийное происхождение [9]. Соотношение изотопов кислорода и водорода указывает на метеорное происхождение минеральных вод [11]. В пределах этого месторождения проводилось изучение микроорганизмов [8]. Согласно результатам этих исследований численность гетеротрофных микроорганизмов, осуществляющих процессы разложения и минерализации ОВ в углекислых водах Приморья, в целом невысока, что говорит о низком содержании ОВ в этих водах. По численности преобладают микроорганизмы цикла серы и азота. В подземных водах Восточно-Уссурийского участка обнаружены общие колиформные бактерии, что свидетельствует об определенном антропогенном загрязнении минеральных вод этого участка.



Рис. 1. Обзорная карта с месторасположением углекислых вод Шмаковского месторождения

Пробы воды для анализа состава УВ были отобраны в сентябре 2023 г. из четырех скважин Шмаковского месторождения: скважина № 47 Восточно-Уссурийского участка; скважина № 2Э Уссурийского участка; скважина «Источник Остросопочный» Остросопочного участка и скважина № 15-70 Медвежьего участка. На месте отбора измерялись нестабильные параметры: рН и Eh – рН-метром Ohaus Starter-300 и температура – термометром Hanna HI 98509 Checktemp-1. Пробы воды собирались в посуду из темного стекла объемом 0,5 дм<sup>3</sup>. На месте отбора проводилась пробоподготовка методом твердофазной экстракции (ТФЭ) при помощи полевой установки [17, 18]. Для качественного анализа ОВ был использован метод капиллярной газовой хромато-масс-спектрометрии [13]. Анализ проводился в лаборатории ИКАРП ДВО РАН (аналитик – В.А. Потурай) на газовом хромато-масс-спектрометре Shimadzu GCMS-QP2010Ultra. Были получены хроматограммы по полному ионному току (ПИТ), по которым идентифицировались органические соединения средней летучести (рис. 2).

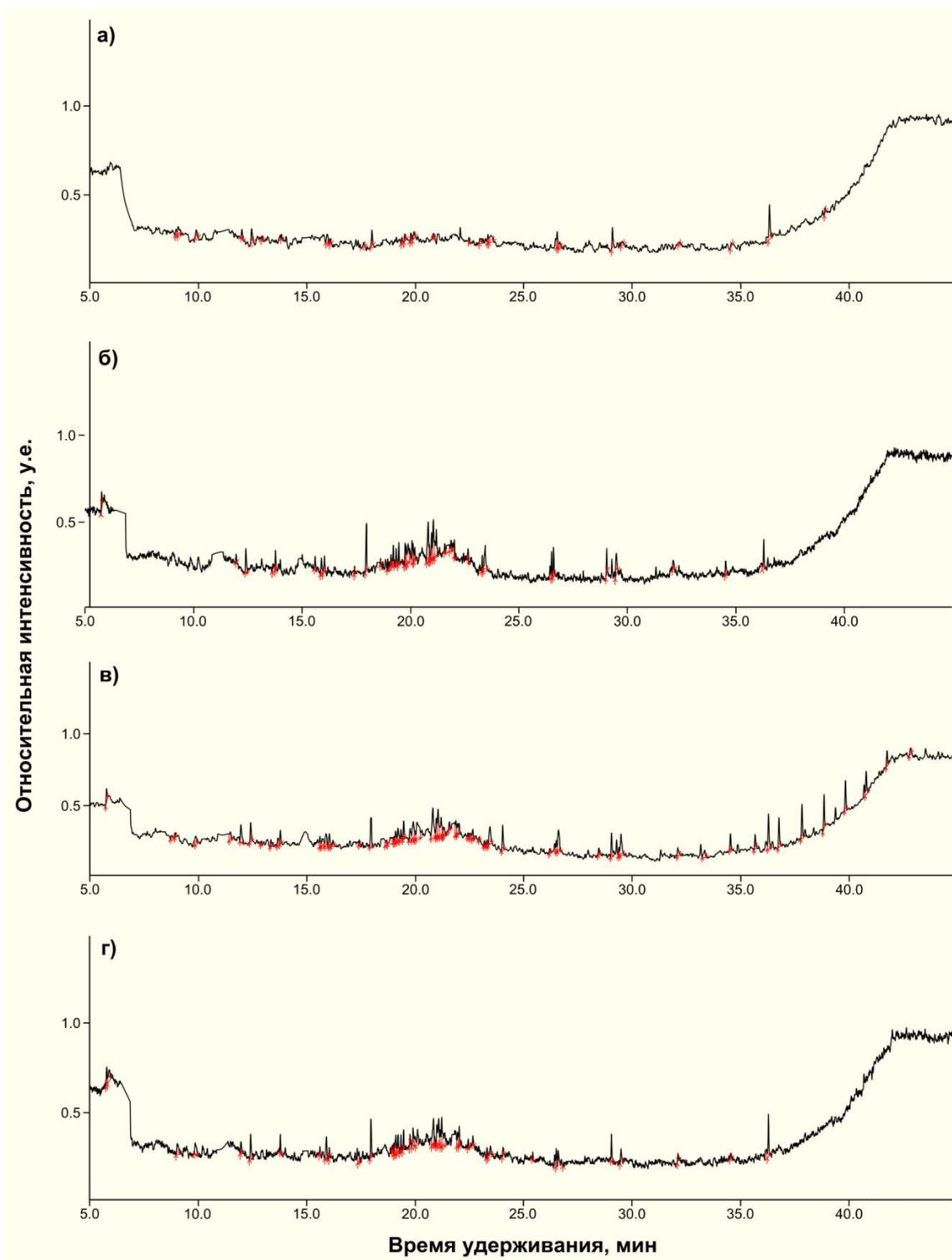


Рис. 2. Хроматограммы ПИТ экстрактов исследуемых вод:  
а) скважина № 15-70; б) скважина № 2Э; в) скважина № 47; источник «Остросопочный»

### *Результаты исследования и их обсуждение*

В Шмаковских минеральных водах установлено 106 органических компонентов (16 гомологических рядов) (табл. 1). При этом доминируют алифатические УВ и кислородсодержащие соединения. К алифатическим УВ относятся нормальные, изо-, цикло-, хлоралканы, алкены, алкины, изопрены и терпены. Присутствие алканов, алкенов и алкинов в исследуемых водах может быть связано с преобладанием диоксида углерода. Эти компоненты плохо растворимы в воде, однако под воздействием  $\text{CO}_2$  они могут переходить в жидкую фазу. Наличие этих компонентов зафиксировано также в угле-

кислых минеральных водах Тункинской впадины [2, 3]. Обращает на себя внимание присутствие в скважине Восточно-Уссурского участка хлоралкана (тетрахлорэтан), который не синтезируется микроорганизмами и может указывать на антропогенное загрязнение этих вод. Галогенпроизводные органические соединения могут образовываться также в процессе горения при лесных пожарах. В этом случае они могли бы усваиваться растениями из загрязненного воздуха и затем попадать в природные воды после деструкции. Однако пока нет определенных данных о содержании галогенсодержащих УВ в растительных тканях [19].

Таблица 1

**Гомологические ряды органических компонентов, установленных в углекислых минеральных водах Шмаковского месторождения**

№ п/п	Наименование гомологического ряда	скв. № 47	скв. № 2Э	Остро-сопочный	скв. № 15-70
		Доля, % (кол-во соединений)			
1	Нормальные алканы	33,3 (22)	26,6 (10)	16,0 (12)	18,9 (13)
2	Хлоралканы	0,4 (1)	–	–	3,2 (1)
3	Изоалканы	18,0 (16)	32,2 (13)	27,3 (12)	13,5 (6)
4	Циклоалканы (Нафтены)	7,8 (3)	11,2 (3)	6,1 (2)	0,3 (1)
5	Алкены и Алкины	3,6 (3)	3,8 (1)	12,4 (4)	10,3 (2)
6	Изопрены	3,1 (1)	–	–	–
7	Ароматические УВ (Арены)	2,4 (1)	–	–	–
8	Полициклические ароматические УВ (ПАУ)	1,0 (1)	1,6 (1)	0,8 (1)	–
9	Гетероароматические УВ	3,1 (5)	–	3,5 (2)	1,6 (1)
10	Карбоновые кислоты	–	–	0,4 (1)	–
11	Эфиры	6,8 (4)	5,4 (3)	9,6 (3)	4,5 (1)
12	Альдегиды	5,0 (4)	10,5 (5)	8,4 (4)	8,4 (3)
13	Спирты	6,0 (4)	1,8 (2)	6,2 (3)	6,5 (2)
14	Серосодержащие соединения	1,6 (1)	–	–	7,7 (1)
15	Терпены	1,4 (1)	–	–	–
16	Фталаты	6,5 (2)	6,9 (2)	9,3 (2)	25,1 (2)
<b>Итого</b>		<b>100 (69)</b>	<b>100 (40)</b>	<b>100 (46)</b>	<b>100 (33)</b>

Примечание: «–» – компонент не установлен.

К кислородсодержащим веществам, идентифицированным в исследуемых водах, относятся карбоновые кислоты и их эфиры, альдегиды и спирты. Эти соединения, вероятнее всего, имеют биогенное происхождение. Они являются промежуточными или побочными продуктами процессов аэробного разложения ОВ и его остатков и широко представлены в биосфере [19, 20]. Кроме этого, эти компоненты (например, эфиры) являются наиболее распространенной формой миграции органических веществ в водах, так как обладают хорошей растворимостью в воде [4]. Вероятнее всего, эфиры, альдегиды и спирты имеют бактериальное происхождение (на это указывает преобладание низкомолекулярных предельных УВ и присутствие в этих водах различных групп микроорганизмов), включая преобразование органических остатков бактериального происхождения под действием углекислого газа. Кроме этого, в скважине № 47, наряду с хлоралканом, зафиксирован хлорсодержащий эфир (тридецилдихлорацетат), происхождение которого также может быть связано с техногенным загрязнением.

Большой интерес представляет наличие и заметное относительное содержание эфиров фталевой кислоты. Эти соединения обычно рассматриваются как типичные загрязнители природных сред в результате антропогенного воздействия, так как являются универсальными пластификаторами и широко используются в пластмассовых и рези-

новых изделиях. Их наличие также связано с инструментальным загрязнением, локализующимся в системе узла ввода образца в прибор [21]. В исследуемых водах они имеют, вероятно, техногенное происхождение, тем более что их максимальное содержание в единицах прибора зафиксировано в воде из Восточно-Уссурского участка, где такое загрязнение предполагается, исходя из вышеприведенных данных.

К ароматическим УВ относятся арены (соединения с одним бензольным кольцом), ПАУ и гетероароматические соединения (компоненты, содержащие кроме углерода и водорода атомы других элементов). К аренам и ПАУ относятся только 1,3,5-трибутилбензол и нафталин, соответственно. Наиболее представлен гомологический ряд гетероароматических УВ, среди которых идентифицированы 6 соединений, содержащих атомы кислорода, азота и серы.

Интересно рассмотреть молекулярно-массовое распределение предельных УВ или *n*-алканов. Их состав и геохимические индексы, рассчитанные по данным молекулярно-массового распределения, используются для определения генезиса ОВ в водном объекте [22, 23]. В исследуемых водах найдены УВ  $n-C_{10}-C_{35}$ , причем высокомолекулярные гомологи характерны только для Восточно-Уссурского участка. В других скважинах алканы выше  $n-C_{22}$  практически не установлены, а нечетные полностью отсутствуют. Доминирующий УВ – тридекан, характерный бактериальный *n*-алкан, а группа низкомолекулярных гомологов  $n-C_{10}-C_{14}$  занимает от 47 до 73 % от состава *n*-алканов. При этом зафиксировано преобладание нечетных УВ в этой области, что указывает на преимущественно бактериальное происхождение ОВ. В воде Восточно-Уссурского участка доля высокомолекулярных соединений достигает 55 % от состава *n*-алканов, при этом индексы нечетности близки к единице. Вероятно, эта особенность *n*-алканов здесь снова указывает на техногенное загрязнение, тем более что оно для этого участка предполагается исходя из других характеристик ОВ и микроорганизмов.

#### Заключение

В результате проведенного исследования произведена оценка индивидуального состава органических соединений в исследуемых водах курорта Шмаковка и выявлен генезис установленных соединений. Были получены следующие выводы:

1. Определен состав углеводов и их производных в исследуемых водах. Всего зафиксировано 106 органических соединений, среди которых преобладают алифатические углеводороды.
2. Оценено молекулярно-массовое распределение нормальных алканов, которое заключается в преобладании низкомолекулярных нечетных углеводов.
3. Идентифицированные компоненты по характеру их распределения и доминирующим соединениям имеют бактериальное происхождение.
4. Выявлены индикаторы техногенного загрязнения минеральных вод Восточно-Уссурского участка, к которым относятся хлор-углеводороды и фталаты.

*Автор признателен генеральному директору ООО «Скит» Сергею Витальевичу Русакову за содействие в отборе проб воды.*

#### Список литературы

1. Абрамов В.Ю., 2014. Формирование органического химического состава углекислых минеральных вод Эссентукского и Нагутского месторождений. *Разведка и охрана недр*, № 5, С. 47–51.
2. Плюсин А.М., Украинцев А.В., Чернявский М.К., 2018. Органическое вещество в углекислых минеральных водах Витимского плоскогорья и Восточного Саяна. *Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами*. Под ред. Л.В. Заманы, С.Л. Шварцева. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, С. 68–71. DOI: 10.31554/978-5-7925-0536-0-2018-68-71.

3. Украинцев А.В., Плюснин А.М., 2020. Алифатические углеводороды углекислых минеральных и азотных термальных вод Западного Забайкалья. *Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами*. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, С. 179–183. DOI: 10.31554/978-5-7925-0584-1-2020-179-183.
4. Украинцев А.В., Плюснин А.М., Чернявский М.К., 2024. Формирование газового, микроэлементного состава и растворенных органических веществ в железистых минеральных водах Западного Забайкалья. *Геохимия*, Т. 69, № 6, С. 562–576. DOI: 10.31857/S0016752524060069.
5. Швец В.М., Кирюхин В.К., 1974. Органические вещества в минеральных лечебных водах. *Бюл. МОИП. Отделение геологии*, № 6, С. 83–96.
6. Шпейзер Г.М., Васильева Ю.К., Гановичева Г.М., Минеева Л.М., Родионова В.А., Ломоносов И.С., Ванг Янсинь, 1999. Органические вещества в минеральных водах горноскладчатых областей центральной Азии. *Геохимия*, № 3, С. 302–311.
7. Абрамов В.Ю., Пятаев А.А., 2021. Возможность формирования углеводородных систем термометаморфического генезиса и роль гидротермальных сверхкритических флюидов. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*, Т. 16, № 1, С. 8. DOI: 10.17353/2070-5379/4\_2021.
8. Калитина Е.Г., Харитоновна Н.А., Челноков Г.А., Вах Е.А., 2015. Микробиологический состав углекислых минеральных вод Приморского края (распространение, численность бактерий, условия их обитания). *Вестник ДВО РАН*, № 5, С. 53–62.
9. Челноков Г.А., Харитоновна Н.А., Брагин И.В., 2013. Состав и генезис газов углекислых минеральных вод юга Дальнего Востока России. *Известия высших учебных заведений. Геология и Разведка*, № 5, С. 42–46.
10. Чудаева В.А., Чудаев О.В., Челноков А.Н., Эдмундс У.М., Шанд П., 1999. *Минеральные воды Приморья (химический аспект)*. Владивосток: Дальнаука, 163 с.
11. Kharitonova N.A., Chelnokov G.A., Chudaev O.V., Bragin I.V., 2015. Groundwater at Shmakovka Spa: Chemical Composition and Element Sources. *Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering*, Vol. 4, № 2, P. 126–130. DOI: 10.5963/JWRHE0402001.
12. Потурай В.А., 2016. Органическое вещество в холодных подземных водах районов азотных терм Приамурья. *Региональные проблемы*, Т. 19, № 4, С. 59–66.
13. Потурай В.А., 2022. Органическое вещество и молекулярно-массовое распределение углеводородов в Анненских термальных водах (Дальний Восток, Россия). *Геология и Геофизика*, Т. 63, № 10, С. 1352–1368. DOI: 10.15372/GiG2021150.
14. Потурай В.А., 2017. Состав и распределение n-алканов в азотных термах Дальнего Востока России. *Тихоокеанская геология*, Т. 36, № 4, С. 109–119.
15. Потурай В.А., 2010. Сравнение химического состава термальных, сточных и грунтовых вод Кульдурского района. *Региональные проблемы*, Т. 13, № 2, С. 92–96.
16. Потурай В.А., Строчинская С.С., Компаниченко В.Н., 2018. Комплексная биогеохимическая характеристика термальных вод Тумнинского месторождения. *Региональные проблемы*, Т. 21, № 1, С. 22–30.
17. Потурай В.А., 2024. Применение метода твердофазной экстракции при исследовании органического вещества в гидротермальных системах Дальнего Востока России. *Региональные проблемы*, Т. 27, № 4, С. 30–48. DOI: 10.31433/2618-9593-2024-27-4-30-48.
18. Украинцев А.В., Плюснин А.М., 2019. Применение метода твердофазной экстракции для анализа состава растворенных органических веществ в углекислых минеральных водах. *Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике*. Улан-Удэ: Геологический институт СО РАН, С. 90–92.
19. Randazzo A., Folino A., Tassi F., Tatano F., Rosa S., Gambioli A., 2022. Volatile organic compounds from green waste anaerobic degradation at lab-scale: evolution and

comparison with landfill gas. *Detritus*, Vol. 19, P. 63–74. DOI: 10.31025/2611-4135/2022.15188.

20. Hunt J.M., 1979. *Petroleum geochemistry and geology*. San Francisco: W.H. Freeman and Company, 617 p.

21. Потурай В.А., 2024. Проблемы инструментального анализа состава органических соединений в природных водах. *Региональные проблемы*. Т. 27, № 3, С. 74–76. DOI: 10.31433/2618-9593-2024-27-3-74-76.

22. Umoh U.U., Li L., He J., Chen L., Dong L., Jia G., Lahajnar N., Massoth G., Schwarz-Schampera U., 2021. Unusual aliphatic hydrocarbon profiles at hydrothermal vent fields of the Central and Southeast Indian Ridges and Mid-Indian Basin. *Deep-Sea Research Part II*, Vol. 194, # 104996. DOI: 10.1016/j.dsr2.2021.104996.

23. Wang B., Yang J., Jiang H., Zhang G., Dong H., 2019. Chemical composition of n-alkanes and microbially mediated n-alkane degradation potential differ in the sediments of Qinghai-Tibetan lakes with different salinity. *Chem. Geol.*, Vol. 524, P. 37–48. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2019.05.038.

### References

1. Abramov V.Yu., 2014. Formirovanie organicheskogo khimicheskogo sostava uglekislykh mineral'nykh vod Essentukского i Nagutского месторождений [Forming organic compound of the carbon dioxide mineral waters in the Essentuksky and Nagutsky deposits]. *Razvedka i okhrana neдр*, № 5, P. 47–51.

2. Plyusnin A.M., Ukraintsev A.V., Chernyavskii M.K., 2018. Organicheskoe veshchestvo v uglekislykh mineral'nykh vodakh Vitimского плоскогор'я i Vostochnого Sayana. *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeistviya vody s gornymi porodami* Organic matter in carbonaceous mineral waters of Vitim plateau and Eastern Sayan]. Pod red. L.V. Zamany, S.L. Shvartseva. Ulan-Ude: Izd-vo BNTs SO RAN, P. 68–71. DOI: 10.31554/978-5-7925-0536-0-2018-68-71.

3. Ukraintsev A.V., Plyusnin A.M., 2020. Alifatiche–skie uglevodorody uglekislykh mineral'nykh i azotnykh termal'nykh vod Zapadного Zabaikal'я [Aliphatic hydrocarbons of carbonaceous mineral and nitrogen thermal waters of Western Transbaikalia]. *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeistviya vody s gornymi porodami*. Ulan-Ude: Izd-vo BNTs SO RAN, P. 179–183. DOI: 10.31554/978-5-7925-0584-1-2020-179-183.

4. Ukraintsev A.V., Plyusnin A.M., Chernyavskii M.K., 2024. Formirovanie gazovogo, mikroelementnogo sostava i rastvorenykh organicheskikh veshchestv v zhelezistykh mineral'nykh vodakh Zapadного Zabaikal'я [Formation of gas, microelements, and dissolved organic matter compositions in the ferruginous mineral waters of Western Transbaikalia]. *Geokhimiya*, Vol. 69, № 6, P. 562–576. DOI: 10.31857/S0016752524060069.

5. Shvets V.M., Kiryukhin V.K., 1974. Organicheskie veshchestva v mineral'nykh lechebnykh vodakh. *Byul. MOIP. Otdelenie geologii*, № 6, P. 83–96.

6. Shpeizer G.M., Vasil'eva Yu.K., Ganovicheva G.M., Mineeva L.M., Rodionova V.A., Lomonosov I.S., Vang Yansin', 1999. Organicheskie veshchestva v mineral'nykh vodakh gornoskladchatykh oblastei tsentral'noi Azii [Organic matter in mineral therapeutic waters of orogenic regions of Central Asia]. *Geokhimiya*, № 3, P. 302–311.

7. Abramov V.Yu., Pyataev A.A., 2021. Vozmozhnost' formirovaniya uglevodorodnykh sistem termometamorficheskogo genezisa i rol' gidrotermal'nykh sverkhkriticheskikh flyuidov [The possibility of hydrocarbon systems by thermometamorphical genesis and the role of hydrothermal supercritical fluids]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, Vol. 16, № 1, P. 8. DOI: 10.17353/2070-5379/4\_2021.

8. Kalitina E.G., Kharitonova N.A., Chelnokov G.A., Vakh E.A., 2015. Mikrobiologicheskii sostav uglekislykh mineral'nykh vod Primorskogo kraя (rasprostranenie, chislenost' bakterii, usloviya ikh obitaniya) [Microbiological composition of carbonic mineral wa-

ters of Primorsky Krai (distribution, bacterial abundance, habitat conditions)]. Vestnik DVO RAN, № 5, P. 53–62.

9. Chelnokov G.A., Kharitonova N.A., Bragin I.V., 2013. Sostav i genezis gazov uglekislykh mineral'nykh vod yuga Dal'nego Vostoka Rossii [Composition and genesis of carbon dioxide mineral water gases in the south of the Russian Far East]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i Razvedka, № 5, P. 42–46.

10. Chudaeva V.A., Chudaev O.V., Chelnokov A.N., Edmunds U.M., Shand P., 1999. Mineral'nye vody Primor'ya (khimicheskii aspekt) [Mineral waters of Primorye (chemical aspect)]. Vladivostok: Dal'nauka, 163 p.

11. Kharitonova N.A., Chelnokov G.A., Chudaev O.V., Bragin I.V., 2015. Groundwater at Shmakovka Spa: Chemical Composition and Element Sources. Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering, Vol. 4, № 2, P. 126–130. DOI: 10.5963/JWRHE0402001.

12. Poturai V.A., 2016. Organicheskoe veshchestvo v kholodnykh podzemnykh vodakh raionov azotnykh term Priamur'ya [Organic matter in cold groundwater of the nitrogenous thermal areas of the Amur region]. Regional'nye problemy, Vol. 19, № 4, P. 59–66.

13. Poturai V.A., 2022. Organicheskoe veshchestvo i molekulyarno-massovoe raspredelenie uglevodorodov v Annenskikh termal'nykh vodakh (Dal'nii Vostok, Rossiya) [Organic matter and molecular-weight distribution of hydrocarbons in the Annenskoe thermal waters (Far East, Russia)]. Geologiya i Geofizika, Vol. 63, № 10, P. 1352–1368. DOI: 10.15372/GiG2021150.

14. Poturai V.A., 2017. Sostav i raspredelenie n-alkanov v azotnykh termakh Dal'nego Vostoka Rossii [Composition and distribution of n-alkanes in nitrogen thermal waters of the Russian Far East]. Tikhookeanskaya geologiya, Vol. 36, № 4, P. 109–119.

15. Poturai V.A., 2010. Sravnenie khimicheskogo sostava termal'nykh, stochnykh i gruntovykh vod Kul'durskogo raiona [Comparison of chemical composition of thermal, waste and ground waters of Kuldur district]. Regional'nye problemy, Vol. 13, № 2, P. 92–96.

16. Poturai V.A., Strochinskaya S.S., Kompanichenko V.N., 2018. Kompleksnaya biogeokhimicheskaya kharakteristika termal'nykh vod Tumninskogo mestorozhdeniya [Complex biogeochemical characteristics of the thermal waters on the Tumninskoye deposit]. Regional'nye problemy, Vol. 21, № 1, P. 22–30.

17. Poturai V.A., 2024. Primenenie metoda tverdogaznoi ekstraktsii pri issledovanii organicheskogo veshchestva v gidrotermal'nykh sistemakh Dal'nego Vostoka Rossii [Application of solid-phase extraction method in the study of organic matter in hydrothermal systems of the Russian Far East]. Regional'nye problemy, Vol. 27, № 4, P. 30–48. DOI: 10.31433/2618-9593-2024-27-4-30-48.

18. Ukraintsev A.V., Plyusnin A.M., 2019. Primenenie metoda tverdogaznoi ekstraktsii dlya analiza sostava rastvorenykh organicheskikh veshchestv v uglekislykh mineral'nykh vodakh. Baikal'skaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya po geologii i geofizike. [Application of solid-phase extraction method to analyse the composition of dissolved organic substances in carbonaceous mineral waters]. Ulan-Ude: Geologicheskii institut SO RAN, P. 90–92.

19. Randazzo A., Folino A., Tassi F., Tatano F., Rosa S., Gambioli A., 2022. Volatile organic compounds from green waste anaerobic degradation at lab-scale: evolution and comparison with landfill gas. *Detritus*, Vol. 19, P. 63–74. DOI: 10.31025/2611-4135/2022.15188.

20. Hunt J.M., 1979. *Petroleum geochemistry and geology*. San Francisco: W.H. Freeman and Company, 617 p.

21. Poturai V.A., 2024. Problemy instrumental'nogo analiza sostava organicheskikh soedinenii v prirodnykh vodakh [Problems of instrumental analysis of the composition of organic compounds in natural waters]. Regional'nye problemy. Vol. 27, № 3, P. 74–76. DOI: 10.31433/2618-9593-2024-27-3-74-76.

22. Umoh U.U., Li L., He J., Chen L., Dong L., Jia G., Lahajnar N., Massoth G., Schwarz-Schampera U., 2021. Unusual aliphatic hydrocarbon profiles at hydrothermal vent fields of the Central and Southeast Indian Ridges and Mid-Indian Basin. *Deep-Sea Research Part II*, Vol. 194, # 104996. DOI: 10.1016/j.dsr2.2021.104996.

23. Wang B., Yang J., Jiang H., Zhang G., Dong H., 2019. Chemical composition of n-alkanes and microbially mediated n-alkane degradation potential differ in the sediments of Qinghai-Tibetan lakes with different salinity. *Chem. Geol.*, Vol. 524, P. 37–48. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2019.05.038.

УДК 556.334:004.94

**Янников Алексей Михайлович**

кандидат геолого-минералогических наук,  
главный научный сотрудник,  
Институт «Якутнiproalmaz»,  
АК «АЛРОСА» ПАО,  
678174, Республика Саха (Якутия),  
г. Мирный, ул. Ленина, 39  
e-mail: [yannikov90@mail.ru](mailto:yannikov90@mail.ru)

**Янникова Светлана Александровна**

научный сотрудник,  
Институт «Якутнiproalmaz»,  
АК «АЛРОСА» ПАО;  
аспирант,  
Воронежский государственный университет  
e-mail: [yannikovasa@yandex.ru](mailto:yannikovasa@yandex.ru)

**Корепанов Алексей Юрьевич**

начальник комплексного отдела  
горно-геологических проблем  
разработки месторождений,  
Институт «Якутнiproalmaz»,  
АК «АЛРОСА» ПАО;  
аспирант,  
Воронежский государственный университет  
e-mail: [KorepanovAYu@alrosa.ru](mailto:KorepanovAYu@alrosa.ru)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА  
ВЕРХНЕКЕМБРИЙСКИХ  
ВОДОНОСНЫХ КОМПЛЕКСОВ  
В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБКИ  
«НЮРБИНСКАЯ» (ЗАПАДНАЯ ЯКУТИЯ)***Аннотация:*

*Отработка главного месторождения Накынского кимберлитового поля – трубки «Нюрбинская» – сопряжена со вскрытием коллекторов верхнекембрийских водоносных комплексов, являющихся источником поступления в карьер высокоминерализованных природных рассолов. Технические решения, реализованные в процессе добычи алмазов, оказывают влияние на гидродинамический режим водоносных комплексов: регионального подмерзлотного верхнекембрийского и спорадически распространенного межмерзлотного верхнекембрийского. Моделирование гидродинамического режима является важным методом, применяемым для обработки информации и выполнения прогноза и позволяющим разработать технические меры, способствующие эффективному осушению месторождения. При этом важно принимать во внимание динамику изменения уровня режима непосредственно в районе карьера, учитывая особенности местной геологии и криогидрогеологии. Прогноз изменения гидродинамического режима осуществлялся при помощи программы гидрогеологического моделирования (ПО Feflow). При построении гидродинамической модели была проведена детализация гидрогеологических характеристик межмерзлотного верхнекембрийского и подмерзлотного верхнекембрийского водоносных комплексов. В результате была получена новая информация по локальному изменению гидродинамического режима вскрываемых карьером водоносных комплексов. Представлены карты-схемы пьезометрических поверхностей, прослежено развитие депрессионной воронки.*

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.099

**Yannikov Alexey M.**

Candidate of Geological  
and Mineralogical Sciences,  
Chief Researcher,  
Yakutniproalmaz Institute, ALROSA PJSC,  
39 Lenin Str., 678174 Mirny,  
Republic of Sakha (Yakutia)  
e-mail: [yannikov90@mail.ru](mailto:yannikov90@mail.ru)

**Yannikova Svetlana A.**

Researcher,  
Yakutniproalmaz Institute,  
ALROSA PJSC;  
Postgraduate Student,  
Voronezh State University  
e-mail: [yannikovasa@yandex.ru](mailto:yannikovasa@yandex.ru)

**Korepanov Alexey Yu.**

Head of the Integrated Department of Mining and  
Geological Problems of Field Development,  
Yakutniproalmaz Institute,  
ALROSA PJSC;  
Postgraduate Student,  
Voronezh State University  
e-mail: [KorepanovAYu@alrosa.ru](mailto:KorepanovAYu@alrosa.ru)

**MODELING OF THE HYDRODYNAMIC  
REGIME OF THE UPPER CAMBRIAN  
AQUIFER COMPLEXES DURING  
THE OPERATION OF THE NYURBINSKAYA  
PIPE (WESTERN YAKUTIA)***Abstract:*

*Development of the main deposit of the Nakyn kimberlite field – the Nyurbinskaya pipe – is associated with the opening of Upper Cambrian aquifer reservoirs, which are the source of highly mineralized natural brines entering the quarry. Technical solutions implemented in the process of diamond mining affect the hydrodynamic regime of the aquifer complexes: the regional subpermafrost Upper Cambrian and the sporadically distributed interpermafrost Upper Cambrian. Modeling of the hydrodynamic regime is an important method used for processing information and making a forecast, allowing for the development of technical measures that facilitate the effective drainage of the deposit. It is important to take into account the dynamics of changes in the level regime directly in the quarry area, taking into account the features of local geology and cryohydrogeology. The forecast of changes in the hydrodynamic regime was carried out using the hydrogeological modeling program (Feflow software). When constructing the hydrodynamic model, the hydrogeological characteristics of the interpermafrost Upper Cambrian and subpermafrost Upper Cambrian aquifer complexes were detailed. As a result, we obtained new information on the local change in the hydrodynamic regime of the aquifer complexes opened by the quarry. The paper presents the maps-schemes of piezometric surfaces and traces the development of the depression funnel.*

*Ключевые слова:* Накынское кимберлитовое поле, трубка Нюрбинская, межмерзлотный водоносный комплекс, моделирование гидродинамического режима, водопонижение, природные рассолы.

*Key words:* Nakyn kimberlite field, Nyurbinskaya pipe, interpermafrost aquifer, modeling of the hydrodynamic regime, dewatering, natural brines.

### Введение

Среди всех кимберлитовых полей Якутской алмазоносной провинции Накынское поле сегодня вызывает наибольший поисковый интерес. Оно находится в пределах Среднемархинского алмазоносного района, на междуречье рек Накын и Ханья. Кимберлитовые тела Накынского поля имеют небольшие размеры, характеризуются слабой намагниченностью и перекрыты терригенными мезозойскими осадками мощностью от 50 до 80 м [1, 2].

В процесс отработки месторождений Накынского кимберлитового поля будут вовлечены кимберлиты трубок «Ботубинская», «Нюрбинская» и тела «Майское». Главным месторождением в настоящее время является трубка «Нюрбинская» (рис. 1). Период эксплуатации трубки по текущему проекту длится до 2040 г., глубина карьера на конец отработки месторождения составит 570 м (+250 м а.о.).



Рис. 1. Плановое расположение объектов исследования

Согласно утвержденным проектам, добыча на этих месторождениях будет осуществляться открытым способом. В процессе будут вскрыты коллекторы двух водоносных комплексов: регионального подмерзлотного верхнекембрийского и спорадически распространенного межмерзлотного верхнекембрийского. В настоящее время оба комплекса вскрыты карьером трубки «Нюрбинская». Осушение, проводимое на территории месторождения, приводит к изменениям в гидродинамическом режиме рассматриваемых комплексов. Это требует тщательного изучения и прогнозирования для эффективного управления над формирующимися дренажными водами.

Цель работы заключалась в моделировании изменения гидродинамического режима верхнекембрийских водоносных горизонтов в период эксплуатации трубки «Нюрбинская», что необходимо для определения объемных показателей процесса закачки дренажных рассолов, которые в настоящее время закачиваются во второй ярус криогенной толщи на территории Ботуобинского участка.

Задачи исследования:

1. Детализация гидрогеологических характеристик вскрываемых водоносных комплексов.
2. Моделирование изменения уровней водоносных комплексов в процессе эксплуатации месторождения.
3. Определение модельных водопритоков в карьер.
4. Установление соответствия полученных на модели значений и фактических.
5. Определение размеров и границ распространения депрессионных воронок, приуроченных к ПВВК и МВВК.

Для успешного выполнения этих задач важно обеспечить точность и полноту исходных данных, а также использовать современные методы и технологии моделирования и анализа.

#### *Краткая характеристика объекта исследований*

Кимберлитовая трубка «Нюрбинская» отрабатывается открытым способом с 2002 г. В настоящее время глубина карьера превысила 400 м (абсолютная отметка дна карьера -190 м). Производительность карьера составляла порядка 1 – 1,5 млн т в год [2, 3]. Размеры карьера: по поверхности 1200×1000 м; по дну 80×200 м.

Структурно-тектонические условия карьерного поля определяют Ботуобинский, Диагональный и Широтный разломы. Остальные фиксируемые тектонические нарушения по своей сути являются опережающими для обозначенных региональных структур (рис. 2). Зафиксированные группы разрывных нарушений хорошо коррелируются с наблюдаемыми притоками и характеризуются зонами динамического воздействия, контролируемые открытой трещиноватостью в областях развития опережающих подчиненных разломов, и, как следствие, обладающими большими фильтрационными параметрами. Наибольшее влияние на гидрогеологические условия месторождения оказывает Ботуобинский разлом, динамическая зона которого хорошо коррелирует с плановым распространением межмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса [4].

В процессе отработки карьера произошло полное вскрытие межмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса (МВВК) и частичное – верхнекембрийского подмерзлотного водоносного комплекса (ПВВК). Схема расположения водоносных комплексов в разрезе с основными гидродинамическими и гидрохимическими характеристиками представлена на рис. 3.

Межмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс был вскрыт открытыми горными работами на карьере «Нюрбинский» в пределах эксплуатационного горизонта (+55,0...+47,5 м) на абсолютной отметке +47,5 м в 2010 г.

Подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс был вскрыт открытыми горными работами на карьере «Нюрбинский» в 2020 г.

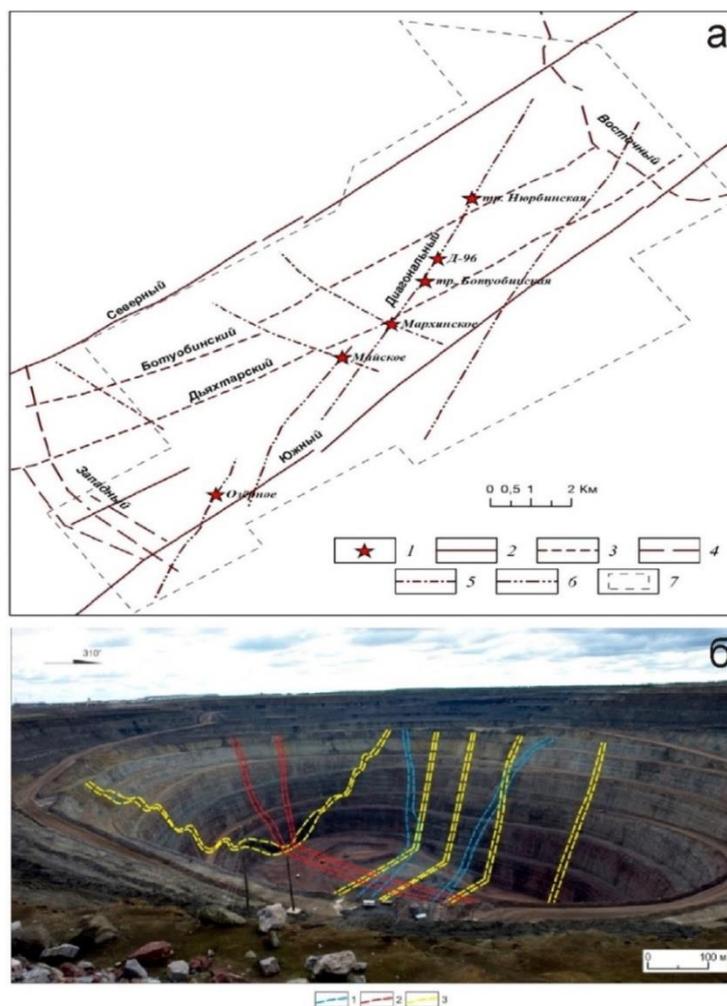


Рис. 2. а) Структурный план центральной части Накынского кимберлитового поля:

- 1 – известные кимберлитовые тела;
- 2–7 – осевые зоны разрывных нарушений, выделенные по данным магниторазведки, сейсморазведки и картирования микротектонических нарушений: Вилуйско-Мархинской зоны низкого порядка;
- 3 – Вилуйско-Мархинской зоны высокого порядка;
- 4 – Средне-Мархинской зоны низкого порядка;
- 5 – Средне-Мархинской зоны высокого порядка (поперечные);
- 6 – кимберлитконтролирующий Диагональный; 7 – граница исследуемой площади;

б) Карьер тр. «Нюрбинская»:

- 1 – Ботуобинский разлом; 2 – Диагональный разлом; 3 – Широтный разлом

В настоящее время выполняется разнос бортов карьера до итогового контура, чтобы достичь проектной глубины. В результате увеличивается площадь вскрытия водоносных горизонтов и усиливается приток.

Разгрузка упомянутых водоносных комплексов происходит в выработанное пространство карьера. Расходы МВВК составляют 35 – 39 м<sup>3</sup>/сут, ПВВК 94 – 100 м<sup>3</sup>/сут. Прямой гидравлической связи у комплексов нет, спорадически они могут сообщаться через гидродинамические окна – региональные разрывные нарушения.

Объектом изучения выступали коллекторы чаргольской свиты верхнего кембрия, отнесенные к межмерзлотному и подмерзлотному водоносным комплексам [5, 6, 7]. Между комплексами находится толща ММП мощностью не менее 50 м, которая является водупором для МВВК. Уровни рассматриваемых комплексов отличаются на 18 м. У МВВК уровень +80, у ПВВК +98 (см. рис. 3). Минерализация ПВВК составляет 380 г/л, у МВВК – 150-200 г/л, химический состав вод наследуется.

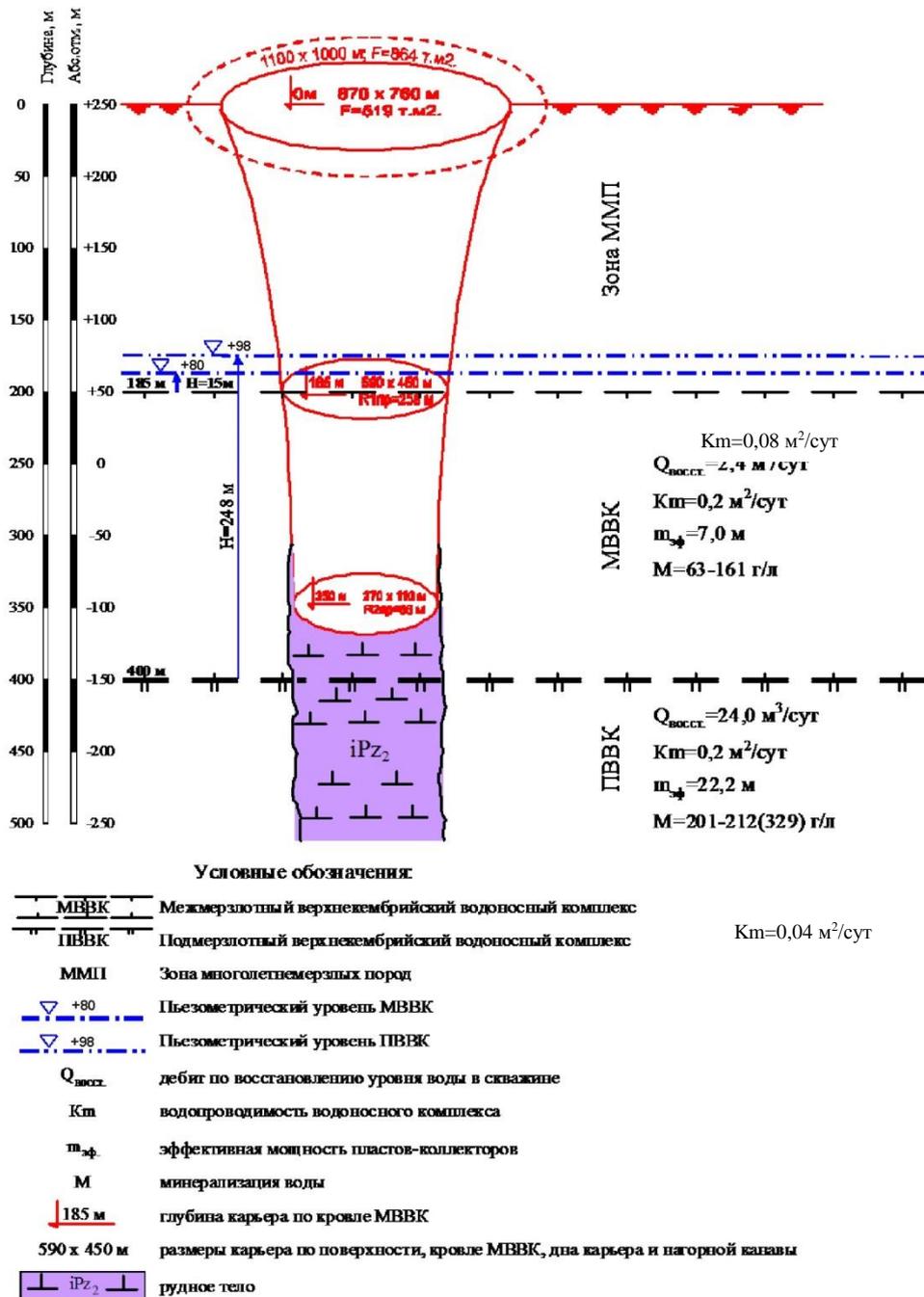


Рис. 3. Схематический разрез трубки «Нюрбинская» с основными гидрогеологическими и гидрохимическими параметрами вскрываемых водоносных комплексов

*Межмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс (МВВК)* характеризуется спорадическим распространением. Так, например, в районе трубки «Ботубинская» и на площади, расположенной южнее Ботубинского разлома до глубин 300 м, комплекс не отмечен. На участках бурения контрольно-стволовых скважин КСС-1 и КСС-2 межмерзлотные воды не встречены, что подтверждается бурением скважин с очисткой забоя сжатым воздухом до глубины 368 м. В районе месторождения трубки «Нюрбинская» кровля МВВК отмечается на глубинах 167,2 – 190,5 м (в абс. отм. +91,1/+58,2). Кровлей водоносного комплекса являются глинистые многолетнемерзлые отложения балыктахской и чаргольской свит нижнего ордовика и верхнего кембрия. Подошвой служит кровля ММП. Абсолютные отметки кровли +91,1/+58,2.

Эффективная мощность – суммарная мощность коллекторов, определенная по керну скважин, в среднем составляет 7,0 м.

Интервалы вскрытия МВВК в пределах карьерного поля трубки Нюрбинская представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Интервалы вскрытия МВВК в пределах месторождения**

№ скважины	Интервал водоносного комплекса, от-до Абс. отм.	Мощность комплекса, м	Эффект. мощность, м
5ГВ	<u>167,2-412,6</u> +91,1/-154,3/	245,4	12,7
9ГВ	<u>166,7-382</u> +91,3/-124/	215,3	10,7
10ГВ	<u>224,4-461</u> +30,6/-206/	236,6	14,6
11ГВ	<u>180-398</u> +75/-143/	218	1,1
13ГВ	<u>208-400</u> +50,3/-141,7/	192	1,2
15ГВ	<u>208-400</u> +50,3/-141,7/	192	
6ГР	<u>190,5</u> +58,2		
Среднее			7,0

Коллекторами МВВК являются верхнекембрийские трещиноватые известняки, алевролиты и песчанистые доломиты. Общая пористость варьируется в интервале от 5,7 до 35 %, в среднем составляет 20 %; эффективная пористость колеблется от 5,8 до 47,9 %, открытая пористость – в интервале от 4,3 до 28,4 %.

Воды напорные, величина напора составляет 15 – 20 м. Установившийся уровень на глубинах 179,5 – 185,7 м (в абс. отм. +57,7/+70,8 м). По химическому составу воды хлоридные магниево-кальциевые, по минерализации (до 162 г/л) – рассолы, обладающие слабой щелочной реакцией и агрессивностью по отношению к металлам и бетону.

Водоносный комплекс характеризуется весьма низкими фильтрационными свойствами. Водопроницаемость 0,001 – 0,20 м<sup>2</sup>/сут. Дебиты по восстановлению уровня воды в скважинах составляют 0,1 – 2,4 м<sup>3</sup>/сут. Коэффициент пьезопроводности ~10<sup>3</sup>.

*Подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс (ПВВК)* имеет повсеместное распространение, вскрывался глубокими гидрогеологическими скважинами на глубинах 422,4 – 433,0 м (в абс. отм. -164,1÷ -198,6 м). В 2020 г. ПВВК вскрыт карьером. Литологический состав вмещающих пород представлен переслаиванием мергелей, известняков и доломитов чаргольской и джуктинской свит верхнего кембрия. В разрезе выделяются пласты-коллекторы мощностью от 0,2 до 10,6 м, эффективная суммарная мощность которых в среднем достигает 22,2 м. Интервалы вскрытия ПВВК в пределах карьерного поля трубки Нюрбинская представлены в табл. 2.

Таблица 2

## Интервалы вскрытия ПВВК в пределах месторождения

№ скважины	Интервал водоносного комплекса, от-до Абс. отм.	Мощность комплекса, м	Эффект. мощность, м
5ГВ	<u>422,4-997,8</u> -164,1/-739,5	575,4	27,3
11ГВ	<u>398-802</u> -143/-547	404	32,1
15ГВ	<u>394,3-750</u> -136/-431,7	355,7	38,7
КСС-1	<u>368,5-1100</u> -112,8/-844,3	731,5	7,4
КСС-2	<u>361,7/-774</u> -107,6/-519,9	412,3	5,5
Среднее			22,2

Коллекторы ПВВК представлены пористо-кавернозными известняками, оолитовыми доломитами.

В силу высокой глинистости разреза водоносный комплекс характеризуется низкими фильтрационными свойствами. Водопроницаемость от 0,001 до 0,31 м<sup>2</sup>/сут, дебиты по восстановлению – 0,2 – 15,9 м<sup>3</sup>/сут. Воды напорные, величина напора достигает 250 м. В тектонических зонах подмерзлотный водоносный комплекс обладает повышенными фильтрационными свойствами. На трубке «Нюрбинская» в зоне Ботуобинского разлома по скважине 10ГВ вскрыта обводненная зона долеритов, коррелируемая с подмерзлотным водоносным комплексом. Дебит скважины по восстановлению уровня составил 13,2 м<sup>3</sup>/сут. Водопроницаемость пород комплекса – до 1,52 м<sup>2</sup>/сут.

*Методика исследований*

Основным методом прогнозирования, позволяющим обеспечить учет описанных гидрогеологических и горно-геологических условий объекта исследований, выступало гидрогеологическое моделирование. При построении гидродинамической модели была проведена детализация гидрогеологических характеристик вскрываемых водоносных комплексов. Исходные параметры приняты по материалам ранее выполненных опытно-промышленных и научно-исследовательских работ за весь период отработки месторождения в интервале водоносных комплексов и корректировались на этапе калибровки модели.

Моделирование гидрогеологических условий месторождений Накынского кимберлитового поля проведено с использованием лицензионной программы FEFLOW, реализующей пространственную фильтрацию подземных вод методом конечных элементов в многослойной толще для областей произвольной конфигурации с изменяющимися по известному закону ГУ I, II и III рода при наличии фильтрационных неоднородностей в плане и разрезе, вертикального переноса [8, 9].

Программа позволяет определять уровни и понижения уровней подземных вод в каждой области фильтрации для каждого слоя, расходы подземных вод в граничных точках изучаемой области, составляющие баланса подземных вод (фильтрация, разгрузка и питание потока подземных вод, перетоки между слоями); автоматически управлять работой граничных условий.

Площадь района исследований составила порядка 400 км<sup>2</sup> и определена радиусом влияния системы дренажа карьеров Ботуобинский, Нюрбинский, а также закачкой на участке «Ботуобинский». Анализируя гидрогеологические условия территории, было выделено два слоя моделирования – два водоносных комплекса, отличных по гидродинамическим параметрам:

- межмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс (МВВК);
- подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс (ПВВК).

Решение фильтрационных задач на модели осуществлялось в нестационарном режиме. Более подробно методика моделирования приведена в опубликованных ранее работах [10, 11].

### Результаты и их обсуждение

В пределах межмерзлотного водоносного комплекса задавались следующие граничные условия:

1. Условие питания межмерзлотного водоносного комплекса как параметр перетекания из техногенного водоносного горизонта на участке закачки ММП «Ботуобинский» через «гидродинамическое окно» учитывалось на модели заданием ГУ III рода в центральной части участка с поддержанием уровня подземных вод на абсолютной отметке  $H=+100$  м.

Внешние границы модели заданы непроницаемыми в силу спорадичности МВВК, в западной части задана питающая граница I рода, представленная Ботуобинским региональным разломом.

2. Условия разгрузки подземного потока карьером «Нюрбинский», находящимся в режиме реконструкции, учитывались на модели заданием ГУ I рода с понижением уровня подземных вод по снижению фактических отметок ведения горных работ.

Решение обратной задачи проводилось методом итераций с использованием данных режимных наблюдений, а также на основе фактических откачек и работы карьерного водоотлива.

По результатам опытно-фильтрационных работ межмерзлотный водоносный комплекс характеризуется весьма низкими фильтрационными параметрами (рис. 4). Коэффициент водопроводимости в среднем составляет  $0,03 \text{ м}^2/\text{сут}$ . Дебиты по восстановлению  $0,12 - 0,96 \text{ м}^3/\text{сут}$ . В пределах карьерного поля трубки «Нюрбинская» значение водопроводимости до  $0,01 \text{ м}^2/\text{сут}$ . Наиболее водообильная зона выделена в юго-западной части месторождения, в зоне Ботуобинского разлома (скв. 10ГВ) водопроводимость до  $0,98 \text{ м}^2/\text{сут}$ . В рудном теле водопроводимость в пределах от  $0,001$  до  $0,07 \text{ м}^2/\text{сут}$ .

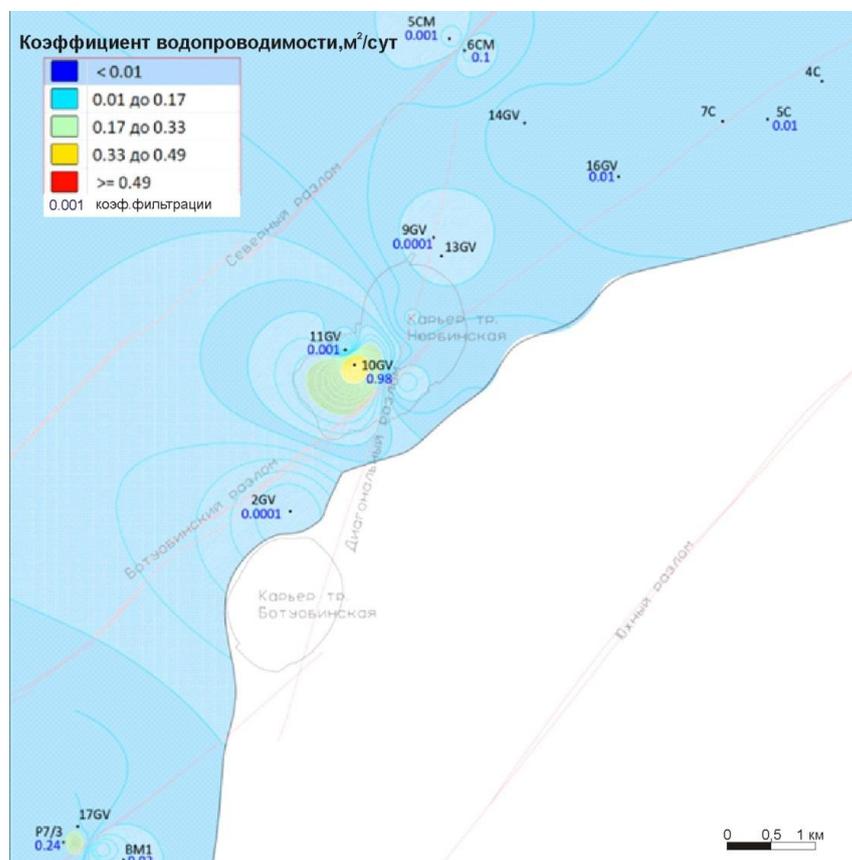


Рис. 4. Схема водопроводимости МВВК

Калибровка гидрогеологической модели на первом этапе проводилась для стационарных условий с целью определения положения уровня подземных вод до начала осушения. На втором этапе решение обратной задачи проводилось в нестационарном режиме с определением погрешности модельных значений на сентябрь 2024 г. (табл. 3). Фактические водопритоки оказались в среднем на 1,5 % выше модельных.

Таблица 3

**Соответствие между фактическими и модельным водопритоками  
на расчетный период**

Год	Месяц	Водоприток м <sup>3</sup> /сут (модельный)			Водоприток м <sup>3</sup> /сут (фактический)		
		МВВК	ПВВК	Всего	МВВК	ПВВК	Всего
2023	декабрь	39	100,4	<b>139,4</b>	58,5	150,6	<b>209,1</b>
2024	январь	38,6	99,9	<b>138,5</b>	57,9	149,8	<b>207,7</b>
	февраль	37,9	99,4	<b>137,3</b>	56,85	149,1	<b>205,9</b>
	март	37,8	98,9	<b>136,7</b>	56,7	148,3	<b>205,0</b>
	апрель	37,4	98,4	<b>135,8</b>	56,1	147,6	<b>203,7</b>
	май	37	97,9	<b>134,9</b>	55,5	146,8	<b>202,35</b>
	июнь	36,8	97,4	<b>134,2</b>	55,2	146,1	<b>201,3</b>
	июль	36,2	96,9	<b>133,1</b>	54,3	145,3	<b>199,65</b>
	август	35,8	96,4	<b>132,2</b>	53,7	144,6	<b>198,3</b>
	сентябрь	35,4	95,9	<b>131,3</b>	53,1	143,8	<b>196,95</b>
	октябрь	35	95,4	<b>130,4</b>	52,5	143,1	<b>195,6</b>
	ноябрь	35,2	94,9	<b>130,1</b>	52,8	142,3	<b>195,15</b>
декабрь	35,2	94,4	<b>129,6</b>	52,8	141,6	<b>194,4</b>	

Соответствие получаемого на модели распределения уровня подземных вод натурному положению контролировалось по опорным точкам, в качестве которых принимались скважины режимной сети, а также фактические водопритоки в карьер. Полученные фильтрационно-емкостные параметры межмерзлотного водоносного комплекса в результате обратной задачи приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Фильтрационно-емкостные параметры МВВК, принятые на модели**

Характеризуемый элемент гидродинамической системы	Коэффициент фильтрации, м/сут	Упругая емкость, 1/м
Зона Северного разлома	0,00001	$1 \times 10^{-4}$
Месторождение тр. «Нюрбинская»	0,0002	$1 \times 10^{-9} - 1 \times 10^{-6}$
Зона Ботубинского разлома	0,0005	$1 \times 10^{-6}$
Участок закачки «Ботубинский»	0.00006-0,5	$1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-5}$
Месторождение тр. «Майское»	0,0002-0,0006	$1 \times 10^{-6}$

В результате моделирования достигнутое соответствие между фактическими и модельными данными уровней подземных вод по скважинам режимной сети и водопритоками в карьер представлены в табл. 5.

Таблица 5

**Сходимость распределения уровней подземных вод (МВВК), полученных на модели с фактическими значениями**

№ скважины	Уровень подземных вод, м абс.		Отклонение	
	Фактический	Модельный	Абсолютное, м	Относительное, %
4с	83,8	83,9	0,1	0,1
5с	98,7	99,9	1,2	0,3
7с	30,2	61,0	30,8	7,6
14ГВ	-	59,9	-	
16ГВ	59,4	59,8	0,4	0,1
17ГВ	21,3	60,0	38,7	9,8
ИГС-1М	-	60,0	-	
<b>Среднее</b>				<b>3,6</b>

Результаты калибровки модели фильтрации подземных вод показывают допустимую сходимость фактического положения уровней подземных вод водоносных комплексов с модельными значениями. Относительное отклонение не превышает 5 %. Модельное распределение уровней подземных вод межмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса на конец 2024 г. представлено на рис. 5. Радиусы формируемых депрессионных воронок в интервале подмерзлотного водоносного комплекса составят от 1 до 2,5 км.

В пределах подмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса задавались следующие граничные условия:

1. Условие питания подземного потока на внешних границах модели задано ГУ I рода согласно фактору удаленности от карьера. Используются значения до начала осушения месторождения.

2. Условия разгрузки подземного потока карьером «Нюрбинский» учитывались на модели заданием ГУ I рода с понижением уровня подземных вод по снижению фактических отметок ведения горных работ.

Результаты опытных работ свидетельствуют о невысоких фильтрационных параметрах подмерзлотного водоносного комплекса (рис. 6).

В большинстве случаев значения коэффициента водопроводимости в пределах 0,0004 – 0,4 м<sup>2</sup>/сут, только в отдельных скважинах (10ГВ, 7СМ), пройденных в зонах тектонических нарушений, они значительно выше за счет наличия зон повышенной трещиноватости, значение водопроводимости до 1,52 – 1,46 м<sup>2</sup>/сут.

В пределах карьерного поля трубки «Нюрбинская» водопроводимость до 0,05 м<sup>2</sup>/сут, наиболее водопроницаемая зона выделена в западной части (зона Ботубинского разлома, скв. 10ГВ). Рудное тело (скв. 6ГР) характеризуется весьма низкой водопроводимостью от 0,0004 до 0,003 м<sup>2</sup>/сут (табл. 6).

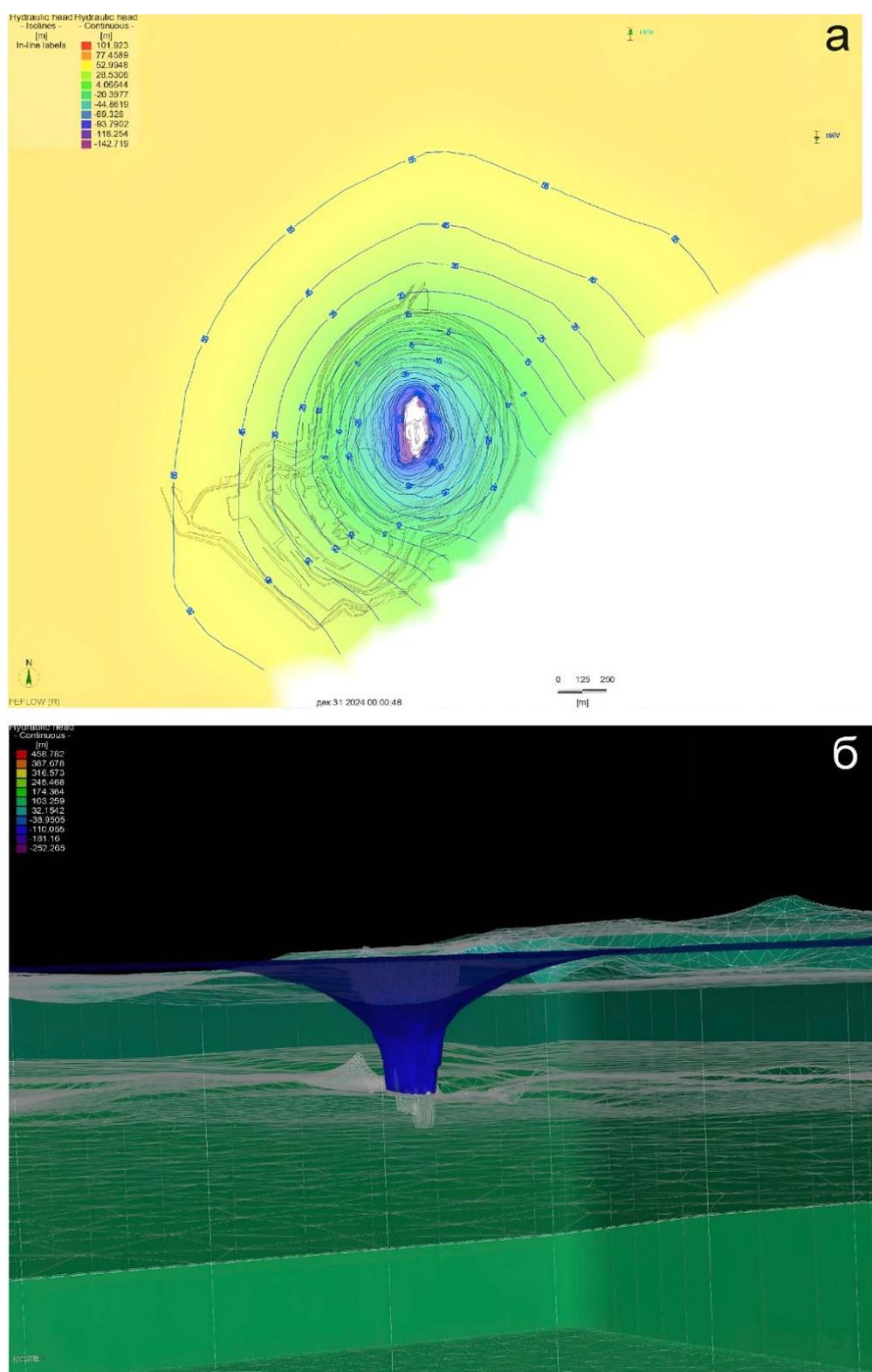


Рис. 5. Схематическое модельное распределение уровня подземных вод МВБК:  
а) пьезометрическая поверхность уровней в плане; б) пьезометрическая поверхность в 3D виде

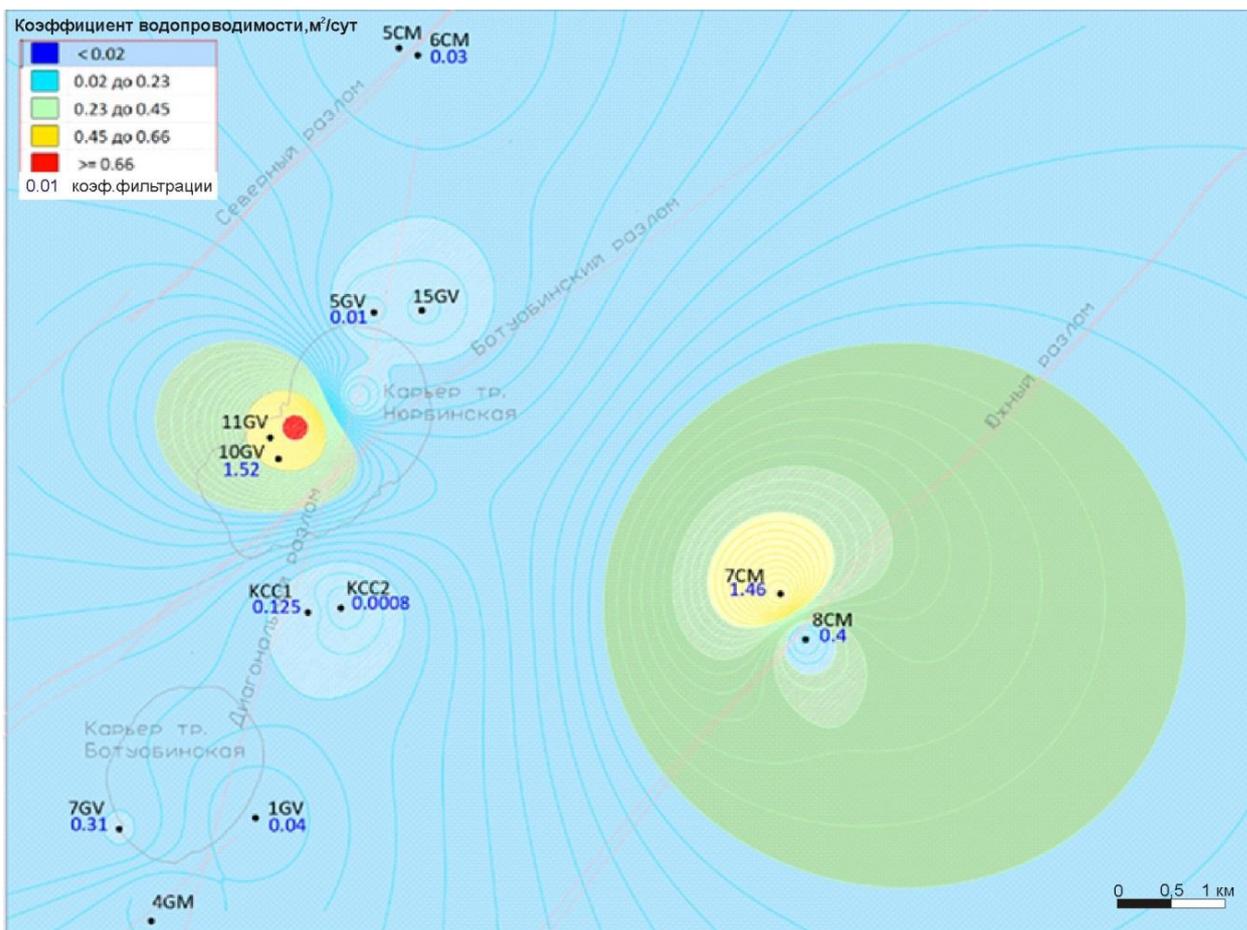


Рис. 6. Схема водопроницаемости ПВБК

Таблица 6

**Фильтрационно-емкостные параметры ПВБК, принятые на модели**

Характеризуемый элемент гидродинамической системы	Коэффициент фильтрации, м/сут	Упругая емкость, 1/м
Месторождение тр. Нюрбинская	0,00001-0,0006	$1 \times 10^{-7}$ - $10^{-9}$
Межтрубье (скв. КСС1/КСС2)	0,00001	$1-5 \times 10^{-6}$
Месторождение тр. Ботубинская	0,00001-0,0004	$1 \times 10^{-6}$
Зона Ботубинского разлома	0,00075	$1 \times 10^{-7}$
Зона Северного разлома	0,0002	$1 \times 10^{-7}$
Зона Южного разлома	0,00026-0,0009	$1 \times 10^{-7}$

Соответствие, получаемое на модели распределения уровня подземных вод, натурному положению контролировалось по опорным точкам, в качестве которых принимались скважины режимной сети. Достигнутое соответствие модельных и фактических уровней подземных вод ПВБК приводится в табл. 7.

Таблица 7

**Сходимость распределения уровней подземных вод, полученных на модели с фактическими значениями**

№ скважины	Уровень подземных вод, м абс.		Отклонение	
	Фактический	Модельный	Абсолютное, м	Относительное, %
15ГВ	-15,8	-19,51	3,7	0,4
4ГМ	73,0	74,7	11,7	1,4
КСС-1	81,8	90,7	8,9	1,0
КСС-2	45,0	41,6	3,4	0,4
7СМ	110,0	86,6	23,4	2,7
8СМ	92,2	87,8	4,43	0,5
18ГВ	-42,2	57,2	99,4	11,6
<b>Среднее</b>				<b>2,6</b>

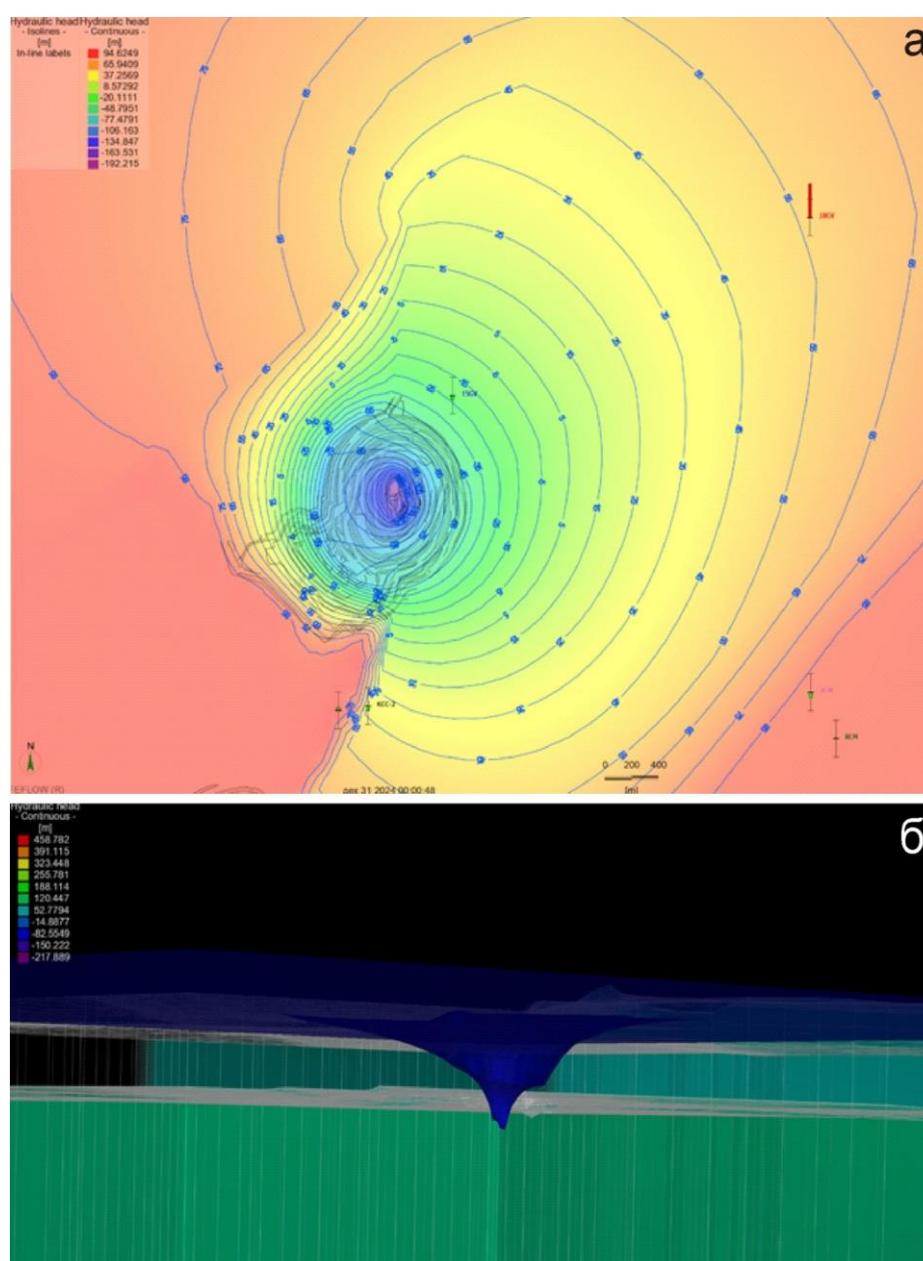


Рис. 7. Схематическое модельное распределение уровня подземных вод ПВВК: а) пьезометрическая поверхность в плане; б) пьезометрическая поверхность в 3D виде

Сходимость фактического положения уровней водоносного комплекса по опорным точкам режимной сети с модельными не превышает допустимое отклонение. Относительное отклонение не превышает 5 %. Модельное распределение уровней подземных вод подмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса на конец 2024 г. представлено на рис. 7. Радиусы формируемых депрессионных воронок в интервале подмерзлотного водоносного комплекса составят от 1 до 5 км.

### Выводы

В рамках прогнозируемого периода жизненного цикла обрабатываемых месторождений пьезометрическая поверхность межмерзлотного и подмерзлотного водоносных комплексов претерпит существенные изменения: вокруг карьера трубки «Нюрбинская» сформируются две депрессионные воронки, приуроченные к водоносным комплексам (ПВВК и МВВК) разной площади ввиду неограниченного распространения подмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса и спорадического распространения межмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса.

Из контекста можно сделать вывод, что гидродинамическая модель подземных вод успешно прошла калибровку. Это означает, что модель была настроена таким образом, чтобы ее результаты (положение уровней подземных вод и водопритоки) соответствовали фактическим данным. Допустимая сходимость между фактическими и модельными значениями подтверждает успешность калибровки.

Низкие параметры водопроницаемости комплексов обуславливают незначительные радиусы формируемых депрессионных воронок: в интервале подмерзлотного водоносного комплекса они составят от 1 до 5 км; в интервале межмерзлотного водоносного комплекса – от 1 до 2,5 км.

Форма депрессионной воронки контролируется региональными разрывными нарушениями: наибольший северо-восточный радиус формируется по осевой части регионального кимберлитконтролирующего разлома, относящегося к Вилуйско-Мархинской системе.

Полученные данные будут использоваться для своевременного анализа гидрогеологической ситуации и корректировки работы системы осушения месторождения.

### Список литературы

1. Коробков И.Г., Евстратов А.А., Коробкова А.И., 2010. Структурно-тектоническое строение Накынского кимберлитового поля (Западная Якутия). *Вестник Санкт-Петербургского университета*, Сер. 7, Вып. 4, С. 47–57.
2. Колганов В.Ф., Акишев А.Н., Дроздов А.В., 2013. *Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии*. Мирный, Мирнинская типография, 568 с.
3. Климовский И.В., Готовцев С.П., 1994. *Криолитозона Якутской алмазоносной провинции*. Новосибирск: Наука, 167 с.
4. Янников А.М., 2023. Влияние структурно-тектонического фактора на формирование криогидрогеологических условий Накынского кимберлитового поля. *Материалы VI Международной научной конференции, посвященной 50-летию Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН: геодинамика и минералогия северной Евразии*. Улан-Удэ, С. 609-612.
5. *Гидрогеология СССР. Том XX. Якутская АССР*, 1970. Москва: Недра, 384 с.
6. Алексеев С.В., 2009. *Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции*. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 319 с.
7. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В., 2008. *Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии*. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 507 с.
8. Chen M., Izady A., Abdalla O.A., 2017. An efficient surrogate-based simulation-optimization method for calibrating a regional MODFLOW model. *Journal of Hydrology*,

vol. 544, pp. 591–603. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.011>

9. Kelson V., 2012. Predicting collector well yields with MODFLOW. *Ground Water*, vol. 50, iss. 6, pp. 918–926. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00910.x>.

10. Янников А.М., Стручкова А.С., 2023. Особенности гидрогеологического моделирования цифровых двойников эксплуатируемых коренных месторождений алмазов и сопряженных участков закачки. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, № 6, С. 71-78. DOI 10.31857/S0869780923060097.

11. Янников А.М., Ильков А.Т., 2021. Формирование рассолопоглощающих коллекторов в толще ММП на примере участка "Ботубинский" (Республика Саха (Якутия)). *Геология и недропользование*, № 4, С. 64-73.

## References

1. Korobkov I.G., Evstratov A.A., Korobkova A.I., 2010. Strukturno-tektonicheskoe stroenie Nakynskogo kimberlitovogo polya (Zapadnaya Yakutiya) [Structural and tectonic structure of the Nakyn kimberlite field (Western Yakutya)]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta*, Ser. 7, Vyp. 4, P. 47–57.

2. Kolganov V.F., Akishev A.N., Drozdov A.V., 2013. Gorno-geologicheskie osobennosti korennykh mestorozhdenii almazov Yakutii. Mirnyi [Mining and geological features of indigenous diamond deposits in Yakutia], *Mirninskaya tipografiya*, 568 p.

3. Klimovskii I.V., Gotovtsev S.P., 1994. Kriolitozona Yakutskoi almazonosnoi provintsii [Cryolithozone of the Yakut diamond-bearing province]. Novosibirsk: Nauka, 167 p.

4. Yannikov A.M., 2023. Vliyanie strukturno-tektonicheskogo faktora na formirovanie kriogidrogeologicheskikh uslovii Nakynskogo kimberlitovogo polya [The influence of structural-tectonic factors on the formation of cryohydrogeological conditions of the Nakyn kimberlite field]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 50-letiyu Geologicheskogo instituta im. N.L. Dobretsova SO RAN: geodinamika i minerageniya severnoi Evrazii*. Ulan-Ude, P. 609-612.

5. *Gidrogeologiya SSSR. Tom XX. Yakutskaya ASSR* [Hydrogeology of the USSR. V.XX. Yakut ASSR], 1970. Moscow: Nedra, 384 p.

6. Alekseev S.V., 2009. Kriogidrogeologicheskie sistemy Yakutskoi almazonosnoi provintsii [Cryohydrogeological systems of the Yakut diamond-bearing province]. Novosibirsk: Akademicheskoe izd-vo "Geo", 319 p.

7. Drozdov A.V., Iost N.A., Lobanov V.V., 2008. Kriogidrogeologiya almaznykh mestorozhdenii Zapadnoi Yakutii [Cryohydrogeology of diamond deposits of Western Yakutia]. Irkutsk: Izd-vo IGTU, 507 p.

8. Chen M., Izady A., Abdalla O.A., 2017. An efficient surrogate-based simulation-optimization method for calibrating a regional MODFLOW model. *Journal of Hydrology*, vol. 544, pp. 591–603. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.011>

9. Kelson V., 2012. Predicting collector well yields with MODFLOW. *Ground Water*, vol. 50, iss. 6, pp. 918–926. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00910.x>.

10. Yannikov A.M., Struchkova A.S., 2023. Osobennosti gidrogeologicheskogo modelirovaniya tsifrovyykh dvoynikov ekspluatiruemykh korennykh mestorozhdenii almazov i sopryazhennykh uchastkov zakachki [Features of hydrogeological modeling of digital twins of exploited primary diamond deposits and associated injection sites]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, № 6, P. 71-78. DOI 10.31857/S0869780923060097.

11. Yannikov A.M., Il'kov A.T., 2021. Formirovanie rassolopogloshchayushchikh kollektorov v tolshche MMP na primere uchastka "Botubinskii" (Respublika Sakha (Yakutiya)) [Formation of brine-absorbing collectors in the thickness of MMPs, on the example of the Botubinsky site (Republic of Sakha (Yakutia))]. *Geologiya i nedropol'zovanie*, № 4, P. 64-73.



## **ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

УДК 669.2/8

**Горячев Андрей Александрович**

кандидат технических наук,  
младший научный сотрудник,  
лаборатория природоподобных технологий и  
техносферной безопасности Арктики,  
Центр наноматериаловедения КНЦ РАН,  
184209, г. Апатиты, мкр. Академгородок, 4А  
e-mail: [a.goryachev@ksc.ru](mailto:a.goryachev@ksc.ru)

**ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ  
ИЗ АЛЛЮВИАЛЬНЫХ  
ТЕХНОГЕННЫХ ПЕСКОВ МЕТОДОМ  
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО  
ОБЖИГА С СУЛЬФАТОМ АММОНИЯ\****Аннотация:*

Проведены исследования по обжигу медно-никелевых аллювиальных техногенных песков месторождения р. Наледная (Норильский район). Для проведения экспериментов из общей массы песков отделяли класс  $-100$  мкм, содержания никеля и меди в классе составили 0,32 и 0,22 %, соответственно. В ходе работы был исследован вещественный состав исходных песков и экспериментальных образцов, а также подобран оптимальный режим их переработки методом низкотемпературного обжига с сульфатом аммония. Для этого образцы песков смешивали с сульфатом аммония, затем обожженную смесь выщелачивали в воде в течение 40 мин при постоянном перемешивании с интенсивностью  $230 \text{ мин}^{-1}$ . Для песков характерно значительное количество сростков, содержащих множественные рудные включения. Свободных от сростков сульфидов около 1 %, пирротин в значительной степени окислен. Методом рентгенофазового анализа среди сульфидов, помимо пирротина, отмечено наличие халькопирита. Максимальное извлечение металлов было достигнуто при температуре  $400^\circ\text{C}$  и массовом соотношении песков и сульфата аммония 1:3, извлечение никеля составило 73,2 %, меди – 71,6 %.

*Ключевые слова:* техногенные пески, сульфиды, сульфат аммония, низкотемпературный обжиг, водное выщелачивание, продуктивный раствор, цветные металлы.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.115

**Goryachev Andrey A.**

Junior Researcher,  
Candidate of Technical Sciences,  
Laboratory of nature-inspired technologies and  
environmental safety of the Arctic region,  
Nanomaterials Research Centre, KSC of RAS,  
184209 Apatity, 4A Akademgorodok  
e-mail: [a.goryachev@ksc.ru](mailto:a.goryachev@ksc.ru)

**RECOVERY OF NON-FERROUS METALS  
FROM ALLUVIAL TECHNOGENIC SANDS  
BY LOW-TEMPERATURE ROASTING  
WITH AMMONIUM SULFATE***Abstract:*

Research has been conducted on the roasting of copper-nickel alluvial technogenic sands of the Nalednaya River deposit (Norilsk region). For the experiments, the  $-100 \mu\text{m}$  class was separated from the sand, the nickel and copper contents in the class were 0.32 and 0.22 %, respectively. During the work, the material composition of the original sands and experimental samples was studied, as well as the optimal mode of their processing by the method of low-temperature roasting with ammonium sulfate was selected. Sand samples were mixed with ammonium sulfate, and then the roasted mixture was leached in water for 40 min with constant stirring at an intensity of  $230 \text{ min}^{-1}$ . The sands are characterized by a significant number of intergrowths containing multiple ore inclusions. Free from sulfide intergrowths, about 1 %; pyrrhotite is largely oxidized. Using the X-ray phase analysis method, among the sulfides, in addition to pyrrhotite, the presence of chalcopyrite was noted. The maximum recovery of metals was achieved at a roasting temperature of  $400^\circ\text{C}$  and a mass ratio of sand and ammonium sulfate of 1:3; the nickel recovery was 73.2 %, copper – 71.6 %.

*Key words:* technogenic sands, sulfides, ammonium sulfate, low-temperature roasting, water leaching, pregnant solution, non-ferrous metals.

**Введение**

В настоящее время наблюдается увеличение объемов потребления природных ресурсов, в особенности – минерального сырья. Значительно возрастают темпы потребления цветных металлов, что связано с их востребованностью в базовых отраслях промышленности. Процессы добычи и обогащения полезных ископаемых сопряжены со значительным количеством отходов различного агрегатного состояния, при этом объем образующихся отходов значительно возрастает при использовании ресурсоемких технологий и устаревшего оборудования [1]. Складирование отходов обогащения приво-

\* Работа выполнена в рамках тем НИР №№ 122022400093-9 и 1021051803680-5.

дит к значительной нагрузке на окружающую природную среду, так как сульфиды цветных металлов в гипергенной обстановке окисляются с образованием водорастворимых сульфатов, что приводит к негативному воздействию на прилегающие водные экосистемы [2]. Учитывая высокие потери цветных металлов с отходами обогащения, а также значительную нагрузку техногенных объектов на природную среду, целесообразным является поиск путей их вовлечения в производство. Кроме того, отмечается постепенный рост цен на цветные металлы. Средняя цена на никель в 2023 г. составила 21 474 долл. США/т, средняя цена на медь – 8 490 долл. США/т.

Норильск располагается на севере Красноярского края и образует крупный промышленный комплекс. Основным горно-металлургическим предприятием, функционирующим в данном районе, является ПАО «ГМК «Норильский никель», ведущий добычу и переработку медно-никелевых руд с извлечением цветных металлов и металлов платиновой группы. Применяемые на предприятии технологии переработки руд характеризуются существенными потерями ценного компонента с отвальным сырьем. На данный момент накоплено более 300 млн т [3] техногенных отходов – хвосты обогащения, лежалые железистые пирротиновые концентраты и железистые кеки, а также шлакопылевые отвалы.

Применяющиеся на предприятии технологии обогащения не позволяют эффективно вовлекать в переработку перечисленные виды сырья. Перспективными представляются термогидрохимические методы обогащения, в частности – технологии с использованием сульфата аммония в качестве основного реагента, что обусловлено его высокой реакционной способностью при взаимодействии с сульфидами цветных металлов [4]. Технология низкотемпературного обжига сульфидного сырья с сульфатом аммония успешно применялась в мировой практике для различного вида сырья [5], например – латеритных и сульфидных никелевых руд [6, 7], бокситовых [8], окисленных цинковых [9], марганцевых руд [10]. Целью данного исследования был подбор оптимального режима переработки техногенных песков методом низкотемпературного обжига в смеси с сульфатом аммония.

#### *Материалы и методы исследования*

Техногенные пески представляют собой аллювиальную россыпь, образованную путем смыва паводковыми и поверхностными водами хвостов обогащения медно-никелевых руд и пыли Малого металлургического и Никелевого заводов (район г. Норильск). Для проведения экспериментов из общей массы песков отделяли класс – 100 мкм, содержание никеля и меди в классе составило 0,32 и 0,22 %, соответственно.

В ходе работы образцы песков смешивали с сульфатом аммония квалификации х.ч.  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  при массовых соотношениях от 1:1 до 1:6 и обжигали при различных температурах в муфельной печи СНОЛ 3/11 (ООО «НПФ Термикс», Москва, Россия) в статической атмосфере воздуха. Температуру обжига варьировали от 200 до 400 °С, продолжительность обжига – от 60 до 320 мин, нагрев до заданной температуры составлял 60 мин. После обжига смесь охлаждали в течение 60 мин. Затем обожженную смесь выщелачивали в подогретой до  $\approx 80$  °С дистиллированной воде в течение 40 мин при постоянном перемешивании с интенсивностью 230 мин<sup>-1</sup>, используя верхнеприводную мешалку MV-6 (ООО «НВ-ЛАБ», Москва, Россия).

Анализ экспериментальных образцов проводили с применением метода сканирующей электронной микроскопии на приборе ZEISS EVO 24 (Carl Zeiss AG, Германия), оборудованном энергодисперсионным рентгеновским спектрометром UltimMax 170 (Oxford Instruments PLC, Великобритания). Изображения и спектры обрабатывались и рассчитывались с помощью ПО Oxford AzTec EDX. Запись дифрактограммы выполняли на порошковом дифрактометре Rigaku MiniFlex-600 (Rigaku Co., Ltd., Япония) в режиме сканирования со скоростью 1°/мин и шагом 0,01°. Анализ кристаллических фаз выполняли с использованием базы данных порошковых дифрактограмм

ICDD. Концентрации ионов меди, никеля и кобальта в продуктивных растворах после выщелачивания обожженной смеси определяли на приборе Shimadzu-AA7000G (Shimadzu Corp., Япония). Обработку результатов проводили с помощью программы MS 15.0.459.1506 Excel 2013 (Microsoft, WA, USA). Визуализация результатов извлечения металлов выполнена в программе Surfer (Golden Software Surfer 8).

### Результаты и их обсуждение

Исходный образец техногенных песков представлял собой обломки и минералы ультраосновных пород, довольно измененные – окисленные и частично разрушенные. Методом рентгенофазового анализа среди сульфидов, помимо пирротина, отмечено наличие халькопирита (рис. 1). Для песков характерно значительное количество сростков, содержащих множественные рудные включения (рис. 2а). Свободных от сростков сульфидов около 1 %, пирротин в значительной степени окислен.

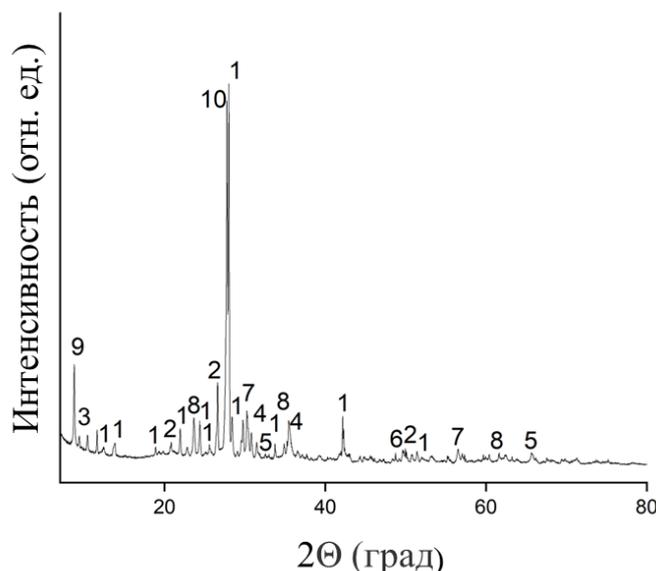
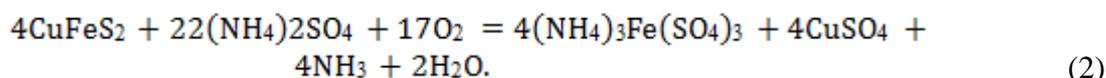
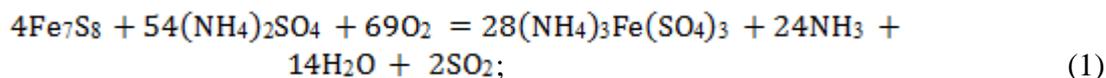


Рис. 1. Дифрактограмма исходного образца техногенных песков.  
Рефлексы: 1 – анортит ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ); 2 – кварц ( $\text{SiO}_2$ ); 3 – мусковит ( $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH},\text{F})_2$ );  
4 – магнетит ( $\text{FeO} \times \text{Fe}_2\text{O}_3$ ); 5 – пирротин ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}_n$ ); 6 – халькопирит ( $\text{CuFeS}_2$ );  
7 – авгит ( $(\text{Ca},\text{Mg},\text{Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$ ); 8 – форстерит ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ); 9 – клинохлор ( $\text{Mg}_5\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ );  
10 – альбит ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )

Взаимодействие сульфидов, входящих в состав песков, с сульфатом аммония (1:4) в процессе обжига при температуре 400 °С в течение 240 мин сопровождалось образованием аммонийсодержащих сульфатов железа – пиракмонит ( $(\text{NH}_4)_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ ) и сабиит  $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$  (рис. 2б). Упрощенные схемы реакций пирротина и халькопирита с реагентом можно представить следующими уравнениями (1) – (2):



Сульфат аммония способствует образованию сульфатов меди и никеля как прямым путем, так и опосредованно – путем его разложения и образования диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ). Опосредованная реакция проявляется, главным образом, в образовании сульфатов из моносульфидов никеля ( $\text{NiS}$ ) и меди ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), оба из которых являются промежуточными продуктами в процессе обжига. Взаимодействие сульфата аммония с моносульфидом никеля можно описать следующим образом. В процессе обжига два атома кислорода связываются с двумя атомами никеля, энергия адсорбции при этом составля-

ет  $-1,81$  эВ. Адсорбированные атомы кислорода создают поверхность для взаимодействия с диоксидом серы. Дальнейшее взаимодействие диоксида серы осуществляется по двум направлениям. В первом направлении диоксид серы связывается только с одним атомом кислорода (длина связи S–O  $1,59$  Å), что приводит к термодинамически стабильной структуре с энергией адсорбции  $-0,75$  эВ. Энергия адсорбции образованной молекулы  $SO_3$  на поверхности адсорбированного ранее кислорода составляет  $-3,23$  эВ, что, в конечном счете, ведет к образованию сульфата ( $SO_4^{2-}$ ). Второе направление, приводящее к образованию сульфата – прямое взаимодействие диоксида серы с двумя атомами кислорода.

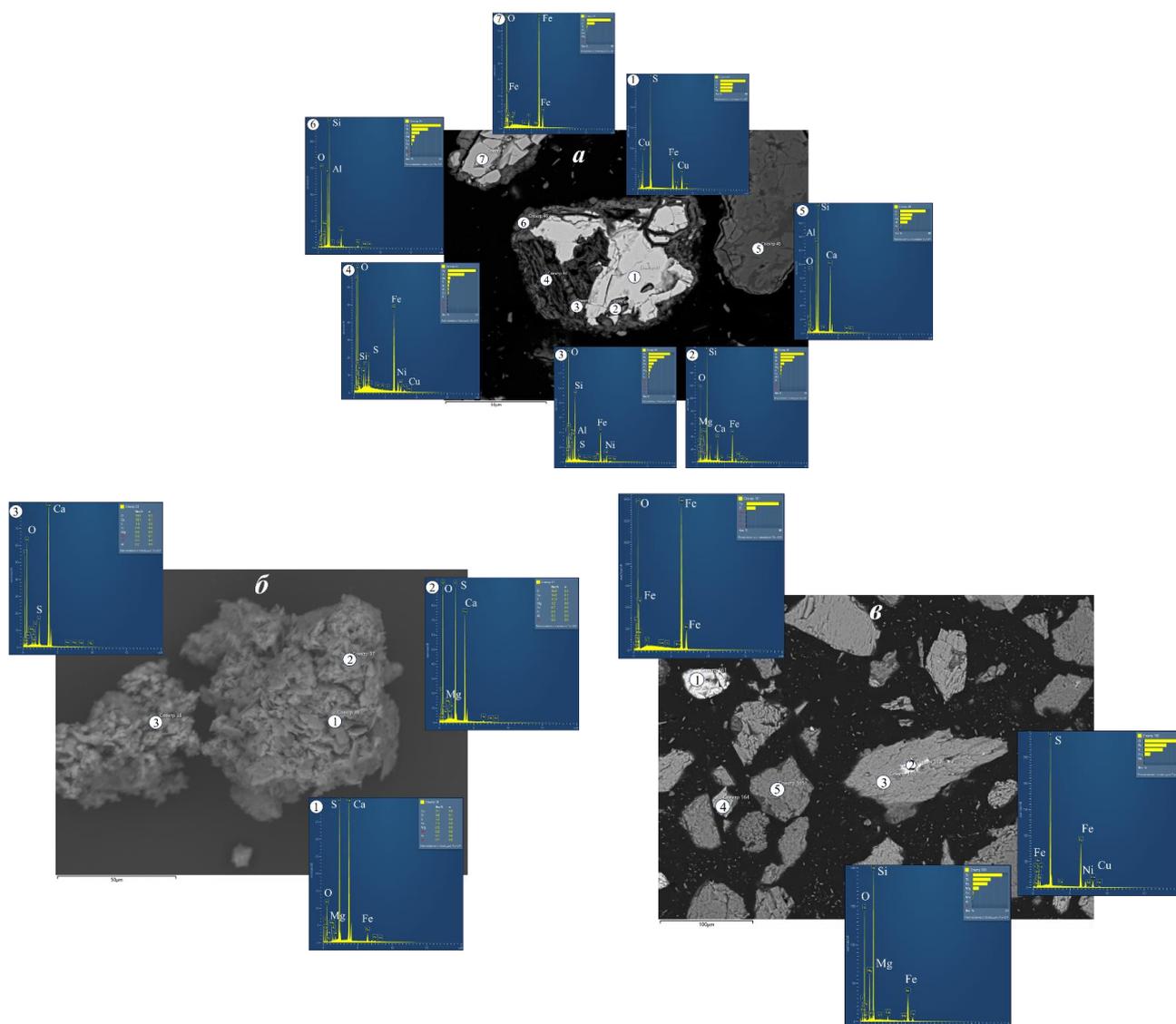


Рис. 2. СЭМ-изображения и ЭДС-спектры:

*a* – исходные пески; *б* – обожженная при  $400$  °С смесь песков и сульфата аммония (1:4);  
*в* – остаток после водного выщелачивания обожженной смеси

В случае сульфида меди ( $Cu_2S$ ) диссоциация кислорода на поверхности минерала приводит к энергии адсорбции  $-1,09$  эВ с длиной связи Cu–O  $1,81$  Å. Как и для никелевого сульфида, можно выделить два направления формирования сульфата в процессе обжига в смеси с сульфатом аммония. В первом случае  $SO_2$  взаимодействует с поверхностью  $Cu_2S$  через адсорбированный атом кислорода, что приводит к падению энергии адсорбции до  $-1,89$  эВ, длина связи S–O составляет  $1,58$  Å. Когда адсорбированные диоксид серы и кислород десорбируются с поверхности сульфида, энергия адсорбции со-

ставляет  $-0,79$  эВ, что указывает на экзотермический характер процесса. В конечном итоге адсорбция  $\text{SO}_3$  приводит к образованию  $\text{SO}_4^{2-}$  на поверхности сульфида меди. Второе направление, как и в случае никелевого сульфида, заключается в прямом взаимодействии диоксида серы с двумя атомами кислорода [11].

Образованные в процессе обжига сульфаты полностью растворялись на стадии водного выщелачивания. Остаток после выщелачивания характеризовался преобладанием оксидов и силикатов (рис. 2в). Отмечено некоторое количество сульфидов, что, вероятно, будет приводить к неполному извлечению цветных металлов в раствор.

По результатам химического анализа было установлено, что пески характеризуются преобладанием кремнезема, содержание которого составило 39,1 %, отмечено значительное количество оксидов железа и алюминия (табл. 1). Эти компоненты преобладают и в обожженной смеси песков и сульфата аммония ( $400$  °С, 1:4). Остаток после выщелачивания характеризовался повышением доли кремнезема, его содержание выросло до 56,4 %, отмечены высокие содержания оксидов алюминия и кремния. Железо, очевидно, в значительной степени было извлечено в раствор на стадии водного выщелачивания.

Таблица 1

**Химический состав экспериментальных образцов**

Компонент	Пески (100 мкм)	Обожженная смесь	Остаток выщелачивания
$\text{SiO}_2$	39,71	10,19	56,38
$\text{TiO}_2$	1,83	0,70	1,39
$\text{Al}_2\text{O}_3$	12,21	3,27	12,62
$\text{Fe}_{\text{общ}}$	14,61	4,09	6,88
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	4,67	4,72	3,50
$\text{FeO}$	6,81	1,02	5,71
$\text{MnO}$	0,16	0,06	0,18
$\text{CaO}$	6,51	2,77	8,66
$\text{MgO}$	3,94	1,21	5,16
$\text{K}_2\text{O}$	1,06	0,27	1,01
$\text{Na}_2\text{O}$	2,12	0,44	2,89
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,44	0,37	0,14
$\text{SrO}$	<0,1	<0,1	<0,1
F	0,10	0,09	0,08
S	1,54	–	0,34
$\text{H}_2\text{O}$	3,72	4,03	1,04
$\text{CuO}$	0,28	0,052	0,011
$\text{NiO}$	0,41	0,018	0,030
$\text{CoO}$	0,009	0,0027	0,003
ппп	10,51	>50	2,39

В процессе обжига техногенных песков в смеси с сульфатом аммония были получены следующие результаты. Значительное увеличение извлечения никеля отмечено при температуре  $300$  °С и соотношении сырья и сульфата 1:5, в раствор при указанных параметрах извлечено 64,3 % никеля (рис. 3). Максимальное извлечение металлов было достигнуто при температуре  $400$  °С и соотношении 1:3, извлечение никеля составило 73,2 %, меди – 71,6 %. Повышение температуры обжига выше  $400$  °С не приводило к значительному увеличению извлечения металлов. Вероятно, это связано с чрезмерным разложением реагента при более высокой температуре обжига.

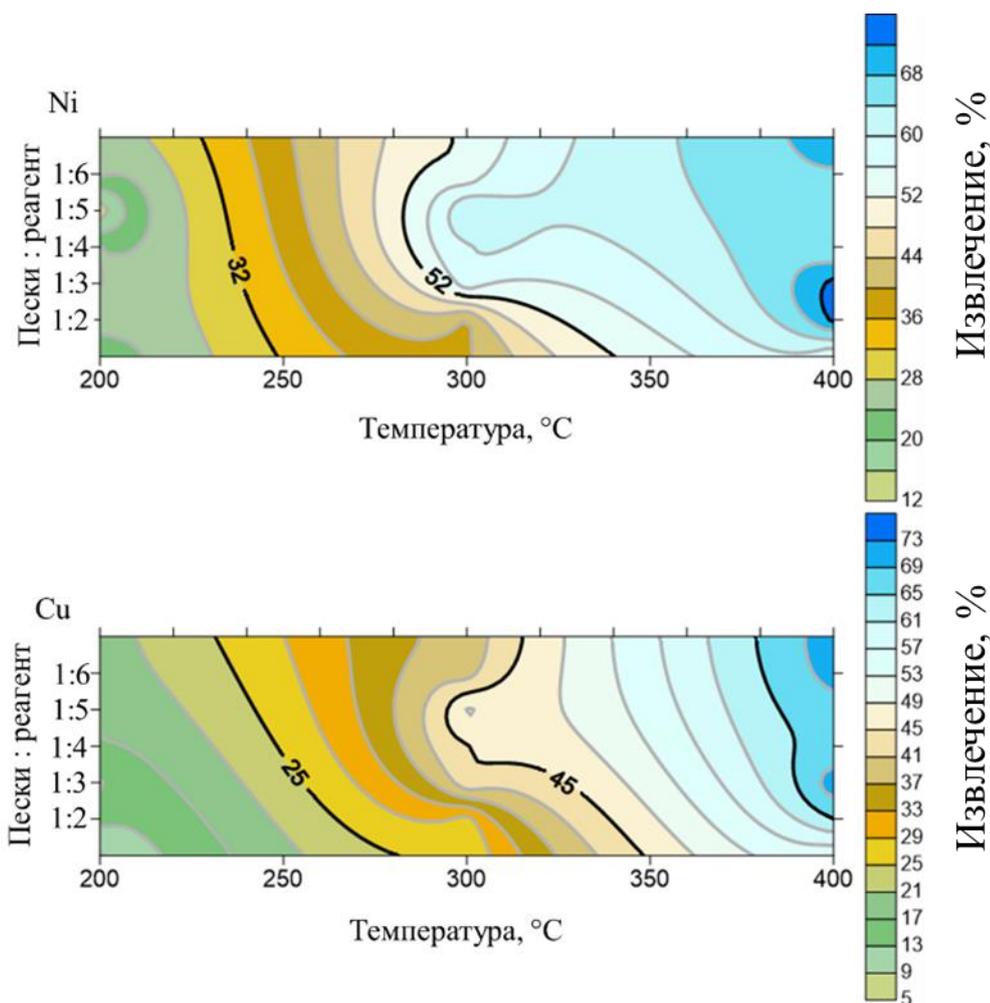


Рис. 3. Извлечение никеля и меди из обожженной смеси песков и сульфата аммония на стадии водного выщелачивания

Получаемый после водного выщелачивания продуктивный раствор может быть переработан по трехстадийной схеме. На первой стадии целесообразно извлекать медь, для этого перспективны методы, эффективные при низкой концентрации металла в растворе, например, методы цементации и гальванокоагуляции. По данным Б.Д. Халезова [12], цементация на железе – самый распространенный способ извлечения меди при небольших масштабах производства из слабо концентрированных сульфатных растворов, что актуально при переработке отходов и руд маломощных месторождений. Авторами [13] исследована перспективность использования метода гальванокоагуляции для извлечения меди из раствора. Методом гальванокоагуляции авторам удалось за две минуты взаимодействия извлечь 92 % меди из однокомпонентных сульфатных растворов с исходной концентрацией меди от 50 до 500 мг/л.

Цементационное получение меди будет приводить к повышенным концентрациям железа в растворе. Поэтому перед получением никеля требуется осадить железо. Этого можно достичь посредством повышения значения pH раствора, осажая железо в виде гидроксида, ярозита или гетита. Получение никеля возможно путем последующего повышения значения pH, осажая гидроксид никеля в виде товарного порошка. Раствор после кондиционирования может быть возвращен в технологический цикл.

Утилизация отходов является важной составляющей технологического производства. В схеме переработки техногенных песков методом низкотемпературного обжига с сульфатом аммония отходы представлены газовой фазой, образующейся на стадии обжига, и остатками, образующимися после водного выщелачивания смеси. Для

безопасной утилизации газов предполагается их улавливание. Улавливание газов позволит не только сократить негативное воздействие на атмосферный воздух, что чрезвычайно актуально для регионов Крайнего Севера, но также и регенерировать  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . Поскольку остаток после выщелачивания характеризуется преобладанием ангидрита с примесью силикатов, то целесообразно рассмотреть возможность его использования в строительной отрасли.

### Заключение

Проведенные исследования показали перспективность использования технологии низкотемпературного обжига для переработки техногенных песков Норильского промышленного района. Из класса  $-100$  мкм было извлечено более 70 % цветных металлов, что превышает текущие показатели обогащения руды, например, на предприятии АО «Кольская ГМК». Преимуществом рассмотренного подхода является отсутствие необходимости измельчения сырья, что позволит снизить затраты на производство цветных металлов. Процесс низкотемпературного обжига медно-никелевого сырья с сульфатом аммония в целом перспективен для переработки вкрапленных труднообогатимых руд и техногенного сырья. Экономическая привлекательность обусловлена высоким уровнем извлечения металлов при температуре обжига  $400$  °С, что значительно ниже по сравнению с температурой традиционных пирометаллургических процессов. Отличительной особенностью технологии является возможность регенерации реагента. Состав отходящих в процессе обжига газов позволит осуществлять регенерацию сульфата аммония, не только снижая затраты на покупку реагента, но и минимизируя негативное воздействие на состояние окружающей природной среды.

*Благодарности:* Автор благодарит д.т.н. Макарова Д.В. за ценные консультации, к.г.-м.н. Компанченко А.А. за проведение анализа методом сканирующей электронной микроскопии, а также сотрудников ЦКП ИППЭС КНЦ РАН за определение концентрации металлов в растворе.

### Список литературы

1. Колотырин К.П., 2017. Повышение эффективности управления отходами горнодобывающей промышленности на основе государственно-частного партнерства. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11, С. 144-150. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-144-150
2. Макаров В.Н., Васильева Т.Н., Макаров Д.В., Алкацева А.А., Фарвазова Е.Р., Нестеров Д.П., Лащук В.В., 2005. Потенциальная экологическая опасность выведенных из эксплуатации хранилищ хвостов обогащения медно-никелевых руд. *Химия в интересах устойчивого развития*, Т. 13, № 1, С. 85-93.
3. Бодуэн А.Я., Петров Г.В., Мардарь И.И., Иванов Б.С., 2013. Извлечение благородных и цветных металлов из техногенного сырья Норильского промышленного региона: практика и исследования. *Успехи современного естествознания*, № 3, С. 143-145.
4. Горячев А.А., 2024. Обоснование и разработка термогидрохимической технологии переработки медно-никелевых руд и техногенных продуктов с использованием сульфата аммония: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Москва, 25 с.
5. Ju J., Feng, Y., Li H., Xu C., Xue Z., Wang B., 2023. Extraction of valuable metals from minerals and industrial solid wastes via the ammonium sulfate roasting process: A systematic review. *Chemical Engineering Journal*, V. 457, P. 141197. DOI: 10.1016/j.cej.2022.141197
6. Li J., Li Y., Duan H., Guo X., Zhai Y. 2018. Experimental and kinetic study of magnesium extraction and leaching from laterite nickel ore by roasting with ammonium

sulfate. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, V. 59, P. 596-604 DOI: 10.3103/S1067821218060123

7. Cui F., Mu W., Zhai Y., Guo X., 2020. The selective chlorination of nickel and copper from low-grade nickel-copper sulfide-oxide ore: Mechanism and kinetics. *Separation and Purification Technology*, V. 239, P. 116577. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116577

8. Xu Y. J., Xin H.X., Duan H.M., Li Y.D., Wu Y., Lin J., Zhai Y.C., 2022. Reaction behavior of silicon-rich diasporic bauxite with ammonium sulfate during roasting. *Journal of Central South University*, V. 29, No. 1, P. 22-31.

9. Sun Y., Shen X.Y., Zhai Y.C., 2015. Thermodynamics and kinetics of extracting zinc from zinc oxide ore by the ammonium sulfate roasting method. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, V. 22, P. 467-475. DOI:10.1007/s12613-015-1095-x

10. Deng L., Qu B., Su S.J., Ding S.L., Sun W.Y., 2018. Extraction of iron and manganese from pyrolusite absorption residue by ammonium sulphate roasting-leaching process. *Metals*, V. 8, No. 1, P. 38. DOI: 10.3390/met8010038

11. Ju J., Feng Y., Li H., Xu C., Xue Z., Wang B., 2023. Extraction of valuable metals from minerals and industrial solid wastes via the ammonium sulfate roasting process: A systematic review. *Chemical Engineering Journal*, V. 457, P. 141197. DOI: 10.1016/j.cej.2022.141197

12. Халезов Б.Д., Ватолин Н.А., Макурин Ю.Н., Быков Н.А., 2005. Исследование извлечения меди в барабанном цементаторе. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5, С. 302-311.

13. Орехова Н.Н., 2009. Исследование метода гальванокоагуляции для селективного извлечения меди и цинка из растворов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, Т. 14, № 12, С. 202-209.

## References

1. Kolotyryn K.P., 2017. Povyshenie effektivnosti upravleniya otkhodami gornodobyvayushchei promyshlennosti na osnove gosudarstvenno-chastnogo partnerstva . [Enhancement of waste management in the mining industry based on the public-private partnership]. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, № 11, P. 144-150. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-144-150

2. Makarov V.N., Vasil'eva T.N., Makarov D.V., Alkatseva A.A., Farvazova E.R., Nesterov D.P., Lashchuk V.V., 2005. Potentsial'naia ekologicheskaya opasnost' vyvedennykh iz ekspluatatsii khranilishch khvostov obogashcheniya medno-nikelevykh rud [Potential environmental hazards of decommissioned copper-nickel ore tailings storage facilities]. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya*, Vol. 13, № 1, P. 85-93.

3. Boduen A.Ya., Petrov G.V., Mardar' I.I., Ivanov B.S., 2013. Izvlechenie blagorodnykh i tsvetnykh metallov iz tekhnogennogo syr'ya Noril'skogo promyshlennogo regiona: praktika i issledovaniya [Recovery of precious and non-ferrous metals from man-made raw materials of the Norilsk industrial region: practice and research]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, № 3, P. 143-145.

4. Goryachev A.A., 2024. Obosnovanie i razrabotka termogidrokhimicheskoi tekhnologii pererabotki medno-nikelevykh rud i tekhnogennykh produktov s ispol'zovaniem sul'fata ammoniya [Justification and development of thermohydrochemical technology for processing copper-nickel ores and technogenic products using ammonium sulfate]: avtoref. dis. ... kand. tekh. nauk. Moscow, 25 p.

5. Ju J., Feng Y., Li H., Xu C., Xue Z., Wang B., 2023. Extraction of valuable metals from minerals and industrial solid wastes via the ammonium sulfate roasting process: A systematic review. *Chemical Engineering Journal*, V. 457, P. 141197. DOI: 10.1016/j.cej.2022.141197

6. Li J., Li Y., Duan H., Guo X., Zhai Y. 2018. Experimental and kinetic study of magnesium extraction and leaching from laterite nickel ore by roasting with ammonium

sulfate. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, V. 59, P. 596-604 DOI: 10.3103/S1067821218060123

7. Cui F., Mu W., Zhai Y., Guo X., 2020. The selective chlorination of nickel and copper from low-grade nickel-copper sulfide-oxide ore: Mechanism and kinetics. Separation and Purification Technology. V. 239, P. 116577. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116577

8. Xu Y. J., Xin H. X., Duan H. M., Li Y. D., Wu Y., Lin J., Zhai Y. C., 2022. Reaction behavior of silicon-rich diasporic bauxite with ammonium sulfate during roasting. Journal of Central South University, V. 29, No. 1, P. 22-31.

9. Sun Y., Shen X.Y., Zhai Y.C., 2015. Thermodynamics and kinetics of extracting zinc from zinc oxide ore by the ammonium sulfate roasting method International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, V. 22, P. 467-475. DOI:10.1007/s12613-015-1095-x

10. Deng L., Qu B., Su S. J., Ding S. L., Sun W. Y., 2018. Extraction of iron and manganese from pyrolusite absorption residue by ammonium sulphate roasting-leaching process. Metals, V. 8, No. 1, P. 38. DOI: 10.3390/met8010038

11. Ju J., Feng Y., Li H., Xu C., Xue Z., Wang B., 2023. Extraction of valuable metals from minerals and industrial solid wastes via the ammonium sulfate roasting process: A systematic review. Chemical Engineering Journal, V. 457, P. 141197. DOI: 10.1016/j.cej.2022.141197

12. Khalezov B.D., Vatolin N.A., Makurin Yu.N., Bykov N.A., 2005. Issledovanie izvlecheniya medi v barabannom tsementatore [Study of copper recovery in drum cementer]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 5, P. 302-311.

13. Orekhova N.N., 2009. Issledovanie metoda gal'vanokoagulyatsii dlya selektivnogo izvlecheniya medi i tsinka iz rastvorov [Study of the galvanocoagulation method for the selective extraction of copper and zinc from solutions]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', Vol. 14, № 12, P. 202-209.

УДК 622.765.061

**Драпей Анатолий Витальевич**  
младший научный сотрудник, лаборант,  
ФГБОУ ВО Тихоокеанский государственный  
университет,  
685035, г. Хабаровск,  
ул. Тихоокеанская, д. 136  
e-mail: [2021100489@pnu.edu.ru](mailto:2021100489@pnu.edu.ru)

**Козловская Мария Максимовна**  
лаборант,  
ФГБОУ ВО Тихоокеанский государственный  
университет  
e-mail: [2021100489@pnu.edu.ru](mailto:2021100489@pnu.edu.ru)

**Мисютинская Валерия Андреевна**  
преподаватель,  
ФГБОУ ВО Тихоокеанский государственный  
университет  
e-mail: [2021100489@pnu.edu.ru](mailto:2021100489@pnu.edu.ru)

**Прохоров Константин Валерьевич**  
кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
Институт горного дела ДВО РАН,  
685000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51  
e-mail: [2021100489@pnu.edu.ru](mailto:2021100489@pnu.edu.ru)

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕАГЕНТНЫХ РЕЖИМОВ НА ФЛОТАЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ ПРОБЫ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ МАЛОМЫР\***

##### *Аннотация:*

*В статье представлено исследование влияния различных реагентных режимов на флотационное извлечение полезных компонентов из золотосульфидных руд месторождения Маломыр. Актуальность работы обусловлена сложностью обогащения руд, содержащих тонковкрапленное золото и углистое вещество, что негативно сказывается на эффективности флотации. Целью работы является оптимизация реагентных режимов флотационного обогащения для повышения извлечения золота. Для достижения этой цели проведены лабораторные испытания с использованием различных реагентов, включая собиратели, депрессоры и вспениватели. Исследования включали 13 серий экспериментов с двумя принципиальными схемами флотации: выделением углистого концентрата в начале процесса и депрессией углистого вещества. Результаты показали, что применение оптимальных реагентных режимов и предварительное выделение углистого концентрата значительно повышают извлечение золота из руды. Работа представляет интерес как для научного сообщества, так и для практиков в области горнодобывающей промышленности, предлагая эффективные подходы к переработке сложных золотосодержащих руд.*

*Ключевые слова:* золотосульфидные руды, оптимальный реагентный режим, извлечение золота, выход, содержание, депрессия углистого вещества, ультразвуковая обработка.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.124

**Drapey Anatoly V.**  
Junior Researcher, Laboratory Assistant,  
Pacific National University,  
685035 Khabarovsk,  
136 Tikhookeanskaya Str.  
e-mail: [2021100489@pnu.edu.ru](mailto:2021100489@pnu.edu.ru)

**Kozlovskaya Maria M.**  
Laboratory Assistant,  
Pacific National University  
e-mail: [2021100489@pnu.edu.ru](mailto:2021100489@pnu.edu.ru)

**Misyutinskaya Valeria A.**  
Lecturer,  
Pacific National University  
e-mail: [2021100489@pnu.edu.ru](mailto:2021100489@pnu.edu.ru)

**Prokhorov Konstantin V.**  
Candidate of Technical Sciences,  
Leading Researcher, Institute of Mining,  
Far Eastern Branch of the RAS,  
685000 Khabarovsk, 51 Turgeneva Str.  
e-mail: [2021100489@pnu.edu.ru](mailto:2021100489@pnu.edu.ru)

#### **RESEARCH ON THE INFLUENCE OF VARIOUS REAGENT REGIMES ON THE FLOTATION EXTRACTION OF VALUABLE COMPONENTS FROM A SAMPLE OF ORE FROM THE MALOMYR DEPOSIT**

##### *Abstract:*

*This article presents a study on the influence of various reagent regimes on the flotation extraction of valuable components from gold-sulfide ores of the Malomyr deposit. The relevance of the work is due to the complexity of enriching ores containing finely disseminated gold and carbonaceous material, which negatively affects flotation efficiency. The aim of the study is to optimize reagent regimes for flotation enrichment to enhance gold extraction. To achieve this goal, laboratory tests were conducted using various reagents, including collectors, depressants, and frothers. The research included 13 series of experiments with two principal flotation schemes: the separation of carbonaceous concentrate at the beginning of the process and the depression of carbonaceous material. The results showed that the application of optimal reagent regimes and preliminary separation of carbonaceous concentrate significantly increase gold extraction from the ore. This work is of interest both to the scientific community and to practitioners in the mining industry, offering effective approaches to processing complex gold-bearing ores.*

*Key words:* gold-sulfide ores, optimal reagent regime, gold extraction, yield, content, depression of carbonaceous material, ultrasonic treatment.

\* Исследования проводились при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации в рамках ГЗ № FEME-2024-0006.

## Введение

Золотосульфидные руды месторождения Маломыр являются важным сырьевым источником для горнодобывающей промышленности. Эффективное извлечение золота из этих руд является актуальной задачей, требующей проведения детальных исследований.

Целью данной работы является экспериментальное исследование флотационного обогащения золотосульфидных руд месторождения Маломыр для определения оптимальных технологических параметров и реагентных режимов, обеспечивающих максимальное извлечение золота в концентрат.

Для достижения поставленной цели были проведены лабораторные флотационные испытания с использованием различных реагентных режимов. Исследования включали в себя изучение влияния типа и дозировки собирателей, депрессоров и вспенивателей на показатели обогащения.

## Литературный обзор

Флотация остается одним из наиболее важных методов обогащения полезных ископаемых, и ее эффективность во многом определяется выбором реагентов и условиями процесса. В данном литературном обзоре освещены ключевые аспекты флотации золота и касситерит-арсенопиритовых руд, основываясь на существующих исследованиях и их результатах.

Исследования процессов флотации золота из руд месторождения Маломыр показали, что одним из наиболее эффективных собирателей является ксантогенат натрия. Этот реагент продемонстрировал высокую селективность при извлечении золота из сложных руд, позволяя избежать значительных потерь [1]. Более того, применение дитиокарбамата оптимизировало условия флотации и способствовало улучшению извлечения золота на уровне 90 %. Подбор оптимальных условий, таких как настройка pH (обычно в пределах 8–10), также способствовал повышению эффективности процесса [1, 5].

Разработка технологии флотационного обогащения касситерит-арсенопиритовых руд предполагает использование специализированных реагентов. В проведенных исследованиях применялись ксантогенаты для флотации касситерита, а также молибденовые и железосодержащие реагенты, служащие депрессорами для арсенопирита. Ключевым аспектом является необходимость достижения селективного извлечения, что позволило получить концентрат с высоким содержанием олова и минимальными потерями арсенопирита [2, 4].

Опыт использования различных режимов флотации, включая варианты с многократным добавлением реагентов на разных стадиях, помог достичь более высокой степени разделения [2, 3]. В этом контексте важно учитывать, что эффективность реагентов может варьироваться в зависимости от состава руды. Поэтому комбинация реагентов должна быть тщательно выбрана для каждого конкретного типа руды, чтобы обеспечить оптимальное разделение и максимальное извлечение золота и олова.

Новое экспериментальное направление в применении депрессоров в технологии флотации заключается в использовании натриймеркаптоацетата, который продемонстрировал свою эффективность в селективной флотации, разделяя халькопирит и пирит. Данный реагент позволяет значительно улучшить результирующую селективность флотации, минимизируя нежелательное взаимодействие между минералами [7]. Это подтверждает тот факт, что правильный выбор депрессора может оказать решающее влияние на результаты обогащения, увеличивая чистоту конечного продукта.

При разработке технологий разделения касситерита и арсенопирита селективная флотация является ключевым процессом. На основе проведенных исследований было установлено, что использование реагентов, таких как фосфаты и кислые соли, может существенно улучшить результаты разделения, обеспечивая значительное снижение

потерь [4]. Данный подход основан на физико-химических различиях между минералами, что способствует более эффективному извлечению полезных компонентов в концентрате. Применение этих технологий в сочетании с высокодисперсными реагентами оказало заметное влияние на общую производительность процесса флотации, обеспечивая извлечение касситерита и арсенопирита до 95 % [4, 5].

Обзор литературных источников показывает, что использование специфических флотационных реагентов, таких как ксантогенаты, дитиокарбаматы и современные депрессоры, играет важную роль в повышении эффективности флотации золота и касситерит-арсенопиритовых руд. Понимание взаимодействий между реагентами и их оптимизация для различных типов руд позволяют достигать высоких показателей извлечения и качества концентратов. В будущем необходимо сосредоточиться на дальнейшей оптимизации процессов флотации и внедрении инновационных технологий переработки, чтобы повысить общую эффективность методов обогащения и обеспечить экологическую устойчивость производства.

#### *Обзор проблемы исследования*

Золотосодержащие руды месторождения Маломыр являются сложными для обогащения объектами, что обусловлено наличием в них тонковкрапленного золота, а также присутствием углистого вещества, которое негативно влияет на процесс флотационного обогащения. Для эффективного извлечения золота из таких руд требуется подбор оптимальных реагентных режимов флотации.

Ранее проведенные исследования показали, что применение традиционных схем флотационного обогащения не позволяет достичь высокого извлечения золота. Одним из перспективных направлений повышения эффективности обогащения является предварительное выделение углистого концентрата, а затем флотация сульфидных минералов, содержащих золото.

Таким образом, актуальной задачей является исследование влияния реагентных режимов на показатели флотационного обогащения золотосодержащих руд месторождения Маломыр, в том числе с предварительным выделением углистого концентрата.

*Целью данной работы* является экспериментальное исследование флотационного обогащения золотосодержащих руд месторождения Маломыр с оптимизацией реагентных режимов для повышения извлечения золота.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Провести серию лабораторных флотационных испытаний с использованием различных реагентных режимов, в том числе с предварительным выделением углистого концентрата.

2. Проанализированы полученные результаты и выявлены оптимальные условия флотационного обогащения, обеспечивающие максимальное извлечение золота.

Предварительно проба была разделена на классы крупности, и каждый из них был проанализирован методом атомно-абсорбционной спектроскопии на золото, серебро и основные металлы сульфидов. Результаты сведены далее в табл. 1.

Таблица 1

#### **Результаты анализа элементного состава фракций крупности проб руд месторождения Маломыр методом атомно-абсорбционной спектроскопии**

Название пробы с распределением по классам крупности	Выход, %	Au, г/т	Ag, г/т	Fe, %	Cu, г/т	As, г/т
рядовая 5 блок -0,2+0,1 мм	0,77	1,48	0,91	1,55	7,14	1447,18
рядовая 5-блок -0,1+0,071 мм	11,28	1,66	0,83	2,08	7,90	1941,02
рядовая 5-блок -0,071+0,05 мм	10,77	2,01	0,74	2,32	16,53	1826,04
рядовая 5-блок -0,05+0,04 мм	13,33	1,95	0,60	1,83	9,17	1941,02
рядовая 5-блок -0,04+0,02 мм	63,85	1,75	0,64	1,79	12,32	2770,13
рядовая 5-блок -0,02+0,0 мм		1,40	0,86	1,88	19,33	3042,68

Из анализа видно, что золото и серебро, как и породообразующие железо, медь и мышьяк, во всех пробах неравномерно распределены по классам крупности. В то же время, учитывая высокий (более 50 %) весовой выход шламообразующих (для дробленной руды) фракций с относительно близкими значениями содержаний золота и серебра, очевидно, что получить при грохочении продуктивные классы крупности дробленной руды, в которых оно концентрируется, не представляется возможным. Однако данные результаты могут быть использованы для планирования флотационной схемы обогащения с предварительным разделением материала на гидроциклоне на песковую и шламовую часть с последующей раздельной флотацией полученных продуктов.

На первом этапе была исследована проба Рядовая 5 блок в качестве основной для тестирования, вследствие среднего (из трех представленных) содержания в ней золота. Лабораторные исследования были проведены на механических флотомашинах 240 ФЛ с объемами камер 0,25, 1, 1,5 л. В качестве реагентов флотации были использованы:

– депрессоры: силикат натрия (жидкое стекло - ЖС), кремнефтористый натрий – КФН, лигносульфат – КБТ.

– собиратели: бутиловый ксантогенат калия – ХтК, дитиофосфат натрия – ДТФ, дистилляты талловых масел – ДТМ, неонол.

– вспениватели: сосновое масло – С.М., Т-80.

Ранее были проведены исследования данной пробы с использованием того же оборудования и реагентов в других соотношениях. В ходе этих испытаний было выяснено, что оптимальный реагентный режим флотации следующий:

– модификатор:  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  в количестве 1,5 кг/т;

– депрессоры: ЖС, КФН и КБТ в количестве 100 – 200 г/т каждый;

– собиратели: ХтК в количестве 80 – 100 г/т и ДТФ в количестве 30 – 50 г/т;

– вспениватель: Т-80 в количестве 50 г/т;

– предварительная углистая флотация с использованием ДТМ и Т-80 или С.М.

Далее приведены результаты новых флотационных испытаний.

Исследования включали в себя 5 серий экспериментов. Серии исследований включали в себя две принципиальные схемы флотации – выведение углистого концентрата в голове процесса и с депрессией углистого вещества. Серии отличаются реагентным режимом и количеством перечисток и концентратов. Реагентные режимы флотации представлены далее. Подробнее о продуктах каждой схемы можно судить по результатам исследований. Углистый концентрат в голове процесса выделялся по принципу «голодного» реагентного режима с целью максимально обеспечить извлечение углистого и снизить адсорбцию собирателя на свободном золоте или золоте в сростках.

Исследования проводились на механических флотомашинах с использованием различных реагентных режимов, включающих депрессоры, собиратели и вспениватели. Основными показателями, по которым оценивались результаты обогащения, являются выход, содержание и извлечение золота, серебра, меди, железа, мышьяка и органического углерода в различных продуктах флотации.

Серия 1:

• Использование неанола 100 г/т и Т-80 50 г/т на стадии углистой флотации.

• На основной флотации использовались ЖС+КФН+КБТ 200+200+100 г/т, ХтК 150 г/т, Т-80 50 г/т.

• Результаты: извлечение золота в основной концентрат составило 41,75 %, в контрольный концентрат – 12,3 – 15,53 %. Содержание золота в основном концентрате – 10,42 г/т.

Серия 2:

• Упрощенный реагентный режим на основной флотации: ЖС+КБТ 300+150 г/т, ХтК 100 г/т, Т-80 100 г/т.

• Результаты: извлечение золота в основной концентрат составило 34,66 %, в контрольные концентраты – 9,84 – 18,77 %. Содержание золота в основном концентрате – 14,87 г/т.

## Серия 3:

- Предварительная ультразвуковая обработка пульпы 7 мин.
- Реагентный режим на основной флотации: ЖС+КФН+КБТ 200+200+100 г/т, ХтК 170 г/т, Т-80 150 г/т.
- Результаты: извлечение золота в основной концентрат составило 32,77 %, в контрольные концентраты – 3,18 – 10,43 %. Содержание золота в основном концентрате – 14,2 г/т.

## Серия 4:

- Предварительная ультразвуковая обработка пульпы 7 мин.
- Увеличение дозировок депрессоров на основной флотации: ЖС+КФН+КБТ 300+300+200 г/т, ХтК 150 г/т, Т-80 150 г/т.
- Результаты: извлечение золота в основной концентрат составило 38,08 %, в контрольные концентраты – 6,96 – 14,93 %. Содержание золота в основном концентрате – 9,94 г/т.

## Серия 5:

- Схема с предварительной углистой флотацией.
- Реагентный режим на основной флотации: ЖС+КФН+КБТ 100+100+100 г/т, ХтК 150 г/т, Т-80 100 г/т.
- Результаты: извлечение золота в основной концентрат составило 50,24 %, в контрольные концентраты – 1,52–5,04 %. Содержание золота в основном концентрате – 6,53 г/т.

## Основные выводы:

1. Предварительная ультразвуковая обработка пульпы перед основной флотацией (Оп 3, 4) позволяет повысить извлечение золота в основной концентрат по сравнению с вариантами без УЗО (Оп 2).

2. Увеличение дозировок депрессоров (ЖС+КФН+КБТ) на основной флотации свыше 500 г/т (Оп 12) приводит к снижению извлечения золота в основной концентрат по сравнению с меньшими дозировками (Оп 3).

3. Схема с предварительной углистой флотацией (Оп 5) обеспечивает максимальное извлечение золота в основной концентрат (50,24 %) при относительно невысоком содержании (6,53 г/т), но с низким извлечением в контрольные концентраты.

Данные, полученные методом атомно-абсорбционного анализа, представлены в приложении 1.

Таким образом, наиболее эффективный реагентный режим включает предварительную ультразвуковую обработку пульпы. Дозировки депрессоров ЖС+КФН+КБТ в пределах 500 г/т. Использование схемы с предварительной углистой флотацией по серии 5 (рис. 1).

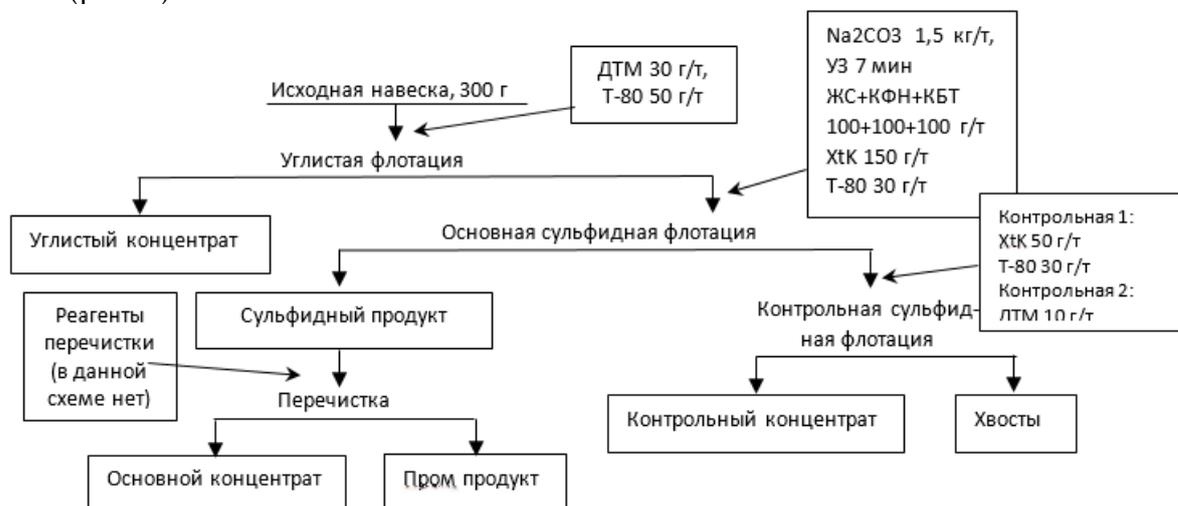


Рис. 1. Схема реагентного режима серии 5 с предварительной углистой флотацией

Приложение 1

Серия	Продукт	Выход, %	Au		Ag		Cu		Fe		As		С орг	
			Сод, г/т	Извл, %	Сод, г/т	Извл, %	Сод, %	Извл, %						
1	УГ к-т	2,89	6,11	17,58	11,28	51,84	108,07	33,84	11,98	12,11	2,33	8,50	1,58	13,87
	S к-т 1	3,95	10,42	40,98	5,03	31,60	41,47	17,75	23,78	32,85	8,37	41,75	0,79	9,48
	S конт к-т 1	2,53	5,26	13,25	1,9	7,65	24,07	6,60	13,49	11,94	3,85	12,30	0,83	6,38
	S конт к-т 2	5,90	2,5	14,68	0,95	8,91	10,66	6,81	7,53	15,53	1,72	12,81	0,76	13,62
	Хвосты	84,74	0,16	13,51	0	0,00	3,81	35,00	0,93	27,58	0,23	24,63	0,22	56,66
	Итого	100,00	1,00	100,00	0,63	100,00	9,22	100,00	2,86	100,00	0,79	100,00	0,33	100,00
2	S к-т 1	2,47	14,87	34,66	15,42	49,77	131,97	40,97	35,99	38,01	6,95	24,88	0,67	5,81
	S пр/пр	2,40	6,12	13,87	3,67	11,52	31,93	9,64	5,47	5,62	4,03	14,03	0,86	7,25
	S конт к-т 1	2,01	9,88	18,77	3,31	8,71	33,6	8,50	8,56	7,37	6,27	18,29	1	7,07
	S конт к-т 2	1,83	5,71	9,84	2,77	6,61	23,12	5,31	7,32	5,72	4,16	11,02	0,96	6,16
	S конт к-т 3	4,87	2,31	10,62	1,19	7,58	9,66	5,92	5,87	12,23	1,84	12,99	0,76	13,00
	Хвосты	86,42	0,15	12,24	0,14	15,81	2,73	29,66	0,84	31,05	0,15	18,79	0,2	60,71
	Итого	100,00	1,06	100,00	0,77	100,00	7,95	100,00	2,34	100,00	0,69	100,00	0,28	100,00
3	S к-т 1	2,32	14,2	32,77	18,08	29,03	171,73	32,94	44,35	29,46	6,81	22,61	0,51	3,64
	S пр/пр 1	3,91	3,67	14,28	6,76	18,30	55,16	17,84	5,46	6,12	3,2	17,91	1,02	12,28
	S пр/пр 2	1,98	12,24	24,12	6,56	9,00	55,83	9,15	24,74	14,04	8,43	23,90	0,87	5,30
	S конт к-т 1	0,90	3,56	3,18	2,94	1,83	28,97	2,15	3,52	0,90	3,12	4,01	1,44	3,98
	S конт к-т 2	5,99	1,75	10,43	1,15	4,77	10,57	5,24	3,3	5,66	1,2	10,29	0,51	9,41
	Хвосты	84,91	0,18	15,22	0,63	37,07	4,65	32,68	1,8	43,82	0,175	21,29	0,25	65,39
	Итого	100,00	1,00	100,00	1,44	100,00	12,08	100,00	3,49	100,00	0,70	100,00	0,32	100,00

4	S к-т 1	3,26	9,94	38,08	11,98	37,26	115,77	38,35	7,23	25,59	8,05	34,43	0,59	4,78
	S пр/пр	3,31	3,78	14,70	2,78	8,78	25	8,41	1	3,59	2,54	11,03	0,82	6,74
	S конт к-т 1	1,95	6,53	14,93	3,75	6,96	31,02	6,13	11,77	24,87	6,19	15,81	0,86	4,16
	S конт к-т 2	3,68	3,18	13,74	2,19	7,68	14,01	5,23	2,21	8,82	3,02	14,57	0,65	5,93
	ХВОСТЫ	87,79	0,18	18,55	0,47	39,32	4,7	41,88	0,39	37,13	0,21	24,16	0,36	78,39
	Итого	100,00	0,85	100,00	1,05	100,00	9,85	100,00	0,92	100,00	0,76	100,00	0,40	100,00
5	УГ к-т	2,07	1,39	3,77	12,71	18,77	115,8	22,15	5,34	4,45	0,87	2,44	2,49	11,99
	S к-т 1	5,87	6,53	50,24	7,32	30,67	57,47	31,20	11,54	27,31	7,21	57,47	0,63	8,61
	S пр/пр 1	6,45	1,23	10,38	1,09	5,01	10,43	6,21	3,21	8,34	0,76	6,65	0,62	9,29
	S пр/пр 2	3,60	3,22	15,19	1,96	5,04	15,81	5,26	5,49	7,97	2,54	12,41	0,89	7,45
	S конт к-т 1	0,84	2,82	3,11	2,54	1,52	24,05	1,87	4,07	1,38	2,09	2,39	1,01	1,98
	S конт к-т 2	3,60	0,87	4,10	1,18	3,03	9,4	3,13	3,41	4,95	0,8	3,91	0,57	4,77
	ХВОСТЫ	77,56	0,13	13,21	0,65	35,96	4,21	30,17	1,46	45,61	0,14	14,73	0,31	55,91
	Итого	100,00	0,76	100,00	1,40	100,00	10,82	100,00	2,48	100,00	0,74	100,00	0,43	100,00

Вывод по результатам экспериментов:

1. Серия 1 показала, что использование неолола в качестве собирателя на стадии углистой флотации в сочетании с ксантогенатом калия и Т-80 на основной флотации позволяет получить высокое извлечение золота в концентрат (около 73 %) при приемлемом его содержании (10,42 г/т). Однако содержание золота в хвостах остается высоким (0,16 г/т).

2. В серии 2 применение только ксантогената калия и Т-80 в качестве собирателей и вспенивателя, соответственно, на основной флотации обеспечило максимальное содержание золота в концентрате (14,87 г/т) при удовлетворительном извлечении (около 70 %). Содержание золота в хвостах снизилось до 0,15 г/т.

3. Введение ультразвуковой обработки пульпы перед основной флотацией в сериях 3 – 5 способствовало повышению извлечения золота в концентрат до 75 – 80 % при его содержании 6,5 – 14,2 г/т. Это свидетельствует об эффективности предварительной дезинтеграции частиц руды ультразвуком для улучшения показателей флотационного обогащения.

4. Серия 5 с предварительной углистой флотацией и последующей основной флотацией с использованием ксантогената калия, Т-80 и умеренных концентраций депрессоров (100 – 200 г/т) показала хорошие результаты по извлечению золота (около 80 %) при его содержании в концентрате 6,53 г/т. Это указывает на целесообразность применения двухстадийной схемы флотации для данной руды.

Таким образом, наиболее эффективными реагентными режимами флотации, обеспечивающими высокие показатели извлечения и содержания золота в концентрате, являются:

- использование ксантогената калия в качестве основного собирателя в сочетании с Т-80 в качестве вспенивателя;
- предварительная ультразвуковая обработка пульпы перед основной флотацией;
- применение двухстадийной схемы флотации с предварительным выделением углистого концентрата.

### Список литературы

1. Кузнецов А. А., Кузнецов Ю.А., Ушаков Д.В., 2020. Исследование флотации золота из руд месторождения Маломыр. *Обогащение руд*, № 4, С. 3-8.
2. Кузнецов Ю.А., Ушаков Д.В., Кузнецов А.А., 2018. Разработка технологии флотационного обогащения касситерит-арсенопиритовых руд. *Обогащение руд*, № 3, С. 3-9.
3. Кузнецов А.А., Кузнецов Ю.А., Ушаков Д.В., 2019. Исследование флотации золота и олова из комплексных руд. *Обогащение руд*, № 6, С. 3-8.
4. Кузнецов Ю.А., Ушаков Д.В., Кузнецов А.А., 2020. Разработка технологии разделения касситерита и арсенопирита методом селективной флотации. *Обогащение руд*, № 5, С. 3-9.
5. Кузнецов А.А., Кузнецов Ю.А., Ушаков Д.В., 2021. Исследование флотации золотосодержащих руд месторождения Маломыр. *Обогащение руд*, № 2, С. 3-8.
6. Газалеева Г.И., 2019. Технологические решения при переработке упорных оловянных руд и отходов обогащения. *Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья: Материалы международной научно-практической конференции, приуроченной к 90-летию со дня основания института "Уралмеханобр"*, Екатеринбург, 06–08 ноября 2019 года. Екатеринбург: ОАО "Уралмеханобр", С. 308-312.
7. Xiaoyan Qin, Jian Liu, Yunlong Yu, Jiamei Hao, Hulin Gao, Da Li, Longfu Dai, 2023. Novel application of depressant sodium mercaptoacetate in flotation separation of

chalcopyrite and pyrite. *Advanced Powder Technology*, Volume 34, Issue 9, 104141, ISSN 0921-8831, <https://doi.org/10.1016/j.appt.2023.104141>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921883123002066>)

8. Zhang X., Zhu Y., Mkhonto P.P., Meng Y., McFadzean B., Ngoepe P.E., & O'Connor C., 2024. The Flotation Separation of Chalcopyrite and Galena: Crystal, Surface, Floatability and Reagents. *Separation & Purification Reviews*, 1–21. <https://doi.org/10.1080/15422119.2024.2383314>

9. Gupta A., Yan D.S., 2016. *Mineral Processing Design and Operations: An Introduction*. URL: [https://books.google.ru/books?id=Ggri\\_yHO8HMC&source=ttb&redir\\_esc=y](https://books.google.ru/books?id=Ggri_yHO8HMC&source=ttb&redir_esc=y) (дата обращения 13.01 2025)

10. Wills B.A., Finch J.A., 2016. *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Elsevier.

11. Fuerstenau M.C., Jameson G.J., Yoon R.H., 2007. *Froth Flotation: A Century of Innovation*. SME.

12. Bulatovic S.M., 2007. *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice: Flotation of Sulfide Ores*. Elsevier

### References

1. Kuznetsov A. A., Kuznetsov Yu.A., Ushakov D.V., 2020. Issledovanie flotatsii zolota iz rud mestorozhdeniya Malomyr [Investigation of gold flotation from ores of the Malomyr deposit]. *Obogashchenie rud*, № 4, P. 3-8.

2. Kuznetsov Yu.A., Ushakov D.V., Kuznetsov A.A., 2018. Razrabotka tekhnologii flotatsionnogo obogashcheniya kassiterit-arsenopiritovykh rud [Development of technology for flotation enrichment of cassiterite-arsenopyrite ores]. *Obogashchenie rud*, № 3, P. 3-9.

3. Kuznetsov A.A., Kuznetsov Yu.A., Ushakov D.V., 2019. Issledovanie flotatsii zolota i olova iz kompleksnykh rud [Investigation of flotation of gold and tin from complex ores]. *Obogashchenie rud*, № 6, P. 3-8.

4. Kuznetsov Yu.A., Ushakov D.V., Kuznetsov A.A., 2020. Razrabotka tekhnologii razdeleniya kassiterita i arsenopirita metodom selektivnoi flotatsii [Development of technology for separation of cassiterite and arsenopyrite by selective flotation]. *Obogashchenie rud*, № 5, P. 3-9.

5. Kuznetsov A.A., Kuznetsov Yu.A., Ushakov D.V., 2021. Issledovanie flotatsii zolotosoderzhashchikh rud mestorozhdeniya Malomyr [Investigation of flotation of gold-bearing ores of the Malomyr deposit]. *Obogashchenie rud*, № 2, P. 3-8.

6. Gazaleeva G.I., 2019. Tekhnologicheskie resheniya pri pererabotke upornykh olovyannykh rud i otkhodov obogashcheniya [Technological solutions for the processing of stubborn tin ores and enrichment waste]. *Sovremennye tendentsii v oblasti teorii i praktiki dobychi i pererabotki mineral'nogo i tekhnogennogo syr'ya: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, priurochennoi k 90-letiyu so dnya osnovaniya instituta "Uralmekhanobr", Ekaterinburg, 06–08 noyabrya 2019 goda. Ekaterinburg: OAO "Uralmekhanobr"*, P. 308-312.

7. Xiaoyan Qin, Jian Liu, Yunlong Yu, Jiamei Hao, Hulin Gao, Da Li, Longfu Dai, 2023. Novel application of depressant sodium mercaptoacetate in flotation separation of chalcopyrite and pyrite. *Advanced Powder Technology*, Volume 34, Issue 9, 104141, ISSN 0921-8831, <https://doi.org/10.1016/j.appt.2023.104141>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921883123002066>)

8. Zhang X., Zhu Y., Mkhonto P.P., Meng Y., McFadzean B., Ngoepe P.E., & O'Connor C., 2024. The Flotation Separation of Chalcopyrite and Galena: Crystal, Surface, Floatability and Reagents. *Separation & Purification Reviews*, 1–21. <https://doi.org/10.1080/15422119.2024.2383314>

9 Gupta A., Yan D.S., 2016. *Mineral Processing Design and Operations: An Introduction*. URL: [https://books.google.ru/books?id=Ggri\\_yHO8HMC&source=ttb&redir\\_esc=y](https://books.google.ru/books?id=Ggri_yHO8HMC&source=ttb&redir_esc=y) (дата обращения 13.01 2025)

10 Wills B.A., Finch J.A., 2016. *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Elsevier.

11 Fuerstenau M.C., Jameson G.J., Yoon R.H., 2007. *Froth Flotation: A Century of Innovation*. SME.

12 Bulatovic S.M., 2007. *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice: Flotation of Sulfide Ores*. Elsevier



## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 622.1:528.74

**Хасанов Даниил Нургалиевич**

инженер, лаборатория геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании, Институт горного дела УрО РАН, 620075, Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, д. 58  
e-mail: [nahadaaaya@gmail.com](mailto:nahadaaaya@gmail.com)

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ФОТОГРАММЕТРИИ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

*Аннотация:*

Одной из задач маркшейдерской службы горного предприятия является съемка горных выработок. Среди различных инструментов, используемых для решения этой задачи, выделяется аэрофотосъемка с последующей фотограмметрической обработкой. Применение аэрофотосъемки и фотограмметрии упрощается за счет доступности беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и современного программного обеспечения (ПО). Преимуществом методики является большой охват съемки и относительно небольшие трудозатраты. Однако проведение аэрофотосъемки по-прежнему требует предварительной расстановки и привязки опознаков<sup>1</sup> что приводит к большим затратам времени на полевые работы. Эта проблема актуализирует вопросы поиска методик, позволяющих сократить необходимое для точного построения фотограмметрической модели числа опознаков.

Основная цель исследований – оценка влияния числа опознаков на точность фотограмметрии с использованием БПЛА в условиях горного предприятия.

По результатам аэрофотосъемки было построено 13 фотограмметрических моделей карьера. Каждая из них отличается числом и расстановкой опознаков. Точность построения была оценена по среднеквадратическим ошибкам в координатах контрольных точек, которые в построении не участвовали. Для оценки взаимосвязи между величиной погрешности и числом опознаков применялись элементы регрессионного анализа. Установлено, что с увеличением количества используемых при построении опознаков величины погрешностей уменьшаются. Наименьшая величина ошибок как в плане, так и по высоте наблюдалась для случая с наибольшим числом опознаков и составляет 0,031 и 0,028 м, соответственно.

*Ключевые слова:* фотограмметрия, маркшейдерское обеспечение, аэрофотосъемка, БПЛА, квадрокоптер, открытые горные работы, ГНСС-оборудование.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.135

**Hasanov Daniil N.**

Engineer, Laboratory of geoinformation and digital technologies in subsurface use, Institute of Mining, UB of RAS, 58 Mamina-Sibiryaka Str., 620075 Ekaterinburg  
e-mail: [nahadaaaya@gmail.com](mailto:nahadaaaya@gmail.com)

## METHODS TO IMPROVE ACCURACY IN OPEN-PIT MINES PHOTOGRAMMETRY

*Abstract:*

One of the mining surveying department tasks is to survey mining operations. Among various tools used in surveying, aerial photography with photogrammetric processing stands out. Use of aerial photography and photogrammetry is simplified due to the availability of unmanned aerial vehicles (UAVs) and modern software. The advantages of this method are large coverage and low labor costs. However, aerial photography still requires preliminary site placement and georeferencing of GCPs, which is time-consuming. This problem raises question about the search for methods that can reduce the number of GCPs necessary for the accurate building of a photogrammetric model.

The main goal of the research is to assess the impact of the number of GCPs on the UAV-based photogrammetric surveying accuracy in open-cut mining. Based on the results of aerial photography, 13 photogrammetric models of the pit were generated. Each of them differs in the quantity and arrangement of used GCPs. Accuracy of the model was estimated using root means square errors (RMSE) of the control points coordinates. Elements of regression analysis were used to assess the relationship between errors and GCPs quantity. It is established that with an increase in the number of GCPs used in the processing, the RMSE values decrease. The smallest horizontal and vertical RMSEs were observed for the case with the largest number of GCPs and are 0.031 m and 0.028 m, respectively.

*Key words:* photogrammetry, surveying, aerial photography, UAV, quadcopter, open-pit mining, GNSS equipment.

<sup>1</sup> Точка объекта фотограмметрической съемки с известными пространственными координатами, опознанная на фотограмметрическом снимке

## Введение

Фотограмметрия и аэрофотосъемка на открытых горных работах – удобный маркшейдерский инструмент для съемки горных выработок. Главным преимуществом фотограмметрии на основе аэрофотосъемки с использованием БПЛА по сравнению с традиционными видами маркшейдерских инструментов служит широкий охват и относительно небольшие трудозатраты. Тем не менее преимущество методики за счет снижения трудозатрат в значительной степени преуменьшается из-за необходимости использовать опознаки. Последние используются для привязки материалов фотограмметрии к нужной системе координат и минимизации погрешностей. Предполетная расстановка опознаков может занимать в разы больше времени, чем сама аэрофотосъемка. В этой связи возникает вопрос об определении числа опознаков, позволяющих минимизировать полевые работы без потери точности, либо потенциального полного отказа от них.

*Целью работы* является определение взаимосвязи между числом опознаков и точностью фотограмметрической съемки с использованием БПЛА в условиях открытых горных работ.

За последние годы появилось множество исследований, посвященных факторам, которые влияют на точность фотограмметрической съемки. В [1] авторами по результатам двухфакторного дисперсионного анализа было выявлено, что наибольшее влияние на погрешность фотограмметрических измерений оказывают регулируемые факторы, к которым относится высота полета, число опознаков и величина перекрытий. На долю их влияния приходится 84 %, а наибольшим влиянием обладает высота полета – 48 %. В [2] исследовался уровень значимости и степень влияния высоты полета, качества изображения, перекрытия, количества опознаков и фокусного расстояния камеры на точность фотограмметрии. Влияние факторов оценивалось по среднеквадратическим ошибкам на контрольных точках. По результатам исследования авторы пришли к выводу, что наибольшим влиянием на ошибки обладает перекрытие снимков и число опознаков.

Одной из базовых проблем фотограмметрии является систематическая высотная ошибка, также называемая «эффектом купола» в иностранных источниках. Появление систематической ошибки в высотных отметках связано с неправильным определением элементов внутреннего ориентирования камеры [3]. При этом систематическая ошибка возникает и в случае использования исключительно опознаков для привязки, и в случае применения БПЛА с ГНСС-приемниками<sup>2</sup> [4]. Отдельные авторы называют главным источником систематической погрешности коэффициенты дисторсии<sup>3</sup> [3], другие видят основу погрешности в определении фокусного расстояния [5]. На данный момент источник систематической высотной ошибки однозначно не определен, но связь между ним и погрешностями в определении элементов внутреннего ориентирования зафиксирована в [6].

В современных исследованиях находятся разные подходы к минимизации погрешностей фотограмметрической съемки. Авторы работ [6, 7] предлагают использовать параметры калибровки, подготовленные заранее в лабораторных условиях, что позволяет снизить погрешности. В исследовании [8] среднеквадратические погрешности определения координат контрольных точек при использовании предварительной калибровки в среднем на 3 – 5 см больше, чем при использовании самокалибровки. Авторы связывают появление такой погрешности с потерей актуальности параметров предварительной калибровки. Авторы статьи [5] дополнили плановую съемку перспективной с углом наклона камеры от 15 до 30°, что позволило снизить высотные ошибки с 0,18 до 0,03 м. Ранее эта методика была предложена в [5], высотная ошибка снизилась с 1,5 до 0,01 м. Потенциальная польза подобной методики, особенно в труднодоступных местностях,

<sup>2</sup> Приемник сигналов глобальных навигационных спутниковых систем

<sup>3</sup> Параметры, используемые в модели Брауна для коррекции аберраций оптических систем, при которых коэффициент линейного увеличения изменяется при удалении от оптической оси

где трудно размещать опознаки, показана в [9]. Включение наклонных снимков в обработку позволило снизить ошибки по высоте с 0,15 до 0,05 м [10]. В исследовании [11] изучалось влияние методики спутникового позиционирования ГНСС-приемника БПЛА на точность определения координат. В среднем NRTK<sup>4</sup>, RTK<sup>5</sup> и РПК<sup>6</sup> показали сходные значения погрешности от 0,35 до 0,40 м [12]. РПК называют предпочтительным методом спутниковых определений, если связь между коптером и спутниками нестабильна [13].

Максимально сократить систематическую высотную ошибку и добиться наилучшей точности можно, используя стандартный подход – применение опознаков в процессе фотограмметрической обработки. Причем в современной фотограмметрии опознаки используются совместно с данными ГНСС-приемника коптера. Подобная методика позволяет как снизить объем полевых работ до приемлемого уровня, так и получить допустимую точность [14]. В [15] показано, что добавление в процесс фотограмметрической обработки опознаков позволяет уменьшить погрешность по высоте и в плане до 0,032 и 0,015 м, соответственно, тогда как для случая без опознаков погрешности составили 0,087 и 0,041 м. Применяя дрон без RTK-режима позиционирования, можно снизить погрешности в плане и по высоте с 1,38 и 2,45 м до 0,05 и 0,29 м, соответственно [16].

В настоящей работе используется методика аэрофотосъемки с применением БПЛА, оснащенного ГНСС-приемником. Число опознаков для каждого случая фотограмметрической обработки изменялось с целью определения взаимосвязи между погрешностью съемки и количеством опорных точек.

#### *Материалы и методы исследования Общие сведения об объекте съемки*

Объектом съемки послужил Седельниковский щебеночный карьер. Месторождение располагается между поселками Большое Седельниково и Малое Седельниково Сысертского городского округа Свердловской области. Ближайшими к Седельниковскому месторождению населенными пунктами являются город Екатеринбург, поселки Большое и Малое Седельниково, Полевой, село Патруши.

Район месторождения характеризуется увалисто-холмистым рельефом, сильно заболоченным в понижениях. Абсолютные отметки за пределами карьера изменяются от 274 до 308 м с повышением на юго-восток. Дно карьера располагается на отметке 254 м. Карьер в границах горного отвода занимает площадь 21,1 га. Разработка ведется с 2015 г. На фотоплан попала территория площадью порядка 90 га, включающая карьер и часть промплощадки, склады и отвалы, часть прилегающих лесных земель и не тронутые разработкой участки.

#### *Планирование и проведение аэрофотосъемки*

Рабочий процесс состоял из полевых работ по размещению и координатной привязке опознаков, аэрофотосъемки, а также фотограмметрической обработки и анализа полученных результатов.

Для проведения аэрофотосъемки использовался коптер DJI Mavic 3E с ГНСС-приемником, характеристики которого приведены в табл. 1.

Маршрут для дрона (рис. 1б) создавался заранее с помощью фирменного ПО производителя дрона. Заданная высота полета коптера – 100 м над уровнем поверхности, продольное и поперечное перекрытие – 80 и 70 %, соответственно, камера в отвесном положении. Полет контролируется оператором с помощью комплектного пульта управления DJI RC с дальностью связи до 15 км.

<sup>4</sup> Network Real-Time Kinematic (NRTK) – метод RTK с получением дифференциальных поправок через интернет

<sup>5</sup> Real-Time Kinematic (RTK) – метод дифференциальных измерений с использованием опорного и подвижного ГНСС-приемников

<sup>6</sup> Post Processing Kinematic (PPK) – метод дифференциальных измерений с использованием опорного и подвижного ГНСС-приемников с постобработкой фазовых измерений

Таблица 1

## Технические характеристики дрона

Дрон DJI Mavic 3E		Камера Hasselblad	
Вес, г	915	Матрица	4/3" CMOS, 20 Мп
Взлетная масса, г	1050	Разрешение изображений	5280×3956
Время полета, мин	45	Диафрагма	f/2,9-f/11
Расстояние полета, км	30	Фокусное расстояние, мм	

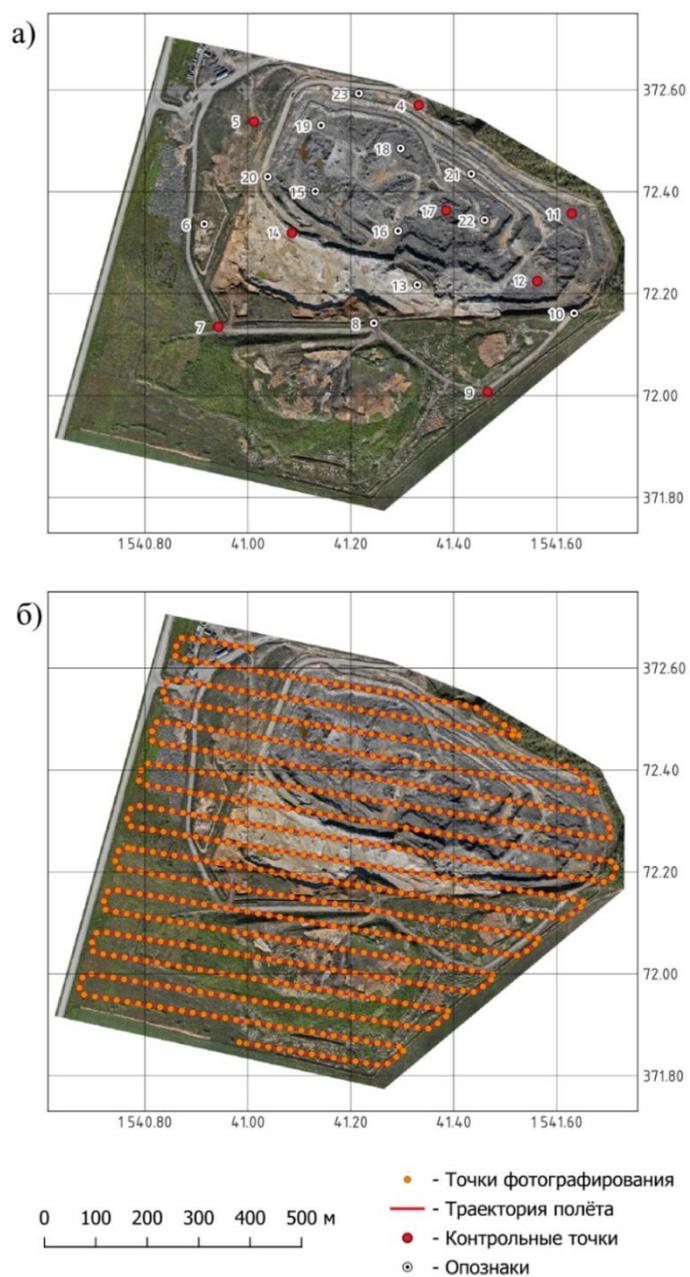


Рис. 1. Схема расстановки опознаков (а) и маршрут коптера (б)

Координаты точек фотографирования определялись встроенным ГНСС-приемником, работающим в режиме RTK. Заявленная производителем точность определения координат точек фотографирования составляет 10 мм в плане и 15 мм по высоте.

Опознавательные знаки размещались за несколько часов до начала аэрофотосъемки. Устанавливались опознаки равномерно по всему карьеру и прилегающей к нему территории (рис. 1а). На земле они обозначаются перекрестными линиями длиной около 1 м. В общем было размещено 20 опознаков, из которых для привязки используется 12, а остальные 8 выступают в качестве контрольных точек для оценки точности съемки.

Полевые работы по геодезической привязке опознаков проводились с использованием ГНСС-приемника PrinCE i80. Определение координат опознаков велось в режиме RTK с поправками от сети постоянно действующих базовых станций PrinNet. Точность определения координат в режиме RTK для ГНСС-приемника составляет 8 мм в плане и 15 мм по высоте, что соответствует классу высокоточных приборов по классификации «Правил осуществления маркшейдерской деятельности» [17]. Координаты опознаков определялись в местной системе координат МСК-66 зоны 1 с локализацией. На рис. 1а представлены схема расположения опознаков и контрольных точек, а также схема с маршрутом полета коптера.

### Обработка данных

По результатам полевых работ был сформирован каталог с координатами опознаков и набор из 708 снимков с метаданными о координатах точек фотографирования. Часть снимков была исключена из обработки из-за потери связи с сетью базовых станций.

В силу технических причин координаты точек фотографирования получены в системе координат WGS84. Для их перевода в местную систему координат применялся QGIS и Exiftool. С помощью Exiftool из области метаданных снимков извлекались, а затем и перезаписывались сведения о координатах точек фотографирования. В QGIS осуществлялось приблизительное преобразование координат методом Гельмерта и их локализация с применением аффинных преобразований и вертикальных трансформаций. Использовались параметры локализации из ГНСС-приемника.

В качестве средства фотограмметрической обработки выступает Agisoft Metashape. Как следует из сравнительных статей [18, 19], Metashape не уступает по эффективности и точности другим современным программам фотограмметрической обработки. Общая последовательность обработки представлена на рис. 2.



Рис. 2. Последовательность фотограмметрической обработки в Metashape

Обработка в Metashape происходит в несколько этапов. На первом этапе осуществляется загрузка необходимых для обработки снимков, калибровка и внешнее ориентирование в заданной системе координат. Полученное облако связующих точек очищается от шумовой составляющей, после чего производится уточнение элементов внутреннего ориентирования и уравнивание блока. На втором этапе на основе карты глубин и облака связующих точек путем сгущения строится плотное облако точек. Плотное облако очищается от шумовой составляющей фильтрацией по критерию достоверности. Достоверность точек определяется расстоянием до ближайших точек в облаке.

По плотному облаку точек строится цифровая модель местности, с помощью которой производится ортотрансформирование снимков с последующим объединением их в ортофотоплан.

Плотное облако точек, фотоплан и цифровая модель местности являются основными результатами фотограмметрической обработки.

Ортофотоплан и ЦММ экспортируются для дальнейшего совмещения в QGIS. Вручную определяется местоположение каждой контрольной точки на фотоплане. Далее полученные с фотоплана и ЦММ координаты контрольных точек извлекаются в виде таблицы CSV формата для дальнейших расчетов.

Приведенный выше алгоритм использовался для обработки каждого из вариантов привязки. Всего в расчетах использовалось 13 вариантов привязки, начиная со случая без опознаков и заканчивая вариантом со всеми 12 опознаками.

#### Оценка точности

Для определения точности полученных в ходе фотограмметрической обработки материалов в соответствии с ГОСТ 59562–2021 [20] используется формула остаточных расхождений:

$$\delta_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2}}{n}, \quad (1)$$

где  $\Delta X_i$ ,  $\Delta Y_i$  – расхождения между измеренными и каталожными значениями координат на отдельной контрольной точке;  $n$  – количество точек.

Приведенная выше формула (1) позволяет оценить погрешности в плановом положении контрольных точек, тогда как для погрешностей в высотных отметках государственным стандартом формулы не приводятся. В связи с этим для оценки точности высотных отметок рассчитывается среднеквадратическая ошибка по формуле

$$m_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta H_i^2}{n}}, \quad (2)$$

где  $\Delta H_i$  – расхождения между измеренными и каталожными значениями высотных отметок на отдельной контрольной точке;  $n$  – количество точек.

Дополнительно были рассчитаны среднеквадратические ошибки отдельно для осей  $x$ ,  $y$  по следующим формулам:

$$m_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta X_i^2}{n}}; \quad (3)$$

$$m_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta Y_i^2}{n}}, \quad (4)$$

где  $\Delta X_i$ ,  $\Delta Y_i$  – расхождения между измеренными и каталожными значениями координат на отдельной контрольной точке.

Формулы (1), (2) позволяют оценить точность ортофотоплана и цифровой модели местности по разнице между координатами фотограмметрическими и координатами, полученными высокоточным спутниковым оборудованием в ходе геодезической привязки контрольных опознаков.

### Обсуждение результатов

Допустимые погрешности определяются государственным стандартом. В соответствии с ГОСТ 59562–2021 [20], среднее расхождение в плановом положении контрольных точек не должно превышать 0,3 мм в масштабе плана и 3/5 допустимой средней квадратической погрешности (СКП) определений координат границ и контуров объектов, а расхождения высот на контрольных точках не должны превышать 0,25 высоты сечения рельефа при высоте сечения 2,0 и 2,5 м [20]. Полученные в ходе обработки фотопланы представлены в масштабе 1:2000 с высотой сечения рельефа 2 м. В то же время допустимая СКП для земель промышленности составляет 0,5 м. Тогда погрешность в плановом и высотном положении контрольных точек не должна превышать 0,3 и 0,5 м, соответственно.

Результаты расчетов приведены в табл. 2. Кроме остаточных расхождений в плане и по высоте на контрольных точках, в табл. 2 были добавлены соответствующие каждому случаю элементы внутреннего ориентирования.

Связь между расхождениями координат и погрешностями в определении элементов внутреннего ориентирования, выявленная в [5], прослеживается и в табл. 2. Так, наибольшие среднеквадратические погрешности высотных отметок  $m_H$  и планового положения  $m_x$ ,  $m_y$  соответствуют отклонениям фокусного расстояния  $f$  и координат главной точки  $x_0$ ,  $y_0$  от средних значений. Из табл. 2 видно, что составляющая среднего расхождения по оси  $x$  –  $m_x$  больше составляющей по оси  $y$  –  $m_y$ . Именно составляющая  $m_x$  вносит наибольший вклад в величину среднего расхождения в плане.

Производитель коптера предоставляет информацию об элементах внутреннего ориентирования, полученных DJI в лабораторных условиях. Координаты главной точки  $x_0$ ,  $y_0$  составили 7,019 и -8,720 пкс, соответственно, тогда как средние значения по результатам самокалибровки – 20,779 и 1,560 пкс. Большая разница в значениях подтверждает низкую стабильность параметров потребительских камер, обозначенную в статье [6]. Такие параметры нельзя использовать при обработке.

Таблица 2

**Результаты расчетов для различного количества опознаков**

Количество опознаков	$\delta_{\text{ср}}$ , м	$m_H$ , м	$m_x$ , м	$m_y$ , м	$f$ , пкс	$x_0$ , пкс	$y_0$ , пкс
Без опознаков	0.098	0.132	0.086	0.048	3798.212	17.296	1.762
1	0.087	0.059	0.074	0.049	3795.151	20.838	1.336
2	0.064	0.046	0.057	0.035	3794.321	20.816	1.336
3	0.052	0.044	0.044	0.030	3794.408	20.802	1.335
4	0.055	0.032	0.044	0.036	3796.140	20.765	1.627
5	0.040	0.033	0.033	0.030	3796.251	20.743	1.655
6	0.042	0.033	0.036	0.028	3796.361	20.736	1.692
7	0.034	0.027	0.028	0.026	3796.177	20.740	1.771
8	0.032	0.028	0.027	0.025	3796.242	20.732	1.794
9	0.032	0.028	0.026	0.017	3796.325	20.699	1.761
10	0.031	0.028	0.025	0.025	3796.321	20.714	1.740
11	0.029	0.028	0.021	0.025	3796.298	20.707	1.716
12	0.031	0.028	0.026	0.016	3796.349	20.706	1.727

Для определения взаимосвязи между количеством опознаков и остаточными погрешностями использовались отдельные элементы регрессионного анализа. Результаты представлены на рис. 3.

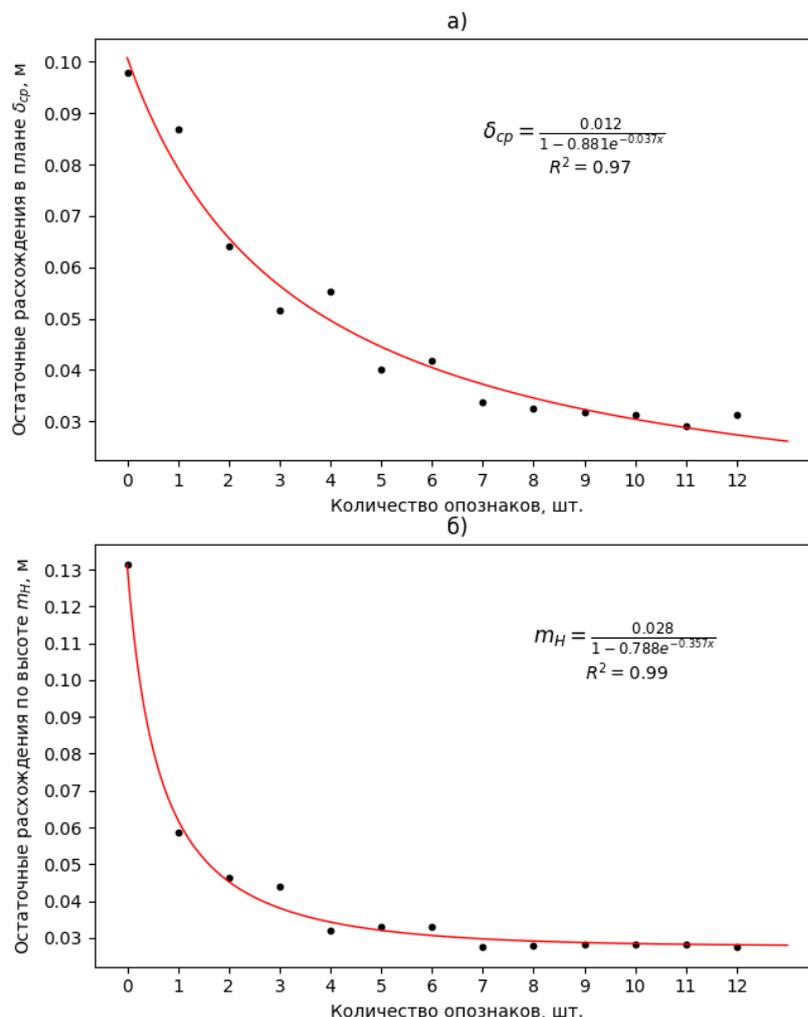


Рис. 3. Зависимость погрешности в плане (а) и по высоте (б) от количества опознаков

Как видно из рис. 3, наибольшие расхождения в плановом и высотном положении характерны для случая, когда опознаки не используются совсем и составляют 0,098 и 0,132 м, соответственно. Наименьшие погрешности в плане и по высоте наблюдаются в случае с использованием всех 12 доступных опознаков и составляют 0,031 и 0,028 м, соответственно, что согласуется с результатами из [15]. С увеличением числа используемых в фотограмметрической обработке опознаков величина остаточных расхождений уменьшается. Эту зависимость на рис. 3 характеризуют графики функций  $m_H$  и  $\delta_{cp}$ . На рис. 3а можно увидеть, что увеличение числа используемых опознаков хоть и снижает погрешность в плане, но изменения эти не столь значительны, и после 7 опознаков не превышают нескольких миллиметров. То же можно сказать о расхождениях по высоте (рис. 3б) – после 4–5 опознаков дальнейшее увеличение их количества не приводит к значительному уменьшению погрешностей. Тенденция к снижению величины погрешностей с увеличением числа опознаков вполне ожидаема и соответствует результатам, полученным в [21, 22]. Погрешности в плановом и высотном положении не превысили допустимых ни в одном из представленных случаев.

В некоторых случаях добавление опознаков привело к увеличению погрешностей, что можно объяснить субъективными ошибками при ручном определении центров опознаков. Не допустить влияние человеческого фактора можно, используя кодированные

опознаки, центры которых определяются в автоматическом режиме.

Результаты расчетов расхождений на контрольных точках показывают, что наименьшие погрешности как в плане, так и по высоте достижимы при использовании всех 12 опознаков и составляют 0,031 и 0,028 м, соответственно. Наибольшие погрешности ожидаемо получены для случая, в котором опознаки не использовались, и составили 0,098 м в плане и 0,132 м по высоте. Однако снижение погрешностей после добавления более 4–5 опознаков не превышает 0,020 м. Такое снижение погрешностей не оправдывает трудозатрат на размещение большего количества опознаков, если целью работ является съемка ситуации или иные работы, не требующие более высокой точности. Кроме того, рассчитанные на основании требований ГОСТ 59562–2021 [20] допустимые расхождения в плане и по высоте (0,30 и 0,50 м, соответственно) не были превышены даже в случае, когда опознаки не использовались для определения элементов внутреннего и внешнего ориентирования съемки.

### Заключение

Из результатов работы следует, что с увеличением числа используемых в фотограмметрической обработке опознаков величины остаточных расхождений в плане и по высоте уменьшаются. Наименьшие погрешности наблюдаются в случае с 12 опознаками и составляют 0,031 м в плане и 0,028 м по высоте. Достаточную точность для ведения съемочных работ можно получить даже в том случае, если опознаки не используются, при условии применения БПЛА с ГНСС-модулем, работающим в режиме РТК. Для фотограмметрических материалов, полученных при обработке без опознаков, остаточные расхождения в плане и по высоте составили 0,098 и 0,132 м, соответственно. При этом погрешности не превышают допустимых по ГОСТ 59562–2021, что доказывает потенциал применения подобной методики для ведения съемочных работ, не требующих повышенной точности.

Полученные выводы согласуются с другими исследованиями в этой области. Результаты подтверждают перспективность дальнейших исследований применения современных методик фотограмметрической съемки с использованием БПЛА для условий открытых горных работ.

### Список литературы

1. Гусев В.Н., Блищенко А.А., Санникова А.П., 2022. Исследование комплекса факторов, оказывающих влияние на погрешность реализации маркшейдерской съемки горных объектов с применением геодезического квадрокоптера. *Записки Горного института*, Т. 254, С. 173–179.
2. Liu Y., Han K., Rasdorf W., 2022. Assessment and Prediction of Impact of Flight Configuration Factors on UAS-Based Photogrammetric Survey Accuracy. *Remote Sensing*, Т. 14, № 16, С. 4119.
3. James M.R., Robson S., 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, Т. 39, № 10, С. 1413–1420.
4. Przybilla H. J. et al., 2020. Interaction between direct georeferencing, control point configuration and camera self-calibration for RTK-based UAV photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Т. 43., С. 485-492.
5. Štroner M. et al., 2021. Photogrammetry using UAV-mounted GNSS RTK: Georeferencing strategies without GCPs. *Remote Sensing*, Т. 13, № 7, С. 1336.
6. Sanz-Ablanedo E. et al., 2020. Reducing systematic dome errors in digital elevation models through better UAV flight design. *Earth Surface Processes and Landforms*, Т. 45, № 9, С. 2134-2147.
7. Senn J. A. et al., 2022. On-site geometric calibration of RPAS mounted sensors for SfM photogrammetric geomorphological surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, Т. 47, № 6, С. 1615-1634.

8. Forlani G. et al., 2020. UAV block georeferencing and control by on-board gnss data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, T. 43, C. 9-16.
9. Nesbit P.R., Hubbard S.M., Hugenholtz C.H., 2022. Direct georeferencing UAV-SfM in high-relief topography: Accuracy assessment and alternative ground control strategies along steep inaccessible rock slopes. *Remote Sensing*, T. 14, № 3, C. 490.
10. Dai W. et al., 2023. Enhancing UAV-SfM Photogrammetry for Terrain Modeling from the Perspective of Spatial Structure of Errors. *Remote Sensing*, T. 15, № 17, C. 4305.
11. Teppati Losè L., Chiabrando F., Giulio Tonolo F., 2020. Boosting the timeliness of UAV large scale mapping. Direct georeferencing approaches: Operational strategies and best practices. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, T. 9, № 10, C. 578.
12. Famiglietti N. A. et al., 2021. A test on the potential of a low cost unmanned aerial vehicle RTK/PPK solution for precision positioning. *Sensors*, T. 21, № 11, C. 3882.
13. Cledat E. et al., 2020. Mapping quality prediction for RTK/PPK-equipped micro-drones operating in complex natural environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, T. 167, C. 24-38.
14. Taddia Y., Stecchi F., Pellegrinelli A., 2020. Coastal mapping using DJI Phantom 4 RTK in post-processing kinematic mode. *Drones*, T. 4, № 2, C. 9.
15. Liu X. et al., 2022. Accuracy assessment of a UAV direct georeferencing method and impact of the configuration of ground control points. *Drones*, T. 6, № 2, C. 30.
16. Gomes Pessoa G. et al., 2021. Assessment of UAV-based digital surface model and the effects of quantity and distribution of ground control points. *International Journal of Remote Sensing*, T. 42, № 1, C. 65–83.
17. Правила осуществления маркшейдерской деятельности: утв. Ростехнадзором 19.05.2023 : введ. в действие с 01.09.2023. КонсультантПлюс: электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_448564/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_448564/) (дата обращения: 22.12.2024)
18. Kameyama S., Sugiura K., 2021. Effects of differences in structure from motion software on image processing of unmanned aerial vehicle photography and estimation of crown area and tree height in forests. *Remote Sensing*, T. 13, № 4, C. 626.
19. Casella V. et al., 2020. Accuracy assessment of a UAV block by different software packages, processing schemes and validation strategies. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, T. 9, № 3, C. 164.
20. ГОСТ Р 59562–2021 «Съемка аэрофототопографическая. Технические требования». Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии от 10 июня 2021 г. N 542-ст. Национальный стандарт Российской Федерации. Москва: Стандартинформ, 2021.
21. Jiménez-Jiménez S.I. et al., 2021. Digital terrain models generated with low-cost UAV photogrammetry: Methodology and accuracy. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, T. 10, № 5, C. 285.
22. Zimmerman T., Jansen K., Miller J., 2020. Analysis of UAS flight altitude and ground control point parameters on DEM accuracy along a complex, developed coastline. *Remote Sensing*, T. 12, № 14, C. 2305.

## References

1. Gusev V.N., Blishchenko A.A., Sannikova A.P., 2022. Issledovanie kompleksa faktorov, okazyvayushchikh vliyanie na pogreshnost' realizatsii marksheiderskoi s'emki gornykh ob'ektov s primeneniem geodezicheskogo kvadroptera [Study of a factors complex influencing the error in the implementation of surveying of mountain objects using a geographic quadcopter]. *Zapiski Gornogo instituta*, V. 254, P. 173–179.

2. Liu Y., Han K., Rasdorf W., 2022. Assessment and Prediction of Impact of Flight Configuration Factors on UAS-Based Photogrammetric Survey Accuracy. *Remote Sensing*, V. 14, № 16, P. 4119.
3. James M.R., Robson S., 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, V. 39, № 10, P. 1413–1420.
4. Przybilla H. J. et al., 2020. Interaction between direct georeferencing, control point configuration and camera self-calibration for RTK-based UAV photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V. 43., P. 485-492.
5. Štroner M. et al., 2021. Photogrammetry using UAV-mounted GNSS RTK: Georeferencing strategies without GCPs. *Remote Sensing*, V. 13, № 7, P. 1336.
6. Sanz-Ablanedo E. et al., 2020. Reducing systematic dome errors in digital elevation models through better UAV flight design. *Earth Surface Processes and Landforms*, V. 45, № 9, P. 2134-2147.
7. Senn J. A. et al., 2022. On-site geometric calibration of RPAS mounted sensors for SfM photogrammetric geomorphological surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, V. 47, № 6, P. 1615-1634.
8. Forlani G. et al., 2020. UAV block georeferencing and control by on-board gnss data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V. 43, P. 9-16.
9. Nesbit P.R., Hubbard S.M., Hugenholtz C.H., 2022. Direct georeferencing UAV-SfM in high-relief topography: Accuracy assessment and alternative ground control strategies along steep inaccessible rock slopes. *Remote Sensing*, V. 14, № 3, P. 490.
10. Dai W. et al., 2023. Enhancing UAV-SfM Photogrammetry for Terrain Modeling from the Perspective of Spatial Structure of Errors. *Remote Sensing*, V. 15, № 17, P. 4305.
11. Teppati Losè L., Chiabrando F., Giulio Tonolo F., 2020. Boosting the timeliness of UAV large scale mapping. Direct georeferencing approaches: Operational strategies and best practices. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, V. 9, № 10, P. 578.
12. Famiglietti N. A. et al., 2021. A test on the potential of a low cost unmanned aerial vehicle RTK/PPK solution for precision positioning. *Sensors*, V. 21, № 11, P. 3882.
13. Cledat E. et al., 2020. Mapping quality prediction for RTK/PPK-equipped micro-drones operating in complex natural environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, V. 167, P. 24-38.
14. Taddia Y., Stecchi F., Pellegrinelli A., 2020. Coastal mapping using DJI Phantom 4 RTK in post-processing kinematic mode. *Drones*, V. 4, № 2, P. 9.
15. Liu X. et al., 2022. Accuracy assessment of a UAV direct georeferencing method and impact of the configuration of ground control points. *Drones*, V. 6, № 2, P. 30.
16. Gomes Pessoa G. et al., 2021. Assessment of UAV-based digital surface model and the effects of quantity and distribution of ground control points. *International Journal of Remote Sensing*, V. 42, № 1, P. 65–83.
17. Pravila osushchestvleniya marksheiderskoi deyatel'nosti: utv. Rostekhnadzorom 19.05.2023 : vvod. v deistvie s 01.09.2023 [Rules for the implementation of surveying activities: approved by Rostekhnadzor on 05/19/2023]. Konsul'tantPlyus: elektron. fond pravovoi i normativ.-tekhn. inform. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_448564/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_448564/) (data obrashcheniya: 22.12.2024).
18. Kameyama S., Sugiura K., 2021. Effects of differences in structure from motion software on image processing of unmanned aerial vehicle photography and estimation of crown area and tree height in forests. *Remote Sensing*, V. 13, № 4, P. 626.
19. Casella V. et al., 2020. Accuracy assessment of a UAV block by different software packages, processing schemes and validation strategies. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, V. 9, № 3, P. 164.

20. GOST R 59562–2021 "S"emka aerofototopograficheskaya. Tekhnicheskie trebovaniya'. Federal'noe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 10 iyunya 2021 g. N 542-st. [GOST R 59562-2021 "Aerial photography. Technical requirements". Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated June 10, 2021 No. 542-art.] Natsional'nyi standart Rossiiskoi Federatsii. Moscow: Stan-dartinform, 2021.

21. Jiménez-Jiménez S.I. et al., 2021. Digital terrain models generated with low-cost UAV photogrammetry: Methodology and accuracy // *ISPRS International Journal of Geo-Information*, V. 10, № 5, P. 285.

22. Zimmerman T., Jansen K., Miller J., 2020. Analysis of UAS flight altitude and ground control point parameters on DEM accuracy along a complex, developed coastline. *Remote Sensing*, V. 12, № 14, P. 2305.

УДК 536.242

**Леуткин Александр Аркадьевич**  
инженер,  
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала  
Сибирского отделения РАН,  
630091, г. Новосибирск,  
ул. Красный проспект, 54  
e-mail: [leutkin-alexandr@rambler.ru](mailto:leutkin-alexandr@rambler.ru)

**Кордубайло Алексей Олегович**  
кандидат технических наук,  
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала  
Сибирского отделения РАН  
e-mail: [kordubaylo\\_ao@mail.ru](mailto:kordubaylo_ao@mail.ru)

### **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОЛОТА**

*Аннотация:*

*В статье представлен анализ эффективности систем охлаждения катушек электромагнитного молота, имеющего металлический корпус. Исследованы различные варианты заполнения свободного пространства между поверхностью катушек и корпусом: воздух, трансформаторное масло, компаунд «Силагерм-2113» и активное охлаждение катушек трансформаторным маслом по замкнутому контуру. Моделирование тепловых процессов выполнено в программе конечноэлементного анализа FEMM 4.2. Установлено, что наибольшей эффективностью обладает активное масляное охлаждение. При невозможности организации такового наиболее эффективным вариантом является размещение слоя компаунда «Силагерм-2113» между поверхностью катушек и корпусом молота. При этом другие полости конструкции должны быть заполнены трансформаторным маслом.*

*Ключевые слова:* электромагнитный молот, силовая катушка, тепловые процессы, моделирование, эквивалентный ток, имитационная модель, тепловыделение, тепловой поток, конечноэлементный анализ.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.147

**Leutkin Alexander A.**  
Institute of Mining n.a. Chinakal,  
Siberian Branch of RAS,  
54 Krasny Prospekt,  
630091 Novosibirsk  
e-mail: [leutkin-alexandr@rambler.ru](mailto:leutkin-alexandr@rambler.ru)

**Kordubailo Alexey O.**  
Candidate of Technical Sciences,  
Institute of Mining n.a. Chinakal,  
Siberian Branch of RAS  
e-mail: [kordubaylo\\_ao@mail.ru](mailto:kordubaylo_ao@mail.ru)

### **EFFICIENCY ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC HAMMER COOLING SYSTEMS**

*Abstract:*

*The article presents an analysis of the efficiency of cooling systems for coils of an electromagnetic hammer having a metal body. The paper deals with various options for filling the free space between the surface of the coils and the housing: air, transformer oil, Silagerm-2113 compound and active cooling of coils with transformer oil in a closed circuit. Modeling of thermal processes was performed in the FEMM 4.2 finite element analysis program. It was found that active oil cooling has the highest efficiency. If it is impossible to organize one, the most effective option is to place a layer of Silagerm-2113 compound between the surface of the coils and the hammer body. At the same time, other parts of the structure have to be filled with transformer oil.*

*Key words:* electromagnetic hammer, power coil, thermal processes, modeling, equivalent current, simulation model, heat dissipation, heat flow, finite element analysis.

### *Введение*

Электромагнитные молоты достаточно широко используются в промышленности. На их основе созданы виброисточники [1 – 6] для повышения нефтеотдачи пластов и дебита нефтяных скважин, установки для разрушения негабаритов в карьерах [7], проводятся исследования по созданию адаптивных копровых установок [8]. Преимуществами этого устройства являются экологичность и относительная простота изготовления [9]. Типовая конструкция такого молота имеет боек,двигающийся внутри трубчатой диамагнитной направляющей, на которой установлены две силовые катушки индуктивности, питаемые импульсами постоянного тока. Возвратно-поступательное движение бойка обеспечивается своевременным переключением питания катушек. При работе электромагнитных молотов за счет протекания токов по обмоткам электромагнитов происходит выделение большого количества тепловой энергии [10]. Во избежание перегрева обмоток этот тепловой поток должен максимально эффективно отводиться от поверхности обмотки в окружающую среду. Исследованию процессов теплообмена

и тепловой защиты молотов посвящена работа [11], из которой следует, что уравнение теплового баланса – многопараметрическая функция. На процесс теплопередачи влияют размеры катушек и корпусов, физические свойства материалов, их тепловые сопротивления и коэффициенты теплопроводности, режимы работы молота, продолжительность включения, действующие токи и другие параметры. Для каждой конструкции и геометрии электромагнитных молотов задача тепловой защиты должна решаться индивидуально. В настоящей работе проведен анализ систем охлаждения электромагнитного молота скважинного виброисточника [12], работающего в нагнетательной скважине, используемой для сброса воды в пласт. В нем катушки установлены в герметичном стальном корпусе, обеспечивающем его защиту от неблагоприятных внешних условий: высокого давления и агрессивных сред.

Такая конструкция имеет существенный недостаток – затрудненное охлаждение внешней поверхности катушек молота, так как отсутствует доступ внешней среды внутрь корпуса. Плотность тока в катушках составляет  $3 - 5 \text{ А/мм}^2$ , активное сопротивление –  $1-1,5 \text{ Ом}$ , что обеспечивает выделение до  $1,5 \text{ кВт}$  тепловой мощности. При таких условиях невозможна длительная работа молота без охлаждения.

#### Постановка задачи

Проблема работы заключается в обеспечении максимально эффективного отвода тепла от катушки в окружающую среду.

В конструкции молота между обмотками катушек и корпусом присутствует конструктивный зазор, необходимый для прокладки коммуникаций вдоль катушек молота (рис. 1). Этот зазор можно использовать в целях охлаждения катушек. Кроме этого, в конструкции имеются свободные полости выше и ниже катушки. Рассмотрены несколько вариантов наполнителей зазора и свободных полостей: 1 – зазор и полости заполнены воздухом; 2 – зазор и полости заполнены трансформаторным маслом; 3 – зазор заполнен компаундом «Силагерм-2113», а полости – трансформаторным маслом; 4 – производится активное охлаждение катушек трансформаторным маслом с организацией принудительной циркуляции.

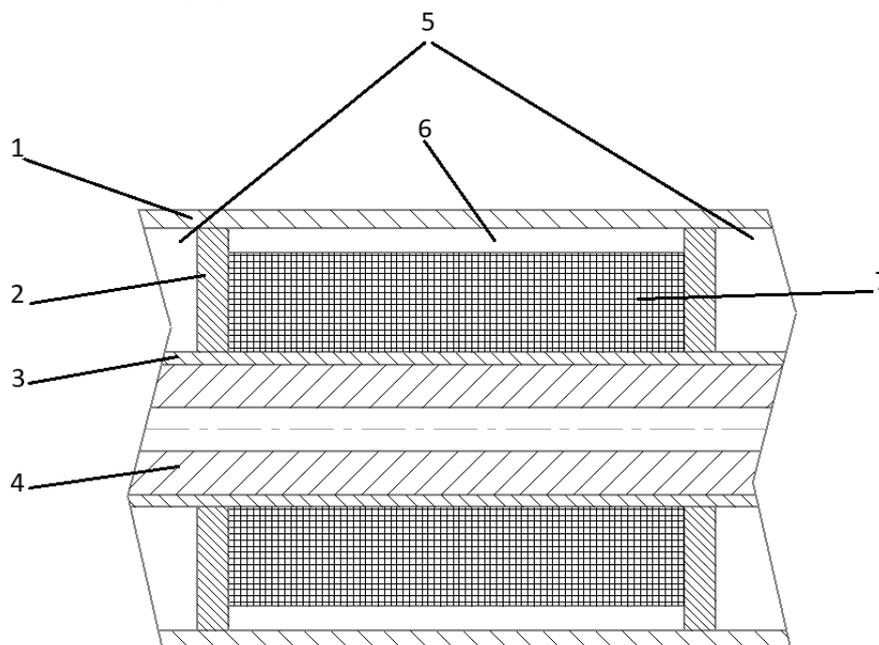


Рис. 1. Продольное сечение катушки молота:  
1 – внешний стальной корпус; 2 – стальной полюс катушки;  
3 – немагнитная направляющая бойка; 4 – стальной боек молота; 5 – полости конструкции;  
6 – зазор между катушкой и корпусом; 7 – силовая катушка

Целью работы является исследование эффективности охлаждения катушек электромагнитного молота в зависимости от материалов заполнения внутренних полостей молота.

Для сравнительного анализа описанных конструкций предлагается ввести безразмерный коэффициент эффективности теплоотвода от катушки:

$$K_1 = \frac{T_A}{T_i}, \quad (1)$$

где  $T_i$  – температура катушек при использовании исследуемого метода охлаждения;  $T_A$  – температура катушек при использовании воздушного охлаждения.

Кроме того, предлагается ввести коэффициент передачи тепла корпусу молота от катушек, характеризующий соответствие температуры корпуса в зоне расположения катушек и фактической температуры катушек:

$$K_2 = \frac{T_i}{T_C}, \quad (2)$$

где  $T_i$  – температура катушек при использовании исследуемого метода охлаждения;  $T_C$  – температура корпуса молота при тех же условиях.

#### Материалы и методы исследования

Исследование выполнено посредством моделирования тепловых потоков от катушек электромагнитного молота в программе FEMM 4.2. Эта программа позволяет создавать имитационные модели реальных объектов с высокой реалистичностью [13]. В имитационной модели учтены тепловые характеристики материалов реального молота. Так как основным тепловыделяющим элементом являются катушки, необходимо рассчитать объемный тепловой поток, создаваемый ими. Тепловой поток определяется рабочими токами, сопротивлением катушек и режимом работы молота; объемом меди в катушке.

Молот работает с перерывами, длительность работы и простоя одинакова и составляет 5 мин. Необходимо рассчитать эквивалентный ток катушек:

$$I_{\Sigma} = I_K * D * ПВ = 24 * 0,5 * 0,5 = 6 \text{ А}, \quad (3)$$

где  $I_K$  – амплитуда импульсов тока катушек, А;  $D$  – коэффициент заполнения импульсов тока катушек, равный 0,5; ПВ – коэффициент продолжительности включения, равный 0,5.

Мощность, выделяемая каждой катушкой при протекании эквивалентного тока:

$$P_K = I_{\Sigma}^2 * R_K = 6^2 * 1,3 = 46,8 \text{ Вт}, \quad (4)$$

где  $I_{\Sigma}$  – эквивалентный ток катушки, А;  $R_K$  – активное сопротивление катушки, Ом.

Объем меди в теле катушки:

$$\begin{aligned} V_K &= \frac{\pi}{4} * (D_0^2 - D_1^2) * h = \\ &= \frac{3,14}{4} * (0,08^2 - 0,06^2) * 0,615 \approx 1,35 * 10^{-3} \text{ м}^3, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $D_1$  – внутренний диаметр катушки, м;  $D_0$  – внешний диаметр катушки, м;  $h$  – высота катушки, м. Коэффициент заполнения окна катушки обмоточным проводом равен единице.

Расчет объемного теплового потока:

$$q_V = \frac{P_K}{V_K} = \frac{46,8}{1,35 * 10^{-3}} \approx 34 \text{ 667 Вт/м}^3, \quad (6)$$

где  $V_K$  – объем катушки;  $P_K$  – активная мощность, выделяемая катушкой.

Полученная величина объемного теплового потока является исходной для имитационной модели в программе FEMM 4.2. Для модели заданы следующие граничные условия: окружающая среда – вода с температурой 15 °С, что соответствует рабочему режиму скважинного виброисточника в нагнетательной скважине.

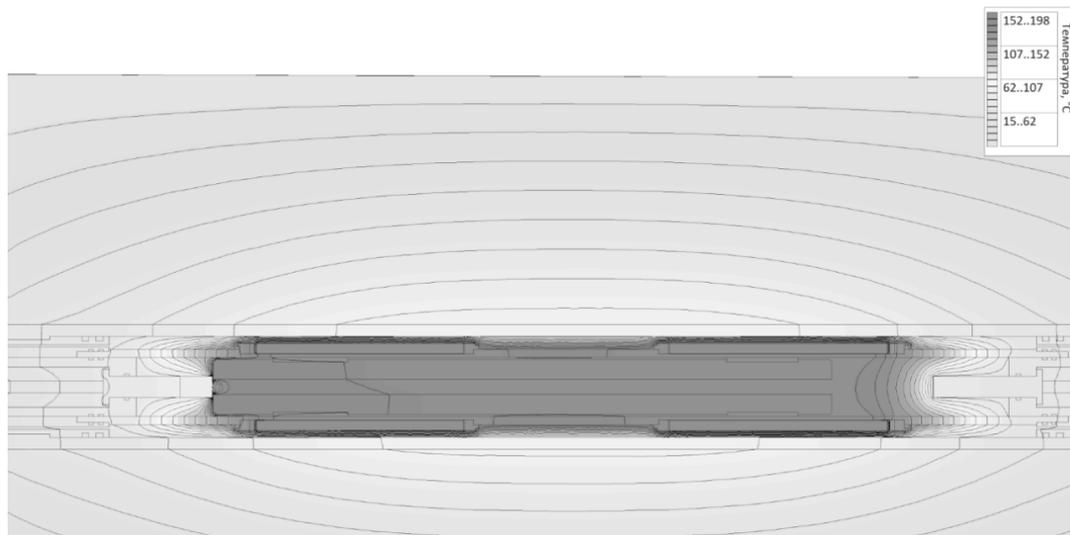


Рис. 2. Температурная карта молота при заполнении полостей воздухом

Температура катушек при воздушном заполнении зазора и полостей составляет  $197\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 2). Это предельно допустимая температура для обмоточного провода и паяных соединений. Перегрев выше этой температуры может привести к плавлению припоя и разрушению эмалевой изоляции обмоточного провода. Поэтому такое значение температуры будет использоваться как эталонное при расчете коэффициента эффективности охлаждения. Следовательно,  $T_A=197\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура корпуса молота в зоне расположения катушек составляет  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Расчет коэффициента передачи тепла корпусу от катушек:

$$K_2 = \frac{T_i}{T_c} = \frac{197}{95} \approx 2,07. \quad (7)$$

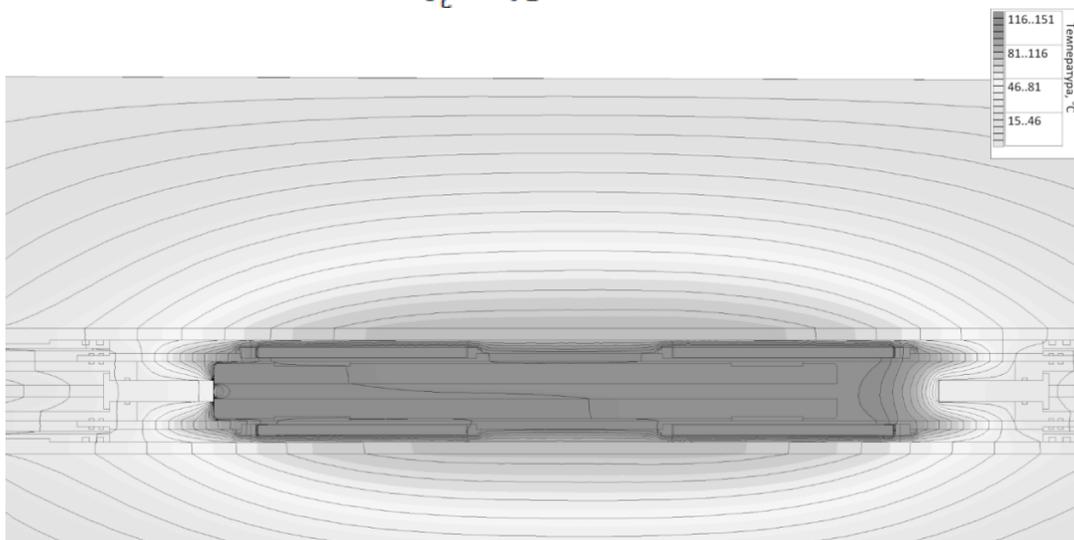


Рис. 3. Температурная карта молота при заполнении трансформаторным маслом

Температура катушек молота при заполнении полостей трансформаторным маслом составляет  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 3). Расчет коэффициента эффективности охлаждения:

$$K_1 = \frac{T_A}{T_i} = \frac{197}{150} \approx 1,31. \quad (8)$$

Температура корпуса молота в зоне расположения катушек составляет  $104\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Расчет коэффициента передачи тепла корпусу от катушек:

$$K_2 = \frac{T_i}{T_c} = \frac{150}{104} \approx 1,44. \quad (9)$$

Ввести компаунд «Силагерм-2113» во все полости молота технологически сложно, поэтому применяется комбинированная конструкция: в пространство между катушками и корпусом помещен компаунд, а остальные полости заполнены трансформаторным маслом (рис. 4).

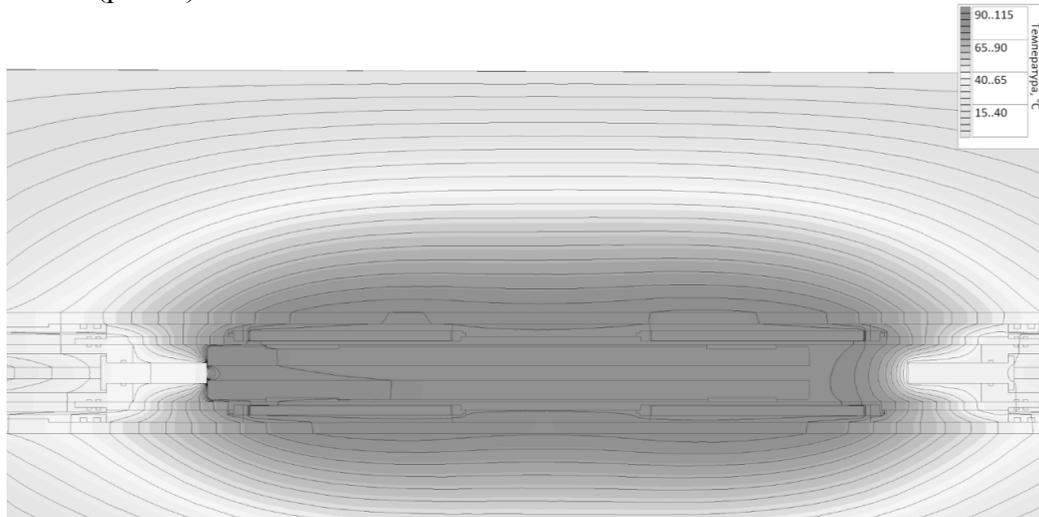


Рис. 4. Температурная карта молота при заполнении пространства между катушками и корпусом компаундом «Силагерм-2113», а остальных полостей – трансформаторным маслом

Температура катушек молота при использовании комбинированной технологии заполнения составляет 115 °С. Расчет коэффициента эффективности охлаждения:

$$K_1 = \frac{T_A}{T_i} = \frac{197}{115} \approx 1,71. \quad (10)$$

Температура корпуса молота в зоне расположения катушек составляет 110 °С. Расчет коэффициента передачи тепла корпусу от катушек:

$$K_2 = \frac{T_i}{T_C} = \frac{115}{110} \approx 1,05. \quad (11)$$

Активное охлаждение катушек реализовано методом создания принудительной циркуляции масла через контур с внешним радиатором (рис. 5).

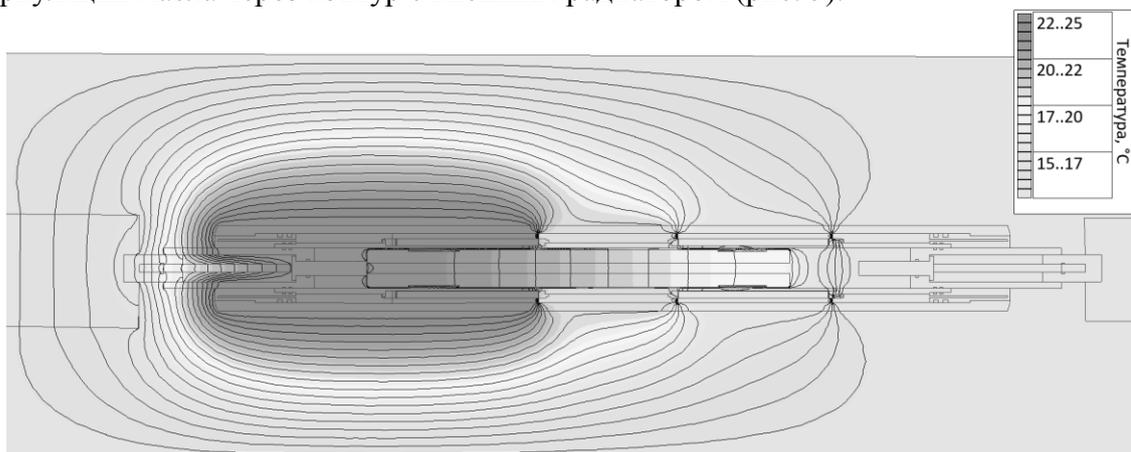


Рис. 5. Температурная карта молота при активном охлаждении катушек

Максимальная температура катушек молота при активном масляном охлаждении составляет 24 °С. Расчет коэффициента эффективности охлаждения:

$$K_1 = \frac{T_A}{T_i} = \frac{197}{24} \approx 8,21. \quad (12)$$

Температура корпуса молота в зоне расположения катушек составляет 23 °С. Расчет коэффициента передачи тепла корпусу от катушек:

$$K_2 = \frac{T_i}{T_c} = \frac{24}{23} \approx 1,04. \quad (13)$$

Результаты моделирования обобщены в табл. 1.

Таблица 1

**Сравнение эффективности систем охлаждения катушек  
электромагнитного молота**

Охлаждающая среда	Температура катушек по результатам моделирования, °С	Коэффициент эффективности охлаждения	Коэффициент передачи тепла корпусу от катушек
Воздух	197	1	2,07
Трансформаторное масло	150	1,31	1,44
Комбинированная, компаунд и трансформаторное масло	115	1,71	1,05
Принудительная циркуляция трансформаторного масла	24	8,21	1,04

#### *Выводы*

Анализ результатов теплового моделирования электромагнитного молота показал высокую эффективность активного масляного охлаждения катушек с принудительной циркуляцией: коэффициент эффективности охлаждения составил 8,21, температура катушек в номинальном режиме работы не превышает 24 °С при температуре корпуса 23 °С. При невозможности организации циркуляции масла наиболее целесообразным вариантом является использование компаунда «Силагерм-2113» с заполнением остальных полостей молота трансформаторным маслом. Такая конструкция обеспечивает температуру катушек не более 115 °С при температуре корпуса 110 °С. Эта особенность позволяет эффективно использовать охлаждающую способность среды, в которую помещен молот.

#### **Список литературы**

1. Газизов А.А., 2002. *Увеличение нефтеотдачи неоднородных пластов на поздней стадии разработки*. Москва: ООО «Недра-Бизнесцентр», 639 с.
2. Sheng J. J., Leonhardt B. and Azri N., 2015. Status of polymer-flooding technology, *J. Can. Petr. Technol.*, Vol. 54, Issue 2, P. 116 – 126.
3. Bera A. and Babadagli T., 2015. Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen recovery and future prospects: *A review, Applied Energy*, Vol. 151, P. 206 – 226.
4. Delamaide E., Bazin B., Rousseau D. and Degre G., 2014. Chemical EOR for heavy oil: The Canadian experience, *SPE EOR Conference at oil and gas West Asia 2014: Driving integrated and innovative EOR*, P. 566 – 596.
5. Esmaeilzadeh P., Sadeghi M. T., Fakhroueian Z., Bahramian A. and Norouzbeigi R., 2015. Wettability alteration of carbonate rocks from liquid-wetting to ultra gas-wetting using TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> and CNT nanofluids containing fluorochemicals, for enhanced gas recovery. *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, Vol. 26, P. 1294 – 1303.

6. Дыбленко В.П., Марчуков Е.Ю., Туфанов И.А. и др., 2012. Волновые технологии и их использование при разработке месторождений нефти с трудноизвлекаемыми запасами. Москва: РЕАН, 344 с.
7. Li Y., Shan H. and Huang S., 2018. Study on failure evolution process of fractured rock specimen under axial force. *Proceedings - 10th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA 2018*, vol. 2018-January, P. 387–390.
8. Al-Rawashdeh A.Y. and Pavlov V.E., 2024. Study of operating modes of electromagnetic hammer with adjustable impact energy and blow frequency. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, Mar., vol. 15, no. 1, p. 64.
9. Wróblewski A., Krot P., Zimroz R., Mayer T. and Peltola J., 2023. Review of linear electric motor hammers—an energy-saving and eco-friendly solution in industry, *Energies*, Jan., vol. 16, no. 2, P. 959.
10. Бессонов Л.А., 2016. *Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров*. 12-е изд., исправ. и доп. Москва: Издательство Юрайт, 701 с.
11. Karimi G., Bhattacharya S., Gould R., Tremelling D., 2014. Thermomagnetic liquid cooling: A novel electric machine thermal management solution. *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. URL: <https://www.proceedings.com/content/024/024070webtoc.pdf> (дата обращения 2.03.2025)
12. Пат. 2642199 Российская Федерация, МПК E21B23/01 (2006.01). *Скважинный сейсмоисточник* / Б. Ф. Симонов, Ю. В. Погарский, А. О. Кордубайло, Ю. А. Лебедев; заявитель и патентообладатель ПАО «СилэнСейсмоимпульс»; заявл. 19.04.2017; опубл. 24.01.2018; Бюл. № 3, 11 с.
13. David M., 2015. *Finite Element Method Magnetics: User Manual*, 160 p. URL: <https://pdfslide.us/documents/finite-element-method-magnetics.html> (дата обращения 5.03.2025)

## References

1. Gazizov A.A., 2002. Uvelichenie nefteotdachi neodnorodnykh plastov na pozdnei stadii razrabotki [Increased oil recovery of heterogeneous formations at a late stage of development]. Moscow: ООО "Nedra-Biznestsentr", 639 p.
2. Sheng J. J., Leonhardt B. and Azri N., 2015. Status of polymer-flooding technology, *J. Can. Petr. Technol.*, Vol. 54, Issue 2, P. 116 – 126.
3. Bera A. and Babadagli T., 2015. Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen recovery and future prospects: *A review, Applied Energy*, Vol. 151, P. 206 – 226.
4. Delamaide E., Bazin B., Rousseau D. and Degre G., 2014. Chemical EOR for heavy oil: The Canadian experience, SPE EOR Conference at oil and gas West Asia 2014: *Driving integrated and innovative EOR*, P. 566 – 596.
5. Esmailzadeh P., Sadeghi M. T., Fakhroueian Z., Bahramian A. and Norouzbeigi R., 2015. Wettability alteration of carbonate rocks from liquid-wetting to ultra gas-wetting using TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> and CNT nanofluids containing fluorochemicals, for enhanced gas recovery. *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, Vol. 26, P. 1294 – 1303.
6. Dyblenko V.P., Marchukov E.Yu., Tufanov I.A. i dr., 2012. Volnovye tekhnologii i ikh ispol'zovanie pri razrabotke mestorozhdenii nefti s trudnoizvlekaemymi zapasami [Wave technologies and their use in the development of oil fields with hard-to-recover reserves]. Moscow: REAN, 344 p.
7. Li Y., Shan H. and Huang S., 2018. Study on failure evolution process of fractured rock specimen under axial force. *Proceedings - 10th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA 2018*, vol. 2018-January, P. 387–390.

8. Al-Rawashdeh A.Y. and Pavlov V.E., 2024. Study of operating modes of electromagnetic hammer with adjustable impact energy and blow frequency. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, Mar., vol. 15, no. 1, p. 64.

9. Wróblewski A., Krot P., Zimroz R., Mayer T., and Peltola J., 2023. Review of linear electric motor hammers—an energy-saving and eco-friendly solution in industry, *Energies*, Jan., vol. 16, no. 2, P. 959.

10. Bessonov L.A., 2016. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektricheskie tsepi: uchebnik dlya bakalavrov [Theoretical foundations of electrical engineering. Electrical circuits: a textbook for bachelors]. 12-e izd., isprav. i dop. Moscow: Izdatel'stvo Yurait, 701 p.

11. Karimi G., Bhattacharya S., Gould R. Tremelling D., 2014. Thermomagnetic liquid cooling: A novel electric machine thermal management solution. *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. URL: <https://www.proceedings.com/content/024/024070webtoc.pdf> (data obrashcheniya 2.03.2025)

12. Pat. 2642199 Rossiiskaya Federatsiya, MPK E21V23/01 (2006.01). Skvazhinnyi seismoistochnik [Borehole seismic source] / B.F. Simonov, Yu.V. Pogarskii, A.O. Kordubailo, Yu.A. Lebedev; zayavitel' i patentoobladatel' PAO "SilenSeismoimpul's"; zayavl. 19.04.2017; opubl. 24.01.2018; Byul. № 3, 11 p.

13. David M., 2015. *Finite Element Method Magnetics: User Manual*, 160 p. URL: <https://pdfslide.us/documents/finite-element-method-magnetics.html> (data obrashcheniya 5.03.2025)