



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

Разрушение горных
пород и массивов

Обогащение

Новые методы
исследований

СЕТЕВОЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЕ НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ISSN 2313-1586

ПРОБЛЕМЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

PROBLEMS OF SUBSOIL USE



Сайт
<http://trud.igduran.ru>

Выпуск 4 (43)

2024

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

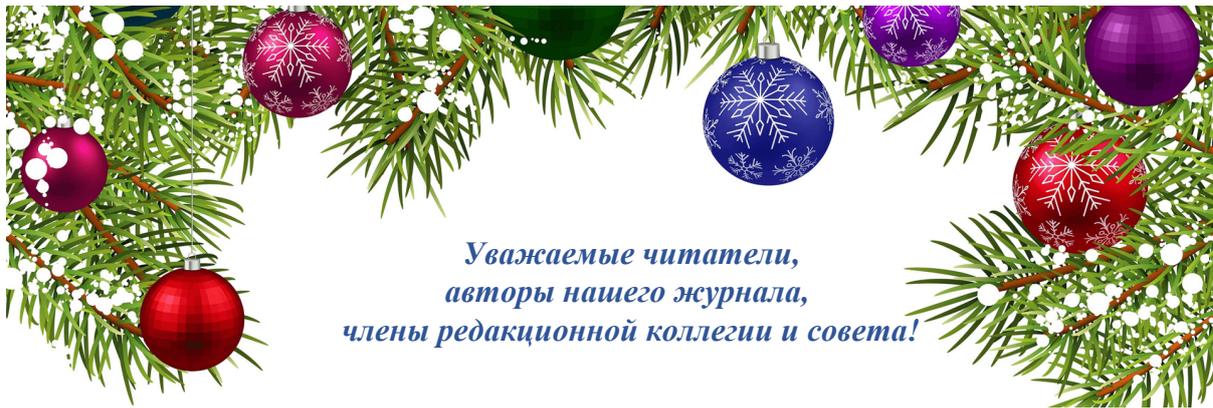
Адрес редакции: 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, д. 58, тел. (343)350-35-62

Сайт издания: trud.igduran.ru

Выпускающий редактор: Е.А. Катаева

Редактор: О.А. Истомина

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



*Уважаемые читатели,
авторы нашего журнала,
члены редакционной коллегии и совета!*

Предлагаем вам четвертый выпуск издания «Проблемы недропользования» за 2024 год. Этот номер посвящен теории проектирования и геотехнологическим проблемам отработки месторождений, геомеханическим и геодинамическим процессам при освоении недр, разрушению горных пород и массивов обогащения, новым методам исследований. Анонс журнала представлен на сайте журнала, а также на сайте ИГД УрО РАН и в соцсетях.

Подошел к концу 2024 год – 10-й год в жизни нашего журнала. Год был очень насыщенным!

Мы выпустили 4 номера журнала. Первый номер нашего журнала был посвящен юбилею постоянного автора нашего журнала, специалиста в области карьерной геотехники, заместителя директора Института по научной работе, доктора технических наук, действительного члена Академии горных наук – Андрея Валерьевича Глебова.

Два номера журнала были специальными. Второй номер журнала был посвящен итогам сессии по вопросам безопасности и эффективности горного производства XI Уральского горнопромышленного форума. В третьем специальном выпуске размещены статьи по результатам докладов молодых ученых XVII Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (с участием иностранных ученых), проведенной Институтом горного дела УрО РАН. Конференция проходила на шести площадках в таких городах, как Екатеринбург, Апатиты, Хабаровск, Пермь, Новосибирск, Якутск, объединенных посредством телемоста.

Мы много работали и много сделали вместе в уходящем году! Подготовка и рецензирование статей, редакторская работа, творческие споры в поиске истины, активное общение – все это было интенсивным и содержательным. Очень надеюсь, что и в новом году мы будем так же активно сотрудничать. Это прежде всего будет способствовать росту востребованности нашего издания.

Традиционно выражаю искреннюю благодарность команде журнала за созидательный труд, профессионализм, упорство и преданность общему делу, которые доставляют удовольствие от проделанной работы!

Надеюсь, что в новом году журнал получит признание экспертного сообщества и будет включен в индексацию SCOPUS, займет место в Перечне ВАК.

Пусть наступающий год станет для вас временем побед и достижений, профессиональных успехов и новых знаний, которые помогут вам двигаться вперед!

Поздравляю вас с наступающим 2025 годом! Пусть он будет наполнен множеством радостных событий и счастливых моментов, а ваше душевное состояние – гармонией и спокойствием!

Счастья и успехов в Новом году!

Главный редактор
Корнилков С.В.



Содержание

ТЕОРИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

- Журавлев А.Г., Кардашин Е.Д.** Моделирование грузопотоков при функционировании дробильно-конвейерного комплекса карьера **6**
- Рожков А.А., Барановский К.В., Дьячков П.С.** Исследование влияния горно-геологических и горнотехнических факторов на величину потерь обогащенной рудной мелочи при выемке пологих залежей средней мощности **16**

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОСВОЕНИИ НЕДР

- Антонов В.А.** Закономерности изменения прочности образцов и массива горных пород **31**
- Коновалова Ю.П.** Изменение напряженно-деформированного состояния массива горных пород под воздействием современных геодинамических движений на различных временных интервалах **46**
- Яковлев А.В., Шимкив Е.С.** Методика расчетного обоснования устойчивости уступа с протяженной трещиной в гравитационно-тектоническом поле напряжений **56**
- Балек А.Е., Харисов Т.Ф., Масальский Н.А., Коптяков Д.А.** Исследование темпа набора прочностных и деформационных свойств бетона в шахтных и лабораторных условиях **64**
- Мельник В.В., Бермухамбетов В.А., Князбаева Ж.Р.** Геофизические исследования структурно-тектонических и гидрогеологических особенностей массива горных пород в районе очистных работ шахты «10-летие независимости Казахстана»..... **77**
- Винальева Е.А.** Необходимость исследования продолжительности процесса сдвижения после окончания горных работ с использованием инструментальных наблюдений **87**

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД И МАССИВОВ

- Яковлев В.Л., Жариков С.Н., Реготунов А.С., Кутуев В.А., Меньшиков П.В.** Комплексное обоснование взрывной нагрузки с учетом информации об изменчивости массива горных пород в границах выемочного блока **96**
- Флягин А.С.** Теоретическая оценка влияния физических характеристик эмульсионных промежуточных детонаторов на характеристики детонационного процесса **109**

ОБОГАЩЕНИЕ

- Драпей А.В., Козловская М.М., Мюситинская В.А., Прохоров К.В.** Сравнительный анализ флотационных реагентов для обогащения золотосульфидных руд **118**

НОВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

- Ногин С.А.** Организация датасета на основе данных маркшейдерских наблюдений **127**
- Далатказин Т.Ш., Зуев П.И.** Исследования возможности применения эманационной съемки для выявления подземных горных выработок **135**
- Далатказин Т.Ш., Зуев П.И.** Экспериментальные исследования возможности применения радонометрии для выявления участков разуплотнения в подработанном горном массиве **143**



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

УДК 622.682:621.926]:004.94

Журавлев Артем Геннадиевич

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией транспортных
систем карьеров и геотехники,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, д. 58
e-mail: juravlev@igduran.ru

Кардашин Егор Дмитриевич

младший научный сотрудник,
лаборатория транспортных систем карьеров
и геотехники,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: kardashin@igduran.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРУЗОПОТОКОВ
ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ
ДРОБИЛЬНО-КОНВЕЙЕРНОГО
КОМПЛЕКСА КАРЬЕРА****Аннотация:*

Практика применения автомобильно-конвейерного транспорта в карьерах показывает, что его параметры нередко не соответствуют фактическим параметрам и динамике развития горных работ в той части, которая обеспечивает его рациональное и производительное использование с максимальным экономическим эффектом. Проблема наиболее характерна для конвейерного звена этого вида транспорта, основой которого является дробильно-конвейерный комплекс. Причины в том числе заключаются в отсутствии применимых на практике инструментов оптимизации параметров потоков горной массы в ДКК, в том числе обосновании рациональной вместимости бункеров, структурной схемы дробильно-перегрузочной установки, обосновании рациональной производительности оборудования и его количества по видам, необходимости организации распараллеливания рудопотоков в пределах ДКК, а также резервирования оборудования по мощности и/или надежности. В связи с этим в ИГД УрО РАН ведется работа по созданию имитационной модели дробильно-конвейерного комплекса, обеспечивающей решение вышеуказанных задач. В статье представлены обоснованные в ходе исследований структура и алгоритм модели, а также результаты апробации имитационной модели, реализованной на примере однолинейного ДКК с ДПУ на базе одной конусной дробилки. Подтверждена работоспособность модели, возможность ее применения для подбора рациональных параметров ДКК путем перебора вариантов, обеспечивающих стабильность работы ДКК по грузопотоку на выходе штабелеукладчика.

Ключевые слова: компьютерное имитационное моделирование, дробильно-конвейерный комплекс (ДКК), дробильно-перегрузочная установка (ДПУ), рациональные параметры, циклично-поточная технология (ЦПТ).

DOI: 10.25635/2313-1586.2024.04.006

Zhuravlev Artem G.

Candidate of Technical Science,
Head of Laboratory for quarry transport
systems and geotechnics,
Institute of Mining UB RAS,
620219 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: juravlev@igduran.ru

Kardashin Egor D.

Junior Researcher,
Laboratory for quarry transport systems
and geotechnics,
Institute of Mining UB RAS
e-mail: kardashin@igduran.ru

**MODELING OF CARGO FLOWS DURING
THE OPERATION OF THE CRUSHING AND
CONVEYOR COMPLEX OF THE QUARRY***Abstract:*

The application praxis of automobile and conveyor transport in open pits shows that their parameters often do not correspond to the actual parameters and dynamics of development of mining operations in the part that provides their rational and productive use with maximum economic effect. The problem is most typical for the conveyor section of this transportation type, the basis of which is the crushing and conveyor complex (CCC). The reasons for are the lack in practical tools for optimizing the parameters of rock mass flows in the CCC, including justification of the rational capacity of hoppers, in structural scheme of the crushing and conveying plant, in justification of the rational productivity of equipment and its number by type, and in the need to organize the paralleling of ore flows within the CCC, as well as the redundancy of equipment by capacity and/or reliability. In this regard, the work on creation of a simulation model of crushing and conveyor complex, providing the solution of the above mentioned problems, is being carried out in the Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. The article presents the structure and algorithm of the model substantiated in the course of research, as well as the results of approbation of the simulation model realized on the example of a single-line CCC with CRP on the basis of one cone crusher. The performance of the model was confirmed, the possibility of its application for selection of rational parameters of CCC by means of selection of variants ensuring the stability of CCC operation in terms of load flow at the stacker output was confirmed.

Key words: computer simulation modeling, crushing and conveying complex (CCC), crushing and reloading plant (CRP), rational parameters, cyclic-flow technology (CFT).

* Исследования выполнены в рамках Государственного задания № 075-00412-22 ПР. Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005), пер. № 123012300005-3.

Введение

Развитие транспортной системы вслед за развитием карьера (его углубкой и расширением) является необходимым элементом устойчивого функционирования горнотехнической системы горнодобывающего предприятия [1]. Применение для каждого этапа освоения месторождения открытым способом рационального вида транспорта обеспечивает экономию затрат на перевозку горной массы, а следовательно, позволяет направить эту экономию на более полное освоение запасов месторождения.

Одним из видов промышленного транспорта, обеспечивающего существенную экономию в сравнении с автомобильным, является конвейерный. Он позволяет сократить эксплуатационные затраты в 3 – 4 раза, однако в современных условиях освоения месторождений по углубочной системе разработки не может выполнять функции сборочного транспорта и применяется на практике в основном в паре с карьерными автосамосвалами. Выбор рациональных параметров комбинированного автомобильно-конвейерного транспорта, применение которого часто именуется циклично-поточной технологией, влияет на его технико-экономические показатели, которые в отдельных случаях могут быть даже хуже, чем автомобильный транспорт. В частности, конвейерный транспорт малоэффективен при незначительном объеме перевозок (менее 5 млн т/год), при нерациональных технических параметрах комплекса, не соответствующих горно-технологическим условиям [2].

Поэтому развитие методик обоснования и расчета рациональных (оптимальных) параметров автомобильно-конвейерного транспорта является актуальной задачей [3, 4]. Основная его часть – ДКК. Следовательно, важным вопросом является развитие методик для определения рациональных его параметров [5 – 10].

Развитие цифровых технологий обеспечивает возможность применения имитационного компьютерного моделирования для решения вышеуказанных задач [11]. В ИГД УрО РАН разрабатывается программное обеспечение (ПО) для моделирования функционирования транспортных систем карьеров [12, 13] и, в частности, ДКК, применяемого в составе внутрикарьерного транспорта.

Среди прочих задач, которые могут решаться с применением компьютерного моделирования, важную роль играет выбор рациональных технологических и связанных с ними технических параметров ДКК с учетом рациональной организации грузопотоков. Его целью является стабилизация грузопотока, компенсация неравномерности подачи сборочного транспорта при передаче горной массы на поточный транспорт, обоснование рациональной производительности оборудования с учетом надежности и резервирования по производительности, а также технологического регламента функционирования комплекса и т.п.

Наиболее подходящим для этого является использование имитационного моделирования функционирования карьерного ДКК, которое позволяет воспроизводить динамику грузопотоков. Разработка соответствующей структуры программного обеспечения и его алгоритмов, а также апробация разработанного ПО и являются целью представленного исследования.

Методы

Для разработки алгоритмов выполнено обобщение методик расчета параметров функционирования дробильно-конвейерного комплекса.

Модель строится как имитационная с детерминированными (не вероятностными) исходными данными. Это позволяет подбирать рациональные параметры элементов ДКК методом вариантов, обеспечивая широкую универсальность самой модели. С этой целью воспроизведение потоков горной массы в ДКК осуществляется по принципу перемещения элементарных ее объемов от одного элемента ДКК к другому.

В рамках исследования имитационная модель принята в понимании, приведенном в [14] как совокупность элементов, имитирующих протекание изучаемого процесса, позволяющих достаточно просто и оперативно реализовать варианты расчеты.

В данном случае суть применения моделирования – в возможности учесть сложно предсказуемые расчетами взаимодействия в системе с многоэлементной структурой. Вероятностные характеристики играют второстепенную роль, поэтому исходные данные в модели задаются как детерминированные величины. При этом те из них, которые на реальном объекте подвержены значительному вероятностному изменению, принимаются как математическое ожидание соответствующего параметра, а установление значений математических ожиданий выполняется заблаговременно при сборе данных с реального объекта или нескольких аналогичных объектов.

Соответственно, модель строится на основе детерминированных расчетных алгоритмов без учета вероятностных характеристик ее элементов.

Для возможности варьировать структуру ДКК в модели он разбит на основные составляющие:

- дробильно-перегрузочная установка (ДПУ);
- ленточные конвейеры;
- оконечный (разгрузочный) агрегат, представленный в двух вариантах: складской штабелеукладчик или стакер, отвалообразователь.

Дробильно-перегрузочная установка детализирована по основному технологическому оборудованию: приемный бункер (предусматривается прямая загрузка конусной дробилки по принципу «работа под завалом», дробилка, разгрузочный (накопительный) бункер, пластинчатый питатель (возможно варьировать схему с одним или двумя пластинчатыми питателями), передаточный конвейер.

Результаты и их анализ

Исходя из поставленной задачи и вышеописанных особенностей разработана структура имитационной модели дробильно-конвейерного комплекса. Она представляет собой совокупность объектов с заданной вместимостью, приемной и пропускной способностью (производительностью), по которым перемещается горная масса. Свойства горной массы (например, насыпная плотность) меняются в каждом элементе ДКК отдельно по заданным алгоритмам с учетом исходных данных по мере ее преобразования (изменение крупности, особенности уплотнения в зависимости от формы насыпи и длительности нахождения в данном агрегате и т.п.).

Передача горной массы между элементами ДКК осуществляется по принципу: если есть свободный объем – передается в соответствии с производительностью одного и приемной способностью другого, если нет – накапливается. При заполнении элемента горной массой до номинальной вместимости прием им горной массы прекращается.

Для точного определения передаваемого объема горной массы между элементами ДКК в целом расчет ведется оригинальным способом: сначала параметры определяются предварительно, а затем повторным расчетом определяются точные значения.

Конусная дробилка детализирована как совокупность двух объемов: приемной части и камеры дробления, приемная и пропускная способность которых задаются в зависимости от типоразмера дробилки.

Такая структура модели позволяет воспроизводить движение горной массы по ДКК с высоким коэффициентом подобия (при верно заданных исходных данных), а также делает возможным изменять структуру ДКК, заменяя один вид агрегата другим (например, менять тип дробилки), а также разветвлять или объединять потоки (например, предусматривать выгрузку из бункера одним или двумя питателями на один и тот же конвейер).

Визуализация моделирования выполнена в трех основных окнах (рис.1):

- окно структуры ДКК, в котором можно выбрать интересующий элемент для детального отображения показателей имитационного моделирования;
- окно визуализации моделирования для выбранного элемента ДКК;
- окно с параметрами (исходными данными) элементов ДКК.

Вкладки с параметрами элементов ДКК

Окно визуализации моделирования для выбранного элемента ДКК

Form1

ДПУ 7200

Пит: 2880,00 м³/ч / 7200,00 т/ч
 Vпит: 0,00 м³ / 0,00 т
 Vчт: 0,00 м³ / 0,00 т
 Vрст: 0,36 м³ / 0,90 т

Гула в дробилке:
 0,0 т
 0,0 м³
 2,5 т/м³

Производительность:
 6500,0 т/ч
 2600,0 м³/ч

Всего: 0,0 т / 0,0 м³
 0,0 т 0,0 т
 0,0 м³ 0,0 м³

Выскамо:
 2,5 т
 1,0 м³

Пит: 2880,00 м³/ч / 7200,00 т/ч
 Vпит: 0,00 м³ / 0,00 т
 Vчт: 0,00 м³ / 0,00 т
 Vрст: 0,36 м³ / 0,90 т

Пит: 2880,00 м³/ч / 7200,00 т/ч
 Vпит: 0,00 м³ / 0,00 т
 Vчт: 0,00 м³ / 0,00 т
 Vрст: 0,36 м³ / 0,90 т

Самосвалов в очереди: 20

- ВелА3-75310
- ВелА3-75603
- ВелА3-75131
- ВелА3-7521
- ВелА3-7530
- ВелА3-75570
- ВелА3-75310
- ВелА3-75603
- ВелА3-75131
- ВелА3-7521

№3
 ВелА3-7530
 dВас = 0,52 т / 0,24 м³
 Vчек = 0,39 т / 0,07 м³
 0,07 %

№1
 ВелА3-75131
 dВас = 0,34 т / 0,15 м³
 Vчек = 0,33 т / 0,00 м³
 0,00 %

Q = 1,75 т
 V = 0,11 м³
 rо = 2,20 т/м³
 Ср = 0,00 см.
 Рр = 0,00 МПа

№2
 ВелА3-7521
 dВас = 0,49 т / 0,22 м³
 Vчек = 0,54 т / 0,05 м³
 0,05 %

№4
 ВелА3-75570
 dВас = 0,23 т / 0,11 м³
 Vчек = 0,28 т / 0,00 м³
 0,00 %

Управление

Старт

Пауза

Время: 5 с.

Общая структура ДКК

Рис. 1. Окно программного обеспечения для моделирования дробильно-конвейерного комплекса (разработано ИГД УрО РАН)

Апробация модели выполнена на примере рудного ДКК с тремя магистральными конвейерами, штабелеукладчиком, ДПУ на базе конусной дробилки с двумя бункерами и двумя пластинчатыми питателями под разгрузочным бункером. Наличие двух питателей обеспечивает их резервирование по надежности, предусматривается, что при выходе из строя одного из питателей второй может быть форсирован на непродолжительное время до 80 % суммарной номинальной производительности двух питателей.

Моделирование вариантов с разной интенсивностью и неравномерностью потока автосамосвалов, производительности дробилки и пластинчатых питателей, вместимостями бункеров ДПУ показали, что

– разработанная имитационная модель адекватно воспроизводит функционирование ДКК в соответствии с заданной его структурой и параметрами основных элементов;

– принятая структура и алгоритм модели обеспечивают возможность определять рациональные параметры элементов ДКК путем перебора вариантов при моделировании, в том числе по динамически изменяющимся показателям, например: по критерию стабилизации потока руды на конвейерной линии, по приемной способности ДПУ с учетом неравномерности и объемных показателей потока автосамосвалов и др.;

– благодаря выгрузке данных по результатам моделирования не только в виде сводных показателей, но и в виде потока данных (таблиц), имеется возможность передавать их в другое ПО для дополнительных расчетов, не предусмотренных в модели ДКК, что позволяет решать широкий круг задач в зависимости от специфики.

Моделирование показало, что одним из важных внешних факторов, который необходимо учитывать, является неравномерность прибытия автосамосвалов, поскольку она существенно влияет как на требуемую вместимость приемного бункера для компенсации колебаний, так и на резерв по номинальной производительности дробилки.

На рис. 2 и 3 приведен пример полученных при моделировании ДКК данных. Видно, что подобранная рационально вместимость приемного и разгрузочного бункеров обеспечивает стабилизацию потока руды, транспортируемой дробильно-конвейерным комплексом: на входе имеется стохастический неравномерный поток руды, доставляемой автосамосвалами, а на выходе из разгрузочного бункера имеет место постоянный рудопоток. Соответственно, далее по конвейерной линии (рис. 3) поток стабилен и изменяется только в зависимости от существенных перерывов в поставке руды автосамосвалами к ДПУ. Вышеуказанные особенности можно учитывать с применением описанной имитационной модели и подбирать рациональные параметры ДКК, которые будут обеспечивать наибольшую стабильность потока при приемлемом времени передачи горной массы от приемного бункера ДПУ до выхода с окончного конвейера.



Рис. 2. Изменение интенсивности рудопотока и объема заполнения бункеров во времени при работе дробильно-перегрузочной установки

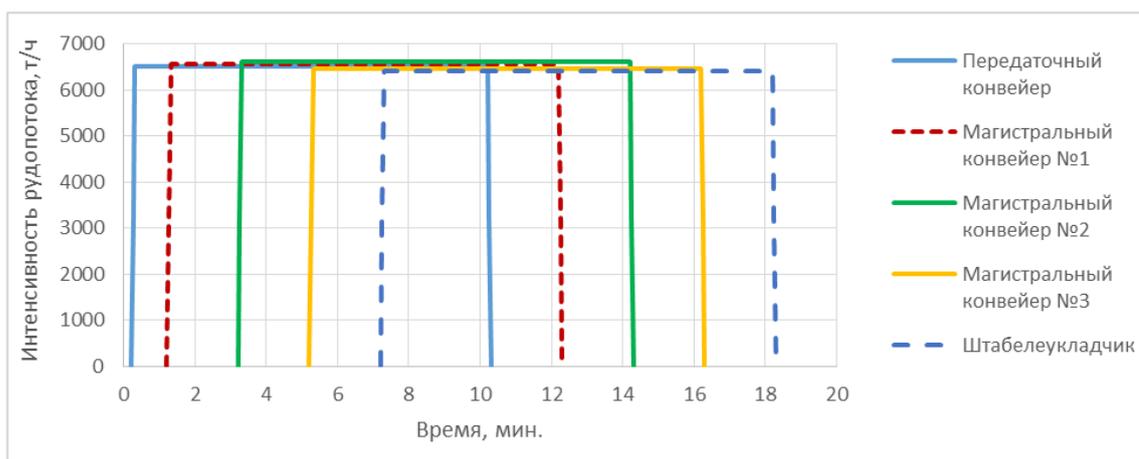


Рис. 3. Изменение во времени интенсивности рудопотока по конвейерам дробильно-конвейерного комплекса при его работе по транспортированию кратковременно поданной руды в объеме 650 т

Как показано ранее [15], возможно применение имитационной модели простой одноуровневой структуры для решения задач по обоснованию рациональных технологических и компоновочных параметров дробильно-перегрузочной установки в увязке с внешними факторами, определяемыми работой сборочного транспорта и дробильно-конвейерного комплекса. Решение подобных задач востребовано, например, при эскизном техническом проектировании и при разработке общих технологических решений при горно-технологическом проектировании. Вышеуказанное относится к основной части модели ДКК – к дробильно-перегрузочной установке. Следовательно, утверждение справедливо и для модели ДКК в целом.

Учет временных закономерностей позволяет учитывать продолжительность передачи руды по протяженной конвейерной линии для организации работы окончательного агрегата, например, перехода отвалообразователя на следующий ряд отсыпки или перемещения штабелеукладчика на рудном складе к следующей зоне штабелирования. Учет таких нюансов уже при проектировании ДКК обеспечивает возможность его ритмичной работы при эксплуатации.

Как показывает опыт [16], а также теоретические исследования [17], при оценке рациональной вместимости приемного бункера должен учитываться комплекс параметров: количество мест разгрузки самосвалов, интенсивность прибытия автосамосвалов, определяемая в том числе неравномерностью их потока, производительность дробилки. Применение имитационного моделирования обеспечивает возможность найти оптимум сочетания указанных параметров в отличие от линейного расчета, который дает значение, не учитывающее все аспекты динамики грузопотоков. Расчеты [15, 17] показали, что количество горной массы в приемном бункере имеет специфическую динамику в зависимости от вышеуказанных параметров и факторов. Так, увеличение грузоподъемности самосвалов в общем случае повышает требуемую вместимость бункера, а уменьшение – снижает. В то же время, при высокой неравномерности прибытия автосамосвалов даже малой грузоподъемности и превышении кратковременной интенсивности загрузки ДПУ над производительностью ДПУ (прежде всего дробилки) наблюдается нарастающее заполнение бункера, что говорит о необходимости выбирать более производительную дробилку либо увеличивать вместимость бункера для данных горно-технологических условий.

Эксперименты с разработанной моделью ДПУ показали, что учет реальных потоков материала и связанных с ними неочевидных закономерностей при ее применении позволяет оптимизировать конструктивные параметры ДПУ на существенную величину.

ну, например: вместимость приемного бункера на 10 – 20 %, разгрузочного бункера на 10 – 35 %, производительность дробилки 5 – 7 %.

Таким образом, в ИГД УрО РАН разработано приложение для персонального компьютера, в котором можно, варьируя параметры ДКК, моделировать его функционирование. Разработанная имитационная модель позволяет за счет моделирования во времени движения горной массы по элементам ДПУ определить с одной стороны работоспособные параметры ДПУ и ДКК в целом, учитывающие реальные потоки материала и неочевидные процессы и закономерности, а с другой – оптимизировать эти параметры под конкретные условия, нивелируя необоснованно принимаемые запасы по производительности и вместимости (которые в конечном итоге определяют материалоемкость и стоимость).

Выводы

1. Разработана имитационная модель ДКК, включающая в состав дробильно-перегрузочную установку, передаточный и магистральные конвейеры, а также оконечный агрегат (штабелеукладчик для рудного ДКК или отвалообразователь для породного ДКК), обеспечивающая воспроизведение функционирования ДКК с высоким коэффициентом подобия без необходимости проведения предварительных исследований на реальных объектах или макетных моделях и составления математических моделей взаимосвязи грузопотоков. Это позволяет моделировать работу ДКК широкого спектра параметров, подбирая наиболее рациональный вариант под конкретные горнотехнические условия разработки месторождения.

2. Апробация разработанной имитационной модели ДКК показала, что ее применение обеспечивает возможность выбора рациональных технологических параметров ДКК в целом и его элементов по различным целевым показателям. В частности, путем подбора параметров оборудования дробильно-перегрузочной установки (вместимость приемного и разгрузочного бункеров, производительность дробилки, производительность пластинчатых питателей) обеспечена стабилизация грузопотока: при неравномерности подачи руды автосамосвалами в приемный бункер ДПУ на выходе ДПУ (разгрузочная тетка передаточного конвейера) наблюдается постоянный рудопоток.

3. Перспективой развития разработанного ПО являются:

- детальный учет параметров ДКК, связанных с его размещением в карьере (углы наклона ставов, траектория конвейеров, высота встраивания ДПУ в уступ и т.п.);
- внедрение модуля расчета параметров конвейеров в зависимости от основных технологических требований;
- учет натуральных и стоимостных параметров функционирования оборудования ДКК (потребление электроэнергии, эксплуатационные расходы и т.п.).

Список литературы

1. Яковлев В.Л., Глебов А.В., Журавлёв А.Г., Жариков С.Н., Шимкив Е.С., 2024. Методологические аспекты переходных процессов при формировании горнотехнических систем глубоких карьеров. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 6, С.35-44.
2. Глебов А.В., Семёнкин А.В., Кармаев Г.Д., Берсенёв В.А., 2017. Новые подходы и решения по применению циклично-поточной технологии на карьерах. *Горный журнал*, № 6, С. 48-52. DOI: 10.17580/gzh.2017.06.09.
3. Глебов А.В., 2022. Концепция методологии взаимной адаптации автомобильно-конвейерного транспорта и развивающейся горнотехнической системы карьера. *Горная промышленность*, № 1S, С. 78 – 85. DOI:10.30686/1609-9192-2022-1S-78-85.
4. Решетняк С.П., 2015. Современные тенденции в проектировании циклично-поточной технологии на карьерах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 56, С.126-132.

5. Журавлев А.Г., Семенкин А.В., Черепанов В.А., Глебов И.А., Чендырев М.А., 2022. Задачи развития перспективных циклично-поточных технологий для глубоких карьеров. *Горная промышленность*, №1S, С. 53-62. DOI: 10.3686/1609-9192-2022-1S-53-62.
6. Yamashita Andre S., Thivierge Alex, Euzébio Thiago A.M., 2021. A review of modeling and control strategies for cone crushers in the mineral processing and quarrying industries. *Minerals Engineering*, vol. 170. DOI 10.1016/j.mineng.2021.107036.
7. Zeren Chen, Guoqiang Wang, Duomei Xue, Qiushi Bi., 2020. Simulation and optimization of gyratory crusher performance based on the discrete element method. *Powder Technology*, vol. 376, P. 93-103. DOI 10.1016/j.powtec.2020.07.034.
8. Юдин А.В., Шестаков В.С., Сайтов В.И., Абдулкаримов М.К., 2020. К определению вместимости бункера в составе перегрузочной системы при комбинированном транспорте. *Известия вузов. Горный журнал*, № 4, С. 99-112.
9. Kanishk Bhadani, 2020. *Optimization Capabilities for Crushing Plants. Doctoral thesis*. Gothenburg, Sweden, Chalmers University of Technology. URL: https://www.researchgate.net/publication/360235473_Optimization_Capabilities_for_Crushing_Plants. (дата обращения: 20.11.2024)
10. Берсенев В.А., Кармаев Г.Д., Семенкин А.В., Сумина И.Г., 2018. Схемы циклично-поточной технологии при различном залегании месторождений полезных ископаемых. *Проблемы недропользования*, № 4 (19), С. 13-21.
11. Билин А.Л., 2012. Особенности применения алгоритма профессора С.Д. Коробова для определения границ карьеров и обоснования режима горных работ. *Записки горного института*, Т.198, С. 55-60.
12. Журавлёв А.Г., Черных В.В., 2023. Компьютерное моделирование при оценке влияния дорожных факторов на производительность карьерного автотранспорта. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, Т. 334, №12, С. 20-31. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4308.
13. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ*. 2012617844 Российская федерация. Транспортная система карьера (ТСК) / Ю.А. Бахтурин, А.Г. Журавлев, Л.А. Трофименко (РФ). – 2012615505; заявл. 03.07.12; опубл. 30.08.12.
14. Моисеев Н.Н., 1981. *Математические задачи системного анализа*. Москва: Наука.
15. Журавлёв А.Г., Кардашин Е.Д., 2024. Особенности моделирования работы дробильно-перегрузочной установки при оптимизации её конструктивно-технологических параметров. *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*, №24, С. 112-121. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-24-112-121.
16. Исмагилов Р.И., Журавлёв А.Г., Фурин В.О., 2024. Проектирование современных российских дробильно-перегрузочных установок для комплексов ЦПТ. *Горная промышленность*, № 3, С. 48-55. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3-48-55.
17. Чендырев М.А., Журавлев А.Г., 2022. Рационализация геометрических параметров приемных бункеров дробилок ККД при автомобильном транспорте. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5-1, С. 158-170. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_158.

References

1. Yakovlev V.L., Glebov A.V., Zhuravlev A.G., Zharikov S.N., Shimkiv E.S., 2024. Metodologicheskie aspekty perekhodnykh protsessov pri formirovaniï gornotekhnicheskikh sistem glubokikh kar'erov [Methodological aspects of transitional processes in the formation of mining engineering systems of deep quarries]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh isko-paemykh*, № 6, P.35-44.

2. Glebov A.V., Semenkin A.V., Karmaev G.D., Bersenev V.A., 2017. Novye podkhody i resheniya po primeneniyu tsiklichno-potochnoi tekhnologii na kar'erakh [New approaches and solutions for the use of cyclic-flow technology in quarries]. *Gornyi zhurnal*, № 6, P. 48-52. DOI: 10.17580/gzh.2017.06.09.
3. Glebov A.V., 2022. Kontsepsiya metodologii vzaimnoi adaptatsii avtomobil'no-konveiernogo transporta i razvivayushcheisya gornotekhnicheskoi sistemy kar'era [A concept of methodology of mutual adaptation of automobile conveyor transport and the developing mining and technical quarry system]. *Gornaya promyshlennost'*, № 1S, P. 78 – 85. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-78-85.
4. Reshetnyak S.P., 2015. Sovremennye tendentsii v proektirovanii tsiklichno-potochnoi tekhnologii na kar'erakh [Current trends in the design of cyclic-flow technology in quarries]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 56, P.126-132.
5. Zhuravlev A.G., Semenkin A.V., Cherepanov V.A., Glebov I.A., Chendyrev M.A., 2022. Zadachi razvitiya perspektivnykh tsiklichno-potochnykh tekhnologii dlya glubokikh kar'erov. *Gornaya promyshlennost'* [The tasks of developing promising cyclic-flow technologies for deep quarries], №1S, P. 53-62. DOI: 10.3686/1609-9192-2022-1S-53-62.
6. Yamashita Andre S., Thivierge Alex, Euzébio Thiago A.M., 2021. A review of modeling and control strategies for cone crushers in the mineral processing and quarrying industries. *Minerals Engineering*, vol. 170. DOI 10.1016/j.mineng.2021.107036.
7. Zeren Chen, Guoqiang Wang, Duomei Xue, Qiushi Bi., 2020. Simulation and optimization of gyratory crusher performance based on the discrete element method. *Powder Technology*, vol. 376, P. 93-103. DOI 10.1016/j.powtec.2020.07.034.
8. Yudin A.V., Shestakov V.S., Saitov V.I., Abdulkarimov M.K., 2020. K opredeleniyu vmestimosti bunkera v sostave peregruzochnoi sistemy pri kombinirovannom transporte [On determining the capacity of the bunker as part of the transshipment system for combined transport]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*, № 4, P. 99-112.
9. Kanishk Bhadani, 2020. *Optimization Capabilities for Crushing Plants. Doctoral thesis*. Gothenburg, Sweden, Chalmers University of Technology. URL: https://www.researchgate.net/publication/360235473_Optimization_Capabilities_for_Crushing_Plants. (data obrashcheniya: 20.11.2024)
10. Bersenev V.A., Karmaev G.D., Semenkin A.V., Sumina I.G., 2018. Skhemy tsiklichno-potochnoi tekhnologii pri razlichnom zaleganii mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh [Schemes of cyclic-flow technology with different occurrence of mineral deposits]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4 (19), P. 13-21.
11. Bilin A.L., 2012. Osobennosti primeneniya algoritma professora S.D. Korobova dlya opredeleniya granits kar'erov i obosnovaniya rezhima gornykh rabot [Features of the application of Professor S. D. Korobov's algorithm for determining the boundaries of quarries and justifying the mining regime]. *Zapiski gornogo instituta*, Vol.198, P. 55-60.
12. Zhuravlev A.G., Chernykh V.V., 2023. Komp'yuternoe modelirovanie pri otsenke vliyaniya dorozhnykh faktorov na proizvoditel'nost' kar'ernogo avtotransporta. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Computer modeling in assessing the impact of road factors on the productivity of motor vehicles]. *Inzhiniring georesursov*, Vol. 334, №12, P. 20-31. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4308.
13. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM [Certificate of state registration of a computer program]. 2012617844 Rossiiskaya federatsiya. Transportnaya sistema kar'era (TSK) / Yu.A. Bakhturin, A.G. Zhuravlev, L.A. Trofimenko (RF). – 2012615505; zayavl. 03.07.12; opubl. 30.08.12.
14. Moiseev N.N., 1981. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical problems of system analysis]. Moscow: Nauka.
15. Zhuravlev A.G., Kardashin E.D., 2024. Osobennosti modelirovaniya raboty drobil'no-peregruzochnoi ustanovki pri optimizatsii ee konstruktivno-tekhnologicheskikh parametrov [Features of modeling the operation of a crushing and transshipment plant while

optimizing its structural and technological parameters]. *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo*, №24, P. 112-121. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-24-112-121.

16. Ismagilov R.I., Zhuravlev A.G., Furin V.O., 2024. Proektirovanie sovremennykh rossiiskikh drobil'no-peregruzochnykh ustanovok dlya kompleksov TsPT [Design of modern Russian crushing and transshipment facilities for CPT complexes]. *Gornaya promyshlennost'*, № 3, P. 48-55. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3-48-55.

17. Chendyrev M.A., Zhuravlev A.G., 2022. Ratsionalizatsiya geometricheskikh parametrov priemnykh bunkerov drobilok KKD pri avtomobil'nom transporte [Rationalization of the geometric parameters of the receiving bunkers of KKD crushers in automobile transport]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 5-1, P. 158-170. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_158.

УДК 622.013.364

Рожков Артём Андреевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58.
e-mail: 69artem@bk.ru

Барановский Кирилл Васильевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: karingist@list.ru

Дьячков Павел Сергеевич

младший научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: dyachkov@igduran.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ
И ГОРНТЕХНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ
НА ВЕЛИЧИНУ ПОТЕРЬ
ОБОГАЩЕННОЙ РУДНОЙ МЕЛОЧИ
ПРИ ВЫЕМКЕ ПОЛОГИХ ЗАЛЕЖЕЙ
СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ***

Аннотация:

В результате анализа опыта подземной обработки месторождений металлических руд выделены и систематизированы основные группы и виды ущерба, связанного с переизмельчением руды. Одним из главных видов такого ущерба являются потери обогащенной рудной мелочи в очистном пространстве. В настоящей работе для условий подземной разработки пологих залежей вкрапленных руд средней мощности исследовано влияние горно-геологических и горнотехнических факторов на величину данного вида потерь. Предложена методика оценки потерь обогащенной рудной мелочи, отличающаяся учетом влияния неровности почвы очистного пространства и неравномерности толщины слоя теряемой руды по длине и ширине камеры. Рассмотрены такие горно-геологические факторы, как мощность рудного тела и плотность руды в массиве. Из горнотехнических факторов исследованы ширина камеры, высота слоя отбитой руды, параметры неровности почвы очистного пространства и коэффициент обогащенности рудной мелочи. В результате проведенных исследований установлен характер влияния совокупности данных факторов на показатели относительных потерь и абсолютного ущерба. Показано, что

DOI: 10.25635/2313-1586.2024.04.016

Rozhkov Artem A.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of Underground Geotechnology,
Institute of Mining UB RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: 69artem@bk.ru

Baranovsky Kirill V.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of Underground Geotechnology,
Institute of Mining UB RAS
e-mail: karingist@list.ru

Dyachkov Pavel S.

Junior Researcher,
Laboratory of Underground Geotechnology,
Institute of Mining UB RAS
e-mail: dyachkov@igduran.ru

**STUDY OF THE INFLUENCE
OF MINING-GEOLOGICAL
AND MINING-TECHNICAL FACTORS
ON THE AMOUNT OF LOSSES
OF ENRICHED ORE FINES DURING
THE EXTRACTION OF FLAT DEPOSITS
OF MEDIUM THICKNESS**

Abstract:

As a result of the analysis of the experience of underground mining of metal ore deposits, the main groups and types of damage associated with ore overgrinding are identified and systematized. One of the main types of such damage is the loss of enriched ore fines in the stope. In this paper, for the conditions of underground mining of flat deposits of disseminated ores of medium thickness, the influence of mining-geological and mining-technical factors on the value of this type of loss is studied. A technique for estimating the loss of enriched ore fines is proposed, which differs when taking into account the influence of the bottom unevenness of open stope and the unevenness of the lost ore layer along the length and width of the chamber. Such mining-geological factors as the thickness of the ore body and the density of the ore in the massifs are considered. The mining-technical factors, the width of the chamber, the height of the broken ore layer, the parameters of the bottom unevenness and the enrichment factor of the ore fines were studied. As a result of the conducted research, the nature of the influence of the set of these factors on the indicators of relative losses and absolute damage was established. It shows that it is advisable to provide for special technological measures to reduce this type of loss. Depending on the enrichment coeffi-

* Исследования выполнены в рамках Госзадания Минобрнауки No075-00412-22 ПР. Тема 1. FUWE-2022-0005.

целесообразно предусматривать специальные технологические мероприятия по снижению данного вида потерь. Установлено, что в зависимости от коэффициента обогащенности рудной мелочи величина ущерба на одну камеру с увеличением ее ширины может составить от 2 – 9 до 9 – 31 млн руб. при минимальной и максимальной высоте теряемого слоя руды, соответственно.

Ключевые слова: пологая залежь, рудная мелочь, переизмельчение руды, камерная выемка, зачистка руды, потери, неровности почвы, ущерб.

cient of ore fines, the amount of damage per chamber can be 2 – 9 million rubles with a minimum height of the lost ore layer and 9 – 31 million rubles with a maximum layer height.

Key words: flat deposit, ore fines, ore overgrinding, open stoping, ore cleaning, losses, bottom unevenness, damage.

Введение

Пологие месторождения бедных вкрапленных руд ограниченной мощности (менее 20 м) Норильской группы, залегающие на значительных глубинах, являются весьма сложными объектами освоения подземным способом [1, 2].

Пологий угол падения рудных тел сводит к минимуму потенциал самотечной доставки руды и способствует повышенному образованию потерь отбитой руды на лезвием боку, а средняя мощность и выемка запасов одним эксплуатационным горизонтом не позволяют доизвлечь теряемую руду при отработке нижележащих выемочных единиц ввиду их отсутствия [3]. В условиях отработки таких месторождений отдельно следует уделить внимание потерям мелких фракций руды (рудной мелочи), обладающих повышенным содержанием полезного компонента [4]. Рудная мелочь образуется в результате переизмельчения в процессе отбойки и выпуска руды. Накопление полезного компонента в мелких фракциях происходит в результате гранулометрической сегрегации за счет большего удельного веса рудных минералов относительно вмещающих пород [5].

Опыт освоения Норильских месторождений вкрапленных руд показывает, что содержание никеля и меди в мелких фракциях руды в 1,5 – 2 и более раз выше, чем в крупных фракциях. Для условий месторождения Норильск-1 установлено, что содержание никеля в кусках отбитой руды с ростом крупности от 5 до 35 см снижается с 0,34 до 0,2 %, меди – с 1,3 до 0,22 % [6]. Применительно к попутно извлекаемым тяжелым металлам, таким как золото и платина, данное соотношение может достигать 2 - 4 и более раз [7].

В условиях отработки пологих и наклонных залежей небольшой мощности объем данного вида потерь достигает 3 – 5 % [8, 9]. Целесообразность минимизации выхода рудной мелочи при отбойке, ее извлечения из очистного пространства или предотвращения осаждения традиционно определяется разностью стоимости теряемой руды и затрат на эти дополнительные мероприятия [10, 11]. С точки зрения оценки экономической эффективности отдельных технологических процессов данный подход логичен и рационален. Вместе с тем сверхнормативные потери металла являются не единственным источником ущерба. В результате проведенного анализа [12] установлено, что основные виды ущерба от переизмельчения металлических руд при подземном способе добычи зависят от применения или неприменения технологических мероприятий (первичный и вторичный ущерб). Подразделяются виды ущерба на четыре основные группы: снижение полноты извлечения запасов недр; снижение экономической эффективности горнотехнической системы; снижение интенсивности освоения участка недр; снижение безопасности освоения участка недр (табл. 1).

Таблица 1

Структура ущерба от переизмельчения металлических руд

Группы ущерба	Условия применения мероприятий по снижению ущерба	
	Без применения (первичный ущерб)	С применением (вторичный ущерб)
	Основные виды ущерба	
<i>Прямой ущерб</i>		
I. Снижение полноты извлечения запасов недр	Значительные потери обогащенной металлом руды в очистном пространстве	Частичные потери обогащенной металлом руды в очистном пространстве
	Повышение потерь полезного компонента в просыпи при погрузке и при транспортировании	
	Потери и разубоживание руды вследствие уменьшения ширины фигуры выпуска	Потери рудной мелочи в результате выноса пульпы из очистного пространства при гидрозачистке блока
II. Снижение экономической эффективности горнотехнической системы	Снижение извлекаемой ценности основных запасов добытой руды	Затраты на поддержание очистного пространства после выемки основных
	Ущерб от потерь обогащенной металлом руды	Затраты на проведение дополнительных мероприятий по извлечению рудной мелочи
<i>Косвенный ущерб</i>		
III. Снижение интенсивности освоения участка недр	Повышение степени слеживаемости рудной массы	Необходимость поддержания очистного пространства после выемки основных запасов
	Повышение вероятности и скорости смерзания рудной массы	Затраты времени на осуществление дополнительных мероприятий по извлечению рудной мелочи
		Повышение выхода негабарита
IV. Снижение безопасности освоения участка недр	Повышение риска самовозгорания рудной массы	Низкая технологичность (кустарность) дополнительных мероприятий
	Высокая запыленность рудничной атмосферы	Нахождение людей в очистном пространстве
		Увеличение количества стадий процесса очистной выемки в техногенно-нарушенных условиях
	Повышение риска взрывов сульфидной пыли	Снижение устойчивости элементов конструкции при проведении дополнительных взрывных работ

Подавляющее большинство способов снижения потерь обогащенной рудной мелочи предназначено для условий отработки маломощных месторождений. С точки зрения эффективности ГТС известные решения в условиях пологих залежей средней мощности могут быть малоэффективны или вовсе неосуществимы [13–17]. Способствуют этому растущая с мощностью рудных тел интенсивность и объемы очистной выемки

[18], значительный выход негабарита при скважинной отбойке руды [19], отсутствие возможности нахождения в очистном пространстве людей при камерной выемке и технологиях с обрушением руды и вмещающих пород [20].

Недостаточная обоснованность или отсутствие технологических решений на стадии проектирования приводят к невозможности осуществления оптимальных мероприятий, что ведет к снижению эффективности и безопасности функционирования всей ГТС [21].

Поскольку основной целью функционирования ГТС, помимо полноты выемки полезного ископаемого, является экономическая эффективность освоения участка недр [22–24], для обоснования целесообразности применения известных технологических мероприятий по снижению ущерба от переизмельчения руды или разработки новых, актуальной задачей остается оценка влияния горно-геологических и горнотехнических факторов на величину и ценность потерь обогащенной рудной мелочи.

Теория, материалы и методы исследования

В работе [25] для условий отработки пологих залежей ограниченной мощности было обосновано применение комбинированной системы разработки, при которой 40 – 50 % запасов вынимается камерами с плоским днищем. Невозможность качественной зачистки неровной почвы в совокупности с характером работы погрузо-доставочных машин с дистанционным управлением (ПДМ с ДУ) приводит к тому, что по мере погрузки и доставки руды самоходное оборудование многократно проходит по рудной массе, уплотняя ее [26]. Просыпи руды при погрузке и последующей доставке приводят к увеличению высоты такого уплотненного слоя. Образующиеся при отбойке руды неровности почвы очистного пространства затрудняют зачистку мелких фракций руды.

Схема формирования эксплуатационных потерь при камерной выемке пологих рудных тел представлена на рис. 1.

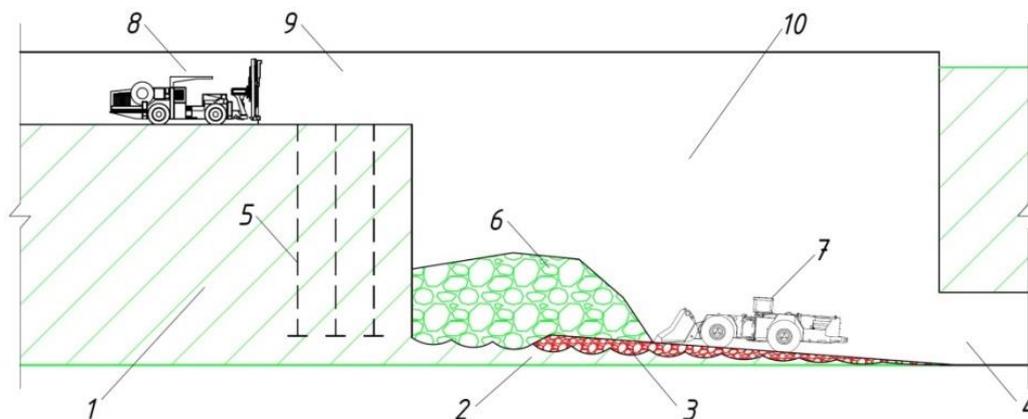


Рис. 1. Схема формирования эксплуатационных потерь при камерной выемке пологих рудных тел:

- 1 – рудный массив; 2 – зона неполной отбойки руды; 3 – слой уплотненной отбитой руды;
- 4 – доставочный штрек; 5 – взрывные скважины; 6 – отбитая руда; 7 – ПДМ с ДУ;
- 8 – буровая установка; 9 – буро-вентиляционный штрек; 10 – очистное пространство

Для объективной оценки величины потерь рудной мелочи и связанного с этим экономического ущерба необходимо рассмотреть основные горно-геологические и горнотехнические факторы. В результате в качестве предмета исследования в настоящей работе приняты такие горно-геологические факторы, как мощность рудного тела и плотность руды в массиве. Из горнотехнических факторов – производственная мощность рудника, ширина камеры, высота слоя отбитой руды, параметры неровности почвы очистного пространства и коэффициент обогащенности рудной мелочи.

При расчете потерь отбитой руды необходимо также учитывать определенное процентное содержание крупных и негабаритных кусков. Абсолютные потери отбитой руды на плоском днище камеры ($\Pi_{отб}$) при некачественной проработке почвы на контакте с подстилающими породами, состоящие из потерь рудной мелочи ($\Pi_{отб}^{рм}$) и крупнокусковой руды ($\Pi_{отб}^{кр}$), могут быть определены следующим образом:

$$\Pi_{отб} = \left(\Pi_{отб}^{рм} + \Pi_{отб}^{кр} \right) k_{нс} k_{нп}, \text{ т}; \quad (1)$$

$$\Pi_{отб}^{рм} = h_{сл} L_k B_k \frac{\gamma_p}{K_p^{рм}} \left[1 - (\eta_{кр} + \eta_{нг}) \right], \text{ т}; \quad (2)$$

$$\Pi_{отб}^{кр} = h_{сл} L_k B_k \frac{\gamma_p}{K_p^{кр}} (\eta_{кр} + \eta_{нг}), \text{ т}; \quad (3)$$

где $k_{нс}$ – коэффициент неравномерности слоя руды, доли ед.; $k_{нп}$ – коэффициент неровности почвы, доли ед.; $h_{сл}$ – высота слоя отбитой руды, м; $K_p^{рм}$ – коэффициент разрыхления рудной мелочи, доли ед.; L_k – длина камеры, м; B_k – ширина камеры, м; γ_p – плотность руды в массиве, т/м³; $\eta_{кр}$ – содержание кусков кондиционной крупности в слое, доли ед.; $\eta_{нг}$ – содержание кусков негабаритной крупности в слое, доли ед.; $K_p^{кр}$ – коэффициент разрыхления крупных фракций руды, доли ед.

Неравномерность слоя теряемой руды определяется его переменной высотой по длине и ширине камеры. При расчетах эта характеристика учитывается соответствующим коэффициентом. В рассматриваемых условиях принимаем $k_{нс} \approx 0,7$, равный отношению средней высоты слоя к его максимальной высоте. Определить исходные параметры слоя возможно путем визуальных или маркшейдерских наблюдений в процессе очистной выемки.

Вместе с тем необходима объективная количественная оценка неровности почвы очистного пространства. Следовательно, при определении значений соответствующего коэффициента необходимо учесть форму и объем неровностей. Известно, что форма неровностей чаще всего представляет собой воронки или борозды, а их глубина может составлять до 0,5 м и более [27]. Поскольку данный коэффициент характеризует некоторое увеличение объема теряемой руды, следовательно, он зависит также и от высоты ее слоя. Для условий камерной выемки с траншейным днищем, при расчете показателей потерь и разубоживания, высоту слоя отбитой руды, теряемой на почве орта, рекомендуется принимать равной 1 м [28]. Учитывая особенности отгрузки руды с почвы плоского днища при помощи ПДМ с ДУ, высоту слоя теряемой руды, представленной преимущественно мелкими фракциями и механически уплотняемой по мере работы самоходного оборудования, с учетом опыта отработки пологих и наклонных рудных тел [27, 29 – 31] можно прогнозировать до 0,5 м.

С учетом вышеизложенных соображений, для углублений воронкообразной формы коэффициент неровности почвы предлагается определять следующим образом:

$$k_{нп} = \frac{h_{сл} + (0,33h_n)}{h_{сл}}, \text{ доли ед.}, \quad (4)$$

где h_n – средняя глубина неровностей почвы, м.

В результате получены искомые значения коэффициента неровности почвы, учитывающего основные параметры теряемого слоя отбитой руды и характеристики подстилающей поверхности очистного пространства (рис. 2).

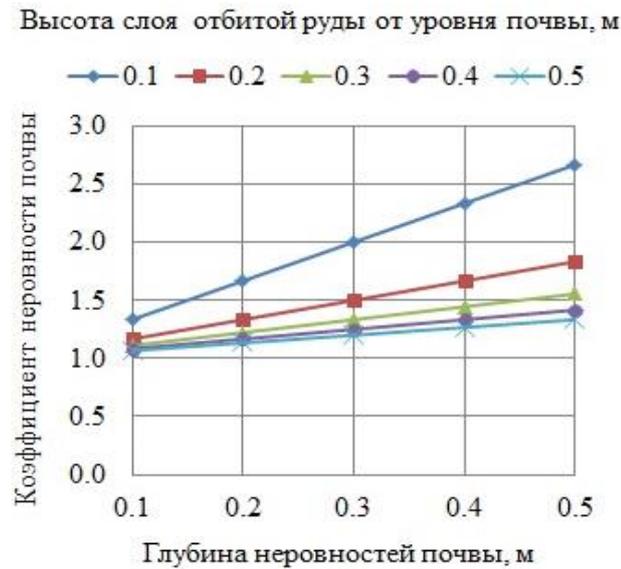


Рис. 2. Изменение коэффициента неровности почвы в зависимости от глубины неровностей при различной высоте слоя отбитой руды

Величина коэффициента закономерно увеличивается с ростом глубины неровностей почвы очистного пространства, причем тем интенсивней, чем меньше высота слоя теряемой руды.

Результаты исследования и их обсуждение

Характер образования рассматриваемого вида потерь отбитой руды при камерной выемке с плоским днищем подсказывает, что его абсолютная величина остается практически неизменной в абсолютных величинах и определяется в первую очередь высотой слоя. Тогда в относительных величинах объем потерь будет зависеть от высоты камеры, равной при отработке пологих залежей мощности рудного тела (рис. 3).

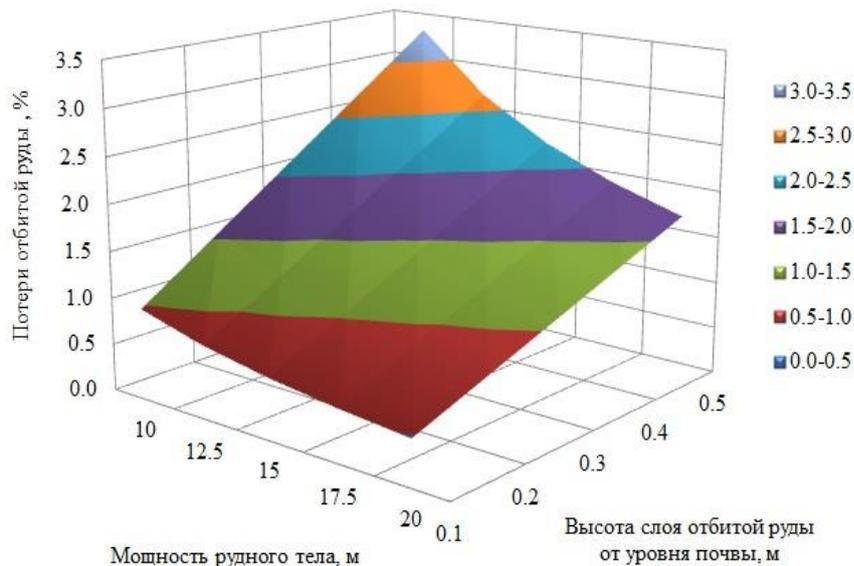


Рис. 3. Зависимость величины потерь от мощности рудного тела и высоты слоя отбитой руды на почве камеры

Из представленного графика видно, что относительная величина потерь растет по мере уменьшения мощности рудного тела и увеличения высоты теряемого слоя руды, составляя от 0,5 до 3,3 %.

Повышенное содержание полезных компонентов в мелких фракциях отбитой руды учитывается коэффициентом обогащенности относительно среднего содержания по блоку. В качестве объективного показателя при оценке ущерба используется также извлекаемая ценность руды, учитывающая рыночную цену, количество и содержание полезных компонентов, показатели извлечения при добыче и обогащении, с которыми потерянная руда могла бы быть добыта при качественном оформлении днища камеры [32].

Тогда ущерб от потерь отбитой руды на почве плоского днища ($Y_{отб}$) можно определить следующим образом:

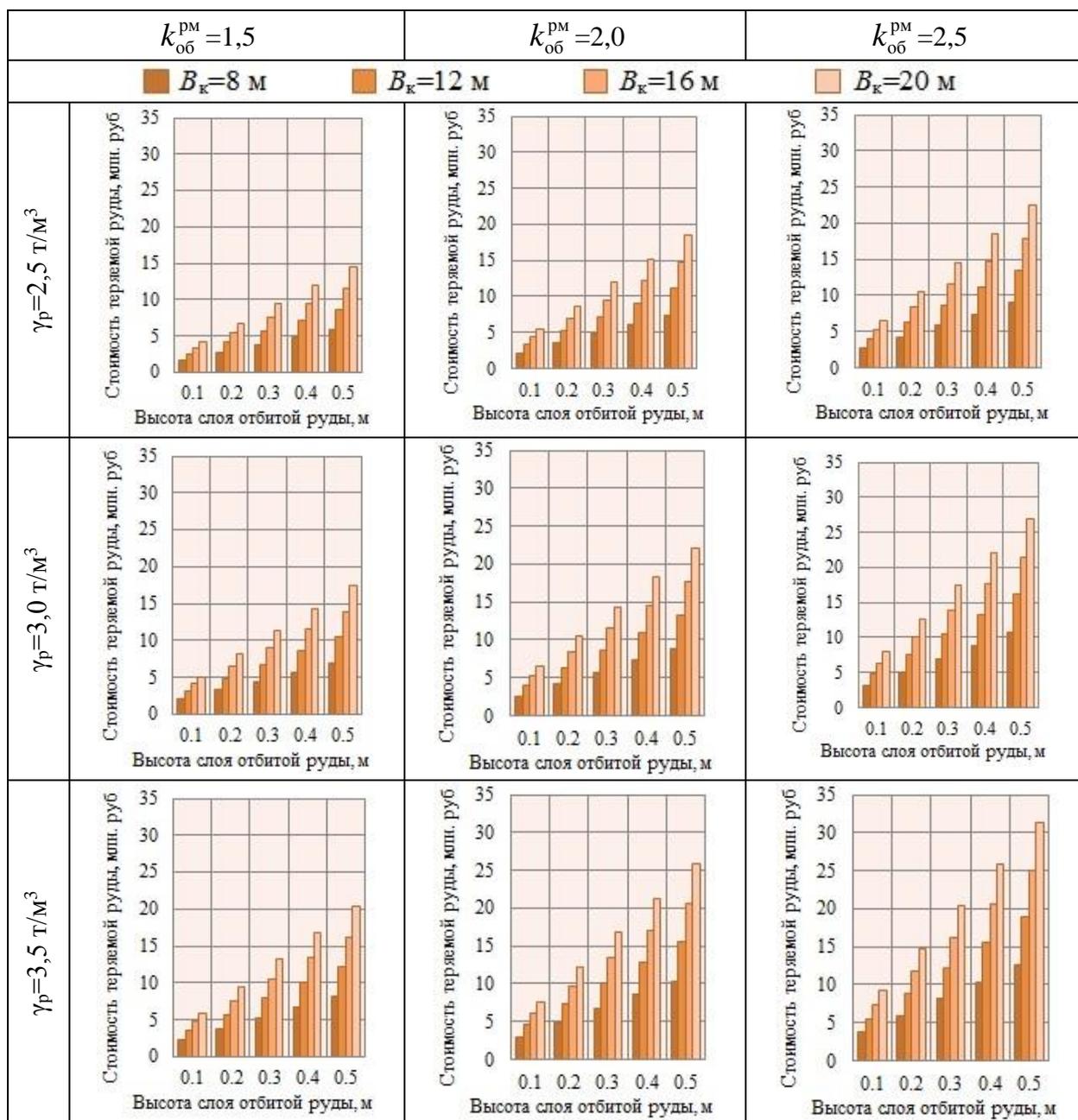
$$Y_{отб} = \left(\Pi_{отб}^{рм} \Pi_{изв} k_{об}^{рм} \right) + \left(\Pi_{отб}^{кр} \Pi_{изв} \right), \text{ руб.}, \quad (5)$$

где $k_{об}^{рм}$ – коэффициент обогащенности рудной мелочи, доли ед.; $\Pi_{изв}$ – извлекаемая ценность руды, руб./т.

Результаты исследования представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние коэффициента обогащенности рудной мелочи и плотности руды в массиве на стоимость теряемой руды в зависимости от ширины камеры



Экономический ущерб, отнесенный на одну камеру при ее постоянной длине 76 м, представлен в виде зависимостей от высоты слоя отбитой руды на плоском днище (от 0,1 до 0,5 м) и ширины камеры (от 8 до 20 м). Также исследовано влияние обогащенности рудной мелочи (с учетом опыта отработки месторождения Норильск-1 и других месторождений металлических руд коэффициент обогащенности принят в диапазоне 1,5 – 2,5) и плотности руды в массиве (2,5 – 3,5 т/м³). При исследовании было принято, что средняя глубина неровностей почвы составляет 0,2 м, а коэффициент разрыхления с учетом механического уплотнения составляет 1,2.

Установлено, что в зависимости от коэффициента обогащенности рудной мелочи величина ущерба на одну камеру с увеличением ее ширины может составить от 2 - 9 до 9 – 31 млн руб. при минимальной и максимальной высоте теряемого слоя руды, соответственно.

Количество камер, обрабатываемых ежегодно, зависит от их ширины, производственной мощности рудника и мощности рудного тела. Исходя из горнотехнических особенностей комбинированной системы разработки [25] приняты следующие параметры ширины камер в зависимости от мощности рудного тела:

- при мощности рудного тела 10 м – ширина камер 8 м;
- при мощности рудного тела 15 м – ширина камер 12 м;
- при мощности рудного тела 20 м – ширина камер 16 м;
- при мощности рудного тела 25 м – ширина камер 20 м.

В зависимости от данных параметров определено количество обрабатываемых в год камер, необходимое для обеспечения годовой производственной мощности рудника в диапазоне от 0,8 до 1,6 млн т в год (рис. 4).

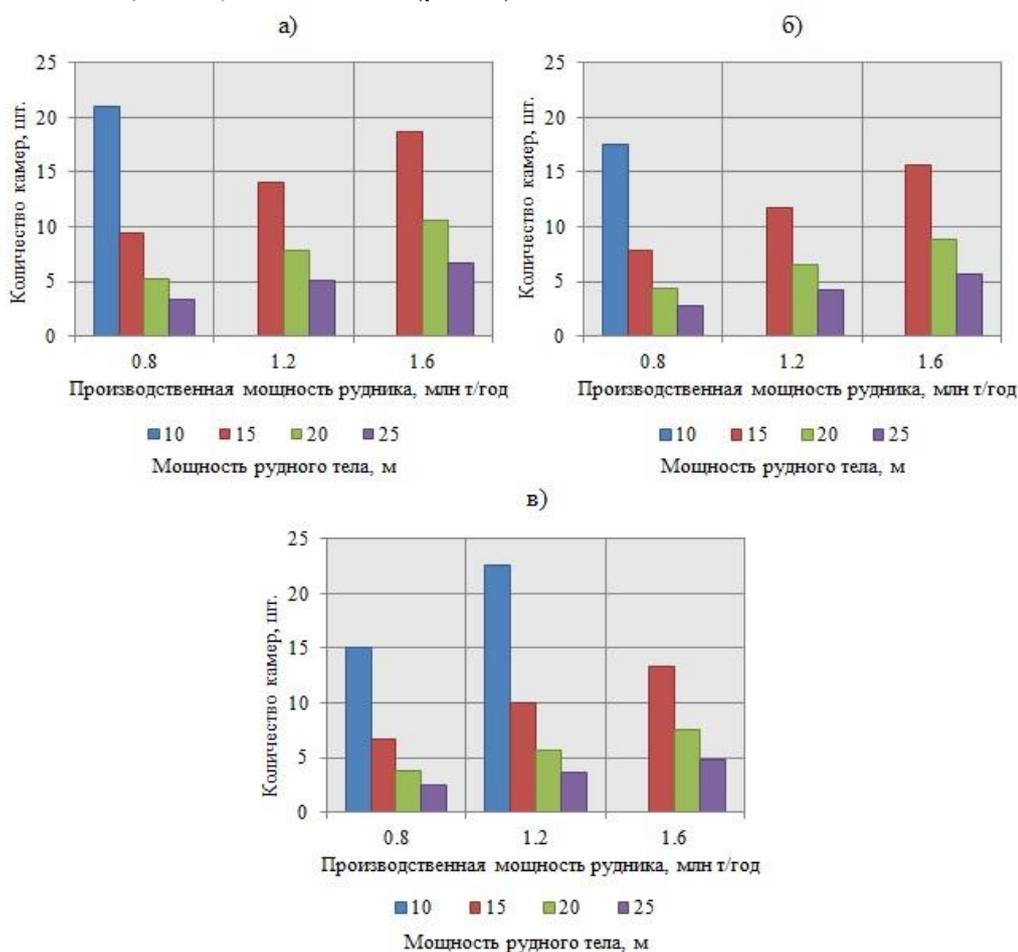


Рис. 4. Необходимое количество камер для обеспечения производственной мощности рудника в зависимости от мощности рудного тела и плотности руды:
а) при плотности руды в массиве 2,5 т/м³; б) при плотности руды в массиве 3,0 т/м³;
в) при плотности руды в массиве 3,5 т/м³

С учетом полученных данных становится возможным определение годового экономического ущерба от потерь обогащенной рудной мелочи. В качестве примера рассмотрен случай с минимальными значениями высоты теряемого слоя (0,1 м), плотности руды ($2,5 \text{ т/м}^3$) и коэффициента обогащенности (1,5). Установлено, что величина ущерба растет с уменьшением мощности рудного тела и увеличением производственной мощности рудника (рис. 5).

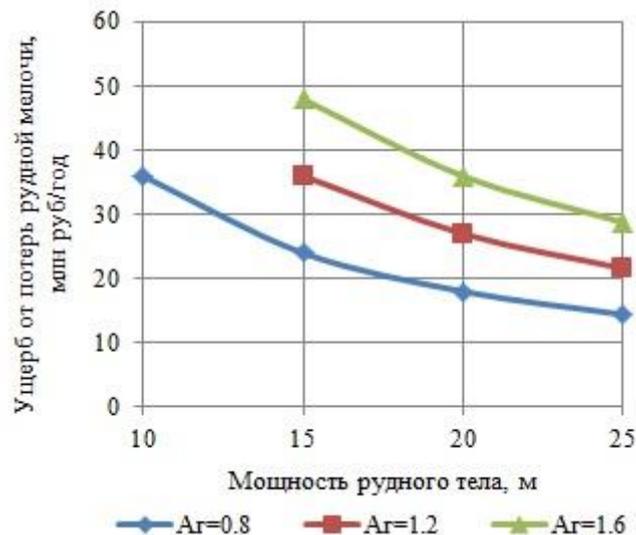


Рис. 5. Ущерб от потерь рудной мелочи в зависимости от мощности рудного тела при различной производственной мощности рудника

Таким образом, даже минимальный ущерб от потерь обогащенной рудной мелочи позволяет говорить о целесообразности разработки и применения специальных технологических мероприятий по его снижению.

Заключение

В результате проведенных исследований установлен характер влияния совокупности горно-геологических и горнотехнических факторов на показатели потерь обогащенной рудной мелочи и обусловленного ими экономического ущерба. Учитывая величину годового ущерба при выемке камер в зависимости от годовой производственной мощности рудника, ширины выемочных единиц, плотности руды в массиве, степени обогащенности рудной мелочи, характеристик слоя теряемой руды и поверхности почвы очистного пространства, можно сделать вывод о целесообразности применения специальных технологических мероприятий по снижению данного вида потерь. При обосновании таких технологических решений необходимо учитывать и другие виды ущерба от переизмельчения руды, оказывающие влияние на показатели эффективности и безопасности функционирования ГТС в целом.

Список литературы

1. Яковлев В.Л., 2022. Основные этапы и результаты исследований по разработке методологических основ стратегии развития горнотехнических систем при освоении глубокозалегающих месторождений твердых полезных ископаемых. *Горная промышленность*, № S1, С. 34-45. DOI 10.30686/1609-9192-2022-1S-34-45.
2. Яковлев В.Л., Корнилков С.В., Соколов И.В., 2018. *Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья*. Екатеринбург: Уральское отделение РАН., 360 с., ISBN 978-5-7691-2514-0.
3. Волков Ю.В., Соколов И.В, Камаев В.Д., 2002. *Выбор систем подземной разработки рудных месторождений*. Ответственный редактор проф., д.т.н. Боликов В.Е.

Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 124 с., ISBN 5-7691-1226-X.

4. Xingwana L., 2016. Monitoring ore loss and dilution for mine-to-mill integration in deep gold mines: A survey-based investigation. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, № 116, P. 149-160. DOI 10.17159/2411-9717/2016/v116n2a6.

5. Ломоносов Г.Г., Туртыгина Н.А., 2014. Явление сегрегации рудной массы и его влияние на формирование качества продукции горнорудного производства. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 6, С. 37-40.

6. Туртыгина Н.А., Елизарьева А.П., Шаров С.А., 2022. Исследования взрывоселекции рудо-породного массива с позиции стабилизации качества руд при добыче. *Научный вестник Арктики*, № 13, С. 94-100. DOI 10.52978/25421220_2022_13_94-100.

7. Чебан А.Ю., Секисов А.Г., 2020. Карьерный экскаватор с рабочим оборудованием для отделения обогащенной рудной мелочи. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*, Т. 18, № 1, С. 16-22. DOI 10.18503/1995-2732-2020-18-1-16-22.

8. Павлов А.М., Семенов Ю.М., 2007. Применение вакуумной технологии при зачистке руды в условиях криолитозоны рудника «Ирокинда». *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11, С. 24 - 29.

9. Wu J., 2020. Research on sublevel open stoping recovery processes of inclined medium thick ore body on the basis of physical simulation experiments. *PLoS ONE*, vol. 15(5), e0232640. DOI: 10.1371/journal.pone.0232640

10. Агошков М.И., 1972. *Научные основы оценки экономических последствий потерь полезных ископаемых при разработке месторождений*. Москва: АН СССР, 149 с.

11. Глотов В.В., Пахалуев Б.Г., 2016. Оптимизация расстояния между стенками желобов при гидрозачистке выемочных блоков. *Вестник Забайкальского государственного университета*, Т. 22, № 4. С. 4-9.

12. Соколов И.В., Рожков А.А., Антипин Ю.Г., 2023. Методический подход к обоснованию технологий снижения ущерба от переизмельчения руды при подземной разработке. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 3, С. 352-367.

13. Ломоносов Г.Г., Шангин С.С., Юсимов Б.В., 2013. Повышение извлечения мелких фракций золотосодержащих руд при подземной разработке маломощных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S27, С. 12-18.

14. Ситников Р.В., 2010. Гидромеханическая зачистка рудной мелочи - эффективный путь снижения потерь руды. *Вестник Читинского государственного университета*, № 2 (59), С. 18-22.

15. Рогизный В.Ф., Хромов В.М., Карпухина М.В., 2020. Технологии селективной выемки маломощных рудных тел с применением малогабаритного самоходного оборудования. *Горная промышленность*, № 1, С. 34-41.

16. Рожков А.А., 2021. Систематизация способов снижения потерь рудной мелочи при подземной разработке месторождений. *Проблемы недропользования*, № 3(30), С. 16-28. DOI 10.25635/2313-1586.2021.03.016.

17. Pickering R. G. B., 2006. Long hole drilling applied to narrow reef mining. International Platinum Conference "Platinum Surges Ahead": proceedings. *The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, P. 199-207.

18. Каплунов Д.Р., Юков В.А., 2013. К оценке интенсивности эксплуатации рудных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, № 1, С. 48-52.

19. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Rozhkov A.A., 2019. Technology of Blasting of Strong Valuable Ores with Ring Borehole Pattern. *Journal of Mining Institute*, Vol. 237, P. 285-291. DOI 10.31897/PMI.2019.3.285.

20. Барановский К.В., Рожков А.А., 2019. Исследование параметров технологии подземной добычи гранулированного кварца. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 3, С. 123-135. DOI 10.25635/IM.2019.27.37355.
21. Соколов И.В., Рожков А.А., Барановский К.В., 2023. Параметризация технологии снижения ущерба от переизмельчения руды при подземной разработке месторождений. *Горная промышленность*, № 5, С. 78-82. DOI 10.30686/1609-9192-2023-5-78-82.
22. Захаров В.Н., Рыльникова М.В., Клебанов Д.А., Радченко Д.Н., 2023. Гипотезы оптимизации параметров функционирования горнотехнических систем с применением методов прогнозной аналитики. *Горная промышленность*, № 5, С. 38-42. DOI 10.30686/1609-9192-2023-5-38-42.
23. Захаров В.Н., Каплунов Д.Р., 2024. Развитие исследований в области теории проектирования горнотехнических систем и геотехнологий при комплексном освоении недр. *Горный журнал*, № 4, С. 4-8.
24. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Рожков А.А., 2020. Модернизация системы разработки маломощного месторождения богатых медноколчеданных руд. *Устойчивое развитие горных территорий*, Т. 12, № 3(45), С. 444-453. DOI 10.21177/1998-4502-2020-12-3-444-453.
25. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Рожков А.А., Никитин И.В., 2022. Пути повышения эффективности подземной разработки пологих месторождений бедных комплексных руд. *Проблемы недропользования*, № 4(35), С. 33-43. DOI 10.25635/2313-1586.2022.04.033.
26. Вохмин С.А., Курчин Г.С., Майоров Е.С., 2009. Оценка мест образования потерь ангидрита при камерно-столбовой системе разработки. *Известия вузов. Горный журнал*, № 5, С. 4-10.
27. Попов Н.И., Иванов А.А., 1979. Снижение потерь отбитой руды при разработке наклонных залежей. *Магадан: Книжное изд-во*, 62 с.
28. Савич И.Н., Мустафин В.И., Лифарь-Лаптев А.А., Яковлев А.М., Сыренов М.О., 2020. Влияние показателей потерь и разубоживания при применении камерной системы разработки с выемкой ромбовидными камерами (в условиях руд средней устойчивости). *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, № S25, С. 43-57. DOI 10.25018/0236-1493-2020-7-25-43-57.
29. Рыльникова М.В., Корнеев С.А., Мажитов А.М., Корнеева В.С., 2014. Обоснование способов освоения и систем разработки маломощных рудных тел Камаганского медноколчеданного месторождения. *Горный журнал*, № 5, С. 86-90.
30. Барановский К.В., Смирнов А.А., Рожков А.А., Ключев М.В., 2021. Повышение эффективности комбинированной геотехнологии жильных золоторудных месторождений. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 3, С. 117-129. DOI 10.46689/2218-5194-2021-3-1-112-123.
31. Антипин Ю.Г., Рожков А.А., Барановский К.В., 2021. Обоснование параметров камерной системы разработки с оставлением неизвлекаемых целиков. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 4, С. 15-23. DOI 10.21440/0536-1028-2021-4-15-23.
32. Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Соколов Р.И., 2012. Влияние показателей извлечения на эффективность технологии подземной разработки рудных месторождений. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 3, С. 4-11.

References

1. Yakovlev V.L., 2022. Osnovnye etapy i rezul'taty issledovaniy po razrabotke metodologicheskikh osnov strategii razvitiya gornotekhnicheskikh sistem pri osvoenii glubokozalegayushchikh mestorozhdenii tverdykh poleznykh iskopaemykh [The main stages

and results of research on the development of the methodological foundations of the strategy for the development of mining systems in the development of deep-lying deposits of solid minerals]. *Gornaya pro-myshlennost'*, № S1, P. 34-45. DOI 10.30686/1609-9192-2022-1S-34-45.

2. Yakovlev V.L., Kornilkov S.V., Sokolov I.V., 2018. Innovatsionnyi bazis strategii kompleksnogo osvoeniya resursov mineral'nogo syr'ya [The innovative basis of the strategy of integrated development of mineral resources]. Ekaterinburg: Ural'skoe otделение RAN, 360 p., ISBN 978-5-7691-2514-0.

3. Volkov Yu.V., Sokolov I.V., Kamaev V.D., 2002. Vybor sistem podzemnoi razrabotki rudnykh mestorozhdenii . [Selection of underground mining systems for ore deposits]. Otvetstvennyi redaktor prof., d.t.n. Bolikov V.E.. Eka-terinburg: Ural'skoe otделение RAN, 124 p., ISBN 5-7691-1226-X.

4. Xingwana L., 2016. Monitoring ore loss and dilution for mine-to-mill integration in deep gold mines: A survey-based investigation. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, № 116, P. 149-160. DOI 10.17159/2411-9717/2016/v116n2a6.

5. Lomonosov G.G., Turtygina N.A., 2014. Yavlenie segregatsii rudnoi massy i ego vliyanie na formirovanie kachestva produktsii gornorudnogo proizvodstva [The phenomenon of ore mass segregation and its influence on the formation of the quality of mining products]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 6, P. 37-40.

6. Turtygina N.A., Elizar'eva A.P., Sharov S.A., 2022. Issledovaniya vzryvoselekttsii rudo-porodnogo massiva s pozitsii stabilizatsii kachestva rud pri dobyche [Studies of explosive extraction of ore-rock mass from the perspective of ore quality stabilization during mining]. *Nauchnyi vestnik Arktiki*, № 13, S. 94-100. DOI 10.52978/25421220_2022_13_94-100.

7. Cheban A.Yu., Sekisov A.G., 2020. Kar'ernyi ekskavator s rabochim oborudovaniem dlya otdeleniya obogashchennoi rudnoi melochi [A quarry excavator with working equipment for separating enriched ore fines]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudar-stvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, Vol. 18, № 1, P. 16-22. DOI 10.18503/1995-2732-2020-18-1-16-22.

8. Pavlov A.M., Semenov Yu.M., 2007. Primenenie vakuumnoi tekhnologii pri zachistke rudy v usloviyakh kriolitozony rudnika "Irokinda" [Application of vacuum technology in ore stripping in the cryolithozone of the Irokinda mine]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 11, P. 24 - 29.

9. Wu J., 2020. Research on sublevel open stoping recovery processes of inclined medium thick ore body on the basis of physical simulation experiments. *PLoS ONE*, vol. 15(5), e0232640. DOI: 10.1371/journal.pone.0232640

10. Agoshkov M.I., 1972. Nauchnye osnovy otsenki ekonomicheskikh posledstviy poter' poleznykh iskopaemykh pri razrabotke mestorozhdenii. [The scientific basis for assessing the economic consequences of mineral losses in the development of deposits]. Moscow: AN SSSR, 149 s.

11. Glotov V.V., Pakhaluev B.G., 2016. Optimizatsiya rasstoyaniya mezhdru stenkami zhelobov pri gidrozachistke vyemochnykh blokov [Optimization of the distance between the gutter walls during hydraulic cleaning of excavation blocks]. *Vestnik Zabaikal'skogo gosudar-stvennogo universiteta*, Vol. 22, № 4. P. 4-9.

12. Sokolov I.V., Rozhkov A.A., Antipin Yu.G., 2023. Metodicheskii podkhod k obosnovaniyu tekhnologii snizheniya ushcherba ot pereizmel'cheniya rudy pri podzemnoi razrabotke [A methodological approach to substantiating technologies for reducing damage from ore over-grinding during underground mining]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 3, P. 352-367.

13. Lomonosov G.G., Shangin S.S., Yusimov B.V., 2013. Povyshenie izvlecheniya melkikh fraktsii zolotosoderzhashchikh rud pri podzemnoi razrabotke malomoshchnykh mestorozhdenii [Increased extraction of small fractions of gold-bearing ores during underground

mining of low-yield deposits]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № S27, P. 12 - 18.

14. Sitnikov R.V., 2010. *Gidromekhanicheskaya zachistka rudnoi melochi - effektivnyi put' snizheniya poter' rudy* [Hydromechanical stripping of ore fines as an effective way to reduce ore losses]. *Vestnik Chitinskogo gosudarstvennogo universiteta*, № 2 (59), P. 18-22.

15. Rogiznyi V.F., Khromov V.M., Karpukhina M.V., 2020. *Tekhnologii selektivnoi vyemki malomoshchnykh rudnykh tel s primeneniem malogabaritnogo samokhodnogo oborudovaniya* [Technologies of selective excavation of low-power ore bodies using small-sized self-propelled equipment]. *Gornaya promyshlennost'*, № 1, P. 34-41.

16. Rozhkov A.A., 2021. *Sistematizatsiya sposobov snizheniya poter' rudnoi melochi pri podzemnoi razrabotke mestorozhdenii* [Systematization of ways to reduce the loss of ore fines during underground mining]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 3(30), P. 16-28. DOI 10.25635/2313-1586.2021.03.016.

17. Pickering R. G. B., 2006. Long hole drilling applied to narrow reef mining. *International Platinum Conference "Platinum Surges Ahead": proceedings. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, P. 199-207.

18. Kaplunov D.R., Yukov V.A., 2013. *K otsenke intensivnosti ekspluatatsii rudnykh mestorozhdenii* [On assessing the intensity of exploitation of ore deposits]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, № 1, P. 48-52.

19. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Rozhkov A.A., 2019. *Technology of Blasting of Strong Valuable Ores with Ring Borehole Pattern*. *Journal of Mining Institute*, Vol. 237, P. 285-291. DOI 10.31897/PMI.2019.3.285.

20. Baranovskii K.V., Rozhkov A.A., 2019. *Issledovanie parametrov tekhnologii podzemnoi dobychi granulirovannogo kvartsa* [Investigation of the parameters of the technology of underground mining of granular quartz]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 3, P. 123-135. DOI 10.25635/IM.2019.27.37355.

21. Sokolov I.V., Rozhkov A.A., Baranovskii K.V., 2023. *Parametrizatsiia tekhnologii snizheniia ushcherba ot pereizmel'cheniya rudy pri podzemnoi razrabotke mestorozhdenii* [Parameterization of the technology for reducing damage from over-grinding of ore during underground mining]. *Gornaya promyshlennost'*, № 5, S. 78-82. DOI 10.30686/1609-9192-2023-5-78-82.

22. Zakharov V.N., Ryl'nikova M.V., Klebanov D.A., Radchenko D.N., 2023. *Gipotezy optimizatsii parametrov funktsionirovaniya gornotekhnicheskikh sistem s primeneniem metodov prognoznoi analitiki* [Hypotheses of optimization of parameters of functioning of mining engineering systems using methods of predictive analytics]. *Gornaya promyshlennost'*, № 5, P. 38-42. DOI 10.30686/1609-9192-2023-5-38-42.

23. Zakharov V.N., Kaplunov D.R., 2024. *Razvitie issledovaniia v oblasti teorii proektirovaniya gornotekhnicheskikh sistem i geotekhnologii pri kompleksnom osvoenii nedr* [Development of research in the field of theory of design of mining engineering systems and of geotechnologies in the complex development of mineral resources]. *Gornyi zhurnal*, № 4, P. 4-8.

24. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Rozhkov A.A., 2020. *Modernizatsiya sistemy razrabotki malomoshchnogo mestorozhdeniya bogatykh mednokolchedannykh rud* [Modernization of the development system for a low-yield deposit of rich copper-crushed ores]. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii*, Vol. 12, № 3(45), S. 444-453. DOI 10.21177/1998-4502-2020-12-3-444-453.

25. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Baranovskii K.V., Rozhkov A.A., Nikitin I.V., 2022. *Puti povysheniya effektivnosti podzemnoi razrabotki pologikh mestorozhdenii bednykh kompleksnykh rud* [Ways to increase the efficiency of underground mining of shallow deposits of poor complex ores]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4(35), P. 33-43. DOI 10.25635/2313-1586.2022.04.033.

26. Vokhmin S.A., Kurchin G.S., Maiorov E.S., 2009. Otsenka mest obrazovaniya poter' anhidrita pri kamerno-stolbovoi sisteme razrabotki [Assessment of the sites of formation of anhydrite losses during the chamber-pillar mining system]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*, № 5, P. 4-10.

27. Popov N.I., Ivanov A.A., 1979. Snizhenie poter' otbitoi rudy pri razrabotke naklonnykh zalezhei [Reduction of losses of beaten ore during the development of inclined deposits]. Magadan: Knizhnoe izd-vo, 62 p.

28. Savich I.N., Mustafin V.I., Lifar'-Laptev A.A., Yakovlev A.M., Syrenov M.O., 2020. Vliyanie pokazatelei poter' i razubozhivaniya pri primenenii kamernoi sistemy razrabotki s vyemkoi rombovidnymi kamerami (v usloviyakh rud srednei ustoichivosti) [The effect of loss and dilution rates when using a diamond-shaped excavation chamber system (in conditions of medium-stability ores)]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, № S25, P. 43-57. DOI 10.25018/0236-1493-2020-7-25-43-57.

29. Ryl'nikova M.V., Korneev S.A., Mazhitov A.M., Korneeva V.S., 2014. Obosnovanie sposobov osvoeniya i sistem razrabotki malomoshchnykh rudnykh tel Kamaganskogo mednokolchedannogo mestorozhdeniya [Substantiation of methods of exploitation and systems of development of low-power ore bodies of the Kamagan copper-crusted deposit]. *Gornyi zhurnal*, № 5, P. 86-90.

30. Baranovskii K.V., Smirnov A.A., Rozhkov A.A., Klyuev M.V., 2021. Povyshenie effektivnosti kombinirovannoi geotekhnologii zhil'nykh zolotorudnykh mestorozhdenii [Improving the efficiency of combined geotechnology of vein gold deposits]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 3, P. 117-129. DOI 10.46689/2218-5194-2021-3-1-112-123.

31. Antipin Yu.G., Rozhkov A.A., Baranovskii K.V., 2021. Obosnovanie parametrov kamernoi sistemy razrabotki s ostavleniem neizvlekaemykh tselikov [Substantiation of the parameters of the camera system developed with the leaving of non-removable rear sights]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, № 4, P. 15-23. DOI 10.21440/0536-1028-2021-4-15-23.

32. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Sokolov R.I., 2012. Vliyanie pokazatelei izvlecheniya na effektivnost' tekhnologii podzemnoi razrabotki rudnykh mestorozhdenii [The influence of extraction rates on the efficiency of the technology of underground mining of ore deposits]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, № 3, P. 4-11.



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ПРИ ОСВОЕНИИ НЕДР**

УДК 622.023.23:539.4

Антонов Владимир Александрович

главный научный сотрудник,
доктор технических наук,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: Antonov@igduran.ru

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ
ПРОЧНОСТИ ОБРАЗЦОВ
И МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД***Аннотация:*

Дано математическое описание и выявлены закономерности определения и изменения прочности образцов горной породы и горного массива. Основой для определений является создание паспорта их прочности по приведенной методике, а также его динамичное применение в сравнениях с образующимися по кругам Мора касательными напряжениями горных пород в зонах деструкции массива. Их прочность определяется с учетом напряжения бокового распора в массиве и коэффициента его структурного ослабления, рассчитываемого по экспоненциальной зависимости от интенсивности наблюдаемой трещиноватости. Для распознавания отмеченных зон введено новое понятие о коэффициенте предельного бокового распора горных пород и установлена его аналитическая связь с коэффициентом структурного ослабления массива и гравитационным давлением. По соотношению принятого и предельного бокового распора сформулирован критерий устойчивости горных пород массива. На примере расчета прочности и устойчивости алевролитового массива показано, что по данному критерию при имеющемся боковом распоре определяются минимально допустимые значения коэффициента структурного ослабления внутри массива и на его вертикальной стенке. Определяются также угловые направления касательного напряжения, сдерживающего разрушение горной породы в зоне ее деструкции. При запредельном снижении коэффициента структурного ослабления массива образуется угловой интервал в направлениях касательного напряжения, в пределах которого горная порода в зоне деструкции разрушается. По приведенным закономерностям определяется и прогнозируется прочностное состояние пород горного массива, включая предупреждения о возможных обрушениях в виде горных ударов.

Ключевые слова: прочность горной породы, паспорт прочности, круг Мора, боковой распор, коэффициент структурного ослабления.

DOI: 10.25635/2313-1586.2024.04.031

Antonov Vladimir A.

Chief Researcher,
Doctor of Engineering Sciences,
Institute of Mining UB RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: Antonov@igduran.ru

**PATTERNS OF CHANGES
IN THE STRENGTH OF SAMPLES
AND OF ROCK MASS***Abstract:*

A mathematical description is given and the regularities of determination and change of strength of rock samples and rock mass are revealed. The basis for determinations is the creation of a passport of their strength according to the given method, as well as its dynamic application in comparisons with tangential stresses of rocks in the zones of massif destruction formed according to Mohr's circles. Their strength is determined taking into account the lateral thrust stress in the massif and the coefficient of its structural weakening, calculated according to the exponential dependence on the intensity of the observed cracking. To recognize the noted zones, a new concept of the coefficient of ultimate lateral thrust of rocks is introduced and its analytical connection with the coefficient of structural weakening of the massif and gravitational pressure is established. According to the ratio of the accepted and ultimate lateral thrust, the criterion of stability of rocks of the massif is formulated. Using the example of calculating the strength and stability of a siltstone massif, it is shown that the minimum permissible values of the structural weakening coefficient inside the massif and on its vertical wall are determined by this criterion for a given lateral thrust. The angular directions of the shear stress restraining the destruction of the rock in the zone of its destruction are also determined. With an extreme decrease in the structural weakening coefficient of the massif, an angular interval of shear stress directions is formed, within which the rock in the destruction zone is destroyed. The strength state of the rocks of the massif are determined and predicted according to the given regularities, including warnings about possible collapses in the form of rock bursts.

Key words: rock strength, strength certificate, Mohr circle, lateral thrust, structural weakening coefficient.

Введение

Оценка прочности и устойчивости горного массива, вмещающего и ограничивающего техногенные выработки, является важной проблемой обеспечения безопасной добычи минерального сырья. Ее решение состоит в определении граничных горно-механических условий, по которым на разной глубине массива прогнозируются и выделяются зоны трещиноватой деструкции с запредельным напряженным состоянием, приводящим к разрушению горной породы и техногенной инфраструктуры.

Основные положения данной проблемы изложены в изданиях [1 – 4], где аспекты формирования напряженно-деформированного состояния горного массива применяются в условиях приконтурных зон горных выработок разной конфигурации. Суждение о предельной устойчивости массива в этих зонах дается в сравнениях гравитационного давления в них с касательными напряжениями в трещинах, сдерживающими разрушение горной породы. В исследовании [5] показано наиболее детально, что касательные напряжения в зонах деструкции горного массива рассчитываются по предложенной формуле паспорта его прочности с учетом образованной трещиноватости. Однако этого недостаточно для определения зон разрушения массива, поскольку не учитывается сдерживающее влияние бокового распора и его связь с деструкцией массива. По этой же причине не обоснована оценка, как, например, в работе [6], устойчивости горного массива по соотношению гравитационного давления с прочностью его образцов, определенной при одноосном сжатии. Таким образом, результаты отмеченных исследований не дают связного представления о критерии, по которому следует выделять зоны горного массива с запредельными параметрами механического напряжения и структурного ослабления, при которых происходит разрушение горной породы.

Главной причиной разрушения при определенном механическом напряжении в отдельных зонах массива является снижение его прочности из-за разуплотнения в трещинах и полостях. Это приводит к структурному ослаблению массива и росту реактивного, т.е. гравитационно-зависимого бокового распора. Поэтому исследование их связей представляется важным и необходимым. В данной статье в плане восполнения отмеченных недостатков рассмотрены закономерности изменения прочности образцов горной породы и горного массива, отображаемые в их паспорте с учетом влияния бокового распора и коэффициента структурного ослабления, позволяющие по установленному критерию выявлять зоны возможного разрушения массива на разной его глубине.

Расчет паспорта прочности горных пород

Необходимую информацию о предельных напряжениях, сдерживающих разрушение горной породы, получают в паспорте ее прочности, построенном по соответствующей теории Мора [7] с использованием результатов лабораторных испытаний представительных образцов горных пород на прочность, проведенных при их растяжении, одноосном и объемном сжатии.

В работе [8] показано, что прочность образцов горной породы по мере возрастания бокового давления увеличивается в меньшей степени. В связи с этим график паспорта, выражающий зависимость сдерживающего касательного напряжения τ , возникающего на площадке скольжения сдвигающихся горных пород, от нормально ориентированного к ней напряжения, становится криволинейно вогнутым и описывается математическим функционально-степенным соотношением

$$\tau = A(\sigma + \sigma_p)^\mu, \quad (1)$$

где A – масштабный коэффициент паспорта; σ_p – прочность горной породы на растяжение; σ – нормальное напряжение; μ – показатель степени, определяемый в области, приближенной к значению $\mu=0,5$. Коэффициент A и показатель μ взаимосвязаны при их расчете методом наименьших квадратов в отклонениях паспорта от экспериментальных значений прочности образцов горной породы.

В разных интервалах аргумента $\sigma_p < \sigma < 0$ или $\sigma > 0$ происходит, соответственно, растяжение или сжатие горной породы. Обобщенный вид графика паспорта и встроеного в него предельного круга Мора показан на рис 1.

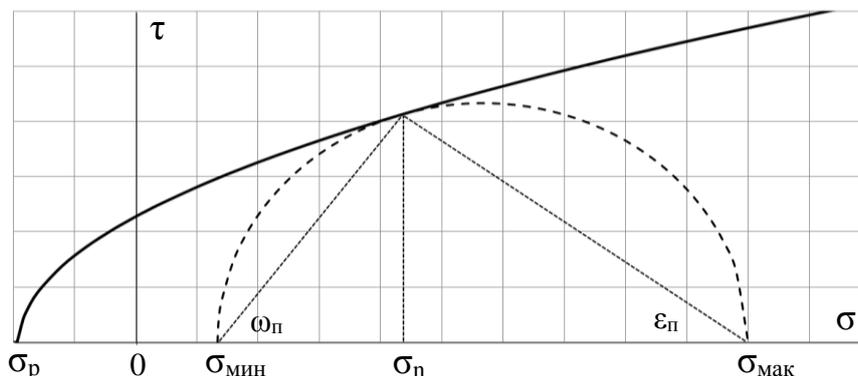


Рис. 1. График паспорта прочности горных пород

Главные напряжения (максимальное σ_{\max} и минимальное σ_{\min}), определенные по встроеному кругу Мора при заданном нормальном напряжении σ_n , связаны между собой. В этой связи так же однозначно определяются предельные углы наклона ϵ_p и ω_p направлений максимального касательного напряжения, сдерживающего разрушение горной породы, к направлениям осей соответствующих главных напряжений σ_{\max} и σ_{\min} . С учетом аналитического выражения функционально-степенного паспорта главные напряжения рассчитываются по следующим формулам:

$$\sigma_{\max} = \sigma_n + \mu A^2 (\sigma_n + \sigma_p)^{2\mu-1} \left[1 + \sqrt{1 + \langle A\mu(\sigma_n + \sigma_p)^{\mu-1} \rangle^{-2}} \right]; \quad (2)$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_n + \mu A^2 (\sigma_n + \sigma_p)^{2\mu-1} \left[1 - \sqrt{1 + \langle A\mu(\sigma_n + \sigma_p)^{\mu-1} \rangle^{-2}} \right]. \quad (3)$$

Отметим важное свойство приведенного выражения паспорта. При увеличении показателя степени ($\mu > 0,5$) или его спаде ($\mu < 0,5$) масштабный коэффициент паспорта A , соответственно, уменьшается или возрастает. При этом положение графика паспорта изменяется незначительно. Поэтому примем показатель $\mu = 0,5$ и в полученном паспорте

$$\tau = A\sqrt{\sigma + \sigma_p} \quad (4)$$

определим коэффициент A по связи главных напряжений σ_{\max} и σ_{\min} . С учетом принятого показателя их выражения (2), (3) упрощаются:

$$\sigma_{\max} = \sigma_n + \frac{A^2}{2} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4(\sigma_n + \sigma_p)}{A^2}} \right], \quad (5)$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_n + \frac{A^2}{2} \left[1 - \sqrt{1 + \frac{4(\sigma_n + \sigma_p)}{A^2}} \right]. \quad (6)$$

Исключая из приведенной системы уравнений нормальное напряжение σ_n , получаем выражение зависимости σ_{\min} от σ_{\max} :

$$\sigma_{\min} = \sigma_{\max} - A(2\sqrt{\sigma_{\max} + \sigma_p} - A), \quad (7)$$

где $\sigma_{\max} > 0$, а σ_{\min} изменяется в ограниченном интервале $-\sigma_p < \sigma_{\min} < \sigma_{\max}$.

В частности, по данным экспериментальных измерений прочности образцов горной породы при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$ принимаем равенство $\sigma_{\max} = \sigma_{сж}$, выполняемое при условии $\sigma_{\min} = 0$. С учетом таких условий получаем из (7) формулу расчета масштабного коэффициента A :

$$A = \sqrt{\sigma_{сж} + \sigma_p} - \sqrt{\sigma_p}. \quad (8)$$

Его размерность выражается соотношением $\text{кг}^{1/2}\text{м}^{-1/2}/\text{с}$. Теперь математическое выражение паспорта представляется в следующем виде:

$$\tau = (\sqrt{\sigma_{сж} + \sigma_p} - \sqrt{\sigma_p})\sqrt{\sigma + \sigma_p}.$$

Приведенный вывод формулы паспорта означает, что для получения аналитического выражения его криволинейно-вогнутого графика не обязательно проводить измерения прочности образцов горной породы при объемном сжатии. Достаточно измерений прочности при их одноосном растяжении и сжатии. Большинство горных пород обладают прочностью, не превышающей соответствующих значений 15 и 100 МПа. График изменения в таких условиях квадрата масштабного коэффициента A^2 показан на рис. 2.

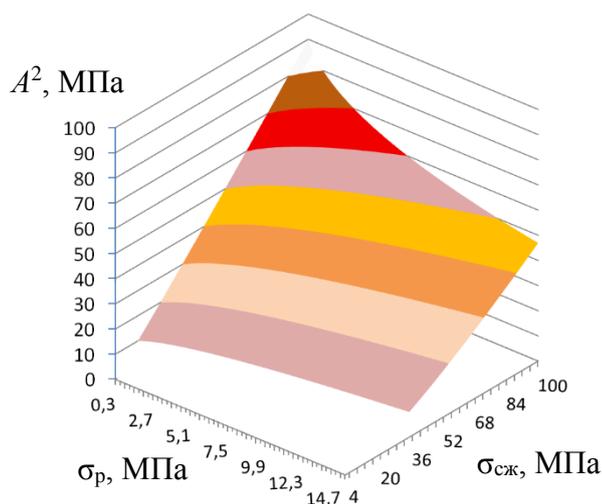


Рис. 2. График изменения масштабного коэффициента паспорта

Его значения в большей степени зависят от прочности горной породы при сжатии. Квадрат коэффициента не превышает 80 МПа.

Предельная прочность массива горных пород

Прочность горной породы в массиве становится меньше отмеченных паспортных значений из-за наличия его блочной деструкции и зон разуплотнения. Их образование и развитие связано с влиянием многих факторов (анизотропия, пористость, обводненность и т. д.). Однако основным и главным из них является развитие трещиноватости горного массива и образование техногенных полостей горных выработок. По сети трещин и полостям образуются зоны его ослабления, в которых при определенном механическом напряжении происходит разрушение горной породы.

Снижение паспортной прочности горных пород оценивается коэффициентом структурного ослабления k_c . Согласно табличным и графическим представлениям [9 - 11] он выпукло уменьшается в связи с ростом интенсивности трещиноватости I_T

(количества трещин на интервале 1 м горного массива). По этим данным сформулирована следующая экспоненциальная зависимость его изменения:

$$k_c = k_{c0} e^{-\frac{I_T}{4,5}},$$

где $k_{c0}=1$ – единичное значение коэффициента структурного ослабления, принимаемое при отсутствии трещин ($I_T=0$). График зависимости коэффициента структурного ослабления от интенсивности трещиноватости показан на рис. 3.

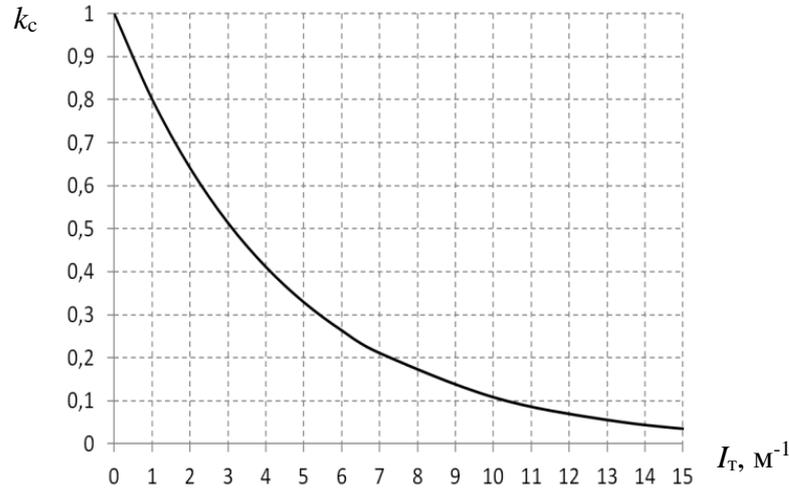


Рис. 3. График зависимости коэффициента структурного ослабления от интенсивности трещиноватости

Касательное напряжение, противодействующее сдвигению и разрушению горной породы на площадках трещиноватости и деструктивного разуплотнения горного массива, выражается по паспорту его прочности τ_m , который представляется скорректированным паспортом прочности образцов горных пород (4) с учетом структурного ослабления:

$$\tau_m = Ak_c \sqrt{\sigma + k_c \sigma_p}. \tag{9}$$

Графики касательного напряжения в горном массиве τ_m , проведенные при разных значениях коэффициента структурного ослабления, показаны на рис. 4.

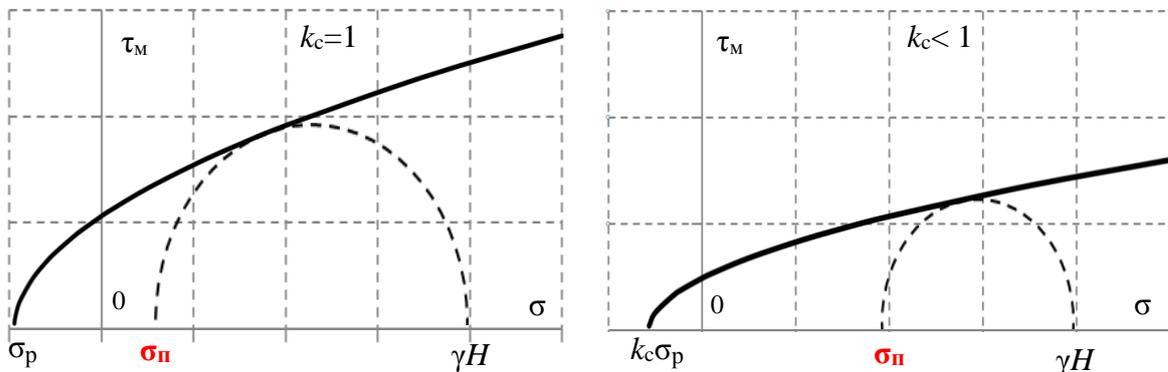


Рис. 4. Определение предельного горизонтального напряжения по паспорту прочности массива горных пород

Алгебраические знаки напряжений сжатия и растяжения в массиве оставлены такими же, как в паспорте. Тогда на глубине H массива наибольшее главное напряжение

горных пород σ_{\max} представляется их гравитационным вертикальным давлением $\sigma_{\max} = \gamma H$, где γ – сила тяжести единичного объема горной породы. По кругу Мора, соответствующему этому условию и касающемуся графика τ_m , определяется наименьшее главное напряжение σ_{\min} , представляющее собой предельное горизонтальное давление σ_n горных пород. При снижении коэффициента k_c наклон графика к оси σ и радиусы встроенных в него кругов Мора уменьшаются. При этом предельное горизонтальное (боковое) напряжение σ_n растет, приближаясь по значению к вертикальному гравитационному давлению γH . Таким образом, оно изменяется в пределах следующего неравенства:

$$-k_c \sigma_p < \sigma_n < \gamma H.$$

Зависимость предельного бокового давления от коэффициента структурного ослабления k_c и вертикального напряжения горных пород γH определяется по аналогии с (7) также скорректированным соотношением

$$\sigma_n = \gamma H - Ak_c (2\sqrt{\gamma H + k_c \sigma_p} - Ak_c). \quad (10)$$

Положим, что боковое давление σ_n возникает в результате реактивного, т.е. деформационного, воздействия гравитационного напряжения γH налегающей части массива. Тогда для относительной его оценки введем понятие коэффициента предельного бокового распора λ_n , определив его соотношением

$$\lambda_n = \frac{\sigma_n}{\gamma H}. \quad (11)$$

Оно принимается в следующих интервалах:

$$-\frac{k_c \sigma_p}{\gamma H} < \lambda_n < 1; \quad \gamma H > 0.$$

Наличие отрицательных значений коэффициента λ_n объясняется предельным горизонтальным растяжением горной породы с напряжением, при котором еще не происходит ее разрушение. Такое состояние бокового растяжения образуется, например, вблизи вертикальной границы свободной поверхности горного массива, т.е. в приконтурной зоне борта карьера или вертикальной горной выработки.

Выражение коэффициента λ_n с учетом влияния горно-механических параметров (10) представим в следующем виде:

$$\lambda_n = 1 - \frac{Ak_c}{\gamma H} (2\sqrt{\gamma H + k_c \sigma_p} - Ak_c). \quad (12)$$

Напряжение σ_n и коэффициент λ_n существенно зависят от давления γH , масштабного и структурного коэффициентов A и k_c . Слабее влияет прочность горной породы при растяжении σ_p . Графики изменения σ_n и λ_n при заданных значениях $A^2=25$ МПа и $\sigma_p=5$ МПа показаны на рис 5.

С ростом коэффициента k_c напряжение σ_n и предельный боковой распор λ_n уменьшаются. Коэффициент λ_n снижается от единицы к нулю и далее до отрицательных значений. Такое снижение ограничено очевидным условием, следующим из допустимых значений напряжения σ_n :

$$\frac{\sqrt{\gamma H + k_c \sigma_p}}{Ak_c} \geq 1.$$

Графики зависимости λ_n от k_c при разном напряжении γH , образующемся на глубине H горного массива, и условиях $A^2=25$ МПа, $\sigma_p=5$ МПа показаны на рис. 6.

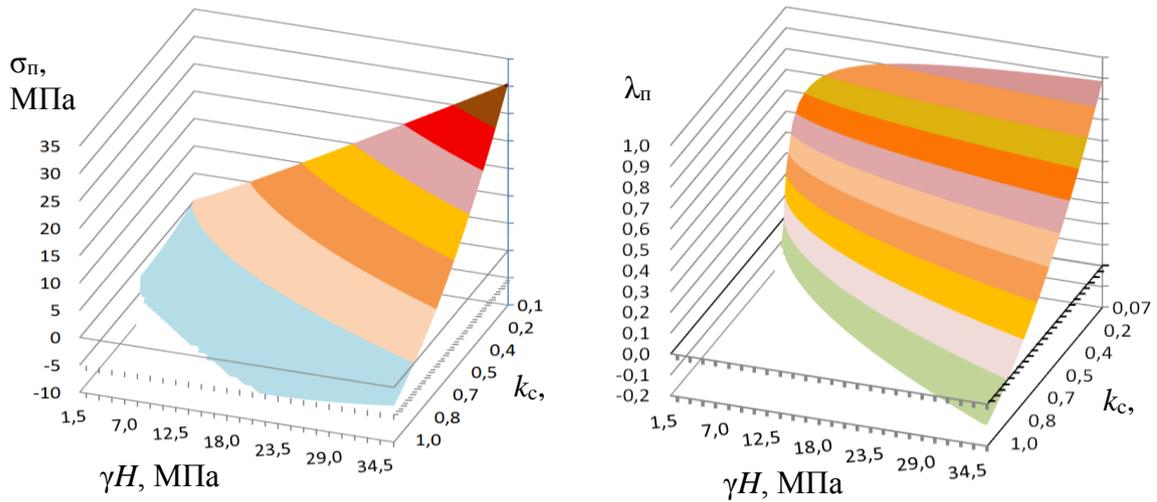


Рис. 5. Графики изменения предельного горизонтального напряжения и коэффициента бокового распора

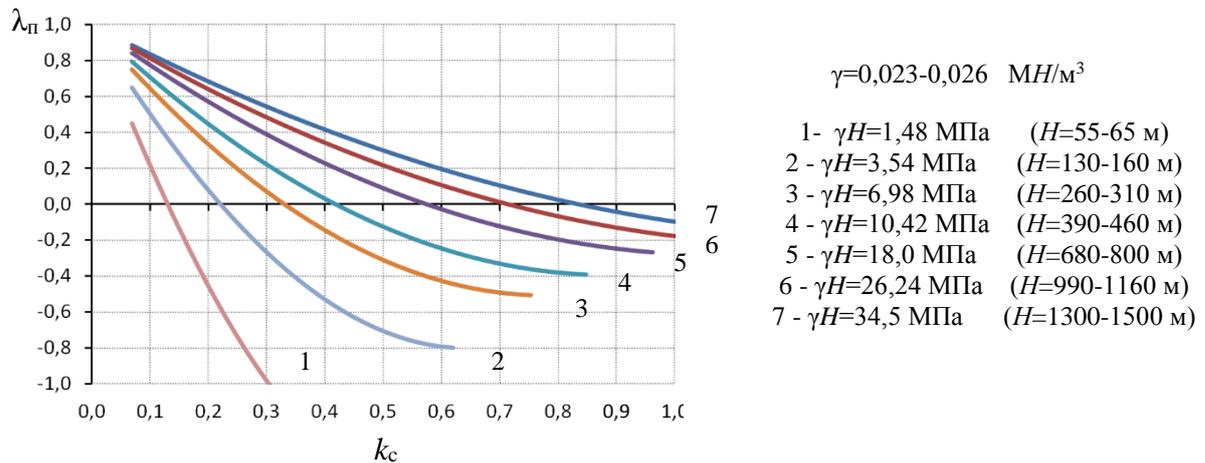


Рис. 6. Графики связи коэффициентов предельного горизонтального распора и структурного ослабления на разной глубине горного массива

На всех углубленных горизонтах массива увеличение его трещиноватости и, соответственно, уменьшение структурного коэффициента приводит к росту $\lambda_{п}$. Чем меньше глубина H , тем круче такой рост и ниже значения сужающегося интервала $k_{с}$. Общая закономерность связи коэффициентов $k_{с}$ и $\lambda_{п}$ состоит в том, что при значительной трещиноватой деструкции горного массива и снижении коэффициента его структурного ослабления коэффициент предельного бокового распора стремится к единице. Это означает приближение состояния горной породы к вязкой пластичности и гидростатическому равновесию.

Предельные и запредельные углы направлений касательного напряжения

Максимальное касательное напряжение, противодействующее разрушающему сдвиганию горной породы в направлении протяженной зоны структурного разуплотнения горного массива, равно $\tau_{м}$. Покажем закономерность изменения образующегося при этом предельного угла $\epsilon_{п}$ между направлением касательного напряжения и осью вертикального давления. Предельный угол наклона к перпендикулярно расположенной оси горизонтального давления $\omega_{п}$ определяется очевидным вычитанием: $\omega_{п} = 90^{\circ} - \epsilon_{п}$.

Угол ε_{Π} определен из следующих соотношений величин, ограниченных кругом Мора, встроенном в паспорт прочности горного массива τ_m при максимальном главном напряжении γH :

$$\sin 2\varepsilon_{\Pi} = \frac{2Ak_c\sqrt{\sigma_{mn} + k_c\sigma_p}}{\gamma H - \sigma_{\Pi}}; \quad \sigma_{mn} = \gamma H - Ak_c\sqrt{\gamma H + k_c\sigma_p},$$

где σ_{mn} – нормальное напряжение в точке касания круга Мора с графиком τ_m . В результате получено выражение угла:

$$\varepsilon_{\Pi} = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2\sqrt{k_c\sigma_p + \gamma H} - Ak_c\sqrt{k_c\sigma_p + \gamma H}}{2\sqrt{k_c\sigma_p + \gamma H} - Ak_c}. \quad (13)$$

График изменения угла ε_{Π} при значениях $A^2=25$ МПа, $\sigma_p=5$ МПа показан на рис. 7. Предельный угол наклона касательного напряжения к вертикали, при котором сдерживается разрушение горной породы в протяженных зонах деструкции массива, вогнуто возрастает в связи с увеличением давления γH и уменьшением коэффициента структурного ослабления k_c , приближаясь к максимальному углу 45° .

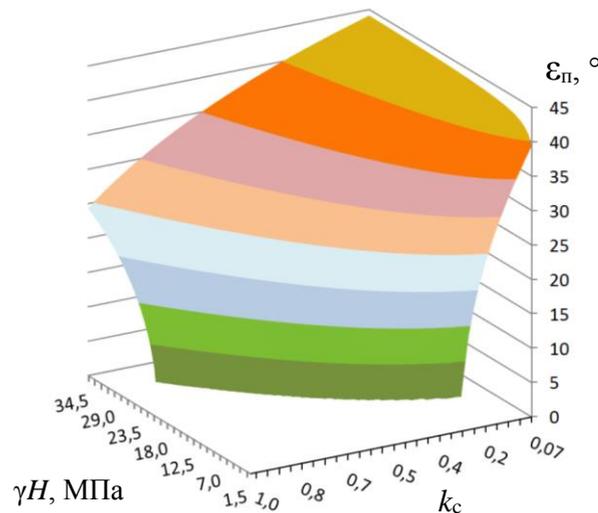


Рис. 7. График изменения предельного угла ε_{Π}

Когда горизонтальное давление σ_r больше предельного значения σ_{Π} , горные породы массива находятся в устойчивом состоянии при всех возможных углах наклона содержащейся в нем протяженной деструктивной зоны к направлению γH . Поэтому критерием их устойчивости при заданном или принятом коэффициенте бокового распора λ является неравенство $\lambda \geq \lambda_{\Pi}$. Если горизонтальное давление становится меньше предельного значения и, соответственно, выполняется неравенство боковых распоров $\lambda < \lambda_{\Pi}$, возникает интервал запредельных углов $\Delta\varepsilon$, охватывающий зону горного массива, в которой происходит разрушение горной породы.

Следует отметить, что значение распора λ принимают при условии всестороннего бокового сжатия горной породы в нетронутом массиве с учетом его упруго-пластичных свойств. С приближением к границе естественной или техногенной полости, образующей в массиве свободное пространство, горизонтальное давление в приграничной зоне слабеет и боковой распор уменьшается. Например, при приближении из массива к вертикально-плоской стенке горной выработки боковое давление со стороны полости снижается, а со стороны горного массива остается прежним. По сведениям исследований [12] соответствующее уменьшение коэффициента концентрации горизонтального напряжения при отработке рудных

месторождений начинается с расстояния 30 – 40 м до стенки. При этом горизонтальное давление и деформация горной породы в приконтурной зоне перераспределяются от сжатия, минуя фазу сцепления в касательном напряжении ($\lambda=0$), к растяжению. Сжимающий сдвиг горных пород по трещинам сменяется их расширением и отрывом. В результате образуется известное выпирание стенок горной выработки в сторону свободного пространства [13]. Выпирание стенок сдерживается структурированной прочностью горной породы на растяжение $k_c\sigma_p$. Поэтому в зонах неустойчивого состояния горного массива боковой распор изменяется в следующем интервале:

$$-\frac{k_c\sigma_p}{\gamma H} < \lambda < \lambda_{II}$$

В частности, на вертикально-плоской стенке горной выработки боковой распор уменьшается в два раза и берется со знаком минус по сравнению с его обычным значением, принятым для условий полного окружения породами горного массива.

Состояние запредельных напряжений, приводящих к разрушению горной породы в локальной зоне, показано на рис. 8. Часть круга Мора, построенного по вертикальному давлению γH и имеющемуся горизонтальному напряжению $\sigma_r < \sigma_{II}$, превышает график τ_m . В интервале превышения выделены углы ε_1 и ε_2 , ограничивающие зону разрушения горного массива. Они рассчитываются путем решения системы уравнений, описывающих пересечения круга Мора и графика τ_m в точках 1 и 2. В результате получено следующее их выражение:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{2} \arccos \left\langle \frac{(Ak_c)^2}{\gamma H(1-\lambda)} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{1}{(Ak_c)^2} \left[4k_c\sigma_p - \frac{(\gamma H)^2(1-\lambda)^2}{(Ak_c)^2} + 2\gamma H(1+\lambda) \right]} \right] \right\rangle.$$

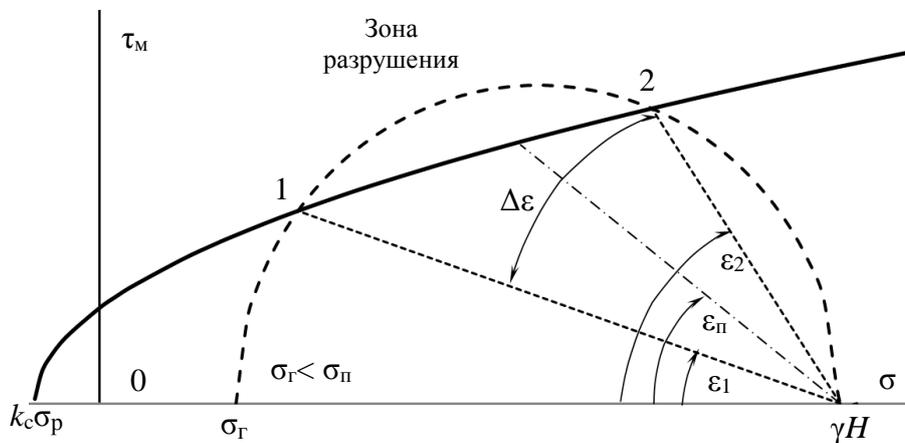


Рис. 8. Схема образования углового интервала, выделяющего зону разрушения пород горного массива

В допредельных угловых интервалах $\varepsilon < \varepsilon_1$ и $\varepsilon > \varepsilon_2$ горные породы в массиве устойчивы к разрушению. В запредельном интервале разности углов $\Delta\varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$ их устойчивость нарушается. Горный массив разрушается в зоне протяженного деструктивного разуплотнения, угловая ориентация которой относительно вертикального направления γH находится в данном интервале. Отметим, что граничные углы зоны разрушения также оцениваются приблизительно с погрешностью, не превышающей $0,5^\circ$, по следующим соотношениям:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{II} - \frac{\Delta\varepsilon}{2}, \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_{II} + \frac{\Delta\varepsilon}{2}.$$

В качестве примеров на рис. 9 показаны графики изменения половинного интервала $\Delta\varepsilon/2$ в координатах коэффициентов бокового распора λ и структурного ослабления k_c при заданных значениях параметров A , σ_p и γH .

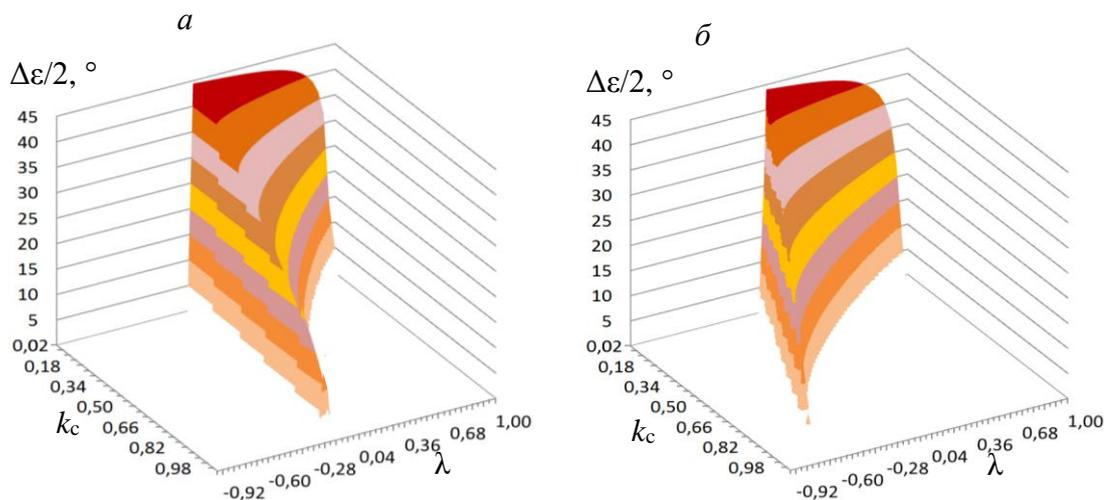


Рис. 9. Графики изменения углового полуинтервала $\Delta\varepsilon/2$:
 а – $A^2=4$ МПа, $\sigma_p=1$ МПа, $\gamma H=5$ МПа; б – $A^2=25$ МПа, $\sigma_p=10$ МПа, $\gamma H=12,5$ МПа

Отметим особенности изменения половинного углового интервала $\Delta\varepsilon/2$. Он выпукло уменьшается по мере роста коэффициента λ от нижнего предельного значения $\lambda=-k_c\sigma_p/\gamma H$ до верхнего $\lambda=\lambda_p$. При разупрочнении горного массива и снижении коэффициента структурного ослабления k_c рост углового интервала $\Delta\varepsilon/2$ начинается с его значений, при которых выполняется следующее неравенство:

$$\frac{1}{k_c} [\gamma H(1+\lambda) + 2k_c\sigma_p] \left[1 - \sqrt{1 - \frac{(\gamma H)^2(1-\lambda)^2}{[\gamma H(1+\lambda) + 2k_c\sigma_p]^2}} \right] > A^2.$$

Наиболее широким (приближенным к 45°) интервал $\Delta\varepsilon/2$ становится при снижении бокового распора к нулю ($\lambda=0$) в зонах горного массива с наибольшей деструкцией ($k_c \ll 1$).

Пример определения прочности массива горной породы

Покажем возможность применения приведенных закономерностей в оценках прочности горной породы на примере массива, сложенного трещиноватым алевролитом. В качестве исходных данных приняты усредненные результаты экспериментальных определений прочности его образцов, приведенные в исследовании [14]. С учетом представленных значений прочности образцов на одноосное растяжение $\sigma_p=9,5$ МПа и сжатие $\sigma_{сж}=34,5$ МПа рассчитан по формуле (8) масштабный коэффициент паспорта прочности алевролита $A=3,55 \cdot 10^3 \text{ кг}^{1/2} \text{ м}^{-1/2} / \text{с}$. В результате формула паспорта с размерностью входящих напряжений МПа определена в следующем виде:

$$\tau = 3,55 \sqrt{\sigma + 9,5}.$$

Она практически совпадает с аналогичным выражением степенной модели паспорта, полученной в работе [8] с немного меньшим коэффициентом $A=3,3 \cdot 10^3 \text{ кг}^{1/2} \text{ м}^{-1/2} / \text{с}$, но зато повышенным показателем $\mu=0,52$ методом регрессии по тем же и дополненным данным объемных измерений прочности образцов алевролита. Этим обстоятельством

подтверждается достоверность предложенного упрощенного подхода к построению криволинейной модели паспорта.

Условия предельной прочности алевролита в массиве и запредельные углы возможного его разрушения определены по результатам сопоставления напряжений, определенных по паспорту прочности массива

$$\tau_m = 3,55k_c \sqrt{\sigma + k_c 9,5}$$

и кругам Мора, проведенным по гравитационному напряжению в нем γH и боковому распору $\lambda \gamma H$. Критерием возможного разрушения горной породы в локальной зоне массива на выбранной глубине является соотношение коэффициентов принятого и предельного распора $\lambda < \lambda_p$, а также соответствующий этому соотношению интервал допустимых значений коэффициента его структурного ослабления.

Полагая, что до глубины 300 – 400 м боковой распор формируется из-за упругой деформации горных пород массива, его значение принимают согласно гипотезе А.Н. Динника по известной связи с коэффициентом Пуассона [15]. Для большинства горных пород, включая алевролит, такая оценка бокового распора в среднем составляет $\lambda = 0,25$. На больших глубинах боковой распор увеличивается в связи с деструкцией горного массива и проявлением свойства его пластичности. Графики изменения коэффициента предельного бокового распора на разных глубинах алевролитового массива по связям с коэффициентом структурного ослабления приведены на рис. 10. В точках пересечения графиков значения принятого коэффициента бокового распора (пунктир) определяют граничные интервалы этих параметров. Стрелками показаны направления их изменений, приводящие к устойчивости горной породы или образованию запредельных углов $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ее разрушения.

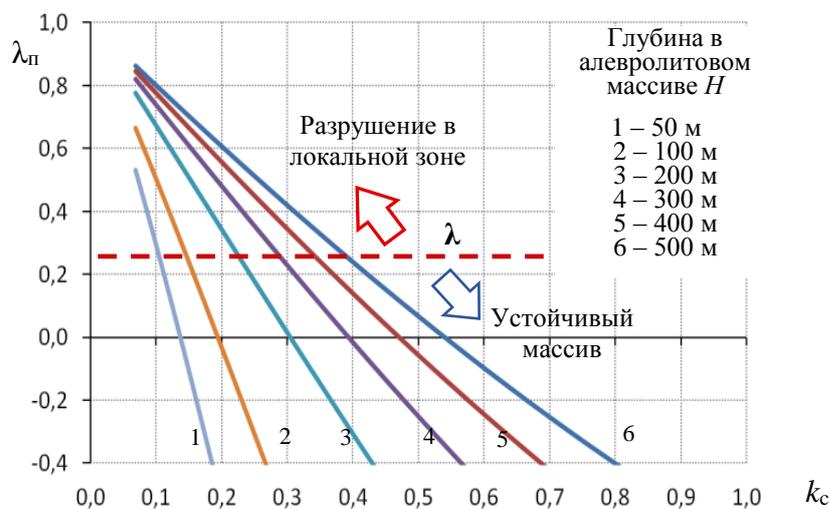


Рис. 10. Графики ограничений коэффициентов бокового распора и структурного ослабления на разной глубине алевролитового массива

Образование и изменение предельных и запредельных углов в направлениях касательного напряжения относительно вертикальной оси z на глубине горизонта 200 м внутри и на протяженной стенке алевролитового массива показаны на рис. 11. На стенке, где боковой распор спадает, коэффициент предельного структурного ослабления массива существенно повышается. Здесь же изображены пересечения графиков паспорта прочности массива и кругов Мора в точках S и R горизонта, соответствующие запредельному напряженному состоянию внутри него ($S-S$) и на стенке ($R-R$), по которым определены начальные угловые интервалы $\Delta\varepsilon$. В деструктивной зоне, расположенной по углу в этих интервалах, алевролит разрушается.

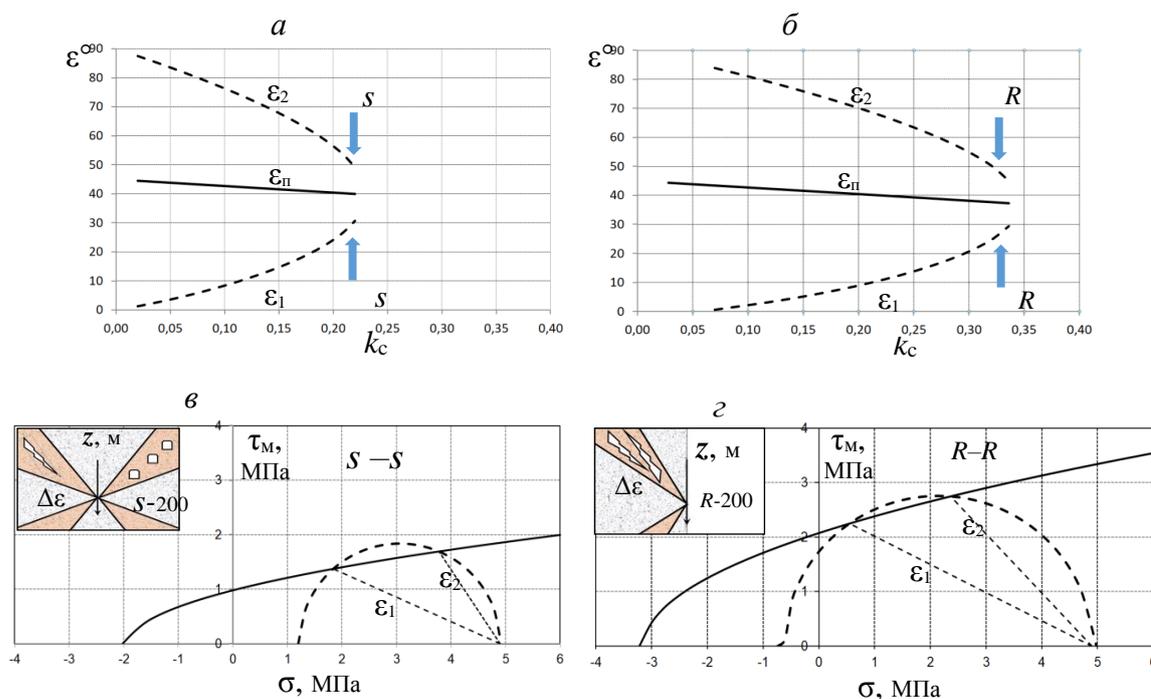


Рис. 11. Графики изменения предельных и запредельных углов в направлениях касательного напряжения алевролитового массива на глубине 200 м:
 а, в – в массиве; б, г – на вертикальной стенке

Сведения о параметрах предельного и начального запредельного прочностного состояния алевролита на глубинах 50, 200 и 500 м размещены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры прочностного состояния алевролитового массива

H, м (γH, МПа)	λ	k _c > мин (I _г , М ⁻¹ < мак)	ε _п , °	k _c	Угловой интервал ε ₁ , °-ε ₂ , °	λ	k _c > мин (I _г , М ⁻¹ < мак)	ε _п , °	k _c	Угловой интервал ε ₁ , °-ε ₂ , °								
											Состояние в массиве				Состояние на стенке			
											Предельное		Запредельное		Предельное		Запредельное	
50 (1,23)	0,25	>0,10 (<10,5)	41,1	0,08	21-62	-0,125	>0,15 (<8,5)	39,7	0,14	32-47								
200 (4,9)		>0,23 (<6,7)	39,8	0,22	31-49		>0,34 (<4,8)	37,0	0,33	27-47								
500 (12,25)	0,35	>0,20 (<7)	40,5	0,19	31-50	-0,175	>0,36 (<4,5)	36,7	0,35	28-45								
	0,5	>0,34 (<4,7)	39,8	0,33	34-46		>0,65 (<2,0)	34,3	0,64	30-39								
		>0,26 (<6,1)	41,1	0,25	35-47	-0,25	>0,70 (<1,6)	33,4	0,69	30-37								

Отметим следующие закономерности в изменениях параметров. По мере углубления в массив алевролита с одинаково принятым коэффициентом бокового распора максимально допустимая интенсивность его трещиноватости, при которой массив устойчив, снижается. При этом минимально допустимый коэффициент его структурно-

го ослабления увеличивается, а предельный угол ε_n уменьшается. Значение такого угла на стенке меньше, чем в глубине массива. Увеличение сжимающего бокового распора в массиве означает рост максимально допустимой интенсивности трещиноватости и, соответственно, снижение минимально допустимого коэффициента его структурного ослабления. На стенке массива, в связи с увеличением растягивающего распора, допустимый коэффициент структурного ослабления увеличивается.

Заключение

Выявленные закономерности изменения прочности образцов и массива горных пород дают возможность по данным гравитационного и бокового напряжения, а также структурного состояния по трещиноватости и размещению горных выработок определить зоны устойчивости пород или возможного разрушения. Основой для таких определений является создание паспорта прочности горного массива по приведенной методике и его динамичное применение в сравнениях с образующимися касательными напряжениями в кругах Мора.

Для распознавания отмеченных зон введено новое понятие о коэффициенте предельного бокового распора горных пород и установлена его аналитическая связь с коэффициентом структурного ослабления массива и гравитационным давлением. По соотношению принятого и предельного бокового распора сформулирован критерий устойчивости горных пород массива.

На примере расчета паспорта прочности и анализа устойчивости алевролитового массива показано, что с учетом принятого коэффициента бокового распора на разных его глубинах по данному критерию определяются минимально допустимые значения коэффициента структурного ослабления внутри массива и на его вертикальной стенке. Устанавливаются также предельные углы в направлениях касательного напряжения, сдерживающего разрушение горной породы. При запредельном снижении коэффициента структурного ослабления массива, происходящего из-за трещин или воздействия техногенных полостей горных выработок, определяется нарастающий угловой интервал, выделяющий зону его разрушения.

Таким образом, по описанным закономерностям определяется и прогнозируется прочностное состояние горного массива, включая предупреждения о наличии зон, в которых возможны разрушения в виде горных ударов.

Список литературы

1. Фисенко Г.Л., 1976. *Предельные состояния горных пород вокруг выработок*. Москва: Недра, 272 с.
2. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г., 1992. *Механика деформирования и разрушения горных пород*. Москва: Недра, 222 с.
3. Булычев Н.С., 1994. *Механика подземных сооружений*. Москва: Недра, 382 с.
4. Hoek E, Brown E.T., 1997. Practical estimates of rock mass strength. *Rock Mech Min Sci*, № 34(8), P. 1165–1186.
5. Литвинский Г.Г., 2008. *Аналитическая теория прочности горных пород и массивов*. Донецк: Норд-Пресс, 207 с.
6. Черданцев Н.В., 2015. Оценка состояния массива вокруг пластовой выработки. *Известия вузов. Горный журнал*, № 3, С. 50-56
7. Пирогов Е.Н., Гольцев В.Ю., 2008. *Сопротивление материалов*. Москва: МИФИ, С. 50.
8. Антонов В.А., 2024. Построение и горно-механическая интерпретация функционально-степенной модели паспорта прочности горных пород. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*, № 3, С. 241-251.
9. СНиП II-94-80, 1982. *Нормы проектирования. Подземные горные выработки*. Москва: Стройиздат.

10. Иудин М.М., 2007. О трещиноватости массива горных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S6, С. 279-284.
11. Борщ-Компониец В.И., Макаров А.Б., 1986. *Горное давление при отработке мощных пологих рудных залежей*. Москва: Недра, 271 с.
12. Рыльникова М.В., Еременко В.А., Есина Е.Н., 2014. *Условия формирования зон концентрации энергии горного массива*. Москва: Горная книга, С. 98.
13. Кузьмин Е.В., Святецкий В.С., Стародумов А.В., Иоффе А.М., Величко Д.В., 2014. Определение параметров геомеханического состояния породного массива на контурах выемочных камер. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 12, С.177-186.
14. Оника С.Г., Кузьмич А.К., 2017. Комплексный метод построения паспорта прочности горной породы. *Горная геомеханика и машиностроение*, № 2. С. 20.
15. Оловянный А.Г., 2010. Боковой распор в массиве горных пород. *Записки горного института. С.-Петербург*, Том 185, С. 141-147.

References

1. Fisenko G.L., 1976. *Predel'nye sostoyaniya gornyx porod vokrug vyrabotok* [Limit states of rocks around workings]. Moscow: Nedra, 272 p.
2. Stavrogin A.N., Protosenya A.G., 1992. *Mekhanika deformirovaniya i razrusheniya gornyx porod* [Mechanics of deformation and destruction of rocks]. Moscow: Nedra, 222 p.
3. Bulychev N.S., 1994. *Mekhanika podzemnykh sooruzhenii* [Mechanics of underground structures]. Moscow: Nedra, 382 s.
4. Hoek E, Brown E.T., 1997. Practical estimates of rock mass strength. *Rock Mech Min Sci*, № 34(8), P. 1165–1186.
5. Litvinskii G.G., 2008. *Analiticheskaya teoriya prochnosti gornyx porod i massivov* [Analytical theory of strength of rocks and massifs]. Donetsk: Nord-Press, 207 p.
6. Cherdantsev N.V., 2015. *Otsenka sostoyaniya massiva vokrug plastovoi vyrabotki* [Assessment of the state of the massif around a seam working]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*, № 3, S. 50-56
7. Pirogov E.N., Gol'tsev V.Yu., 2008. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow: MIFI, P. 50.
8. Antonov V.A., 2024. *Postroenie i gorno-mekhanicheskaya interpretatsiya funktsional'no-stepennoi modeli pasporta prochnosti gornyx porod* [Construction and mining-mechanical interpretation of the functional-power model of the strength passport of rocks]. *Izvestiya Tul-GU. Nauki o Zemle*, № 3, P. 241-251.
9. SNiP II-94-80, 1982. *Normy proektirovaniya. Podzemnye gornye vyrabotki*. [Design standards. Underground mine workings]. Moscow: Stroiizdat.
10. Yudin M.M., 2007. *O treshchinovatosti massiva gornyx porod* [On the fracturing of the rock mass]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № S6, P. 279-284.
11. Borshch-Komponiets V.I., Makarov A.B., 1986. *Gornoe davlenie pri otrabotke moshchnykh pologikh rudnykh zalezhei* [Rock pressure during development of thick flat ore deposits]. Moscow: Nedra, 271 p.
12. Ryl'nikova M.V., Eremenko V.A., Esina E.N., 2014. *Usloviya formirovaniya zon kontsentratsii energii gornogo massiva* [Conditions for the formation of energy concentration zones in a rock mass]. Moscow: Gornaya kniga, S. 98.
13. Kuz'min E.V., Svyatetskii V.S., Starodumov A.V., Ioffe A.M., Velichko D.V., 2014. *Opreделение parametrov geomekhanicheskogo sostoyaniya porodnogo massiva na konturakh vyemochnykh kamer* [Determination of the parameters of the geomechanical state of a rock mass on the contours of extraction chambers]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 12, P. 177-186.



14. Onika S.G., Kuz'mich A.K., 2017. Kompleksnyi metod postroeniya pasporta prochnosti gornoj porody [Integrated method for constructing the rock strength passport]. Gornaya geomekhanika i mashinostroenie, № 2. P. 20.

15. Olovyanniy A.G., 2010. Bokovoi raspor v massive gornykh porod [Lateral thrust in a rock massif]. Zapiski gornogo instituta. S.-Peterburg, Vol. 185, P. 141-147.

УДК 622.831

Коновалова Юлия Павловна

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория сдвига горных пород,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: lisjul@mail.ru

**ИЗМЕНЕНИЕ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ
ПОРОД ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ
СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ
ДВИЖЕНИЙ НА РАЗЛИЧНЫХ
ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛАХ***

Аннотация:

Современные геодинамические движения земной коры являются одним из факторов, определяющим напряженно-деформированное состояние массива горных пород и оказывающим негативное влияние на здания, сооружения и объекты инфраструктуры. Параметры геодинамических движений зависят от пространственно-временных масштабов измерительных систем.

В статье представлены исследования по оценке изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород под воздействием геодинамических движений, полученных с различной временной дискретностью. Установлена взаимосвязь ориентации главных осей тензоров деформаций трендовой составляющей геодинамических движений за длительный промежуток времени и вариационной короткопериодной составляющей, рассчитанных по данным измерений на основе спутниковых методов. Выявленная зависимость дает возможность экспресс-оценки изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород при геодинамической диагностике территорий.

Ключевые слова: современные геодинамические движения земной коры, напряженно-деформированное состояние, массив горных пород, спутниковые методы, главные компоненты тензора деформаций, геодезический пункт, вектор смещения.

DOI: 10.25635/2313-1586.2024.04.046

Konvalova Yulia P.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of rock displacement,
Institute of Mining, UB of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: lisjul@mail.ru

**THE STRESS-STRAIN STATE CHANGE
OF ROCK MASS BY IMPACT OF RECENT
GEODYNAMIC MOVEMENTS
AT VARIOUS TIME INTERVALS**

Abstract:

Recent geodynamic movements of Earth's crust are one of the factors that determine the stress-strain state of rock mass and have a negative impact on buildings, structures and infrastructure. Parameters of geodynamic motions depend on space-time scales of measuring systems.

The article presents research for the stress-strain state change of rock mass by impact of geodynamic movements obtained with different time discreteness. The relationship between the main axis's orientation of strain tensors of the trend geodynamic movements component over a long time period and the variational short-period component calculated from satellite data has been established. The discovered dependence makes it possible to quickly determine the stress-strain state change of rock mass during geodynamic diagnostics of territories.

Key words: crustal recent geodynamic movements, stress-strain state, rock mass, satellite methods, main components of strain tensors, permanent benchmark, geodetic benchmark displacement vector.

Введение

Одним из факторов, определяющих напряженно-деформированное состояние массива горных пород, являются современные геодинамические движения земной коры. Как показали многочисленные исследования последних двух десятилетий, эти дви-

* Исследования выполнены в рамках Государственного задания Минобрнауки №075-00412-22 ПР. Тема 3. FUWE-2022-0003, рег. №1021062010536-3-1.5.1.

жения, обусловленные совокупностью природных эндогенных и экзогенных воздействий, происходят в настоящее время и могут оказывать негативные воздействия на здания, сооружения и различные объекты инфраструктуры [1 – 5].

Нормативные документы регламентируют обязательный их учет при проектировании особо ответственных объектов. Поэтому исследования, связанные с их изучением, разработкой методов их регистрации и интерпретации результатов, являются актуальными.

Геодезические методы выступают в роли основных методов изучения современных геодинамических движений. Вертикальная компонента движений надежно и достоверно фиксируется с помощью высокоточного нивелирования. А для исследования горизонтальной составляющей успешно применяются методы спутниковой геодезии. На основе горизонтальных относительных смещений геодезических пунктов производится оценка изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород, определяются величины и направления главных нормальных деформаций [6].

Параметры геодинамических движений зависят от пространственно-временных масштабов измерительных систем, что обусловлено иерархически блочным строением массива горных пород и природными процессами, определяющими современное геодинамическое состояние недр как эндогенного, так и экзогенного характера. Так, например, выбор пространственных баз для исследования движений обусловлен рамками решаемых задач, которые могут быть глобального, регионального и локального уровней.

Более сложная ситуация складывается с временными масштабами измерений. Временная дискретность фиксации геодинамических движений (частота опроса) может быть практически любой, вплоть до внутрисуточного масштаба [7 – 10]. В связи с этим в научной литературе современные движения условно подразделяют на *направленную (трендовую)* и *знакопеременную (вариационную)* составляющие. Трендовая составляющая выявляется в процессе многолетних измерений с периодичностью от 0,5 года или однократных повторных наблюдениях через интервал от 10 лет и более, а вариационная составляющая проявляется в виде короткопериодных движений, продолжительность циклов которых укладывается один и более раз в сеанс непрерывных измерений и составляет минуты, часы, сутки. Разработаны методики выявления вариационной короткопериодной составляющей геодинамических движений на малых временных интервалах [11]. Короткопериодные деформации могут в своем максимуме достигать, а иногда и превышать деформации, рассчитанные за многолетний период наблюдений, и оказывать негативное влияние на объекты. Поэтому роль вариационной составляющей значима для безопасности объектов.

Проведенные исследования вариационной составляющей геодинамических движений в ходе непрерывного мониторинга с различной частотой опроса, от 10 минут в течение многочасовых измерений до 14 дней в течение трех лет, показали, что в течение всего мониторингового периода наблюдений имеют место часто встречающиеся направления смещения реперов, превышающие точность их определения. Чаще всего они согласуются с направлением простираения тектонических нарушений [12]. В связи с этим был разработан метод оценки изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород под воздействием вариационной короткопериодной составляющей геодинамических движений [13] и проведены исследования взаимосвязи деформационных параметров трендовой и вариационной составляющих, которые изложены в данной статье.

Методы исследования

Исследования взаимосвязи между деформационными параметрами трендовой и вариационной короткопериодной составляющими геодинамических движений основаны на сравнении главных компонент тензора деформаций, определяемых по результа-

там выявленных смещений одних и тех же реперов наблюдательной сети. Поскольку вариационная короткопериодная составляющая движений внутрисуточного масштаба достоверно выделяется только на пространственных базах до 5 – 6 километров, то исследования обеих составляющих ограничены именно этими расстояниями.

Трендовые движения определяются с периодичностью один раз за несколько лет. Смещения реперов, получаемые через 10 – 15-минутные интервалы в результате обработки непрерывного ряда спутниковых измерений, позволяют определить вариационную составляющую движений. Временные интервалы такой длины гарантируют максимальную достоверность и точность результатов при использовании относительного метода позиционирования в режиме статики, в благоприятных условиях, исключая явление переотражения спутниковых сигналов, и частоте их дискретизации не менее 0,5 Гц на базах до 5 – 6 километров, а также применении специализированного научного программного обеспечения для обработки измерений.

Для получения тензорного представления деформационного поля необходимо определить главные компоненты тензора деформаций для каждого треугольного элемента наблюдательной сети, в вершинах которого находятся реперы, для которых определяются смещения через определенные интервалы времени относительно условно неподвижной точки. Разбиение на треугольные элементы может осуществляться как триангуляцией Делоне, так и пересекающимися треугольниками. Для центра тяжести каждого треугольного элемента рассчитываются главные величины тензора деформаций ε_{\max} и ε_{\min} и угол ϕ , определяющий направление ε_{\max} относительно оси X (отсчитывается против часовой стрелки) (рис. 1). Для их получения могут использоваться различные методики, широко представленные в литературе [14].

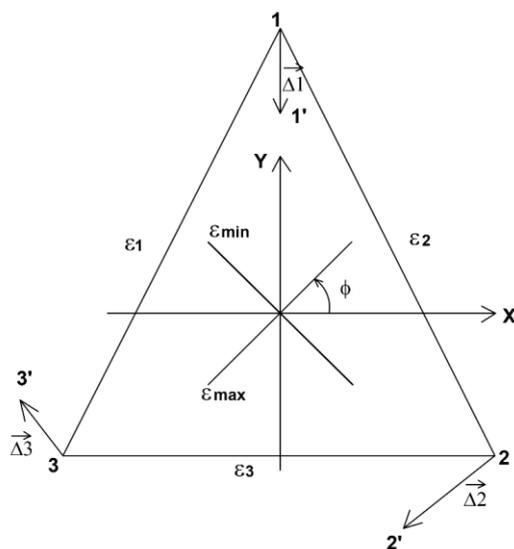


Рис. 1. Схема к определению главных компонент тензора деформаций для треугольного элемента наблюдательной сети

Исходя из того, что вариационная составляющая геодинамических движений формирует в массиве постоянно меняющееся деформационное поле с дискретностью, соответствующей частоте опроса в измерениях, необходимо получить его тензорное представление не просто в конкретный заданный момент времени, а с учетом максимальных смещений (наихудшей ситуации в целях безопасности объектов) и частоты изменения направления вектора смещения за весь сеанс наблюдений. Такой метод разработан и опубликован в работе [13].

Исследования проведены на двух экспериментальных участках – в зоне техногенного влияния на территории Олимпиадинского месторождения и вне ее, на незастроенной территории вблизи г. Рудный (Казахстан). Выбор техногенного участка обу-

словлен наличием интенсификации геодинамических движений, что позволяет сократить период для определения трендовых движений, потому что количество геодезических пунктов, смещения которых можно получить за длительный временной интервал, в пределах 6 километров ограничено.

Результаты исследования

Наблюдательная сеть на территории Олимпиадинского месторождения состоит из семи реперов (рис. 2), длины между которыми находятся в диапазоне 600 - 4000 метров.

Определены трендовые смещения пунктов за период 6 лет (2010 – 2016 гг.), координаты которых в обеих сериях получены спутниковыми методами. Смещения реперов определены относительно базовой точки АВК, которая привязана к пунктам Международной геодезической сети IGS и пунктам ФАГС в глобальной системе координат ITRF2014 и показала стабильность своего положения. На пунктах сети также проведен непрерывный многочасовой мониторинг с использованием спутниковых систем, в результате которого получены параметры вариационной короткопериодной составляющей геодинамических движений.

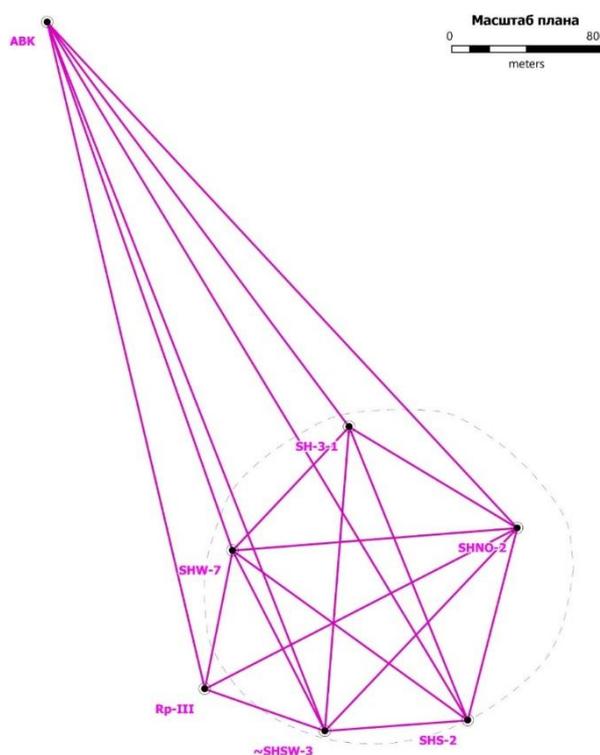


Рис. 2. Схема экспериментальной наблюдательной сети на Олимпиадинском месторождении

На основании полученных векторов смещения трендовой и вариационной составляющих определены деформации для 20 треугольных элементов сети. Главные компоненты тензора деформаций (ε_{\max} и ε_{\min}) и угол φ , определяющий направление положения компоненты ε_{\max} , приведены в табл. 1, а графическое изображение этих параметров – на рис. 3.

Полученные результаты подтверждают, что максимальные значения горизонтальных деформаций, вызванных вариационной составляющей, могут быть сопоставимы с трендовыми деформациями за 6-летний период. Для трендовых деформаций максимальные компоненты ε_{\max} в равной степени носят как растягивающий, так и сжимающий характер, а минимальные компоненты ε_{\min} – только

сжимающий. Максимальные компоненты ϵ_{max} вариационных деформаций преимущественно все растягивающие, а минимальные ϵ_{min} – сжимающие.

Таблица 1

Главные компоненты тензоров деформаций для трендовой и вариационной составляющих геодинамических движений

номер треуг-ка	Реперы	Деформации (трендовые)			Деформации (вариационные)		
		ϵ_{max}	ϵ_{min}	$\varphi, ^\circ$	ϵ_{max}	ϵ_{min}	$\varphi, ^\circ$
1	~SHSW-3 - SH-1(RpIII) - SHW-7	1,811E-04	-5,156E-05	137	4,064E-05	-8,019E-05	319
2	~SHSW-3 - SHW-7 - SH-3-1	-1,318E-05	-3,984E-04	209	2,626E-05	-1,309E-05	178
3	~SHSW-3 - SH-3-1 - SHNO-2	-1,327E-05	-8,290E-05	151	1,204E-04	-4,970E-06	39
4	~SHSW-3 - SHNO-2 - SHS-2	-1,780E-05	-6,955E-05	39	9,761E-06	-6,650E-06	19
5	SHS-2 - ~SHSW-3 - SH-1(RpIII)	-3,396E-05	-8,561E-05	331	3,983E-05	-6,032E-05	318
6	SHS-2 - SH-1(RpIII) - SHW-7	1,096E-04	-5,422E-05	144	1,254E-05	-1,607E-05	343
7	SHS-2 - SHW-7 - SH-3-1	1,427E-03	-1,851E-04	41	7,835E-05	6,359E-06	137
8	SHS-2 - SH-3-1 - SHW-7	1,199E-05	-5,765E-04	220	5,174E-05	-2,697E-04	222
9	SHNO-2 - ~SHSW-3 - SH-1(RpIII)	2,789E-03	-1,506E-04	139	5,865E-04	-2,218E-05	139
10	SHNO-2 - SH-1(RpIII) - SHW-7	5,657E-05	-1,287E-04	196	-7,978E-06	-1,672E-05	321
11	SHNO-2 - SHW-7 - SH-3-1	-7,078E-05	-5,373E-04	328	1,677E-05	-1,149E-04	322
12	SH-3-1 - SHW-7 - SH-1(RpIII)	6,178E-05	-2,154E-04	175	7,627E-06	-8,223E-05	222
13	SH-3-1 - SH-1(RpIII) - ~SHSW-3	-2,309E-05	-5,906E-05	217	8,559E-05	2,952E-06	40
14	SH-3-1 - ~SHSW-3 - SHS-2	-1,834E-05	-4,255E-05	142	2,706E-05	8,475E-06	162
15	SHW-7 - ~SHSW-3 - SHS-2	4,834E-05	-5,391E-05	144	3,571E-05	5,378E-06	147
16	SHW-7 - SHS-2 - SHS-2	-4,084E-05	-1,841E-04	221	7,346E-06	-3,882E-05	316
17	SH-1(RpIII) - SH-3-1 - SHNO-2	5,326E-04	-9,218E-05	138	6,067E-05	-6,730E-04	225
18	SH-1(RpIII) - SHNO-2 - SHS-2	2,134E-05	-8,131E-05	42	4,529E-05	-1,782E-05	42
19	SH-1(RpIII) - SH-3-1 - SHS-2	-1,722E-05	-8,232E-05	317	1,464E-04	-2,838E-05	140
20	SHW-7 - SHNO-2 - ~SHSW-3	5,156E-05	-1,221E-04	158	5,946E-05	-1,600E-05	149

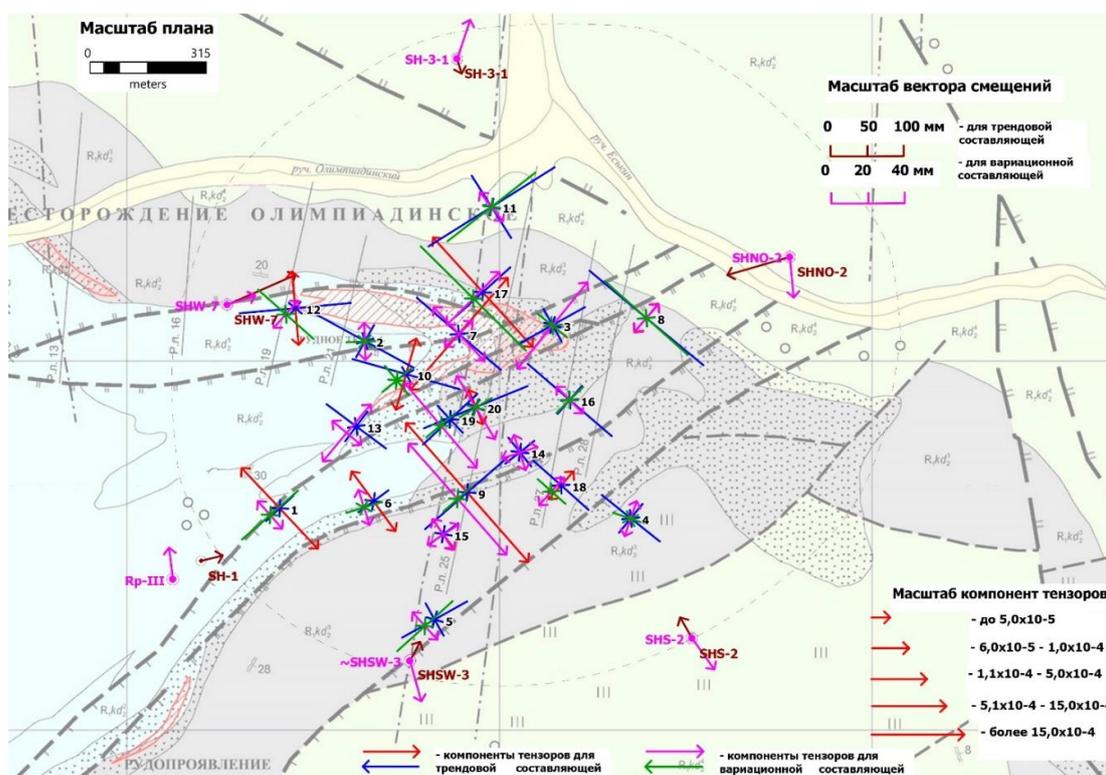


Рис. 3. Главные компоненты тензоров деформаций трендовой и вариационной составляющих геодинамических движений, Олимпиадинское месторождение

Из тензорного представления деформационных полей видно, что направления главных компонент тензоров деформаций трендовой и вариационной составляющих взаимосвязаны. В семнадцати треугольных элементах из двадцати совпадают направления главных компонент тензоров: в 12 треугольниках – в пределах 10 градусов, в 5 треугольниках – в пределах 20 градусов. Из семнадцати совпадающих тензоров тринадцать имеют совпадения в направлении положения компонент ϵ_{\max} , а в четырех тензорах – направление компоненты ϵ_{\max} для трендовых деформаций совпадает с ϵ_{\min} для вариационных и наоборот (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение направлений главных компонент тензоров деформаций

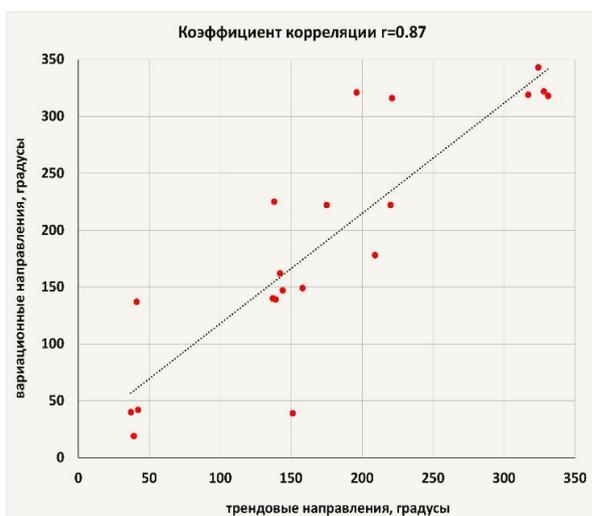
тренд.	317	209	61	39	331	324	131	220	139	196	328	175	37	142	144	311	228	42	137	158
вариаци.	319	178	39	19	318	343	137	222	139	321	322	222	40	162	147	316	225	42	140	149
разность	-2	31	22	20	13	-19	-6	-2	0	-125	6	-47	-3	-20	-3	-5	3	0	-3	9

■ - не совпадают ■ - совпадают при $\pm 180^\circ$ ■ - совпадают при $\pm 90^\circ$

Коэффициент корреляции направлений главных компонент тензоров деформаций для двух составляющих движений равен $r=0,87$, для случая совпадения только направлений компонент ϵ_{\max} (рис. 4 а) и $r=0,95$, когда в дополнение учитываются совпадения трендовой ϵ_{\max} с вариационной ϵ_{\min} и наоборот (рис. 4 б).

Экспериментальная площадка, расположенная в северной части г. Рудный, представлена наблюдательной сетью из пяти пунктов геодезической сети. Были получены трендовые движения пунктов за период 45 лет с 1972 по 2017 г., а также выполнены серии суточных и многочасовых непрерывных спутниковых измерений на этих пунктах. Основным критерием выбора участка являлось отсутствие масштабной техногенной нагрузки на него за прошедший 45-летний период и на современном этапе.

а)



б)

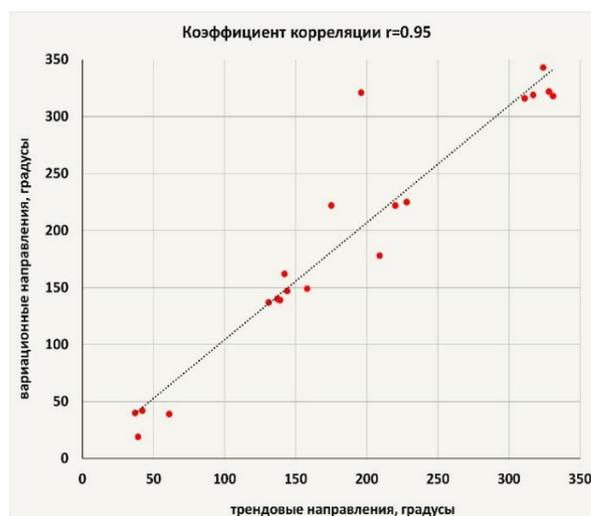


Рис. 4. Главные компоненты тензоров деформаций трендовой и вариационной составляющих геодинамических движений

Полученные графические результаты сравнения приведены на рис. 5, а числовые параметры тензоров деформаций в табл. 3.

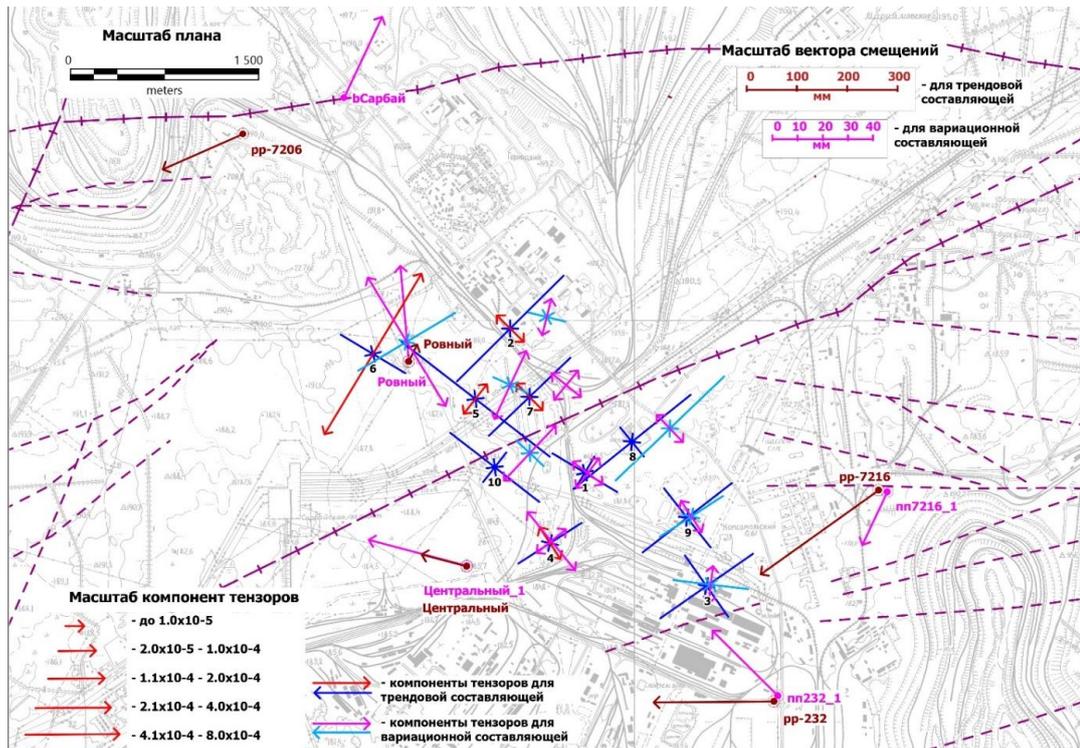


Рис. 5. Главные компоненты тензоров деформаций трендовой и вариационной составляющих геодинамических движений, г. Рудный, Казахстан

Таблица 3

Главные компоненты тензоров деформаций для трендовой и вариационной составляющих геодинамических движений, г. Рудный, Казахстан

номер треуг-ка	Реперы	Деформации (трендовые)			Деформации (вариационные)		
		ϵ_{max}	ϵ_{min}	$\varphi, ^\circ$	ϵ_{max}	ϵ_{min}	$\varphi, ^\circ$
1	pp7216 - Центральный - Ровный	-1,060E-05	-7,003E-05	211	1,451E-05	1,089E-06	217
2	pp7216 - Ровный - pp7206(бСарбай)	1,544E-05	-2,538E-04	315	1,086E-05	-7,301E-06	14
3	pp232 - pp7216 - Центральный	-4,717E-05	-1,307E-04	325	8,628E-06	-2,414E-05	7
4	pp232 - Центральный - Ровный	1,393E-05	-4,731E-05	147	2,942E-05	1,368E-06	141
5	pp232 - Ровный - pp7206(бСарбай)	1,193E-05	-7,739E-04	218	2,578E-05	-7,138E-06	25
6	pp7206(бСарбай) - Ровный - Центральный	4,298E-04	-1,690E-05	31	3,820E-04	-1,999E-04	329
7	pp7206(бСарбай) - Центральный - pp7216	9,614E-06	-2,025E-04	316	1,234E-05	7,252E-07	39
8	pp7206(бСарбай) - pp7216 - pp232	-9,231E-07	-3,142E-04	321	5,322E-06	-2,192E-04	316
9	Ровный - pp7216 - pp232	-3,522E-05	-1,929E-04	322	9,633E-06	-6,359E-05	327
10	Центральный - pp7206(бСарбай) - pp232	-1,287E-05	-1,204E-04	218	2,456E-05	-3,410E-06	43

Направления главных осей тензоров деформаций для двух составляющих геодинамических движений совпадают в пределах 10° в семи треугольных элементах из десяти: шесть совпадений по ϵ_{max} и одно совпадение ϵ_{min} для трендовой составляющей с ϵ_{max} для вариационной составляющей движений. В трех треугольниках совпадения компоненты ϵ_{min} трендовых движений с компонентой ϵ_{max} для вариационных движений находятся в диапазоне $28 - 48^\circ$ (табл. 4). Описанные взаимосвязи направлений главных компонентов тензоров деформаций для двух составляющих движений описываются коэффициентом корреляции $r=0,99$ (рис. 6).

Таблица 4

Сравнение направлений главных компонент тензоров деформаций

тренд.	211	45	55	147	38	301	46	321	322	38
вариан.	217	14	7	141	25	329	39	316	327	43
разность	-6	31	48	6	13	-28	7	5	-5	-5

■ - совпадают при $\pm 180^\circ$

■ - совпадают при $\pm 90^\circ$

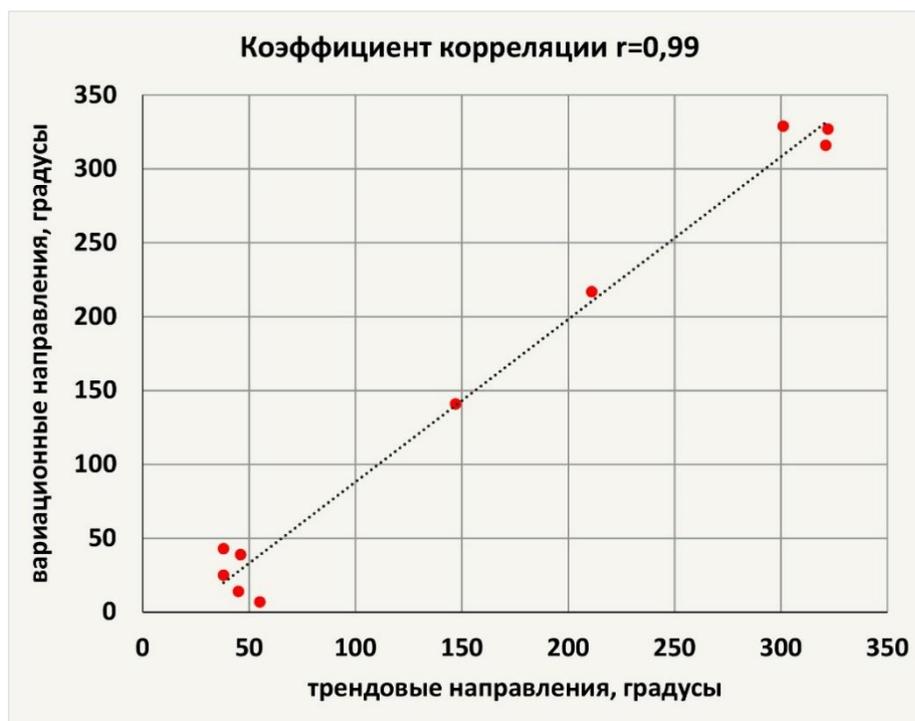


Рис. 6. Корреляционное поле направлений главных компонент тензоров деформаций для трендовой и вариационной составляющих геодинамических движений, г. Рудный

Таким образом, сравнение параметров двух составляющих геодинамических движений на одинаковых пространственных базах до шести километров показало, что вариационная составляющая в своем максимуме может быть сопоставима с параметрами трендовых движений, а следовательно, деформационные поля, формируемые ею, при оценке геодинамической безопасности территорий должны приниматься в рассмотрение.

Установлена взаимосвязь с коэффициентом корреляции r , равным $0,87 - 0,99$, ориентации главных осей тензоров деформаций трендовой составляющей геодинамических движений за длительный промежуток времени и вариационной короткопериодной составляющей, рассчитанных по данным измерений на основе спутниковых методов. Данная взаимосвязь объясняется тем, что вариационные короткопериодные смещения происходят вдоль тренда, и, как показали исследования, частота отклонения репера за сеанс непрерывных измерений зачастую повышена в направлении тренда. Именно по частоте отклонения определяется преобладающий вектор смещения под воздействием вариационных движений [13].

Заключение

Выявленная зависимость в ориентации тензоров деформаций трендовой и вариационной составляющей движений дает возможность экспресс-оценки изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород, что особенно эффективно при геодинамической диагностике территорий, на которых отсутствует возможность определения трендовых движений за длительный промежуток времени. Знание направлений главных величин тензора деформаций является важным моментом с точки зрения безопасного размещения объектов недропользования, поскольку сооружение, оси которого расположены вдоль главных линейных компонент тензора, не будет испытывать сдвиговых деформаций. Таким образом, учет временной изменчивости деформационных полей помогает избежать ошибок при выборе

безопасных площадок для размещения объектов в условиях иерархической блочности и постоянной подвижности массива горных пород.

Список литературы

1. Сашурин А.Д., 2011. Геодинамические истоки крупнейших природно-техногенных катастроф. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11, С. 13-37.
2. Сашурин А.Д., Панжина Н.А., 2010. Влияние земных разломов на прочностные характеристики зданий и сооружений. *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*, № 1, С. 64-67.
3. Kuzmin Yu.O., 2016. Recent geodynamics of dangerous faults. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, Vol. 52, № 5, P. 709-722.
4. Учитель И.Л., 2010. *Разрушительные свойства геодеформаций*. Одесса: Астропринт, 222 с.
5. Селюков Е.И., Стигнеева Л.Т., 2010. *Краткие очерки практической микрогеодинамики*. Санкт-Петербург: Питер, 175 с.
6. Панжин А.А., 2008. Определение тензора деформаций для исследования параметров процесса сдвига в трехмерном пространстве. *Маркшейдерия и недропользование*, №2(34), С. 64-66.
7. Seco A., Tirapu F., Ramirez F. et al., 2007. Assessing building displacement with GPS. *Building and environment*, Vol. 42, № 1, P. 393-399.
8. Yi T. H., Li H. N., Gu M., 2013. Recent research and applications of GPS-based monitoring technology for high-rise structures. *Structural control and health monitoring*, Vol. 20, Issue 5, P. 649-670.
9. Murray-Moraleda J., 2011. GPS: applications in crustal deformation monitoring. *Extreme Environmental Events. Complexity in Forecasting and Early Warning*, Springer New York, Vol. 1, P. 589-622.
10. Nickitopoulou A., Protopsalti K., Stiros S., 2006. Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: accuracy, limitations and promises. *Engineering Structures*, Vol. 28, Iss. 10, P. 1471-1482. DOI: 10.1016/j.engstruct.2006.02.001
11. Панжин А.А., 2003. Исследование короткопериодных деформаций разломных зон верхней части земной коры с применением систем спутниковой геодезии. *Маркшейдерия и недропользование*, № 2, С. 43-54.
12. Коновалова Ю.П., 2018. Исследование закономерностей деформационных процессов в массиве горных пород для оценки площадок размещения ответственных объектов недропользования. *Известия Уральского государственного горного университета*, №3(51), С.98-107. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-3-98-107.
13. Коновалова Ю.П., Ручкин В.И., 2020. Оценка влияния короткопериодных геодинамических движений на напряженно-деформированное состояние массива горных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, № 3-1, С. 90-104. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-90-104.
14. Безухов Н.И., 1961. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. Москва: Высшая школа, с. 537.

References

1. Sashurin A.D., 2011. Geodinamicheskie istoki krupneishikh prirodno-tekhnogennykh katastrof [Geodynamic origins of the largest natural and man-made disasters]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 11, P. 13-37.

2. Sashurin A.D., Panzhina N.A., 2010. Vliyanie zemnykh razlomov na prochnostnye kharakteristiki zdaniy i sooruzheniy [Influence of Earth faults on the strength characteristics of buildings and structures]. *Akademicheskii vestnik UralNIIproekt RAASN*, № 1, P. 64-67.
3. Kuzmin Yu.O., 2016. Recent geodynamics of dangerous faults. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, Vol. 52, № 5, P. 709-722.
4. Uchitel' I.L., 2010. Razrushitel'nye svoystva geodeformatsii [Destructive properties of geodeformations]. Odessa: Astroprint, 222 p.
5. Selyukov E.I., Stigneeva L.T., 2010. Kratkie ocherki prakticheskoi mikrogeodinamiki [Brief sketches of practical microgeodynamics]. Sankt-Peterburg: Piter, 175 p.
6. Panzhin A.A., 2008. Opredelenie tenzora deformatsii dlya issledovaniya parametrov protsessa sdvizheniya v trekhmernom prostranstve [Determination of the strain tensor for the study of the parameters of the displacement process in three-dimensional space]. *Marksheideriya i nedropol'zovanie*, №2(34), P. 64-66.
7. Seco A., Tirapu F., Ramirez F. et al., 2007. Assessing building displacement with GPS. *Building and environment*, Vol. 42, № 1, P. 393-399.
8. Yi T. H., Li H. N., Gu M., 2013. Recent research and applications of GPS-based monitoring technology for high-rise structures. *Structural control and health monitoring*, Vol. 20, Issue 5, P. 649-670.
9. Murray-Moraleda J., 2011. GPS: applications in crustal deformation monitoring. *Extreme Environmental Events. Complexity in Forecasting and Early Warning*, Springer New York, Vol. 1, P. 589-622.
10. Nikitopoulou A., Protopsalti K., Stiros S., 2006. Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: accuracy, limitations and promises. *Engineering Structures*, Vol. 28, Iss. 10, P. 1471-1482. DOI: 10.1016/j.engstruct.2006.02.001
11. Panzhin A.A., 2003. Issledovanie korotkoperiodnykh deformatsii razlomnykh zon verkhnei chasti zemnoi kory s primeneniem sistem sputnikovoi geodezii [Investigation of short-period deformations of fault zones of the upper part of the Earth's crust using satellite geodesy systems]. *Marksheideriya i nedropol'zovanie*, № 2, P. 43-54.
12. Konovalova Yu.P., 2018. Issledovanie zakonomernostei deformatsionnykh protsessov v massive gornykh porod dlya otsenki ploshchadok razmeshcheniya otvetstvennykh ob"ektov nedropol'zovaniya [Study of the patterns of deformation processes in the rock mass for the assessment of sites for the placement of responsible subsurface use facilities]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, №3(51), P. 98-107. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-3-98-107.
13. Konovalova Yu.P., Ruchkin V.I., 2020. Otsenka vliyaniya korotkoperiodnykh geodinamicheskikh dvizhenii na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie massiva gornykh porod [Assessment of the effect of short-period geodynamic movements on the stress-strain state of a rock mass]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, № 3-1, P. 90-104. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-90-104.
14. Bezukhov N.I., 1961. Osnovy teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti [Fundamentals of the theory of elasticity, plasticity and creep]. Moscow: Vysshaya shkola, p. 537.

УДК 622.271.33:622.83

Яковлев Алексей Викторович
кандидат технических наук,
заведующий сектором устойчивости
бортов карьеров,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: lubk_igd@mail.ru

Шимкив Екатерина Сергеевна
научный сотрудник,
сектор устойчивости бортов карьеров,
Институт горного дела УрО РАН

МЕТОДИКА РАСЧЕТНОГО ОБОСНОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ УСТУПА С ПРОТЯЖЕННОЙ ТРЕЩИНОЙ В ГРАВИТАЦИОННО-ТЕКТОНИЧЕСКОМ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ*

Аннотация:

Разработаны методические основы формирования уступов и участков бортов на предельном контуре карьеров в условиях гравитационно-тектонического поля напряжений, проведены геомеханические расчеты устойчивости уступов и участков бортов в гравитационно-тектоническом поле напряжений при различных углах падения и свойствах заполнителя протяженной трещины. По результатам проведенных исследований разработана методика изучения влияния тектонических напряжений на устойчивость уступов и участков бортов и компьютерные программы в редакторе Excel для расчетного обоснования условий возникновения тектонических подвижек прибортового массива по протяженной трещине и предельных параметров уступа или группы уступов в зависимости от прочностных свойств протяженной трещины, угла ее падения и величины максимального главного напряжения при его ориентировке согласно приоткосной части борта.

Ключевые слова: Карьер, уступ, структура массива горных пород, протяженная трещина, тектонические напряжения, расчет устойчивости.

DOI: 10.25635/2313-1586.2024.04.056

Yakovlev Alexey V.
Candidate of Technical Sciences,
Head of the Sector of Stability
of Quarry Sides,
Institute of Mining UB RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: lubk_igd@mail.ru

Shimkiv Ekaterina S.
Researcher,
Quarry Side Stability Sector,
Institute of Mining UB RAS

METHOD FOR CALCULATING THE STABILITY OF A LEDGE WITH AN EXTENDED CRACK IN THE GRAVITATIONAL AND TECTONIC STRESS FIELD

Abstract:

Methodological foundations have been developed for the formation of ledges and sections of sides on the limiting contour of quarries under conditions of a gravitational and tectonic stress field, geomechanical calculations of the stability of ledges and sections of sides in a gravitational and tectonic stress field at various angles of incidence and properties of the filler of an extended crack have been carried out. Based on the results of the research, a methodology has been developed to study the effect of tectonic stresses on the stability of ledges and sections of sides and computer programs in the Excel editor to calculate the conditions for the occurrence of tectonic movements of the instrument array along an extended crack and the limiting parameters of the ledge or group of ledges, depending on the strength properties of the extended crack, its angle of incidence and the magnitude of the maximum main stress when it is oriented according to the sloping part of the side.

Key words: quarry, ledge, rock mass structure, extended crack, tectonic stresses, stability calculation.

Введение

Статья является продолжением исследований, приведенных в статье [1], в которой отражены этапы развития нормативной базы в области обеспечения устойчивости бортов карьеров, обоснованы дополнительные факторы, влияющие на устойчивость уступов и участков бортов карьеров в гравитационно-тектоническом поле напряжений, определены основные направления изучения прибортовых массивов на действующих

* Работа выполнена в рамках Госзадания № 075-00412-22 ПР.

карьерах, показана необходимость изучения тектонических напряжений в массивах скальных горных пород и учета их воздействия на устойчивость карьерных откосов, разработан алгоритм обоснования параметров уступов и участков бортов карьеров в тектонически напряженных массивах горных пород, проведена расчетная оценка подвижности массива по протяженным трещинам в зависимости от прочностных свойств заполнителя и тектонических напряжений.

Постановка задачи

Устойчивость уступов в скальных породах без учета тектонических напряжений зависит от ориентировки и прочностных свойств поверхностей ослабления в массиве. Наибольшее влияние на устойчивость уступов оказывают протяженные трещины, имеющие падение в направлении выработанного пространства карьера и низкие прочностные свойства по поверхности ослабления.

Расчеты устойчивости уступов, подсеченных протяженной трещиной, производятся в соответствии с методикой ВНИМИ [2] и «Правилами...» [3] по формуле:

$$H = \frac{2C'_n \sin \alpha \cos \phi'_n}{\gamma \sin(\alpha - \beta) \sin(\beta - \phi'_n)}, \quad (1)$$

где H – высота уступа, м;

C'_n – сцепление по поверхности ослабления, МПа (т/м^2);

α – угол откоса уступа, м;

ϕ'_n – угол трения по поверхности ослабления, град;

γ – плотность пород, МН (т/м^3);

β – угол падения поверхности ослабления, град.

Повышение надежности обоснования углов откоса уступов должно базироваться на расчетной оценке возможности потери устойчивости уступов по протяженным трещинам в зависимости от действующих тектонических напряжений, ориентировки трещин относительно простирания уступа, прочностных свойств заполнителя и характеристик поверхностей трещин (ровная, волнистая, гладкая, шероховатая и т.д.).

Методика расчетного обоснования устойчивости уступов и участков бортов в гравитационно-тектоническом поле напряжений

В общем случае расчет коэффициента запаса устойчивости откоса n основан на сравнении удерживающих и сдвигающих сил, действующих по вероятной поверхности скольжения:

$$n = \Sigma (P_i \cdot \cos \beta_i \cdot \text{tg } \phi'_i + C'_i \cdot \ell_i) / \Sigma (P_i \cdot \sin \beta_i), \quad (2)$$

где P_i – вес расчетного блока, МН (т);

ℓ_i – длина i -го участка поверхности скольжения, м.

При тектоническом воздействии нормальная и касательная к рассматриваемой площадке составляющие максимальной компоненты тектонической силы σ_1 определяются по формулам:

$$N_i = \sigma_1 \cdot \sin(\delta_i - \beta_i); \quad (3)$$

$$T_i = \sigma_1 \cdot \cos(\delta_i - \beta_i), \quad (4)$$

где δ_i – угол между σ_1 и горизонтом, град.

Тогда с учетом тектонических сил σ_1 :

$$n = \Sigma [P_i \cdot \cos \beta_i \cdot \text{tg } \phi'_n + \sigma_1 \cdot \sin(\delta_i - \beta_i) \cdot \text{tg } \phi'_n + C'_i \cdot \ell_i] / \Sigma [P_i \cdot \sin \beta_i + \sigma_1 \cdot \cos(\delta_i - \beta_i)] \quad (5)$$

В условиях регионального тектонического поля напряжений максимальная компонента тектонической силы ориентирована горизонтально, а минимальная – вертикально.

При формировании выработанного пространства карьера параметры тектонического поля напряжений изменяются вблизи откосов уступов и участков бортов, как показано в монографиях д.т.н. Зубкова А.В. (рис. 1) [4], Яковлева А.В., Ермакова Н.И. (рис. 2) [5, 6].

Максимальная компонента тектонической силы в результате трансформации поля напряжений ориентирована в массиве согласно с углом наклона борта карьера, минимальная – по нормали к σ_1 .

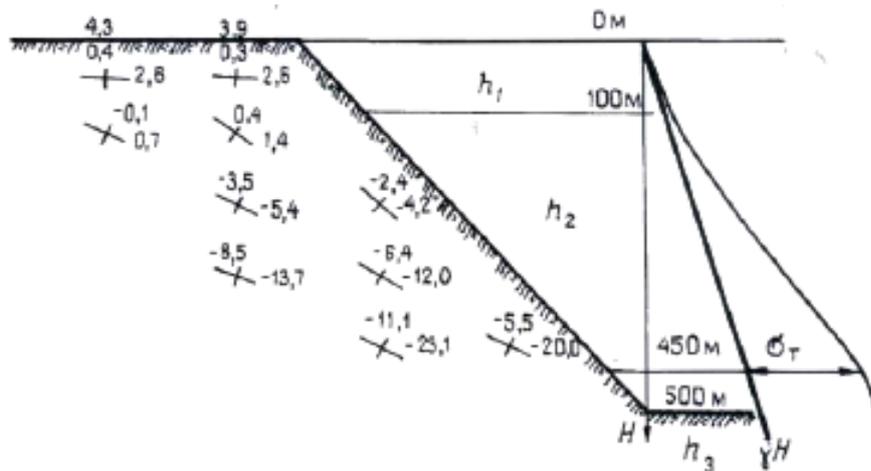


Рис. 1. Направление действия главных напряжений вблизи борта карьера [4]

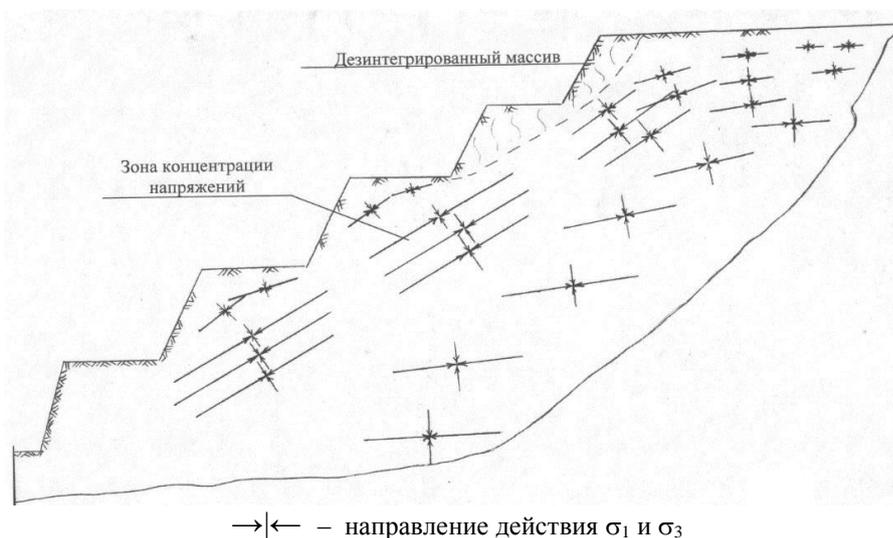
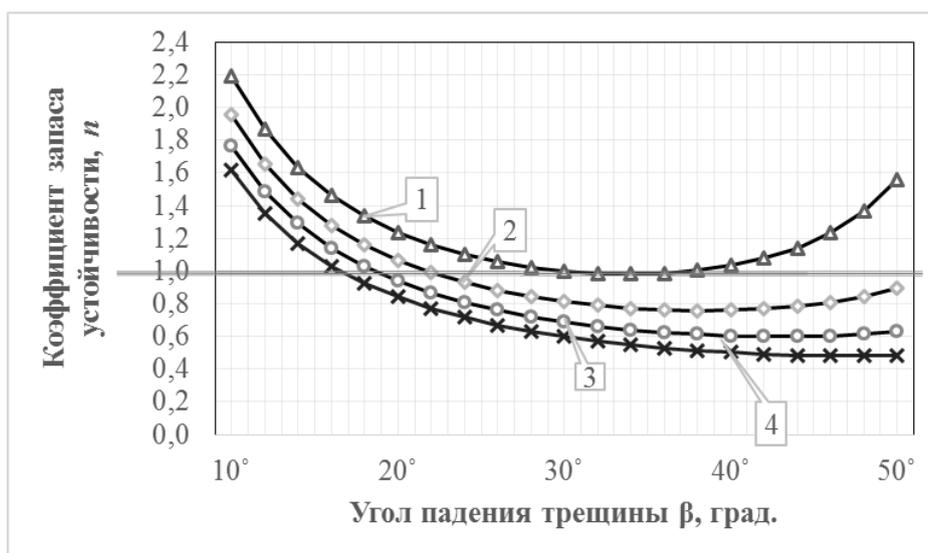


Рис. 2. Изменение направления максимальной компоненты в результате трансформации поля напряжений в прибортовом массиве согласно с углом наклона борта карьера [5, 6].

Расчеты устойчивости уступов и участков бортов с учетом тектонических напряжений

Расчеты проведены по формуле (5) с использованием разработанной в редакторе Excel компьютерной программы для типичного состояния прибортового массива, при котором протяженная трещина имеет падение в направлении выработанного пространства карьера (рис. 3).



Значение максимальной компоненты тектонической силы σ_1 :
 1 – $\sigma_1 = 0$ МН; 2 – $\sigma_1 = 0,5$ МН; 3 – $\sigma_1 = 1,0$ МН; 4 – $\sigma_1 = 1,5$ МН

Рис. 3. Результаты расчетов устойчивости уступа высотой 15 м с углом откоса 60° при $C' = 5$ т/м² и $\varphi' = 7,5^\circ$.

Для расчетов принято, что направление максимальной компоненты тектонической силы σ_1 меньше угла откоса уступа на 10° .

Расчеты устойчивости уступов высотой 15 и 30 м с углами откоса $\alpha = 60^\circ$ и $\alpha = 70^\circ$ в зависимости от величины максимального главного напряжения σ_1 проведены при различных прочностных свойствах ($C' = 5$ т/м² и $\varphi' = 7,5^\circ$; $C' = 10$ т/м² и $\varphi' = 10^\circ$; $C' = 15$ т/м² и $\varphi' = 12,5^\circ$; $C' = 20$ т/м² и $\varphi' = 15^\circ$) протяженной трещины и углах ее падения ($\beta = 10 - 60^\circ$) в направлении выработанного пространства карьера.

Используя результаты расчетов, можно определить, при каких углах падения трещины различной морфологии в зависимости от величины максимальной компоненты тектонической силы σ_1 сохраняется устойчивость уступа.

Например, устойчивость уступа высотой 15 м с углом откоса 60° при $C' = 5$ т/м² и $\varphi' = 7,5^\circ$ обеспечивается в следующих условиях (табл. 1, рис. 4):

- при отсутствии тектонических напряжений при углах падения трещины β менее 30° и более 38° (при $30^\circ < \beta < 38^\circ$ коэффициент запаса $n \approx 1$);
- при $\sigma_1 = 0,5$ МН – при β менее 22° ;
- при $\sigma_1 = 1,0$ МН – при β менее $18,5^\circ$;
- при $\sigma_1 = 1,5$ МН – при β менее $16,5^\circ$.

Таблица 1

Результаты расчетов устойчивости уступа высотой 15 м с углом откоса 60° при $C' = 5$ т/м² и $\varphi' = 7,5^\circ$

Угол падения трещины β , град	Коэффициент запаса устойчивости (n) при максимальной компоненте тектонической силы σ_1						
	0 МН	0,25 МН	0,5 МН	0,75 МН	1,0 МН	1,25 МН	1,5 МН
10	2,19	2,07	1,96	1,86	1,77	1,69	1,61
20	1,24	1,15	1,07	1,00	0,94	0,89	0,84
30	1,00	0,90	0,81	0,75	0,69	0,64	0,60
40	1,03	0,88	0,76	0,67	0,60	0,55	0,50
50	1,56	1,14	0,90	0,74	0,63	0,55	0,48

При увеличении прочностных характеристик по поверхности трещины до $C' = 10 \text{ т/м}^2$ и $\varphi' = 10^\circ$ устойчивость уступа высотой 15 м с углом откоса 60° обеспечивается при более высоких значениях σ_1 (табл. 2 и рис. 4):

- при $\sigma_1 = 1,5 \text{ МН}$ – при β менее 33° ;
- при $\sigma_1 = 2,0 \text{ МН}$ – при β менее 28° .

Разработанная компьютерная программа позволяет установить предельные параметры уступа (h и α) или группы уступов, изменяя прочностные свойства (C' и φ') протяженной трещины, углы ее падения β и величину σ_1 .

Таблица 2

Результаты расчетов устойчивости уступа высотой 15 м с углом откоса 60° при $C' = 10 \text{ т/м}^2$ и $\varphi' = 10^\circ$

Угол падения трещины β , град	Коэффициент запаса устойчивости (n) при максимальной компоненте тектонической силы σ_1					
	0 МН	1,0 МН	1,25 МН	1,5 МН	1,75 МН	2,0 МН
10	3,89	3,13	2,98	2,85	2,73	2,62
20	2,24	1,69	1,59	1,51	1,43	1,36
30	1,85	1,27	1,18	1,10	1,03	0,97
40	1,96	1,14	1,03	0,95	0,87	0,81
50	3,04	1,23	1,07	0,95	0,85	0,77

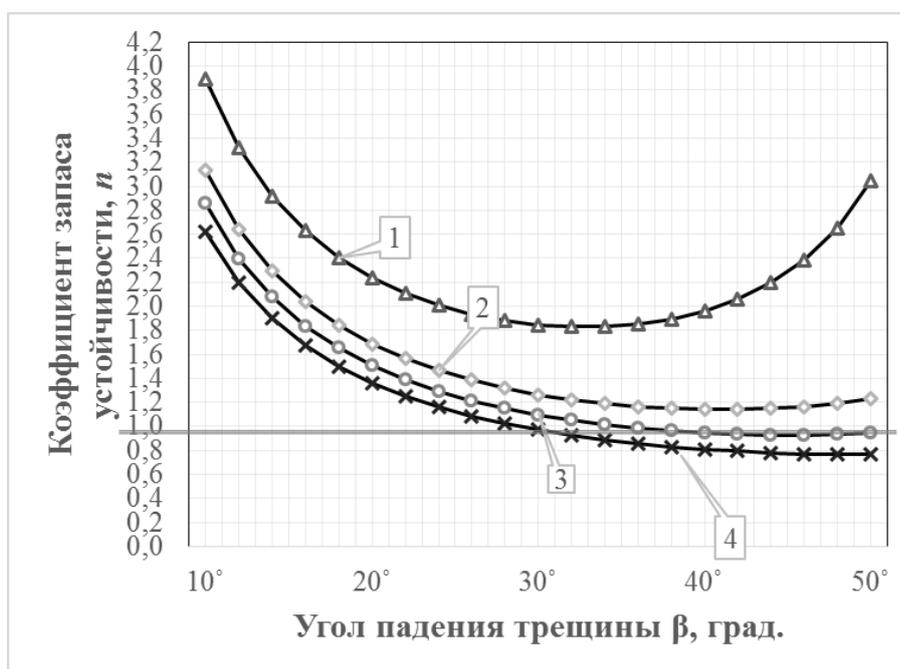


Рис. 4. Результаты расчетов устойчивости уступа высотой 15 м с углом откоса 60° при $C' = 10 \text{ т/м}^2$ и $\varphi' = 10^\circ$.

Примеры графиков для определения предельно допустимых параметров уступов и участков бортов при угле падения трещины в направлении выработанного пространства карьера $\beta = 30^\circ$ приведены на рис. 5 – 7.

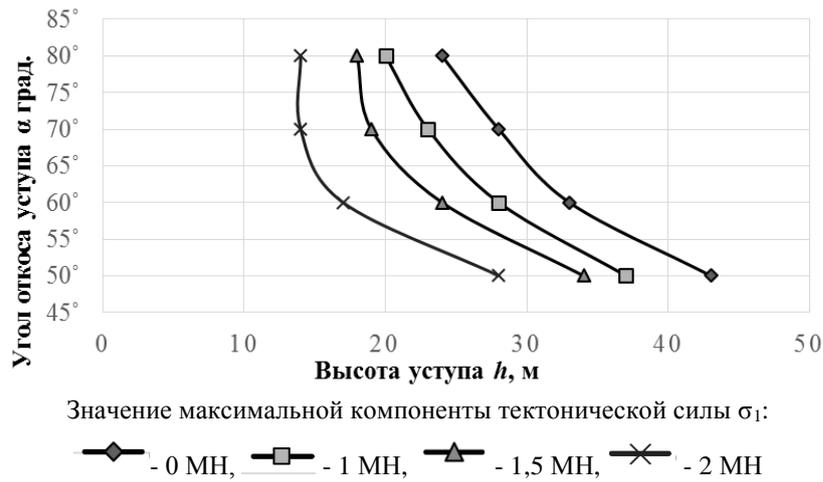


Рис. 5. Взаимосвязь предельно допустимых параметров уступов и участков бортов карьера при $C' = 10 \text{ т/м}^2$ и $\varphi' = 10^\circ$

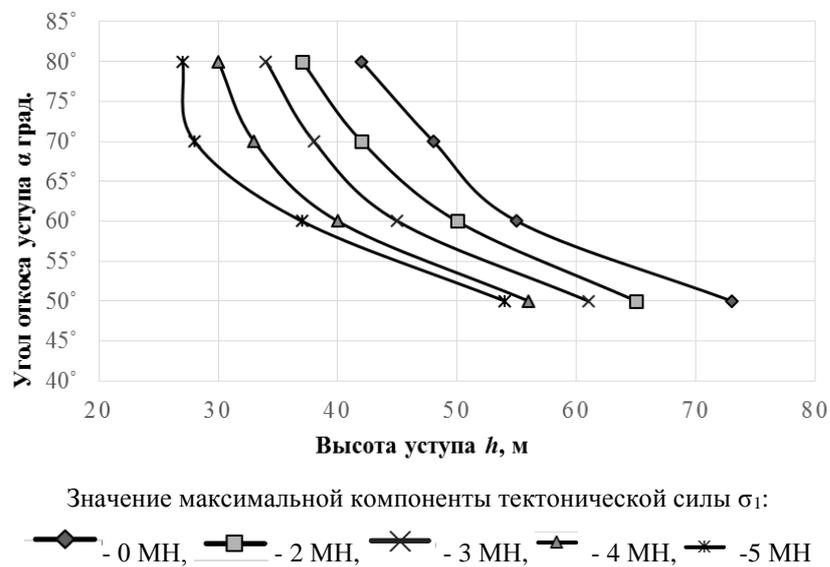


Рис. 6. Взаимосвязь предельно допустимых параметров уступов и участков бортов карьера при $C' = 15 \text{ т/м}^2$ и $\varphi' = 12,5^\circ$

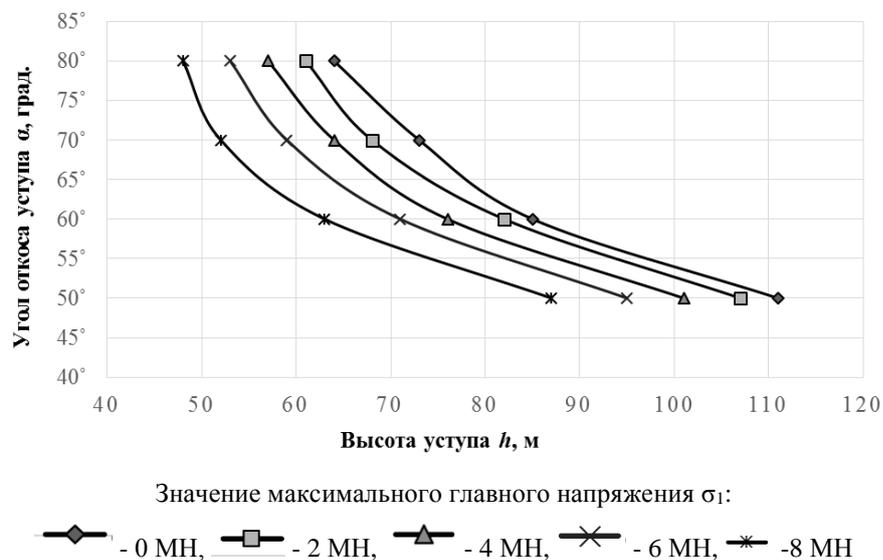


Рис. 7. Взаимосвязь предельно допустимых параметров уступов и участков бортов карьера при $C' = 20 \text{ т/м}^2$ и $\varphi' = 15^\circ$

Выводы

1. Деформирование бортов карьеров в скальных массивах определяется воздействием гравитационно-тектонического поля напряжений, вызывающим возникновение подвижности участков прибортовых массивов, изменение структуры массива с раскрытием существующих и образованием новых дизъюнктивов, формирование поверхностей скольжения и оползневых участков массива.

2. В результате трансформации тектонического поля напряжений максимальная компонента ориентирована в массиве согласно с углом наклона борта карьера.

3. Разработаны методические основы формирования уступов и участков бортов на предельном контуре карьеров в гравитационно-тектоническом поле напряжений, включающие методику учета влияния тектонических напряжений на устойчивость уступов и участков бортов и компьютерные программы в редакторе Excel для расчетного обоснования условий возникновения тектонических подвижек прибортового массива по протяженной трещине и предельных параметров уступа (h и α) или группы уступов в зависимости от прочностных свойств (C' и φ') протяженной трещины, угла ее падения β и величины максимальной компоненты тектонической силы σ_1 .

Список литературы

1. Яковлев А.В., Шимкив Е.С., 2024. Методические основы формирования уступов и участков бортов на предельном контуре карьеров. *Геотехнологические проблемы комплексного освоения недр: сборник научных трудов*. Вып. 6(96). Екатеринбург: ИГД УрО РАН, С. 244-255.

2. *Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов, строящихся и эксплуатируемых карьеров*. Ленинград: ВНИМИ, 1972, 165 с.

3. *Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов: утв. Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору 13.11.2020, № 439, 77 с.* URL: <https://tk-expert.ru/uploads/files/ntd/ntd-809-20210108-191105.pdf?ysclid=m4qnacq1g4707925959> (дата обращения 22.10.2024)

4. Рыльникова М.В. и др., 2022. *Методические указания по определению параметров бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов*. Москва: ИПКОН РАН, 80 с.

5. Зубков А.В., 2000. *Геомеханика и геотехнология*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 335 с.

6. Яковлев А.В., Ермаков Н.И., 2006. *Устойчивость бортов рудных карьеров при действии тектонических напряжений в массиве*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 231 с.

7. Яковлев А.В., Ермаков Н.И., 2008. *Методика изучения прибортовых массивов для прогнозирования устойчивости бортов карьеров*. Екатеринбург: УрО РАН, 78 с.

References

1. Yakovlev A.V., Shimkiv E.S., 2024. Metodicheskie osnovy formirovaniya ustupov i uchastkov bortov na predel'nom konture kar'erov [Methodological foundations of the formation of ledges and sections of sides on the barrier contour of quarries]. *Geotekhnologicheskie problemy kompleksnogo osvoeniya nedr: sbornik nauchnykh trudov*. Вып. 6(96). Ekaterinburg: IGD UrO RAN, P. 244-255.

2. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu uglov naklona bortov, otkosov ustupov i otvalov, stroyashchikhsya i ekspluatiruemykh kar'erov [Methodological guidelines for determining the angles of inclination of sides, slopes of ledges and dumps, quarries under construction and in operation]. Leningrad: VNIMI, 1972, 165 p.

3. Pravila obespecheniya ustoichivosti bortov i ustupov kar'erov, razrezov i otkosov otvalov: utv. Prikazom Federal'noi sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru 13.11.2020, № 439, 77 s. [Rules for ensuring the stability of sides and ledges of quarries, cuts and slopes of dumps: approved by Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision on 11/13/2020, No. 439, 77 p.] URL: <https://tk-expert.ru/uploads/files/ntd/ntd-809-20210108-191105.pdf?ysclid=m4qnacq1g4707925959> (data obrashcheniya 22.10.2024)

4. Ryl'nikova M.V. i dr., 2022. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu parametrov bortov i ustupov kar'erov, razrezov i otkosov otvalov [Methodological guidelines for determining the parameters of sides and ledges of quarries, sections and slopes of dumps]. Moscow: IPKON RAN, 80 p.

5. Zubkov A.V., 2000. Geomekhanika i geotekhnologiya [Geomechanics and geotechnology]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 335 p.

6. Yakovlev A.V., Ermakov N.I., 2006. Ustoichivost' bortov rudnykh kar'erov pri deistvii tektonicheskikh napryazhenii v massive [Stability of the sides of ore pits under the action of tectonic stresses in the massif]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 231 p.

7. Yakovlev A.V., Ermakov N.I., 2008. Metodika izucheniya pribortovykh massivov dlya prognozirovaniya ustoichivosti bortov kar'erov [Methodology for studying instrument arrays for predicting the stability of quarry sides]. Ekaterinburg: UrO RAN, 78 p.

УДК 622.831

Балек Александр Евгеньевич

доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник,
лаборатория геомеханики подземных
сооружений,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
Мамина-Сибиряка 58
e-mail: balek@igduran.ru

Харисов Тимур Фаритович

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией геомеханики
подземных сооружений,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: timur-ne@mail.ru

Масальский Николай Александрович

лаборант,
лаборатория геомеханики подземных
сооружений,
Институт горного дела УрО РАН,
e-mail: nmasalskiy01@mail.ru

Коптыков Дмитрий Александрович

научный сотрудник,
лаборатория геомеханики
подземных сооружений,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: koptyakov_d@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПА НАБОРА ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ БЕТОНА В ШАХТНЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ*

Аннотация:

В работе представлены результаты натурных и лабораторных исследований. Целью исследований являлось выявление относительной неравномерности набора твердеющим бетоном прочностных и деформационных свойств. Обнаружились новые, не учитываемые действующими нормативными документами факторы формирования напряжений в монолитных шахтных креплениях из тяжелых бетонов на портландцементе. Было экспериментально установлено, что на ранних стадиях твердения (в течение 1 – 1,5 месяцев) бетон набирает упругие свойства относительно более медленными темпами, чем прочностные.

Ключевые слова: монолитная крепь, бетон, испытания, прочность, упругость, несущая способность, кинетика твердения, прогнозирование.

DOI: 10.25635/2313-1586.2024.04.064

Balek Alexander Ye.

Doctor of Engineering Sciences,
Leading Researcher,
Laboratory of geomechanics
of underground structures,
Institute of Mining UB RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: balek@igduran.ru

Kharisov Timur F.

Candidate of Technical Sciences,
Head of Laboratory of geomechanics
of underground structures,
Institute of Mining UB RAS
e-mail: timur-ne@mail.ru

Masalsky Nikolay A.

Laboratory Assistant,
Laboratory of geomechanics
of underground structures,
Institute of Mining UB RAS
e-mail: nmasalskiy01@mail.ru

Koptyakov Dmitry A.

Researcher,
Laboratory of geomechanics
of underground structures,
Institute of Mining UB RAS
e-mail: koptyakov_d@mail.ru

STUDY OF THE RATE OF CONCRETE STRENGTH AND DEFORMATION PROPERTIES SET IN MINE AND LABORATORY CONDITIONS

Abstract:

The paper presents the results of field and laboratory studies. The purpose of the research was to identify the relative unevenness of the set of hardening concrete strength and deformation properties. New factors of stress formation in monolithic shaft supports made of heavy concrete on Portland cements, which are not taken into account by current regulatory documents, have been discovered. It has been experimentally established that in the early stages of hardening (within 1 – 1.5 months), concrete gains elastic properties at a relatively slower rate than strength properties.

Key words: monolithic concrete support, concrete, trials, strength elasticity, bearing capacity, kinetics of hardening, forecasting.

* Статья подготовлена в рамках реализации государственного задания № 075-00412-22 ПР, тема 3 рег. № 1021062010536-3-1.5.1

Введение

Параметром, практически не учитываемым в геомеханических расчетах, но существенно влияющим на напряженно-деформированное состояние монолитной бетонной крепи подземных выработок (в особенности вертикальных стволов), является относительная неравномерность набора твердеющим бетоном прочностных и деформационных свойств. Имеется в виду весь тот комплекс сложных процессов, который в материаловедении именуется кинетикой твердения бетона. Строительными механиками решению этого вопроса не уделяется должного внимания, поскольку для наземных сооружений главным является набор бетоном прочности [1 – 2].

Однако при уходке забоя шахтного ствола от темпов набора бетоном упругих свойств, определяемых модулями упругости, существенно зависят напряжения, формирующиеся в крепи. Геомеханикам важно знать, на какой стадии проходки ствола упругую конвергенцию его породных стенок будет воспринимать бетон, уже набравший жесткость, а в каких условиях бетон монолитной крепи будет деформироваться без нарушения сплошности в пластическом режиме и, таким образом, уходить от нагрузок.

Для решения этой задачи ИГД УрО РАН был проведен комплекс натурных и лабораторных исследований.

Методы исследований

Испытания прочностных и деформационных свойств типичной монолитной шахтной крепи из тяжелых бетонов на портландцементе проводились по кубиковым образцам разновозрастного бетона, выпиленным из различных участков монолитной крепи строящегося вертикального ствола. Кубиковая прочность R и начальный модуль упругости E бетона крепи определялись стандартным методом разрушающего контроля в лабораторных условиях.

Для оценки темпов изменения прочностных и деформационных свойств бетонной крепи во времени в нормальных температурно-влажностных условиях выполнены лабораторные исследования кинетики твердения бетона класса $B 25$: типового тяжелого бетона, применяющегося для крепи вертикальных стволов. На специально изготовленных образцах – призмах стандартных размеров (с отношением высоты к ширине, равным 4) различного возраста стандартным методом разрушающего контроля проведен комплекс прессометрических лабораторных испытаний контрольных партий образцов на призменную прочность $R_{пр}$ и на начальный модуль упругости E бетона.

Все работы выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 28570-2019 «Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобранным из конструкций» [3] и ГОСТ 24452-2023 «Бетоны. Методы определения призменной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона» [4]. Размеры образцов по крупности заполнителя, оборудование для их изготовления и правила выдерживания, прессовое и испытательное оборудование, инструменты и приборы, а также интервал рабочих температур в помещении, где проводились исследования, соответствовали требованиям ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» [5].

Для измерения деформаций применялись индикаторы часового типа по ГОСТ 9696-82 «Индикаторы многооборотные с ценой деления 0,001 и 0,002 мм. Технические условия», обеспечивающие измерение относительных линейных деформаций с точностью 0,001 мм [6]. Индикаторы крепились на образцах с помощью прижимных приспособлений на фиксируемой базе, которая отстояла на одинаковом расстоянии от торцов образца и не превышала $2/3$ его высоты, но более чем в 2,5 раза превышала наибольший размер зерен заполнителя бетона.

Кубиковая прочность бетона на одноосное сжатие определялась по формуле

$$R = \alpha P / S, \quad (1)$$

расчетная призменная прочность – по формуле

$$R_{\text{пр}} = 0,75 R, \quad (2)$$

начальный модуль упругости – по формуле

$$E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon, \quad (3)$$

где R и $R_{\text{пр}}$ – прочность бетона на одноосное сжатие, соответственно, кубиковая и призмная, МПа;

α – безразмерный масштабный коэффициент, принимаемый 0,85 при высоте образцов-кубиков $5 \div 6$ см, 0,95 – при их высоте $9 \div 10$ см и 1 – при высоте более 10 см;

P – разрушающая нагрузка, считываемая по шкале силоизмерителя прессы, кН;

S – площадь поперечного сечения образца, определяемая по его линейным размерам, см²;

E – начальный модуль упругости бетона, ГПа;

$\Delta\sigma = \Delta P / S$ – приращение главных нормальных напряжений, действующих в образце от условного нуля до уровня внешней нагрузки, не превышающей 30 % от разрушающей нагрузки P , МПа;

ΔP – приращение внешней нагрузки, соответствующее приращению $\Delta\sigma$, кН;

$\Delta\varepsilon$ – приращение упруго-мгновенной продольной относительной деформации образца, соответствующее уровню внешней нагрузки, не превышающей 30 % от разрушающей, замеренной в начале и в конце каждой ступени ее приложения.

При определении модуля упругости нагружение каждого образца до уровня нагрузки (40 ± 5 %) P проводилось ступенями, составляющими не более 10 % от ожидаемой разрушающей нагрузки P , с выдерживанием в пределах каждой ступени скорости нагружения около ($0,6 \pm 0,2$) МПа/с. На каждой ступени нагрузка выдерживалась от 4 до 5 мин с записью отсчетов по приборам в начале и в конце выдержки. При уровне нагрузки (40 ± 5 %) P приборы с образца снимались, и дальнейшее нагружение образца до его полного разрушения выполнялось непрерывно с постоянной скоростью около ($0,6 \pm 0,4$) МПа/с.

В пределах каждой ступени нагружения приращения упруго-мгновенной относительной продольной деформации образца определялись путем линейной интерполяции: как среднее арифметическое показаний приборов по граням образца, а значения относительных деформаций рассчитывались по формуле

$$\varepsilon = \Delta l_1 / l_1, \quad (4)$$

где Δl_1 – замеренные абсолютные приращения продольной деформации образца, вызванные соответствующим приращением напряжений;

l_1 – фиксированная база измерения продольной деформации образца.

В каждой серии образцов средние значения кубиковой или призмной прочности, равно как и модуля упругости бетона, определяли по формуле

$$y_{\text{ср}} = 1/n \sum y_i, \quad (5)$$

где $y_{\text{ср}}$ – среднее значение указанных величин в серии образцов;

y_i – значение указанных величин по отдельным образцам;

n – число образцов в серии.

Начальное усилие обжатия (которое при испытании принималось за условный ноль) по всем образцам не превышало 2 % от разрушающей нагрузки P , составляющей менее 80 % от максимального значения шкалы силоизмерителя прессы. В процессе проведения испытания от условного нуля до нагрузки (40 ± 5 %) P отклонения деформаций по каждой грани образца не превышали 15 % от их среднего арифметического значения.

При испытаниях призматических бетонных образцов-призм с отношением высоты к ширине, равным 4, призмная прочность бетона напрямую определялась по результатам замеров по формуле (1).

Для оперативной оценки прочности и сопоставительного анализа разновозрастных участков бетонной крепи в шахтном стволе применялись ручные склерометры ти-

па ИПС-МГ 4, использующие метод упругого отскока бойка от прижатого к поверхности бетона ударника, в соответствии с ГОСТ 22690-2015 «Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля» [7].

Результаты исследований

Испытания прочностных и деформационных свойств монолитной бетонной крепи шахтного ствола проводились по образцам бетона, выпиленным на строящемся стволе «Вентиляционный» 2-й очереди шахты «10-летие независимости Казахстана» (шахта «ДНК») Донского ГОКа из крепи 30- и 90-суточного возраста. Размеры щебня во всех образцах не превышали 10 – 12 мм, что позволяло при испытаниях использовать кубиковые образцы минимально допустимых размеров: от 50 – 60 до 90 – 100 мм.

В общей сложности испытано 14 бетонных образцов, 6 из которых были также использованы для определения начального модуля упругости бетона. Результаты пресометрических испытаний представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты испытаний прочностных свойств разновозрастных образцов бетонной крепи ствола «Вентиляционный» шахты «ДНК»

№ образца (возраст бетона, сут)	Размеры образца, см	Площадь рабочего сечения образца S , см ²	Разрушающая нагрузка P , кН	Масштабный коэффициент α	Замеренная кубиковая прочность R , МПа	Расчетная призмная прочность $R_{пр}$, МПа
1 (30)	4,1×4,1×4,7	17,2	770	0,85	38,1	28,5
2 (30)	4,1×4,1×5,0	16,7	635	0,85	32,3	24,2
3 (30)	4,3×4,3×4,8	18,6	708	0,85	32,4	24,3
4 (30)	4,2×4,2×4,8	17,6	605	0,85	29,2	21,9
5 (30)	4,5×4,5×4,8	20,1	916	0,85	38,8	29,1
6 (30)	4,3×4,3×5,3	18,1	677	0,85	31,8	23,9
7 (30)	4,5×4,5×5,7	20,3	628	0,85	26,3	19,7
8 (30)	4,8×4,8×6,0	23,0	549	0,85	20,3	15,2
Среднее арифметическое для 30-суточного возраста:					31,2 ± 5,0	23,4 ± 3,8
Коэффициент вариации для 30-суточного возраста:					19,3 %	19,3 %
9 (90)	9,5×9,4×9,5	89,5	3863	0,95	41,0	30,8
10 (90)	9,8×9,8×10,0	96,0	3618	0,95	35,8	26,9
11 (90)	4,2×4,2×5,0	17,4	661	0,85	32,3	24,2
12 (90)	4,0×4,1×5,7	16,3	704	0,85	36,7	27,5
13 (90)	4,2×4,2×5,2	17,4	818	0,85	40,0	30,0
14 (90)	4,2×4,2×4,9	17,4	716	0,85	35,0	26,2
Среднее арифметическое для 90-суточного возраста:					36,8 ± 3,4	27,6 ± 2,6
Коэффициент вариации для 90-суточного возраста:					8,9 %	8,9 %

Таблица 2

Результаты испытаний деформационных свойств разновозрастных образцов бетонной крепи ствола «Вентиляционный» шахты «ДНК»

№ образца (возраст бетона, сут)	Размеры образца, см	Площадь рабочего сечения образца S , см ²	Разрушающая нагрузка P , кН	Приращение напряжений при нагрузке $0,3P$, МПа	Приращение деформации при нагрузке $0,3P$, мм/м	Начальный модуль упругости E , ГПа
6 (30)	4,3×4,3×5,3	18,1	677	8,1	0,55	14,7
7 (30)	4,5×4,5×5,7	20,3	628	7,9	0,57	13,9
8 (30)	4,8×4,8×6,0	23,0	549	6,1	0,49	12,4
Среднее арифметическое для 30-суточного возраста:						13,2 ± 2,9
Коэффициент вариации для 30-суточного возраста:						8,5 %
12 (90)	4,0×4,1×5,7	16,3	704	9,1	0,48	19,0
13 (90)	4,2×4,2×5,2	17,4	818	7,6	0,30	25,3
14 (90)	4,2×4,2×4,9	17,4	716	8,0	0,38	21,0
Среднее арифметическое для 90-суточного возраста:						21,8 ± 8,0
Коэффициент вариации для 90-суточного возраста:						14,8 %

Выполненная в местах выпиливания образцов в стволе «Вентиляционный» оперативная оценка прочности бетонной крепи с помощью ручного склерометра ИПС-МГ 4, использующего метод упругого отскока бойка от прижатого к поверхности бетона ударника, показала следующие средние (с коэффициентом вариации 25 – 35 %) значения кубиковой прочности бетона: в возрасте 30 сут – 10 МПа; в возрасте 90 сут – 16 МПа; в возрасте свыше 180 сут – 25 ÷ 31 МПа.

Для выявления различий в темпах набора монолитной крепью прочностных и деформационных свойств был проведен комплекс прессометрических лабораторных испытаний бетона на призменную прочность $R_{пр}$ и на начальный модуль упругости E для серий контрольных образцов различного возраста (2, 7, 14, 35 и 101 сут), изготовленных и выдерживаемых при комнатных температуре и влажности. Исследования выполнялись на призматических бетонных образцах минимально допустимых размеров: 7 см × 7 см × 28 см с постоянными площадью рабочего сечения $S = 49$ см² и базой измерения деформаций 10 см, располагавшейся на одинаковом фиксируемом расстоянии от торцов призм.

При изготовлении образцов использовали портландцемент марки М400, гранитный заполнитель с максимальной крупностью зерен 20 мм и кварцевый песок. Все материалы взяты из партий, применявшихся при изготовлении бетона класса В 25 для крепи ствола «Вентиляционный» в соответствии с ГОСТ 26633-2015 «Межгосударственный стандарт. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия», а именно: цемент – песок – щебень в соотношении 1 – 2 – 3 при водоцементном соотношении В / Ц в пределах 0,4 ÷ 0,5 [8]. Данный состав бетонной смеси является стандартным для тяжелых бетонов класса В 25, наиболее широко использующихся для крепления шахтных стволов.

Результаты прессометрических испытаний разновозрастных призматических бетонных образцов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний бетона, используемого для крепи ствола «Вентиляционный» шахты «ДНК», на призменную прочность $R_{пр}$ и на начальный модуль упругости E при различном возрасте бетонных образцов-призм

№ образца (возраст бетона, сут)	Разрушающая нагрузка P , кН	Приращение напряжений при нагрузке $0,3P$, МПа	Приращение деформации при нагрузке $0,3P$, мм/м	Замеренная призменная прочность $R_{пр}$, МПа	Начальный модуль упругости E , ГПа	Отношение $R_{пр} / E$, МПа/ГПа
1 (2)	270	1,6	0,17	5,5	9,6	0,57
2 (2)	274	1,4	0,17	5,6	8,5	0,66
3 (2)	274	1,3	0,15	5,6	8,9	0,63
4 (2)	299	1,5	0,18	6,1	8,6	0,71
Среднее арифметическое для 2-суточного возраста:				5,7 ± 0,4	8,9 ± 0,8	0,64 ± 0,1
Коэффициент вариации для 2-суточного возраста:				4,8 %	5,6 %	8,9 %
5 (7)	500	3,3	0,25	10,2	13,3	0,77
6 (7)	564	4,6	0,30	11,5	15,3	0,75
7 (7)	598	3,9	0,25	12,2	15,6	0,78
8 (7)	524	4,0	0,28	10,7	14,2	0,75
9 (7)	735	4,7	0,32	15,0	14,8	1,01
10 (7)	461	2,6	0,25	9,4	10,2	0,92
Среднее арифметическое для 7-суточного возраста:				11,5 ± 2,1	13,9 ± 2,1	0,83 ± 0,1
Коэффициент вариации для 7-суточного возраста:				17,2 %	14,3 %	13,3 %
11 (14)	946	3,2	0,18	19,3	18,0	1,07
12 (14)	892	2,8	0,21	18,2	13,5	1,35
13 (14)	882	3,0	0,18	18,0	16,8	1,07
14 (14)	755	2,5	0,17	15,4	14,7	1,05
15 (14)	872	2,7	0,20	17,8	13,6	1,31
16 (14)	882	2,9	0,21	18,0	13,9	1,29
Среднее арифметическое для 14-суточного возраста:				17,8 ± 1,3	15,1 ± 2,0	1,18 ± 0,1
Коэффициент вариации для 14-суточного возраста:				7,2 %	12,5 %	11,9 %
17 (35)	985	5,4	0,51	20,1	10,6	1,90
18 (35)	1392	8,5	0,48	28,4	17,7	1,60
19 (35)	1073	7,0	0,52	21,9	13,4	1,63
20 (35)	1269	6,8	0,35	25,9	19,5	1,33
21 (35)	907	5,6	0,45	18,5	12,4	1,49
22 (35)	882	6,2	0,45	18,0	13,7	1,31
Среднее арифметическое для 35-суточного возраста:				22,1 ± 4,4	14,6 ± 3,5	1,52 ± 0,2
Коэффициент вариации для 35-суточного возраста:				18,9 %	23,1 %	14,4 %
23 (101)	1470	7,8	0,51	30,0	15,2	1,97
24 (101)	1333	7,7	0,45	27,2	17,1	1,59
25 (101)	1274	5,9	0,42	26,0	14,0	1,86
26 (101)	1171	6,1	0,38	23,9	16,0	1,49
27 (101)	1225	5,6	0,37	25,0	15,0	1,67
28 (101)	1299	6,2	0,42	26,5	14,8	1,79
Среднее арифметическое для 101-суточного возраста:				26,4 ± 2,2	15,4 ± 1,1	1,72 ± 0,2
Коэффициент вариации для 101-суточного возраста:				7,9 %	7,0 %	10,3 %

Обсуждение результатов исследований

По результатам прессометрических испытаний разновозрастных бетонных образцов отстроены диаграммы, отражающие зависимости прочностных и деформационных свойств бетона от возраста. На рис. 1 и 2 представлены, соответственно, замеренные значения призмной прочности $R_{пр}$ и начального модуля упругости E , которые были сопоставлены с нормативными показателями кинематики твердения, отражающими темпы набора бетоном класса $B 25$ табличных значений прочности и модуля упругости.

Для бетона класса $B 25$ в возрасте 28 сут табличная призмная прочность составляет $R_{пр(28сут)} = 18,75$ МПа: 75 % от его нормативной кубиковой прочности $R_{(28сут)} = 25$ МПа, полученной с обеспеченностью прочностных свойств 95 % при испытаниях стандартных бетонных кубов с размерами ребра 15 см в нормальных условиях. Математические же зависимости, определяющие изменение прочности тяжелых видов бетонов на портланд-цементях в разные моменты времени при различных условиях твердения регламентируются ГОСТ 22783-2022 «Бетоны. Методы прогнозирования прочности на сжатие». В соответствии с данным ГОСТом набор призмной прочности $R_{пр}$ в нормальных условиях происходит в соответствии с зависимостью

$$R_{пр} = 0,7 R_{пр(28сут)} \lg t, \quad (6)$$

где $R_{пр(28сут)}$ – призмная прочность бетона в возрасте 28 сут, МПа;

t – текущий возраст бетона, сут.

На диаграмме рис. 1 кинематика твердения «табличного» бетона $B 25$ по нормативной зависимости (6) представлена сплошной кривой, которая находится в пределах доверительного интервала среднеарифметических замеренных значений $R_{пр}$ с обеспеченностью 95 % как для образцов бетона из ствола (см. табл. 1), так и для контрольных образцов-призм (см. табл. 3). Несущественны и различия среднеарифметических замеренных значений $R_{пр}$ этих двух групп образцов между собой, поскольку внутригрупповые их дисперсии существенно превышают межгрупповые.

Сложнее обстоит дело с нормативными значениями модулей упругости бетона, которые сильно зависят не только от условий твердения, но и от множества других факторов, основными из которых являются крупность и состав заполнителя. Таблица в СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» демонстрирует 37-процентный разброс значений начальных модулей упругости тяжелого бетона класса $B 25$: от 30 ГПа – для условий естественного твердения, до 19 ГПа – для «бетона мелкозернистого группы D, подвергнутого тепловой обработке при атмосферном давлении». В этой связи следует напомнить, что при изготовлении контрольных бетонных призм в соответствии с ГОСТ максимальную крупность зерен щебеночного заполнителя искусственно ограничивают 20 миллиметрами, а в реальных бетонных крепях заполнитель существенно крупнее.

Также до сих пор не выработаны общепризнанные нормативы и для темпов набора бетонами упругих свойств. В СССР (и в настоящее время в России) строительные механики для цели их прогнозирования чаще всего использовали формулу Н.Х. Арутюняна [9]:

$$E = E_{дл} (1 - \beta e^{-\alpha t}), \quad (7)$$

где t – текущий возраст бетона, сут;

E – начальный модуль упругости бетона в возрасте t , ГПа;

$E_{дл}$ – начальный модуль упругости бетона в длительном возрасте, ГПа;

$\alpha = 0,056 \div 0,129$ сут⁻¹; $\beta = 0,5 \div 0,575$ – эмпирические коэффициенты, зависящие от класса бетона, подвижности бетонной смеси (осадки конуса), крупности и состава щебеночного заполнителя и множества других факторов. При этом сложности задания этих коэффициентов, обусловленные их изменчивостью, признавались самими авторами [10].

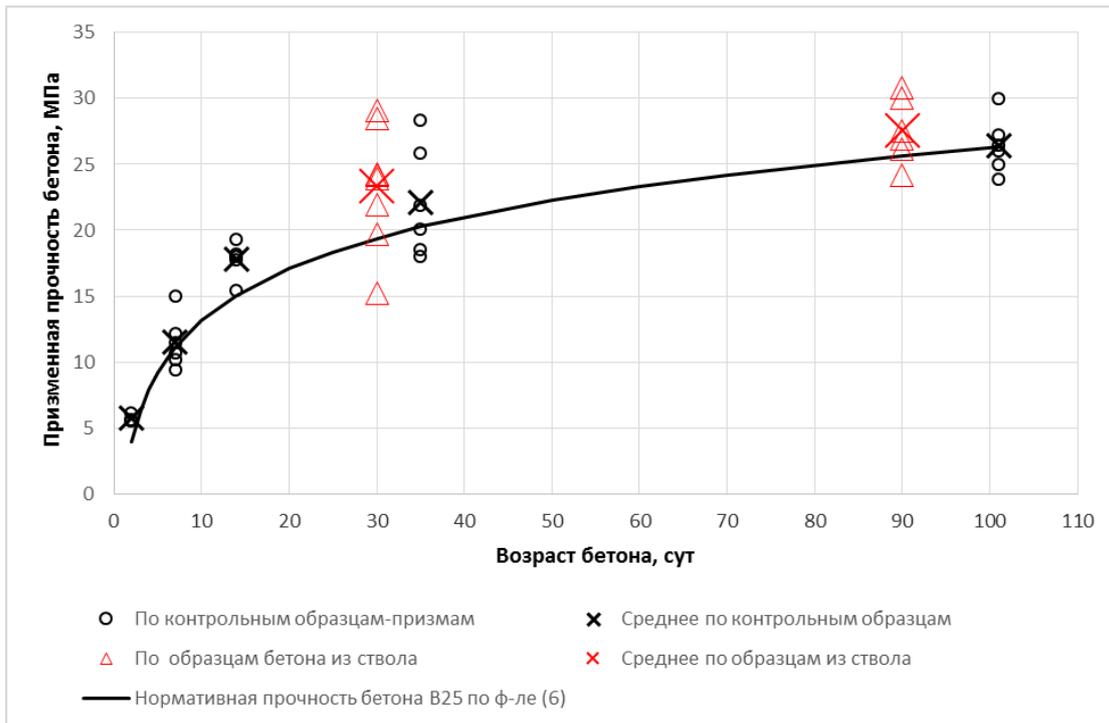


Рис. 1. Зависимость между возрастом бетона и его призмной прочностью $R_{пр}$

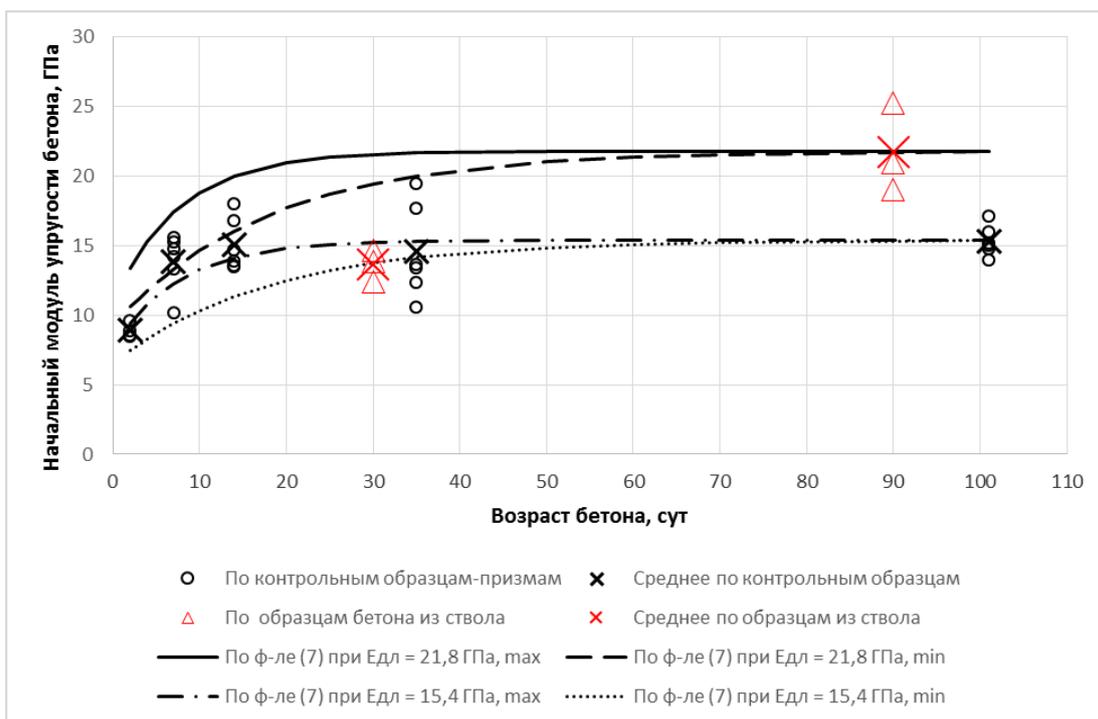


Рис. 2. Зависимость между возрастом бетона и его начальным модулем упругости E

В ряде учебников, в частности, оценку модуля упругости бетона $E(t)$ на ранних стадиях твердения (в диапазоне возрастов от 1 до 180 сут) предлагается осуществлять также и по эмпирической зависимости [11]:

$$E = \frac{100}{1,7 + \frac{360}{\chi(\ln \frac{t}{180} + 5,2)}}$$

Однако эта зависимость никак не привязана к асимптотическим показателям модуля упругости бетона в длительном возрасте, и практическое ее применение затруднено вследствие еще больших, чем у формулы (7), сложностей при задании эмпирического коэффициента χ .

С учетом вышеизложенного для целей рассматриваемых исследований замеренные модули упругости разновозрастных образцов сопоставлялись с расчетными значениями E , определенными по формуле (7) для всего диапазона вариативности эмпирических коэффициентов: от обеспечивающих минимальные показатели упругости $\alpha = 0,129 \text{ сут}^{-1}$ и $\beta = 0,5$, $E(t)$, до $\alpha = 0,056 \text{ сут}^{-1}$ и $\beta = 0,575$, дающих максимальные E .

Для значений модуля упругости бетона $B 25$ в длительном возрасте $E_{\text{дл}}$ также рассматривались два варианта, принятые с учетом фактически замеренных среднеарифметических показателей: $E_{\text{дл}} = 15,4 \text{ ГПа}$, полученных по бетонным образцам-призмам в возрасте 101 сут (см. табл. 3), и $E_{\text{дл}} = 21,8 \text{ ГПа}$, определенных по ствольным бетонным образцам в возрасте 90 сут (см. табл. 2).

Отстроенные таким образом по формуле (7) кривые, отражающие весь возможный диапазон темпов набора бетоном класса $B 25$ расчетных значений начального модуля упругости, приведены на рис. 2. Сопоставление их с фактически замеренными значениями E показывает, что формально все кривые находятся в пределах доверительного интервала среднеарифметических значений E с обеспеченностью 95 %. Это касается как образцов бетона из ствола (см. табл. 2), так и контрольных образцов-призм (см. табл. 3). И также, как и для $R_{\text{пр}}$, различия в замеренных среднеарифметических значениях E между этими двумя статистическими совокупностями являются несущественными.

Вместе с тем рассмотрение зависимости между возрастом бетона и отношением его призмной прочности $R_{\text{пр}}$ (в МПа) к модулю упругости E (в ГПа), представленной на рис. 3, свидетельствует о значимом превышении отношений $R_{\text{пр}} / E$ для показателей, замеренных в возрасте 30 – 35 сут, по сравнению с соотношением аналогичных показателей для расчетных значений, полученных по формулам (6) и (7). Особенно явно это превышение проявляется для образцов бетона из ствола (рис. 3).

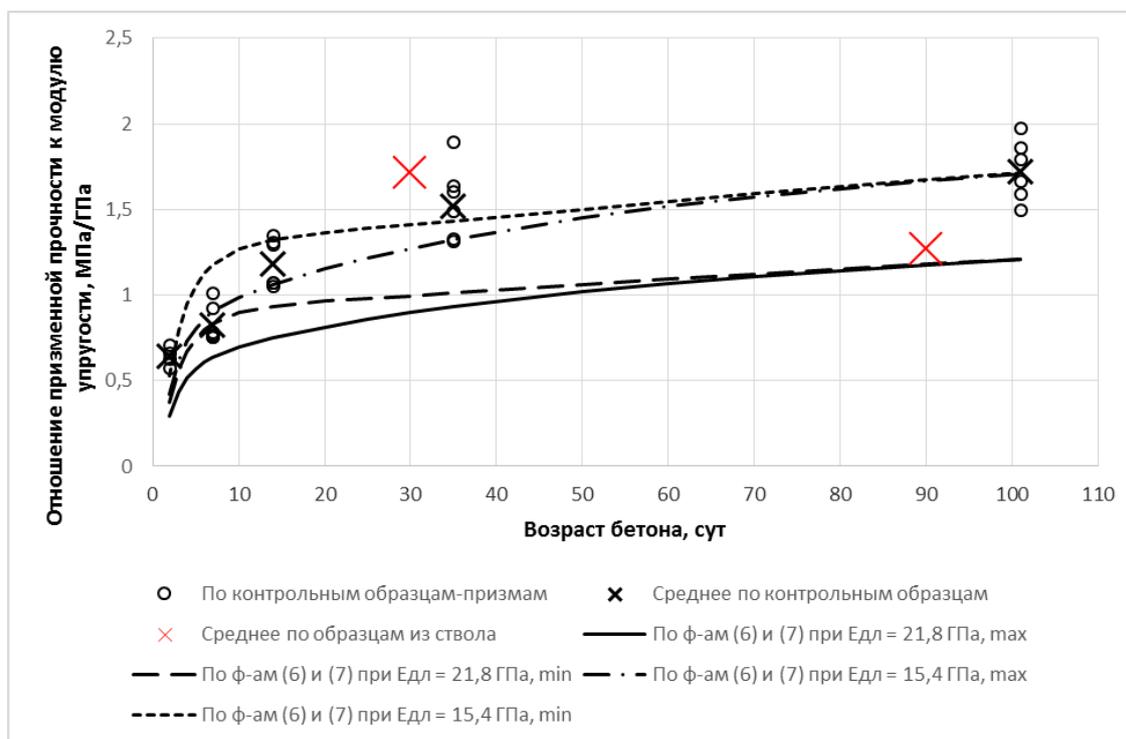


Рис. 3. Зависимость между возрастом бетона и отношением его призмной прочности $R_{\text{пр}}$ (представленной в МПа) к модулю упругости E (в ГПа)

Для возрастов порядка 30 – 35 сут характерен и повышенный коэффициент вариации (причем также по обеим группам образцов), достигающий 23,1 % для модуля упругости 35-суточного бетона контрольных образцов. В то время как на начальных стадиях твердения, так и в его конце (для 101 сут), этот коэффициент не превышал 10 - 15 % (см. табл. 3).

На основании вышеизложенного можно заключить, что отклонения экспериментальных данных от нормативных показателей кинематики твердения свидетельствуют о ее неравномерности во времени и о существенных различиях в темпах набора прочностных и деформационных свойств бетона в разных его участках – объемах. Следует особо отметить, что это проявляется не только при твердении монолитной бетонной крепи в шахтных условиях, но и при твердении контрольных бетонных образцов в нормальных температурно-влажностных условиях в лаборатории.

По этой причине и данные склерометрии для бетона ствола «Вентиляционный» на ранних сроках твердения не соответствовали значениям прочности, получаемым при испытаниях образцов (из тех же участков крепи) на прессе. Так, для возраста 30 сут средние (с коэффициентом вариации 25 – 35 %) значения кубиковой прочности бетона ствола по показаниям склерометра составляли около 10 МПа, а по данным прессометрических испытаний – $31,2 \pm 5,0$ МПа (см. табл. 1). То же для возраста 90 сут, соответственно: 16 МПа и $36,8 \pm 3,4$ МПа. И лишь в возрасте крепи порядка 180 – 200 сут показатели склерометра начинали коррелироваться с результатами прессометрических испытаний и нормативными значениями кубиковой прочности бетона В 25. А поскольку по своей физической сути показания склерометра отражают не столько прочностные, сколько упругие свойства испытуемого материала, то можно сделать вывод, что бетон на ранних этапах твердения набирал упругие свойства относительно более медленными темпами, чем прочностные.

Это подтверждает сопоставительный анализ зависимостей, представленных на рис. 1 и 2, который показывает, что в целом темпы набора бетоном упругих свойств ниже, чем прочностных, однако на ранних стадиях твердения эти темпы относительно еще более низкие, в особенности в возрасте 30 – 35 сут. Данный эффект является положительным фактором, поскольку способствует уходу крепи от нагрузок. В процессе ухода забоя выработки большая часть конвергенции ее породных стенок реализуется в условиях пластичной деформации, и уровень напряжений в бетонной крепи оказывается меньшим, чем в бетоне, уже набравшем жесткость.

Экспериментальное подтверждение данного эффекта в свое время было получено в процессе строительства ствола «Вентиляционный», когда на глубине 602 м проходка была приостановлена и снова возобновлена спустя 6 месяцев. При возобновлении проходки ствола ИГД УрО РАН замерами методом шелевой разгрузки был зафиксирован существенный прирост напряжений прилегающего участка бетонной крепи, утратившей за это время пластичность [12].

Таким образом, при проходке шахтных стволов повышенная податливость бетона на ранних стадиях твердения частично используется естественным образом. При средней скорости углубки ствола около 30 м в месяц основные деформации породных стенок бетон воспринимает в течение первых двух недель после возведения крепи. И поскольку в этом возрасте бетон обладает повышенной естественной пластичностью, то это обеспечивает его уход из-под нагрузки без нарушения сплошности и снижения несущей способности крепи. Очевидно, что в условиях скоростных проходок этот эффект проявляется еще больше.

Однако естественная податливость монолитной бетонной крепи в раннем возрасте может быть усилена еще больше путем целенаправленного замедления темпов набора бетоном упругих свойств, при сохранении темпов набора прочностных, за счет введения в бетонную смесь пластифицирующих добавок. При этом прочность крепи не

только не снизится, но даже несколько увеличится за счет повышения удобоукладываемости бетонной смеси за опалубку, что позволит уменьшить расход воды затворения.

Анализ литературных источников о добавках к бетонной смеси показывает, что сейчас для пластифицирования бетона чаще всего применяют концентрат сульфидно-дрожжевой бражки в количестве 0,15 – 0,25 % от массы цемента, суперпластификатор ПАЩ-1 в количестве 0,1 – 0,2 %, а также продукты конденсации нафталиносульфоокислоты С-3 или С-4 ("Дофен") в количестве от 0,2 до 1,2 % от массы цемента [13 – 15]. В соответствии с ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия» и ГОСТ 24211-2008 «Добавки для бетонов. Общие технические требования» при стандартно применяемых дозировках указанные добавки являются эффективным пластификатором незатвердевшей бетонной смеси, которые позволяют уменьшить расход цемента и воды без снижения прочности бетона [16 – 17]. При повышенных же дозах (до 0,5 – 0,6 % от массы цемента), судя по описаниям, они становятся эффективным пластификатором также и для уже частично затвердевшего бетона, способствуя изменениям формы и уменьшению размеров кристаллов новообразований в цементном камне, а также увеличивая воздухоовлечение в бетонную смесь, изменяя пористую структуру бетона. Увеличение содержания вовлеченного воздуха в уплотненной бетонной смеси практически не повышает общей пористости затвердевшего бетона, поскольку в бетонных смесях равной подвижности при неизменном В/Ц уменьшается масса цементного теста, а следовательно, сокращается и объем пористости, приходящийся в бетоне на долю цементного камня. Все это неизбежно изменяет деформационные характеристики бетона на ранних стадиях твердения в сторону снижения модуля упругости, что благоприятно сказывается на напряженно-деформированном состоянии монолитной бетонной крепи.

Заключение

При проведении комплекса натуральных и лабораторных исследований обнаружилось новые, не учитываемые действующими нормативными документами факторы формирования напряжений в монолитных шахтных крепях из тяжелых бетонов на портландцементях. Было экспериментально установлено, что на ранних стадиях твердения (в течение 1 – 1,5 месяцев) бетон набирает упругие свойства относительно более медленными темпами, чем прочностные. С точки зрения влияния на устойчивость крепи это является положительным фактором, поскольку способствует уходу крепи от нагрузок. Для усиления данного эффекта за счет еще большего замедления темпов набора бетоном упругих свойств (при сохранении темпов набора свойств прочностных) рекомендуется применение пластифицирующих добавок.

Список литературы

1. Komljenovic, M., 2015. Mechanical strength and Young's modulus of alkali-activated cement-based binders. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, № 7, P. 171–215. DOI:10.1533/9781782422884.2.171
2. Xianyu Jin, Zongjin Li, 2003. Effects of Mineral Admixture on Properties of Young Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(5), 435–442. DOI:10.1061/(asce)0899-1561(2003)15:5(435)
3. ГОСТ 28570-2019. *Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций*. Москва: Стандартинформ, 2019, 12 с.
4. ГОСТ 24452-2023. *Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона*. Москва: Российский институт стандартизации, 2024, 10 с.
5. ГОСТ 10180-2012. *Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам*. Москва: Стандартинформ, 2013, 30 с.

6. ГОСТ 9696-82. Индикаторы многооборотные с ценой деления 0,001 и 0,002 мм. Технические условия. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1984, 6 с.
7. ГОСТ 22690-2015. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. Москва: Стандартинформ, 2016, 19 с.
8. ГОСТ 26633-2015. Межгосударственный стандарт. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2019, 11 с.
9. Арутюнян Н.Х., 1952. Некоторые вопросы теории ползучести. Москва: Гостехиздат, 323 с.
10. Арутюнян Н.Х., Зевин А.А., 1988. Расчет строительных конструкций с учетом ползучести. Москва: Стройиздат, 256 с.
11. Булычев Н.С., 1994. Механика подземных сооружений. Москва: Недра, 382 с.
12. Боликов В.Е., Балек А.Е., Бекеев М.М., 2012. Решение геомеханических проблем обеспечения устойчивости горных выработок в шахтах Донского ГОКа. *Горный журнал*, № 1, С. 55- 59.
13. Рамачандран В.С., Фельдман Р.Ф., Коллепарди М. и др., 1988. *Добавки в бетон*: Справ. пособие. Пер. с англ. Москва: Стройиздат, 575 с.
14. Куликова Е.С., Куликова Т.А., Ткаченко А.З., 2019. Добавки в технологии бетона. *Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса*. № 1-3, С. 371-374.
15. Garzon-Agudelo P.A., Palacios-Alvarado W., Medina-Delgado B., 2021. Impact of plasticizers on the physical and structural properties of concrete used in constructions. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2046 DOI:10.1088/1742-6596/2046/1/012069
16. ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2012, 11 с.
17. ГОСТ 24211-2008. Добавки для бетонов. Общие технические требования. Москва: Стандартинформ, 2010, 11 с.

References

1. Komljenovic, M., 2015. Mechanical strength and Young's modulus of alkali-activated cement-based binders. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, № 7, P. 171–215. DOI:10.1533/9781782422884.2.171
2. Xianyu Jin, Zongjin Li, 2003. Effects of Mineral Admixture on Properties of Young Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(5), P. 435–442. DOI:10.1061/(asce)0899-1561(2003)15:5(435)
3. GOST 28570-2019. Betony. Metody opredeleniya prochnosti po obraztsam, otobranym iz konstruksii . [Concrete. Methods for determining strength from samples selected from structures]. Moscow: Standartinform, 2019, 12 p.
4. GOST 24452-2023. Betony. Metody opredeleniya prizmennoi prochnosti, modulya uprugosti i koeffitsienta Puassona [Concrete. Methods for determining the prismatic strength, modulus of elasticity and Poisson's efficiency]. Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii, 2024, 10 p.
5. GOST 10180-2012. Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obraztsam [Concrete. Methods for determining strength from control samples]. Moscow: Standartinform, 2013, 30 p.
6. GOST 9696-82. Indikatory mnogooborotnye s tsenoi deleniya 0,001 i 0,002 mm. Tekhnicheskie usloviya . [The indicators are diverse with a division price of 0.001 and 0.002 mm. Technical conditions]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 1984, 6 p.
7. GOST 22690-2015. Betony. Opredelenie prochnosti mekhanicheskimi metodami nerazrushayushchego kontrolya [Concrete. Determination of strength by mechanical methods

of non-destructive testing]. Moscow: Standartinform, 2016, 19 p.

8. GOST 26633-2015. Mezhgosudarstvennyi standart. Betonny tyazhelye i melkozernisty. Tekhnicheskie usloviya. [Interstate standard. Heavy and fine-grained concretes. Technical conditions]. Moscow: Standartinform, 2019, 11 p.

9. Arutyunyan N.Kh., 1952. Nekotorye voprosy teorii polzuchesti [On some issues of the theory of creep]. Moscow: Gos-tekhizdat, 323 p.

10. Arutyunyan N.Kh., Zevin A.A., 1988. Raschet stroitel'nykh konstruksii s uchetom polzuchesti [Calculation of building structures taking into account the creep]. Moscow: Stroiizdat, 256 p.

11. Bulychev N.S., 1994. Mekhanika podzemnykh sooruzhenii [Mechanics of underground structures]. Moscow: Nedra, 382 p.

12. Bolikov V.E., Balek A.E., Bekeev M.M., 2012. Reshenie geomekhanicheskikh problem obespecheniya ustoichivosti gornyx vyrabotok v shakhtakh Donskogo GOKa [Solving geomechanical problems of ensuring the stability of mining operations in the mines of Donskoy GOK]. Gor-nyi zhurnal, № 1, P. 55- 59.

13. Ramachandran V.S., Fel'dman R.F., Kollepardi M. i dr., 1988. Dobavki v beton: [Additives in concrete:] Sprav. posobie . Per. s angl. Moscow: Stroiizdat, 575 p.

14. Kulikova E.S., Kulikova T.A., Tkachenko A.Z., 2019. Dobavki v tekhnologii betona. [Additives in concrete technology]. Dal'nyi Vostok: problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa. № 1-3, P. 371-374.

15. Garzon-Agudelo P.A., Palacios-Alvarado W., Medina-Delgado B., 2021. Impact of plasticizers on the physical and structural properties of concrete used in constructions. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2046 DOI:10.1088/1742-6596/2046/1/012069/

16. GOST 23732-2011. Voda dlya betonov i stroitel'nykh rastvorov. Tekhnicheskie usloviya [Water for concrete and mortars. Technical conditions]. Moscow: Standartinform, 2012, 11 p.

17. GOST 24211-2008. Dobavki dlya betonov. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [Additives for concrete. General technical requirements]. Moscow: Standartinform, 2010, 11 p.

УДК 622.83:550.8

Мельник Виталий Вячеславович

кандидат технических наук,
заведующий отделом геомеханики,
Институт горного дела УрО РАН,
Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: melnik@igduran.ru,

Бермухамбетов Валихан Айдарович

директор ТОО «ИГД Казахстан»,
Республика Казахстан, г. Астана,
ул. Куйши Дина, 17
e-mail: igd.kazakhstan@gmail.com

Князбаева Жайнагуль Рахимгалиевна

менеджер технической службы,
Донской ГОК – филиал АО «ТНК «Казхром»,
Республика Казахстан,
г. Хромтау, площадь Мира, 25
e-mail: Zh.Knyazbayeva@erg.kz

**ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИХ
И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ
ОСОБЕННОСТЕЙ МАССИВА ГОРНЫХ
ПОРОД В РАЙОНЕ ОЧИСТНЫХ РАБОТ
ШАХТЫ «10-ЛЕТИЕ НЕЗАВИСИМОСТИ
КАЗАХСТАНА»****Аннотация:*

Исследование структурного строения массива горных пород при ведении подземных горных работ является актуальной задачей как при решении задач устойчивости выработок, так и при их осушении. В настоящей работе приведен пример выполненных работ на одном из крупнейших горнообогатительных комбинатов Республики Казахстан – Донском ГОКе. При выполнении работ использовался метод спектрального сейсмопрофилирования, хорошо зарекомендовавший себя в шахте, основанный на определении акустических свойств массива горных пород. Цель исследований заключалась в поиске структурно-тектонических нарушений и связанных с ними зон повышенной трещиноватости. Такие области являются основными каналами поступления подземных вод в шахту, и их выделение позволит выбирать оптимальные условия расположения дренажных скважин при решении задач осушения рудных тел. В результате выполненных исследований были построены карты развития трещиноватости для каждого горизонта шахты, а впоследствии объемная модель распределения трещиноватости в шахте, которая была внедрена в модель месторождения предприятия. По результатам районирования были пробурены заверочные скважины, подтвердившие эффективность выбранной методики и ее достоверность.

Ключевые слова: структурное строение, геофизические исследования, шахтное поле, вертикальные горные выработки, дренажные скважины, осушение, спектральное сейсмопрофилирование, рудное тело, трещиноватость.

DOI: 10.25635/2313-1586.2024.04.077

Melnik Vitalii V.

Candidate of Technical Sciences,
Head of the Department of Geomechanics,
Institute of Mining UB RAS,
620075 Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiriyaka Str.
e-mail: melnik@igduran.ru

Bermukhambetov Valikhan A.

Director TOO IGD Kazakhstan,
Republic of Kazakhstan, Astana,
17 Kuishi Dina Str.
e-mail: igd.kazakhstan@gmail.com,

Knyazbayeva Zhainagul R.

Technical Service Manager,
Donskoy GOK – Branch of TNK Kazchrome,
Republic of Kazakhstan, Khromtau,
25 Mira Square
e-mail: Zh.Knyazbayeva@erg.kz

**GEOPHYSICAL STUDIES
OF STRUCTURAL, TECTONIC
AND HYDROGEOLOGICAL
FEATURES OF THE ROCK MASS
IN THE AREA OF THE MINE TREATMENT
WORKS "10TH ANNIVERSARY
OF INDEPENDENCE OF KAZAKHSTAN"***Abstract:*

The study of the structural composition of an array of rocks in during underground mining is an urgent task both in solving problems of the stability of workings and in their drainage. This paper provides an example of the work performed at one of the largest mining and processing plants in the Republic of Kazakhstan – Donskoy GOK. During the work, the spectral seismic profiling method was used, which has proven itself well in the mine, based on the determination of the acoustic properties of the rock mass. The purpose of the research was to search for structural and tectonic disturbances and associated areas of increased fracturing. Such areas are the main channels of groundwater supply to the mine and their allocation will allow you to choose the optimal conditions for the location of drainage wells when solving problems of draining ore bodies. As a result of the performed research, fracture development maps were constructed for each mine horizon, and subsequently a volumetric model of fracture distribution in the mine, which was implemented into the enterprise's field model. According to the results of zoning, test wells were drilled, which confirmed the effectiveness of the chosen technique and its reliability.

Key words: structural composition, geophysical research, mine field, vertical mining, drainage wells, dewatering, spectral seismic profiling, ore body, fracturing.

* Работа выполнена в рамках Госзадания № 075-00412-22. Тема № 3.

Введение

Ведение горных работ при подземном способе разработки месторождений всегда связано с решением задач осушения горных выработок, и особенно важной задачей является снижение обводненности руды при очистных работах. Существует множество способов осушения месторождений: скважинные водозаборы, дренажные кольцевые подземные выработки вокруг месторождения с сетью водосбросных скважин и др. Такие меры обычно являются достаточными для безопасного ведения горных работ, однако рудные тела от насыщения водой они не защищают. Мокрая руда – это не только дополнительные материальные и временные затраты на сушку, но и сложности с перепуском ее через вертикальные горные выработки на нижние горизонты для транспортировки к месту подъема на земную поверхность, т.е. к скиповым стволам. В настоящей статье хочется остановиться на одном из примеров решения задач осушения горных выработок и рудных тел с помощью разгрузки водоносных горизонтов путем бурения разгрузочных скважин.

Само по себе бурение разгрузочных и перепускных скважин является общепринятым способом уменьшения обводненности горных выработок при ведении подземных горных работ, однако точки размещения этих скважин, как правило, выбираются только по аналитическим данным, с учетом визуальных наблюдений за участками поступления воды и направлением развития очистных работ. Такой подход является логически обоснованным и не подвергается критике, хотя получаемый при буровых работах объем воды зачастую является минимальным.

Для увеличения производительности дренажных скважин, кроме обозначенных выше параметров, при выборе точек бурения скважин следует учитывать расположение трещиноватости в массиве горных пород, поскольку вода в скальных массивах идет по трещинам. Зная пространственное расположение зон повышенной трещиноватости, можно с большой вероятностью получения максимальной водоотдачи скважин задавать точки их расположения, необходимую глубину и азимуты бурения.

К сожалению, традиционные геофизические методы в большинстве случаев использовать в условиях шахты не представляется возможным, поскольку существуют различные помехи, препятствующие проведению измерений, такие как бетонная крепь, металлические конструкции, забутовочная сетка и, конечно, небольшой размер самих горных выработок.

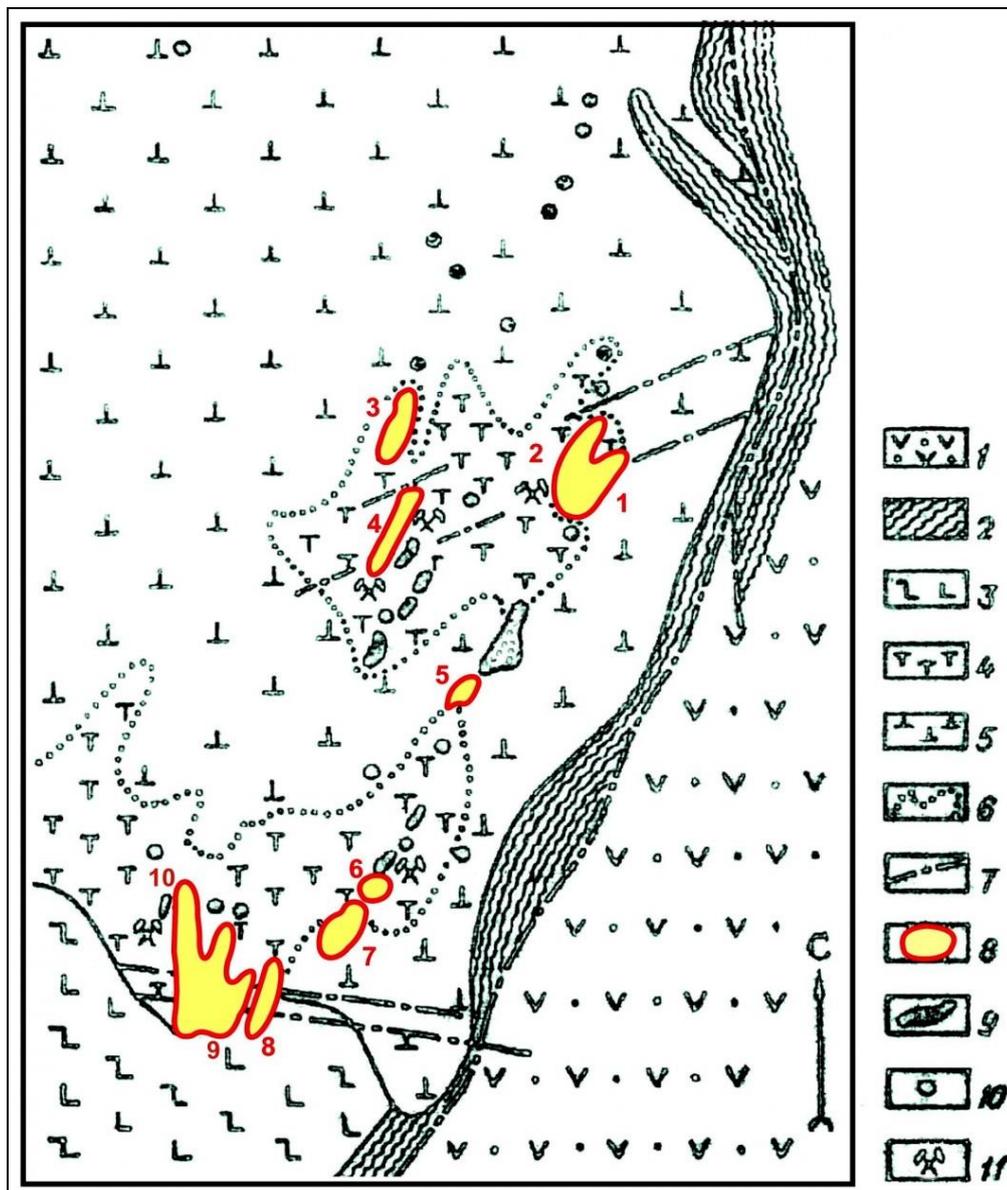
Для решения задач картирования структурных нарушений в условиях подземных горных выработок используется хорошо зарекомендовавший себя метод спектрального сейсмопрофилирования (ССП), разработанный в свое время НПФ «Геофизпрогноз» в г. Санкт-Петербурге [1]. Данный метод уже более двадцати лет успешно применяется специалистами отдела геомеханики ИГД УрО РАН при решении подобных задач, в условиях как подземных горных работ, так и наземных [2 – 8]. Один из примеров использования метода СПП при моделировании структурного строения массива горных пород шахты для выбора точек заложения разгрузочных гидрогеологических скважин приведен в настоящей статье.

Предпосылки проведения исследований

Как уже упоминалось выше, геофизический метод спектрального сейсмопрофилирования позволяет оперативно и с достаточной точностью выявлять области повышенной трещиноватости, являющиеся основными каналами фильтрации подземных вод в скальных массивах [9 – 10]. Информация о расположении этих трещин позволяет пробурить дренажные и заверочные скважины в наиболее перспективных точках, обеспечив их максимальную производительность.

Массив горных пород шахт Донского ГОКа (Республика Казахстан), где проводились работы, обладает высокой трещиноватостью, однако, как показывает практика, распределяется трещиноватость неравномерно. Этот факт уже несколько лет использу-

ется при выборе мест расположения восстающих выработок и подбора вариантов крепления стволов при их строительстве. Основные породы, слагающие массив, представлены серпентинитами, дунитами, габбро и другими скальными породами (рис. 1).



Геологическая схема Южно-Кемпирсайских хромитовых месторождений (по Г.А. Елпашеву):
1 – палеозойские вулканогенно-осадочные отложения; 2 – протерозойские метаморфические породы;
3 – габброамфиболиты; 4 – серпентиниты по дунитам; 5 – серпентиниты по перидотитам;
6 – границы пород; 7 – разрывные нарушения;
8 – крупные хромитовые месторождения (1 – Молодежное, 2 – 40 лет КазССР,
3 – Геофизическое XII, 4 – 20 лет КазССР, 5 – Геофизическое VI, 6 – Спорное,
7 - №21, 8 – Первомайское,
9 – Алмаз-Жемчужина, 10 – Миллионное); 9 – средние и мелкие месторождения;
10 – рудопроявления; 11 – разрабатываемые месторождения

Рис. 1. Выкопировка из геологической карты района

Данные породы без наличия трещиноватости являются практически водоупорными, однако раскрытые трещины, приуроченные к активным тектоническим нарушениям, значительно повышают их фильтрационные характеристики. Это в свою очередь доставляет множество проблем при отработке данных месторождений.

На поле шахты «10-летие независимости Казахстана» (ДНК), где проводились исследования, представленные в настоящей статье, широко развиты разрывные нарушения преимущественно субширотного, северо-восточного, северо-западного и в меньшей степени субмеридиональных направлений. Большинство из них имеют пострудный возраст, зачастую они расчленяют рудные тела на отдельные блоки и смещают их относительно друг друга.

Разрывные нарушения представлены зонами интенсивной серпентинизации и дробления пород с многочисленными серпентинитовыми прожилками, содержащими примесь брусита. Отдельные нарушения трассируются маломощными дайками габбро-диабазов.

Все рудное поле расчленяется разрывами указанных направлений на блоки с поперечником от 100 до 700 м. Протяженность их составляет 1 – 5 и более км, а мощность колеблется от первых дециметров до десятков метров. На фоне такой решетки разрывных нарушений проявлены многочисленные разрывы более высокого порядка и, в конечном счете, весь массив рудовмещающих серпентинизированных гипербазитов разбит системой мелких трещин различных направлений на элементарные блоки размером 0,5 – 2,0 м, а вблизи разрывных нарушений – до 0,1 м.

При обводнении массива горных пород в зонах, нарушенных структурными трещинами, регулярно наблюдаются и задокументированы отслаивание горных пород, а также и вывалообразование (рис. 2).



Рис. 2. Обводненность и отслаивание стенок выработки

Для борьбы с повышенной обводненностью горных выработок было принято решение использовать дренажные скважины, позволяющие своевременно разгружать водоносный горизонт скальных пород до начала очистных работ на определенных участках. При этом, как уже упоминалось, без трещин массив является практически безводным, поэтому вопрос, как выбрать точки и направление бурения дренажных скважин, стал основным при данном способе осушения.

Результаты исследований

Геофизические исследования методом спектрального сейсмопрофилирования проводятся на данном горно-обогательном комбинате уже больше 15 лет как специалистами отдела геомеханики ИГД УрО РАН совместно с ТОО «ИГД-Казахстан», так и специалистами Донского ГОКа. В связи с этим метод определения расположения областей повышенной трещиноватости был выбран однозначно – метод ССП.

Крепление выработок на шахте ДНК выполнено металлической решеткой ма-

ленького размера с забутовкой. В связи с этим выполнять измерения в стенки или кровлю выработок не представлялось возможным. Исследования массива горных пород производилось бурением и сейсмопрофилированием в почву выработок. Учитывая, что такой способ измерений не позволяет оценить состояние массива в разных направлениях, выполнять исследования было решено на всех доступных горизонтах для получения объемной модели и возможности интерполировать выявленные нарушения на различные глубины и в пространстве. На рис. 3 приведен пример получаемых разрезов.

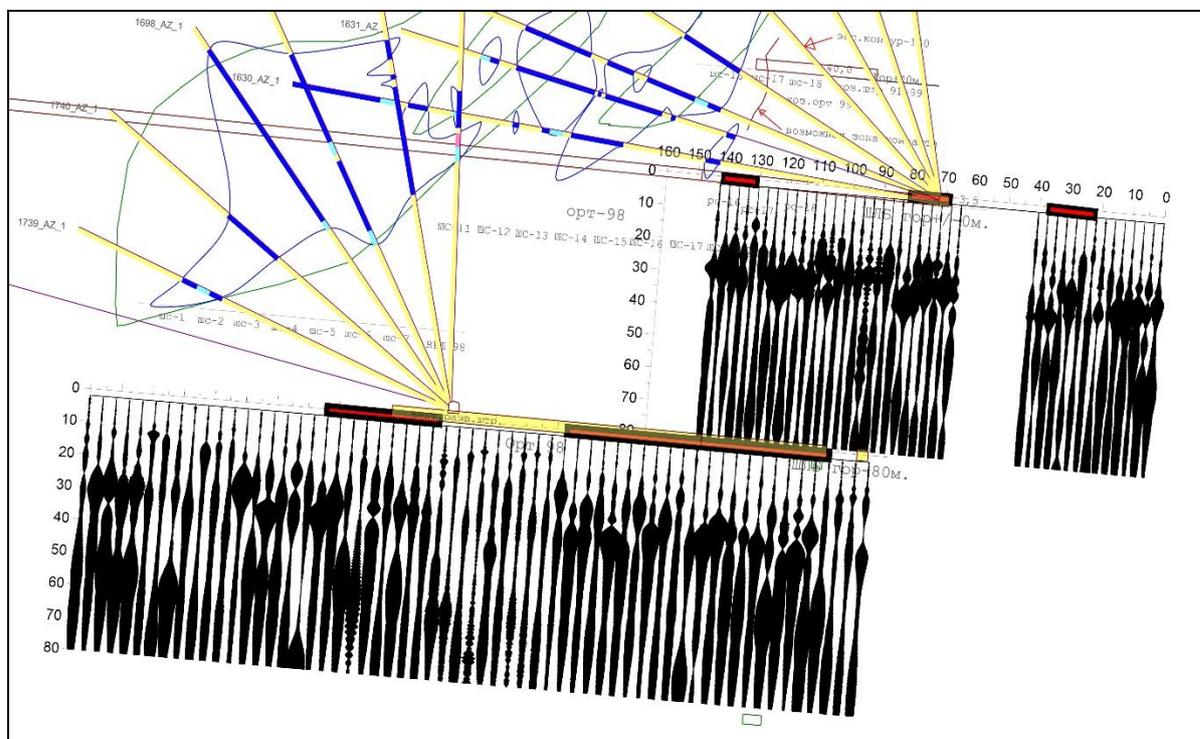


Рис. 3. Пример получаемых сейсморазрезов по двум горизонтам

Все разрезы подвергались тщательной привязке к горизонтам и внедрялись в структурную модель шахты ДНК.

На рис. 4 представлено внедрение результатов геофизических измерений на разрез по двум горизонтам шахты, совпадающим по осям в плане.

По каждому разрезу в отдельности проводилась интерпретация с выделением наиболее нарушенных участков, кроме того, учитывая, что массив на данном объекте и так достаточно сильно нарушен, при выделении структур предпочтение отдавалось косым трещинам, т.е. нарушениям, имеющим признаки современной геодинамической подвижности.

Кроме того, на каждый горизонт была вынесена информация из архивных данных по имеющимся на площадке подтвержденным тектоническим нарушениям и выходам воды в стенках и кровле выработок. Вся информация досконально изучалась, сопоставлялась, это позволило вынести на план каждого горизонта области, рекомендуемые для бурения дренажных скважин. Пример представления данных приведен на рис. 5.

Выделенные области повышенной трещиноватости были внедрены в трехмерную модель шахты для дальнейшего использования специалистами предприятия при решении различных задач, связанных с проходкой горных выработок и дренажных скважин. На рис. 6 представлена выкопировка из данной модели.

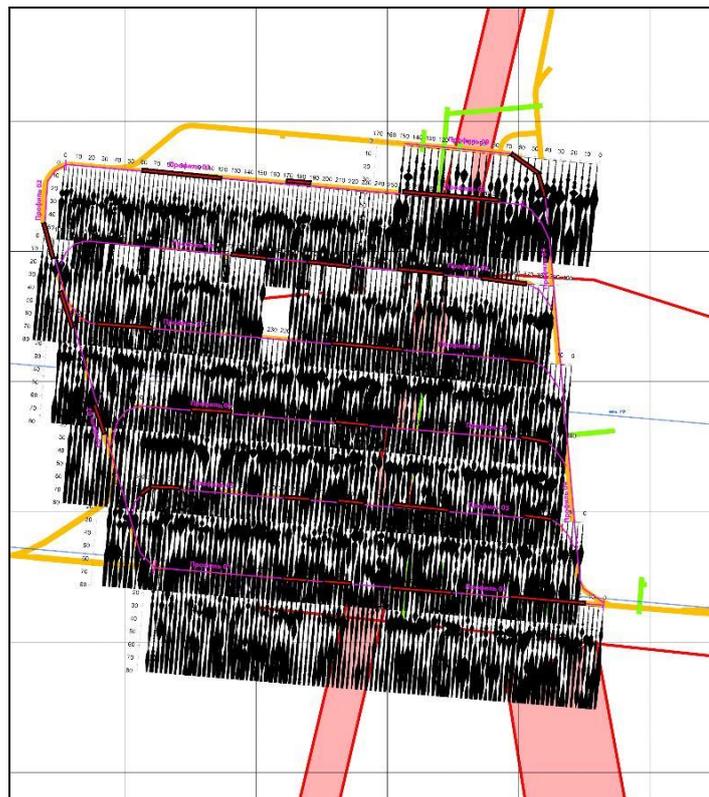


Рис. 4. Визуальное представление результатов исследований



Рис. 5. Структурно-тектоническая модель горизонта

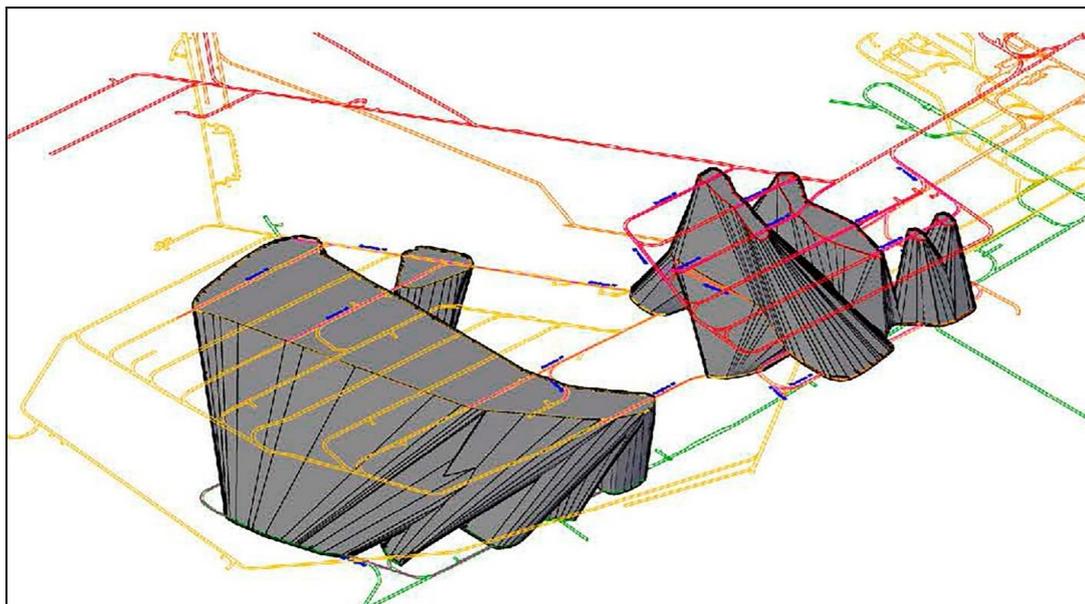


Рис. 6. Выкопировка из трехмерной модели участка исследований

По результатам районирования было произведено заверочное бурение вееров скважин. Для этого совместно со специалистами шахты были выбраны точки бурения и направления вееров. При этом точки были заданы как на участках, рекомендованных для бурения, так и за пределами выделенных областей для сравнения полученных результатов.

Первый веер был отбурен за пределами выделенной зоны, скважины оказались сухими, и массив, по информации буровых мастеров, достаточно устойчивый.

Второй и третий веера пробурены с учетом выделенных неоднородностей. Во втором вода вышла, хотя и дебит оказался незначительным, в третьем воды не было, но весь массив также, по информации бурового мастера, оказался сильно нарушенным, стволы скважин сильно изогнуты из-за встречи наклонной трещиноватости.

Нужно отметить, что бурение первых трех вееров проводилось на практически сухом нижнем горизонте в кровлю выработок, причем, как говорилось раньше, нарушенные области выделялись по зондированиям в почву и интерполировались на остальной массив.

Далее предстоит бурение на остальных горизонтах, однако уже сейчас можно сделать вывод о том, что выбранная методика исследований оказалась достаточно информативной, а результаты были подтверждены бурением, т.е. результаты достоверные.

Исследования структурно-тектонического строения массива горных пород при ведении горных работ – необходимая задача не только для осушения горного массива, но и для обеспечения безопасности проходки горных выработок, что подтверждается многими международными исследованиями [11 – 15].

Заключение

Использование метода спектрального сейсмопрофилирования для диагностики массива горных пород, вмещающего шахтное поле, показало свою эффективность и достоверность при выявлении зон повышенной трещиноватости. В данном случае исследования проводились в почву выработок, однако при других способах крепления выработок зондирования можно проводить и в стенки и кровлю выработок, что позволяет изучить массив горных пород в разных плоскостях [16].

Результаты исследований прошли экспериментальную оценку путем бурения заверочных дренажных вееров скважин, построенная по результатам геофизических ра-

бот объемная модель развития трещиноватости шахтного поля будет использоваться специалистами предприятия для решения задач строительства и размещения горных выработок и дренажных скважин. Следует отметить, что при окончательном выборе мест размещения восстающих выработок следует проводить дополнительные геофизические исследования с уменьшением шага зондирования (шаг профиля не более 1 м) для получения более точной и полной информации, пример выполнения таких работ на комбинате уже имеется [17].

Список литературы

1. Гликман А.Г., 2018. *Физика и практика спектральной сейсморазведки*. URL: <http://www.newgeophys.spb.ru> (дата обращения 20.08.2024).
2. Мельник В.В., 2021. Геомеханический мониторинг геофизическими методами при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом. *Проблемы недропользования*, № 4(31), С. 36-43. DOI 10.25635/2313-1586.2021.04.036. EDN NWOQF.
3. Мельник В.В., 2021. Решение проблемы повышенной обводненности руды при ведении очистных работ на шахте "Десятилетие независимости Казахстана" (ДНК). *Проблемы недропользования*, № 2(29), С. 17-26. DOI 10.25635/2313-1586.2021.02.017. EDN XDCQWH.
4. Левин Е.Л., Сердюков А.Л., 2017. Вероятностные модели предельного равновесия, деформации борта проектируемого карьера с динамическим прогнозированием параметров поверхностей скольжения при использовании метода спектрального сейсмопрофилирования. *Проблемы недропользования*, № 4(15), С. 43-51. EDN ZXKYFH.
5. Мельник В.В., Харисов Т.Ф., Замятин А.Л., 2020. Методические основы комплексных геомеханических исследований для выбора оптимальных параметров осушения обводненных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, № 3-1, С. 127-137. DOI 10.25018/0236-1493-2020-31-0-127-137. EDN TFMPKG.
6. Семенов С.Н., 2018. Опыт прогнозирования зон тектонических нарушений и повышенной трещиноватости в массиве горных пород на шахтах Донского горно-обогатительного комбината. *Проблемы горного давления*, № 1-2(34-35), С. 81-86. EDN XYFFFI.
7. Мельник В.В., 2006. Диагностика карстоопасности методом спектрального сейсмопрофилирования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 7, С. 153-156. EDN HZUYDF.
8. Шевченко М.Д., 2021. Изучение изменений массива горных пород в области влияния подземных горных выработок. *Проблемы недропользования*, № 4(31), С. 55-60. DOI 10.25635/2313-1586.2021.04.055. EDN DOQHKM.
9. Далатказин Т.Ш., Ведерников А.С., Григорьев Д.В. и др., 2022. Опыт применения геофизических методов в комплексе геодинамической диагностики горного массива. *Горная промышленность*, № S1, С. 105-110. DOI 10.30686/1609-9192-2022-1S-105-110. EDN HODQHC.
10. Мельник В.В., 2005. Применение метода спектрального сейсмопрофилирования для оценки геомеханического состояния массива горных пород вокруг шахтных выработок. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 10, С. 69-74. EDN IFAQTV.
11. Elsayed I.S., Alhussein A.B., Gad E., Mahfooz A.H., 2014. Shallow seismic refraction, two-dimensional electrical resistivity imaging, and ground penetrating radar for imaging the ancient monuments at the Western Shore of old Luxor City, Egypt. *Archaeological Discovery*, Vol. 2, No. 2, P. 31 - 43.

12. Conyers L.B., 2016. *Ground-penetrating radar for geoarchaeology. Analytical methods in earth and environmental science*. N. Y: Wiley, 160 p.
13. Junjie Cai, Xijian Li, Longxing Guo, Haiteng Xue, Bize Xu, 2022. Fracture Development and Multifield Coupling Evolution Law of Soft Overburden Rock in a Medium-Thick Coal Seam Mine " *Geofluids*, vol. March, Article ID 6371887, 14 p., DOI 10.1155/2022/6371887
14. Shichuan Zhang, Baotang Shen, Yangyang Li, Shengfan Zhou, 2019. Modeling Rock Fracture Propagation and Water Inrush Mechanisms in Underground Coal Mine " *Geofluids*, vol. 12, Article ID 1796965, 15 p., DOI 10.1155/2019/1796965.
15. Халимендик Ю.М., Бруй А.В., Чемакина М.В., 2010. Исследование закономерностей вывалообразований в очистных забоях угольных шахт. *Записки Горного института*, Т. 188, С. 70-73. EDN RENUCX.
16. Мельник В.В., Замятин А.Л., 2024. Оценка точности и информативности геофизических методов для решения задач картирования структурных неоднородностей в шахте. *Проблемы недропользования*, № 1(40), С. 90-101. DOI 10.25635/2313-1586.2024.01.090. EDN CBRZTJ.
17. Князбаева Ж.Р., Насыров Р.Ш., Мельник В.В., 2024. Укрепление массива горных пород с использованием геофизических методов контроля его состояния для обеспечения возможности проходки вертикальной горной выработки. *Conference: «Ресурсосберегающие технологии в минерально-индустриальном мегакомплексе в условиях устойчивого развития экономики». 14-15 марта 2024*. Ат: Алматы: КазННТУ, С. 110-113.

References

1. Glikman A.G., 2018. *Fizika i praktika spektral'noj sejsmorazvedki* [Physics and practice of spectral seismic exploration]. URL: <http://www.newgeophys.spb.ru> (data obrashcheniya 20.08.2024).
2. Mel'nik V.V., 2021. Geomekhanicheskij monitoring geofizicheskimi metodami pri razrabotke mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh otkryтым способом [Geomechanical monitoring by geophysical methods in the development of mineral deposits in an open pits]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4(31), S. 36-43. DOI 10.25635/2313-1586.2021.04.036. EDN NWOQF.
3. Mel'nik V.V., 2021. Reshenie problemy povyshennoj obvodnennosti rudy pri vedenii ochistnyh rabot na shahte \"Desyatiletie nezavisimosti Kazahstana\" (DNK) . [Solution of the problem of increased water content of ore during treatment operations at the mine \"Decade of Independence of Kazakhstan\"]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 2(29), S. 17-26. DOI 10.25635/2313-1586.2021.02.017. EDN XDCQWH.
4. Levin E.L., Serdyukov A.L., 2017. Veroyatnostnye modeli predel'nogo ravnovesiya, deformacii borta proektiruemogo kar'era s dinamicheskim prognozirovaniem parametrov poverhnostej skol'zheniya pri ispol'zovanii metoda spektral'nogo sejsmoprofilirovaniya . [Probabilistic models of marginal equilibrium, deformation of the side of the projected quarry with dynamic prediction of sliding surface parameters using the spectral seismic profiling method]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4(15), P. 43-51. EDN ZXKYFH.
5. Mel'nik V.V., Harisov T.F., Zamyatin A.L., 2020. Metodicheskie osnovy kompleksnyh geomekhanicheskikh issledovaniy dlya vybora optimal'nyh parametrov osusheniya obvodnennyh mestorozhdenij [Methodological foundations of complex geomechanical studies for the selection of optimal parameters for the drainage of flooded deposits]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*, № 3-1, P. 127-137. DOI 10.25018/0236-1493-2020-31-0-127-137. EDN TFMPKG.
6. Semenov S.N., 2018. Opyt prognozirovaniya zon tektonicheskikh narushenij i povyshennoj treshchinovatosti v massive gornyh porod na shahtah Donskogo gorno-

obogatitel'nogo kombinata [Experience of forecasting zones of tectonic disturbances and increased fracturing in the rock mass at the mines of the Don Mining and processing plant]. Problemy gornogo davleniya, № 1-2(34-35), P. 81-86. EDN XYFFFI.

7. Mel'nik V.V., 2006. Diagnostika karstoopasnosti metodom spektral'nogo sejsmoprofilirovaniya [Karst hazard diagnostics by spectral seismic profiling method]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten', № 7, P. 153-156. EDN HZUYDF.

8. Shevchenko M.D., 2021. Izuchenie izmenenij massiva gornyh porod v oblasti vliyaniya podzemnyh gornyh vyrabotok [Study of changes in the rock mass in the field of influence of underground mining]. Problemy nedropol'zovaniya, № 4(31), P. 55-60. DOI 10.25635/2313-1586.2021.04.055. EDN DOQHKM.

9. Dalatkazin T.Sh., Vedernikov A.S., Grigor'ev D.V. i dr., 2022. Opyt primeneniya geofizicheskikh metodov v komplekse geodinamicheskoy diagnostiki gornogo massiva [Experience of using geophysical methods in the complex of geodynamic diagnostics of a mountain range]. Gornaya promyshlennost', № S1, P. 105-110. DOI 10.30686/1609-9192-2022-1S-105-110. EDN HODQHC.

10. Mel'nik V.V., 2005. Primenenie metoda spektral'nogo sejsmoprofilirovaniya dlya ocenki geomekhanicheskogo sostoyaniya massiva gornyh porod vokrug shahtnyh vyrabotok [Application of the spectral seismic profiling method to assess the geomechanical state of the rock mass around mine workings]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten', № 10, P. 69-74. EDN IFAQTV.

11. Elsayed I.S., Alhussein A.B., Gad E., Mahfooz A.H., 2014. Shallow seismic refraction, two-dimensional electrical resistivity imaging, and ground penetrating radar for imaging the ancient monuments at the Western Shore of old Luxor City, Egypt. Archaeological Discovery, Vol. 2, No. 2, P. 31 - 43.

12. Conyers L.B., 2016. Ground-penetrating radar for ge archaeology. Analytical methods in earth and environmental science. N. Y: Wiley, 160 p.

13. Junjie Cai, Xijian Li, Longxing Guo, Haiteng Xue, Bize Xu, 2022. Fracture Development and Multifield Coupling Evolution Law of Soft Overburden Rock in a Medium-Thick Coal Seam Mine " Geofluids, vol. March, Article ID 6371887, 14 p., DOI 10.1155/2022/6371887

14. Shichuan Zhang, Baotang Shen, Yangyang Li, Shengfan Zhou, 2019. Modeling Rock Fracture Propagation and Water Inrush Mechanisms in Underground Coal Mine " Geofluids, vol. 12, Article ID 1796965, 15 p., DOI 10.1155/2019/1796965.

15. Halimendik Yu.M., Bruj A.V., Chemakina M.V., 2010. Issledovanie zakonov vyvaloobrazovaniy v ochistnyh zaboyah ugol'nyh shaht [Investigation of the patterns of fallout formation in the treatment faces of coal mines]. Zapiski Gornogo instituta, Vol. 188, P. 70-73. EDN RENUCX.

16. Mel'nik V.V., Zamyatin A.L., 2024. Ocenka tochnosti i informativnosti geofizicheskikh metodov dlya resheniya zadach kartirovaniya strukturnykh neodnorodnostej v shahte [Assessment of accuracy and informativeness of geophysical methods for solving problems of mapping structural heterogeneities in a mine]. Problemy nedropol'zovaniya, № 1(40), P. 90-101. DOI 10.25635/2313-1586.2024.01.090. EDN CBRZTJ.

17. Knyazbaeva Zh.R., Nasyrov R.Sh., Mel'nik V.V., 2024. Ukreplenie massiva gornyh porod s ispol'zovaniem geofizicheskikh metodov kontrolya ego sostoyaniya dlya obespecheniya vozmozhnosti prohodki vertikal'noj gornoj vyrabotki [Strengthening of the rock mass using geophysical methods of monitoring its condition to ensure the possibility of sinking vertical mining]. Conference: «Re-sursosberegayushchie tekhnologii v mineral'no-industrial'nom megakomplekse v usloviyah ustojchivogo razvitiya ekonomiki». 14-15 marta 2024. At: Almaty: KazNITU, P. 110 - 113.

УДК 622.831:528.5

Винальева Екатерина Алексеевна
младший научный сотрудник,
лаборатория сдвига горных пород,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58

НЕОБХОДИМОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ ПОСЛЕ ОКОНЧАНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ*

Аннотация:

Использование подработанных территорий связано с возможной активизацией незавершенных процессов сдвига и, как следствие, образованием провалов, а также риском сильной деформации земной поверхности, влекущей за собой повреждения зданий и сооружений [1]. Степень повреждений зависит от характера и параметров текущего процесса сдвига при подземной добыче полезных ископаемых и варьируется в широких пределах, начиная с появления трещин на стенах и потолка здания, заканчивая полным разрушением инфраструктуры. Отличительной особенностью населенных пунктов, связанных с подземной добычей полезных ископаемых, является непосредственное соприкосновение их территорий с горными отводами. Особенно это заметно на Урале, где горные работы ведутся более 300 лет. За это время развитие урбанизации обусловило перемежаемость застраиваемых и подработанных территорий. Подработанные участки, не задействованные в хозяйственном обороте, превращаются в пустыри и свалки. Между тем, городские коммуникации (дороги, линии электропередач, водопроводы и т.д.) развиваются и нуждаются в увеличении площадей для их размещения. Экономические и социальные проблемы вызваны наличием потенциально опасных земель в черте города, отсутствием свободных земельных участков. Следовательно, эти проблемы могут быть решены в уральских городах (Березовский, Верхняя Пышма, Дежарск, Екатеринбург, Каменск-Уральский, Красноуральск, Нижний Тагил, Пермь и т.д.), где подработанные территории находятся в экономически освоенных и застроенных районах [2]. В статье рассмотрены методы, используемые для мониторинга процесса сдвига земной поверхности, а также различные техногенные и природные факторы. В качестве примера в данной работе рассматривается Сарановское месторождение хромитовых руд.

Объектом обзора является процесс сдвига горных пород.

Целью работы является обзор факторов, оказывающих влияние на продолжительность процесса сдвига после окончания горных работ.

Ключевые слова: мониторинг, тахеометр, геодезические приборы, нивелир, земная поверхность, измерения, деформации, сдвигение, анализ, подработанные территории, суперинтенсивные деформации.

DOI: 10.25635/2313-1586.2024.04.087

Vinalyeva Ekaterina A.
Junior Researcher,
Laboratory of rock shifting,
Institute of Mining UB RAS,
620759 Ekaterinburg?
58 Mamina-Sibiryaka Str.,

NECESSITY OF INVESTIGATION FOR DURATION OF THE SHEAR PROCESS AFTER THE END OF MINING WORKS USING INSTRUMENTAL OBSERVATIONS

Abstract:

The use of mined areas is associated with the possible activation of incomplete shear processes and, as a consequence, the formation of failures, as well as the risk of severe deformation of the earth's surface, resulting in damage of buildings and structures. The degree of damage depends on the nature and parameters of the ongoing shear process during underground mining and varies widely, ranging from cracks in building walls and ceilings to complete destruction of infrastructure. A distinctive feature of settlements associated with underground mining is the direct contact of their territories with mining allotments. This is especially noticeable in the Urals, where mining operations have been carried out for more than 300 years. During this time, the development of urbanization has caused the interchangeability of built-up and mined areas. The mined areas that are not used in economic turnover became wastelands and dumps. Meanwhile, urban communications (roads, power lines, water pipelines, etc.) are developing and need more space to accommodate them. Economic and social problems are caused by the presence of potentially hazardous lands within the city limits, lack of free land plots. Therefore, these problems can be solved in the Ural cities (Berezovsky, Verkhnyaya Pyshma, Degtyarsk, Ekaterinburg, Kamensk-Uralsky, Krasnoturyinsk, Nizhny Tagil, Perm, etc.) where the mined areas are located in economically developed and built-up areas. The paper discusses the methods used to monitor the process of earth surface shear, as well as various anthropogenic and natural factors. The Saranovskoye chromite ore deposit is considered as an example in this paper.

Key words: monitoring, total station, geodetic instruments, leveller, earth surface, measurements, deformation, shear, analysis, mined areas, superintense deformations.

* * Исследования выполнены в рамках Госзадания № 075-00412-22 ПП, тема No (FUWE-2022-0003), рег. No1021062010536-3-1.5.1.

Введение

Интенсивное развитие промышленности в XX веке привело к масштабному освоению недр Земли, в результате чего значительные территории, ранее пригодные для жизни, оказались подработанными горными выработками. Последние два десятилетия наблюдается стремительный рост потребности в освоении таких территорий для строительства инфраструктуры. Закрытие горнодобывающих предприятий создало парадоксальную ситуацию: объемы строительства на территориях, подлежащих подработке, стали превышать объемы на уже подработанных площадях. Ситуация осложняется тем, что даже после закрытия шахт геомеханические и гидрогеологические процессы в толще пород и на поверхности земли продолжают. Отсутствие доступа к горным выработкам не позволяет контролировать эти процессы. Одним из ключевых факторов, затрудняющих строительство на подработанных территориях, является изменение земной поверхности вследствие подземной добычи. Это может вызывать провалы, оседание поверхности, деформацию и разрушение зданий и сооружений. В настоящее время отсутствует единый подход к оценке возможности застройки подработанных территорий. Разработка научно обоснованного подхода, учитывающего динамику деформаций, является актуальной задачей как для науки, так и для практики [3].

Методы мониторинга процесса сдвижения земной поверхности

Для мониторинга процесса сдвижения земной поверхности после ликвидации шахты и при завершении горных работ на локальных участках рекомендуется применять следующие методы:

1. Геодезический мониторинг: этот метод позволяет отслеживать деформации земной поверхности, фиксируя изменения в высоте и положении контрольных точек. Полученные данные используются для выявления сдвижений массивов горных пород и оценки их динамики после окончания горных работ. Современные технологии, такие как дроны, спутниковая съемка и искусственный интеллект, открывают новые возможности для более точного и оперативного мониторинга и анализа данных [4].

2. Сейсмометрия: сейсмометры регистрируют сейсмическую активность, которая может свидетельствовать о процессе сдвижения. Метод позволяет обнаружить даже незначительные изменения в структуре грунта и определить зоны, где вероятно возникновение деформаций.

3. Мониторинг состояния зданий и инфраструктуры: регулярный осмотр зданий и инфраструктуры позволяет выявить повреждения, связанные с процессом сдвижения. Это способствует предотвращению аварий, обеспечивает безопасность эксплуатации и продлевает срок службы объектов. Мониторинг включает проверку фундаментов, стен, перекрытий, кровли, инженерных систем и других элементов конструкции. Данные мониторинга используются для принятия решений о необходимости ремонта или реконструкции объекта [5].

4. Моделирование и анализ данных: с помощью компьютерного моделирования и анализа данных можно предсказывать и изучать процесс сдвижения, получая ценную информацию о его динамике.

Процесс сдвижения земной поверхности после подземной добычи: факторы влияния и зависимость от глубины отработки

При существующих различных методах оценки параметров процесса сдвижения в настоящее время не существует единого системного подхода к определению возможности застройки территории, отработанной подземной добычей полезных ископаемых. Подработанные территории могут быть безопасно использованы в хозяйственной деятельности только после завершения процесса сдвижения. Для месторождений руд черных металлов Урала и Казахстана опытным путем установлено, что в условиях полной

отработки земной поверхности общая продолжительность процесса сдвижения после прекращения очистных работ и погашения пустот в данном районе ориентировочно определяется зависимостью от глубины отработки (рис. 1) [6].

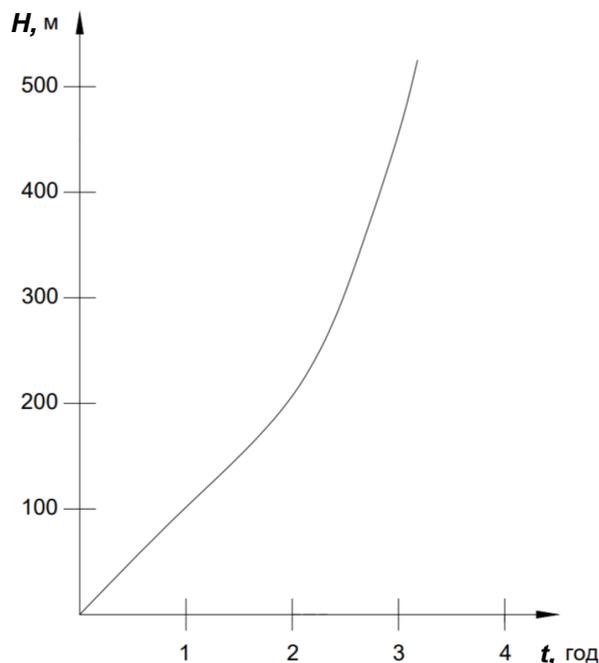


Рис.1 Зависимость глубины отработки от продолжительности процесса сдвижения

В реальных же условиях процесс сдвижения является комплексным, так как на него влияет не только глубина разработки, но и различные техногенные факторы, характеризующие структурные особенности массива горных пород, прочностные свойства, геометрические параметры рудных тел и глубина их залегания (они определяют основные закономерности процесса сдвижения), применяемые системы разработки (относятся к основополагающим факторам, позволяющим судить о характере процесса сдвижения), квалификация и опыт персонала, эффективность управления рисками и планирования операций, интенсивность нагрузки (чем больше нагрузка на грунт, тем быстрее происходит процесс сдвижения), вибрация (вибрация от транспорта, строительных или взрывных работ может вызывать дополнительное напряжение в грунте и ускорять процесс сдвижения). К непостоянно действующим факторам, но оказывающим также существенное влияние на сдвижение, относятся крупные тектонические нарушения, неровный рельеф поверхности, обводненность пород и т.п. Их влияние слабо изучено и устанавливается в каждом конкретном случае отдельно [7].

Одним из важных параметров, определяющих развитие катастрофических деформационных процессов, является геодинамическая активность массива, проявляющаяся в виде современных геодинамических движений, формирующих его напряженно-деформированное состояние. По масштабу воздействия они подразделяются на локальные, региональные и глобальные, с меняющимися в зависимости от этого степенью локализации, характером и интенсивностью проявлений, как можно видеть в табл. 1 [8].

Также стоит отметить, что в ходе непрерывного мониторинга были обнаружены короткопериодные движения суточного масштаба, не связанные с землетрясениями и регистрируемые как геодезическими, так и сейсмическими методами. Деформации, обусловленные этими движениями, могут достигать значений до 10^{-3} на интервалах от десятков метров до пяти – шести километров. Такие движения способны прямым или косвенным образом влиять на объекты недропользования путем достижения критиче-

ских значений в деформациях, обусловленных всплеском амплитуд движений, а также через проявление усталостных эффектов в конструкциях сооружений и через изменение свойств массива горных пород в разломных зонах под влиянием переменных циклических нагрузений [9].

Таблица 1

Факторы геодинамических движений

Факторы	Масштаб	Период воздействия	Типичные значения деформаций
Планетарные эндогенные процессы: явления тепловой, химико-плотностной конвекции, изостазии и т.п.	Глобальный, региональный уровни	$\geq 10^2$ лет	$< 10^{-5}$
Метеорологические экзогенные воздействия (осадки, температура, атмосферное давление)	Глобальный, региональный уровни	сутки месяц год	10^{-5} -10^{-8}
Астрономические (лунно-солнечные приливы)	Глобальный, региональный уровни	часы сутки неделя	10^{-8} -10^{-9}
Геологические процессы (карст, оползни, тектоника и т.п.)	Локальный, региональный уровни	$\geq 10^0$ лет	10^{-3} -10^{-4}
Техногенные воздействия (горные работы, строительство)	Локальный уровень	10^0 -10^1 лет	10^{-3}

Кроме того, известен особый тип аномальных деформационных процессов, приуроченных к зонам тектонических нарушений, получивший название суперинтенсивных деформаций. Среднегодовые скорости для них чрезвычайно высоки и составляют величины порядка $2 - 7 \cdot 10^{-5}$ /год. Эти аномальные движения высокоамплитудны (50 - 70 мм/год), короткопериодичны (0.1 – 1.0 года), пространственно локализованы (0.1–1.0 км), обладают пульсационной и знакопеременной направленностью [9].

С точки зрения нелинейных динамических систем суперинтенсивные деформации являются параметрически индуцированными малыми природно-техногенными воздействиями в обстановке квазистатического режима нагружения геологической среды. Такие деформационные процессы опасны для объектов недропользования, поскольку способны накапливать в среде напряжения около $1 \div 5$ Мпа в течение первых десятков лет. Эти напряжения сопоставимы с порогом прочности конструкционных материалов, и в связи с этим возможно проявление их значительного и необратимого изменения в областях максимального проявления суперинтенсивных деформаций. Исследования показали, что суперинтенсивные деформации зачастую индуцируются в районах добычи полезных ископаемых, а также на участках точечной застройки на урбанизированных территориях [9].

Мониторинг деформаций на Сарановском месторождении хромитовых руд

В качестве примера в данной работе рассматривается Сарановское месторождение хромитовых руд, расположенное на западном склоне Среднего Урала в Горнозаводском районе Пермского края. Наблюдения на данном месторождении ведутся с 1980 года. Создана база данных для прогнозирования развития деформационного процесса земной поверхности и выявления потенциально опасных деформаций с целью

выбора местоположений зданий и сооружений для обеспечения их устойчивости [10]. В качестве примера взят участок профильной линии 5, а именно с 14 до 21 репер. Горные работы в данной области велись в период с 1973 по 2009 год. Матрица скоростей оседаний для данного участка приведена на рис. 2.

Годы	Rp14	Rp15	Rp16	Rp17	Rp18	Rp19	Rp20	Rp21
2023	2	1	3	3	3		-7	
2022	8				3		8	
2021	1	37,9	0	-1	5			
2020	2	2	2	2	2			
2019	5	3	4	4	3			
2018	3,3	2,8	2,5	2,8	2,8	3	2,5	3,3
2014	1	3	2	1	1	2	2	-8
2013	-4	-4	-2	-2				
2012	-12	-11	-12	-13				
2011	-4	0	0	0				
2010	50,8	-4	15,9	17,9				
2009	15,1	17,1	-1	-3				
2008	-8	-16	-16	-13				
2007	2	1	-2	-5				
2006		4	6	5				
2005		9	9	18,9				
2004		4,5	4,5	-1				
2002		12,7	12,5	20,5				
2000			6	-7				
1999		-21	-14	-15				
1998		12	9	11				
1997		-49	-45	-44				
1996		-8,4	-9,6	-11				
1995		1,4	1,4	1,9				
1993		-5,5	-5,5	-4,6				
1992				4,4				
1991								
1990								
1988								
1987		-8		-2	-4			
1985		1	0	2	4			
1984		7,5	-3,4	0	23,2			
1983		-59	7,4	-5,6	-50			
1982		-60	-20	-26	-47			
1981		13	8	9	14			
1980		1	0	0	0			

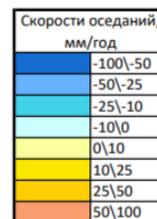


Рис. 2. Матрица скоростей оседаний профильной линии 5 на участке с 14 – 21 репер

Из данной матрицы отдельно построены для наглядности графики скоростей оседаний реперов 14 и 15.



Рис. 3. График скоростей оседаний для репера 14



Рис. 4. График скоростей оседаний для репера 15

Согласно представленным графикам, на данных точках мониторинга были зафиксированы всплески значений скоростей оседаний. Для репера 14 в 2007 году значение составило 50.8 мм/год. Для репера 15 в 2021 году зафиксировано поднятие 37.9 мм/год. Всплески не связаны с проведением горных работ под данным участком земной поверхности. Это еще раз доказывает тот факт, что процесс сдвижения необходимо рассматривать комплексно и уделять внимание различным факторам влияния, как техногенным, так и природным.

Выводы

Анализ представленных данных свидетельствует о том, что процесс сдвижения горных пород и земной поверхности определяется не только глубиной горных выработок. Он характеризуется многообразием форм проявления, обусловленных комплексным воздействием различных факторов, сочетающихся по-разному в различных горно-геологических условиях.

Сложность их комплексного учета при разработке месторождений приводит к возникновению внезапных аномальных деформационных процессов в массиве горных пород, проявляющихся в виде провалов и обрушений, которые, в свою очередь, приводят к повреждению зданий и сооружений, а также нарушению технологических процессов.

Для решения сложных геомеханических задач, в том числе связанных с исследованием продолжительности сдвижения земной поверхности после завершения горных работ, необходимо учитывать весь комплекс факторов, как природных, так и техногенных, с целью выявления всплесков и цикличности процессов.

Дальнейшее изучение процесса сдвижения на подработанных территориях позволит обеспечить рациональное использование этих земель. Знания о процессах сдвижения способствуют оптимизации использования территорий, что позволяет выбирать наиболее безопасные и эффективные методы управления ресурсами. Понимание этих процессов позволит городским планировщикам учитывать риски и ограничения при проектировании новых застроек и инфраструктуры, а также принимать во внимание возможные изменения ландшафта, предотвращая негативные последствия.

Список литературы

1. Florkowska L., Bryt-Nitarska I., Kruczkowski J., 2021. Deformation and damage to buildings caused by ground movements in mining areas. *Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych*. P. 52-63.
2. Усанов С.В., 2011. *Геомеханическая оценка возможности использования подработанных территорий*: диссертация ... кандидата технических наук: 25.00.20; [Место защиты: Ин-т горн. дела УрО РАН]. Екатеринбург, 150 с.
3. Ботвенко Д.В., Жогло В.И., Бердников А.Н., 2019. Выбор комплекса технических мероприятий, обеспечивающих безопасное использование подработанных территорий при строительстве. *Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности*, № 3, С. 89-96.
4. Винальева Е.А., 2023. Обзор современных геодезических приборов для мониторинга деформационных процессов земной поверхности. *Проблемы недропользования*, № 4(39), С. 57-64.
5. Харисова О.Д., 2018. Мониторинг пространственных деформационных процессов подрабатываемых сооружений. *Проблемы недропользования*, № 3(18), С. 81-88.
6. *Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на месторождениях руд черных металлов Урала и Казахстана*. Свердловск: Институт горного дела УрО РАН, 1990, 64 с.
7. Кириллов С.Г., Семькин Е.С., Мокрицкая Н.И., 2020. Сдвигение земной поверхности при отработке Талнахского и Октябрьского месторождения. Меры охраны подрабатываемых зданий и сооружений. *Горная промышленность*, № 6, С. 106-111.
8. 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.
9. Кузьмин Ю.О., 1999. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. *Агентство экономических новостей*, 220 с.
10. *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 Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук.*

References

1. Florkowska L., Bryt-Nitarska I., Kruczkowski J., 2021. Deformation and damage to buildings caused by ground movements in mining areas. *Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych*. P. 52-63.
2. Usanov S.V., 2011. *Geomechanicheskaya otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya pod-rabotannykh territorii* [Geomechanical assessment of the possibility of using the under-worked territories]: dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk: 25.00.20; [Mesto zashchity: In-t gorn. dela UrO RAN]. Ekaterinburg, 150 p.
3. Botvenko D.V., Zhoglo V.I., Berdnikov A.N., 2019. Vybora kompleksa tekhnicheskikh meropriyatii, obespechivayushchikh bezopasnoe ispol'zovanie podrabotannykh territorii pri stroitel'stve [Choice of a set of technical measures to ensure the safe use of the under-worked territories during construction]. *Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoi i ekologicheskoi bezopasnosti*, № 3, P. 89-96.
4. Vinal'eva E.A., 2023. Obzor sovremennykh geodezicheskikh priborov dlya monitoringa deformatsionnykh protsessov zemnoi poverkhnosti [Overview of modern geodetic

instruments for monitoring deformation processes of the Earth's surface]. Problemy nedropol'zovaniya, № 4(39), P. 57-64.

5. Kharisova O.D., 2018. Monitoring prostranstvennykh deformatsionnykh protsessov podrabatyvaemykh sooruzhenii [Monitoring of spatial deformation processes of the structures under construction]. Problemy nedropol'zovaniya, № 3(18), P. 81-88.

6. Pravila okhrany sooruzhenii i prirodnykh ob"ektov ot vrednogo vliyaniya podzemnykh razrabotok na mestorozhdeniyakh rud chernykh metallov Urala i Kazakhstana . [Rules for the protection of structures and natural objects from the harmful effects of underground mining in the deposits of ferrous metals in Ural regions and Kazakhstan]. Sverdlovsk: Institut gornogo dela UrO RAN, 1990, 64 p.

7. Kirillov C.G., Semykin E.S., Mokritskaya N.I., 2020. Sdvizhenie zemnoi poverkhnosti pri otrabotke Talnakhskogo i Oktyabr'skogo mestorozhdeniya [Displacement of the Earth's surface during the mining of the Talnakhsy and Oktyabrsky fields. Measures for the protection of buildings and structures under construction]. Mery okhrany podrabatyvaemykh zdaniy i sooruzhenii. Gornaya promyshlennost', № 6, P. 106-111.

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

9. Kuz'min Yu.O., 1999. Sovremennaya geodinamika i otsenka geodinamicheskogo riska pri nedropol'zovanii [Modern geodynamics and assessment of geodynamic risk in sub-surface use]. Agentstvo ekonomicheskikh novostei, 220 p.

10. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh № 2023622239 Rossiiskaya Federatsiya. Dannye nablyudenii za protsessom sdvizheniya na Severopeschanskom mestorozhdenii khromitov za 2021–2022 gg. [Certificate of state registration of the database No. 2023622239 Russian Federation. Observation data on the process of displacement at the Severopeschansk chromite deposit for 2021-2022]: № 2023621896: zayavl. 21. 06. 2023: opubl. 05.07.2023 / S.V. Usanov, S.A. Nogin, Yu.P. Konovalova i dr.; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Institut gornogo dela Ural'skogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk.



РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД И МАССИВОВ

УДК 622.235

Яковлев Виктор Леонтьевич

доктор технических наук, профессор,
советник РАН, член-корреспондент РАН,
главный научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58;
e-mail: yakovlev@igduran.ru;

Жариков Сергей Николаевич

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
заведующий лабораторией
разрушения горных пород,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: 333vista@mail.ru

Реготунов Андрей Сергеевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория разрушения горных пород,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: pochta8400@inbox.ru;

Кутуев Вячеслав Александрович

научный сотрудник,
лаборатория разрушения горных пород,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: 9634447996@mail.ru

Меньшиков Павел Владимирович

научный сотрудник,
лаборатория разрушения горных пород,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: menshikovpv@mail.ru

**КОМПЛЕКСНОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ВЗРЫВНОЙ НАГРУЗКИ С УЧЕТОМ
ИНФОРМАЦИИ ОБ ИЗМЕНЧИВОСТИ
МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД
В ГРАНИЦАХ ВЫЕМОЧНОГО БЛОКА****Аннотация:*

Существующий принцип расчета параметров БВР по методикам основан на представлении массива как однородного по составу и строению объекта воздействия. Тем не менее реальный массив горных пород, предназначенный для взрывного разрушения, не является постоянным по своему строению и составу физическим объектом. Поэтому проектирование БВР должно решаться на основе принципов оперативного и систематического учета изменчивости физико-механических свойств горных пород в динамике процесса добычи и совершенствования на этой основе соответствующих подходов управления детонационными и энергетическими характеристиками эмульсионных ВВ (ЭВВ).

В статье обоснована актуальность выполняемых исследований, выполнен обзор современного состоя-

DOI: 10.25635/2313-1586.2024.04.096

Yakovlev Viktor L.

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Adviser to the RAS,
Corresponding Member of the RAS,
Chief Researcher,
Institute of Mining UB RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: yakovlev@igduran.ru;

Zharikov Sergey N.

Candidate of Technical Sciences,
Leading Researcher,
Head of Laboratory of rock destruction,
Institute of Mining UB RAS
e-mail: 333vista@mail.ru

Regotunov Andrey S.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of rock destruction,
Institute of Mining UB RAS
e-mail: pochta8400@inbox.ru

Kutuev Vyacheslav A.

Researcher,
Laboratory of rock destruction,
Institute of Mining UB RAS
e-mail: 9634447996@mail.ru

Menshikov Pavel V.

Researcher,
Laboratory of rock destruction,
Institute of Mining UB RAS
e-mail: menshikovpv@mail.ru

**COMPREHENSIVE JUSTIFICATION
OF THE EXPLOSIVE LOAD, TAKING
INTO ACCOUNT INFORMATION ABOUT
THE VARIABILITY OF THE ROCK MASS
WITHIN THE BOUNDARIES
OF THE EXCAVATION BLOCK***Abstract:*

The existing principle of calculating the parameters of drilling and blasting operations according to the methods is based on the representation of the array as a homogeneous object of influence in composition and structure. Nevertheless, a real rock mass intended for explosive destruction is not a permanent physical object in its structure and composition. Therefore, the design of drilling and blasting operations should be solved on the basis of the principles of operational and systematic consideration of the variability of the physical and mechanical properties of rocks in the dynamics of the mining process, and improvement on this basis of appropriate approaches to control the detonation and energy characteristics of emulsion explosives.

The article substantiates the relevance of the research carried out, provides an overview of the current state of

* Исследования выполнены в рамках Государственного задания №075-00412-22 ПР, темы 1 (2022-2024): Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005), пер. №1021062010531-8-1.5.1, а также при дополнительном привлечении хоздоговорных средств.

ния способов учета изменчивости свойств массива горных пород, физико-механических свойств и расчета конструкций зарядов ВВ. Показаны результаты определения показателей изменчивости физико-механических и структурных свойств горных пород, получаемых на основе данных шарошечного бурения, выбора порядка инициирования промежуточных детонаторов в скважинах в зависимости от прочности и неоднородности массива горных пород, а также управления скоростью детонации основного заряда ЭВВ с помощью изменения массы эмульсионного промежуточного детонатора.

Используя накопленную базу экспериментальных данных по сейсмическому воздействию взрывов в условиях месторождений Урала, Сибири, Карелии и Казахстана, установлены и приведены в статье коэффициенты грунтовых условий и показатели степени затухания сейсмических колебаний. Полученные эмпирические коэффициенты и показатели позволяют точнее и быстрее выполнять оценку скоростей смещения в ближней, промежуточной и дальней зонах и определять уровень сейсмического воздействия на охраняемые участки бортов карьеров при различном направлении инициирования скважинных зарядов ВВ с учетом фактора сезонности.*

Ключевые слова: разрушение горных пород, буровзрывные работы, карьер, прочностные свойства, энергетические и детонационные характеристики ВВ, параметры промежуточных детонаторов, неоднородность, сейсмозрывное воздействие.

methods for accounting for the variability of the properties of a rock mass, physical and mechanical properties and calculation of explosive charge structures. The results of determining the variability of the physico-mechanical and structural properties of rocks obtained on the basis of data from spherical drilling, choosing the order of initiation of intermediate detonators in wells depending on the strength and heterogeneity of the rock mass, as well as controlling the detonation rate of the main charge are shown emulsion explosives by changing the mass of the emulsion intermediate detonator.

Using the accumulated database of experimental data on the seismic effects of explosions in the conditions of deposits in the Urals, Siberia, Karelia and Kazakhstan, the coefficients of ground conditions and indicators of the degree of attenuation of seismic vibrations are established and presented in the article. The obtained empirical coefficients and indicators allow for more accurate and faster assessment of displacement velocities in the near, intermediate and far zones and to determine the level of seismic impact on protected areas of quarry sides in different directions of initiation of borehole explosive charges, taking into account the seasonality factor.

Key words: rock destruction, drilling and blasting, quarry, strength properties, energy and detonation characteristics of explosives, parameters of intermediate detonators, heterogeneity, seismic and explosive effects.

Введение

Взрывная подготовка горной массы к экскавации относится к основным технологическим процессам горного производства и в значительной мере определяет себестоимость добычи полезных ископаемых.

Установлено, что на ряде крупных карьеров России [1] применяется до нескольких видов взрывчатых веществ (ВВ), типоразмеров диаметров взрывных скважин, схем и систем инициирования, вспомогательных средств формирования конструкции заряда ВВ. В работах [2, 3] показано, что при внедрении технических новшеств возникает ряд сложностей – повышенный выход некондиционных кусков разрушенной горной массы, значительный сейсмический эффект на законтурный массив с последующим заколообразованием и возможным обрушением уступов борта, неправильная форма развала взорванной горной массы. Происходит это из-за недостаточного детального учета изменчивости прочностных свойств горных пород в пределах выемочного блока и физико-химических свойств ВВ в скважине после заряжания, чем обусловлена необходимость уточнять разрушающую взрывную нагрузку и прогноз сейсмического действия взрыва.

Практика ведения буровзрывных работ (БВР) показывает, что за основные характеристики прочности массива горных пород на горных предприятиях принимаются коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова, категория буримости и взрываемости, устанавливаемые по частным классификациям самих предприятий. При таком подходе учитываются средние параметры отдельностей в массиве, что явно недостаточно для проектирования рациональной разрушающей взрывной нагрузки.

Выбор типа эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ), промежуточного детонатора, конструкции заряда ВВ, порядка внутрискважинного инициирования является

* Исследования выполнены при участии: А.С. Флягина, Л.А. Васильевой

одной из основных задач, которые приходится решать при составлении проекта на массовый взрыв очередного выемочного блока на карьере. В настоящее время на первое место, при обосновании параметров БВР выходит вопрос о достижении рационального соотношения между прочностными и структурными свойствами горных пород и энергетическими характеристиками ЭВВ, что достигается применением соответствующей конструкции заряда. Конструкция заряда должна обеспечивать такое распределение энергии взрыва, чтобы на участки массива горных пород с повышенной трещиноватостью приходилось меньше энергии, чем на остальной массив, и газовые потоки от взрывного превращения ЭВВ способствовали их схлопыванию. Теоретическому и экспериментальному обоснованию указанного вопроса посвящены работы [4 – 9]. Тем не менее подход к выбору места расположения промежуточного детонатора в заряде ЭВВ в зависимости от положения структурных неоднородностей требует дополнительного обоснования с учетом фактических измеренных значений скорости детонации на полигоне в гильзах или в скважинах в условиях карьера ВВ. Вторым важным вопросом является обеспечение стабильного физико-химического состава ЭВВ, т.к. согласно [10] установлено, что после заряжания ЭВВ и до взрыва изменяются такие свойства, как плотность, вязкость, газификация, температура эмульсии, значительно влияющие в целом на детонационные и энергетические характеристики ЭВВ. Третьим важным вопросом является расчет сейсмического действия взрыва на устойчивость охраняемых участков бортов карьера. Результаты исследований [11 – 16] свидетельствуют, что для прогнозирования скорости смещения различных грунтов в ближней и дальней зонах взрыва (законтурный массив горных пород, промышленные здания и домовладения вблизи горного предприятия) разработаны различные расчетные модели. Однако в отечественных и зарубежных исследованиях недостаточно рассмотрен фактор сезонности, т.е. влияние положительной и отрицательной температур грунта на сейсмозрывное воздействие, главным образом, в ближней и промежуточной (средней) зонах действия взрыва.

Таким образом, целью исследований является разработка комплексного подхода обоснования параметров БВР, предполагающего поэтапное определение информации об изменчивости свойств массива горных пород, характеристик ЭВВ и уточнение на этой основе величины и направления действия взрывной нагрузки с оценкой уровня сейсмического воздействия на охраняемые участки бортов карьера и объекты, расположенные на дневной поверхности.

Результаты исследований

Профессор, д.т.н. И.А. Тангаев впервые предложил способ оперативного уточнения физико-механических свойств по энергоемкости шарошечного бурения взрывных скважин [17]. Далее способ получил развитие в работах [18 – 26] и в ИГД УрО РАН [27 – 29], что стало основой для дальнейшего развития способа в части определения зон неоднородности массива горных пород по данным шарошечного бурения взрывных скважин. В процессе исследований установлено, что разброс измеренных значений момента вращения шарошечного долота относительно среднего значения находится в корреляционной зависимости со скоростью бурения на неоднородном участке локального массива. Реализация установленного факта в производственных условиях позволяет моделировать распределение крепости горных пород с учетом их неоднородности по высоте уступа выемочного блока. Для этого был разработан соответствующий методический подход [30], апробированный на карьере ПАО «Ураласбест».

В результате (рис. 1) установлены прочностные модели состояния массива горных пород по его буримости, дополненные данными о неоднородности массива горных пород по признаку «асбестовая волокно-вмещающая порода». Анализ моделей в целом показал, что на горизонтальных и вертикальных сечениях по контрасту выбранной ха-

характеристики наблюдаются различия буримости серпентинитов. В некоторых случаях это можно связать с зоной техногенной нарушенности от предыдущих взрывов на отработанном горизонте. В целом опытно-промышленная проверка показала удовлетворительные результаты и указала на перспективу развития дальнейших исследований в этом направлении.

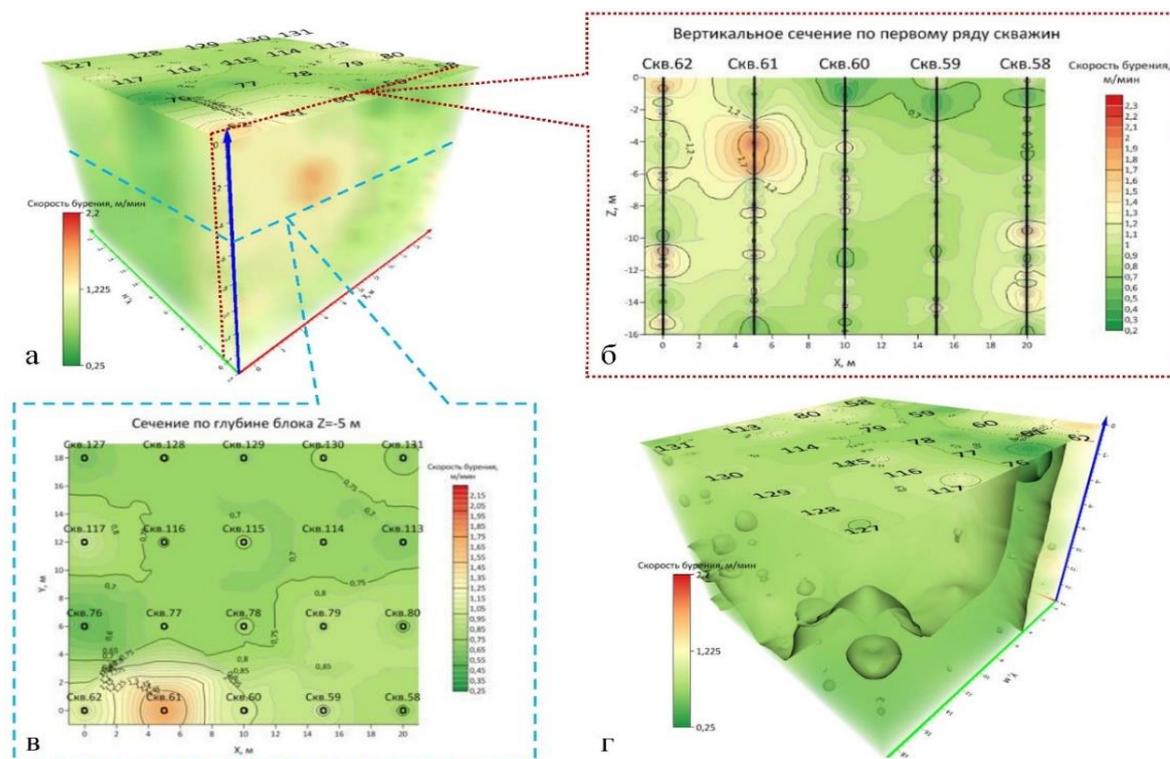


Рис. 1. Моделирование свойств массива горных пород по его буримости:

- а – цифровая модель по скорости бурения каждого метра скважин;
- б, в – вертикальное и горизонтальное сечения модели;
- г – модель для оценки неоднородности массива по содержанию асбестового волокна в руде

Полученные модели с указанными на них участками возможной неоднородности были использованы для разработки критериального подхода к выбору промежуточных детонаторов в зависимости от структурных свойств массива и фактически измеренных детонационных характеристик конкретных ЭВВ, а также обоснования порядка внутрискважинного инициирования. Условия выбора представлены в табл. 1.

Масса и тип промежуточного детонатора (ПД) должны определяться по результатам проведенных исследований скорости детонации и плотности ЭВВ, представленных в табл. 2. Особенности детонационных свойств ЭВВ и ПД могут быть уточнены при проведении периодических и полигонных испытаний.

Высота расположения ПД в скважинном заряде определяется по маркшейдерским профилям и ранее уточненным моделям расположения зон неоднородности в массиве выемочных блоков. Оптимальное расстояние расположения ПД от трещины составляет 0,5 – 1 м. При расположении ПД на меньшем расстоянии от трещины при взрыве теряется энергия на ее раскрытие.

В результате исследований по разработке подхода к управлению детонационными характеристиками заряда ЭВВ установлена возможность стабилизации в скважинных условиях плотности состава ЭВВ с помощью добавления микросфер.

Таблица 1

**Условия выбора способа инициирования скважинных зарядов
в зависимости от трещиноватости**

Высота уступа, м	Трещиноватость (слоистость)	Способ инициирования	Кол-во ПД
< 15 м	Крупноблочный массив без слоистости с редкими трещинами	Прямое, обратное или центральное	1
	Сеть мелких трещин или крупная трещина в верхней и/или средней части борта	Обратное	
	Сеть мелких трещин или крупная трещина в нижней и/или средней части борта	Прямое	
	Сеть мелких трещин или крупные трещины в верхней и нижней части борта	Центральное	
	Сеть мелких трещин или крупные трещины во всем борту	Прямое, обратное или центральное	
от 15 до 25 м	Крупноблочный массив без слоистости с редкими трещинами	Встречное В-Н (0-500), Н-В (0-500) или (0-0)	2
	Сеть мелких трещин или крупные трещины в верхней и средней части борта	Встречное Н-В (0-500)	
	Сеть мелких трещин или крупные трещины в нижней и средней части борта	Встречное В-Н (0-500)	
	Сеть мелких трещин или крупные трещины в средней части борта	Встречное (0-0)	
	Сеть мелких трещин или крупные трещины в верхней и нижней части борта или во всем борту	Встречное В-Н (0-500), Н-В (0-500) или (0-0)	
> 25 м	Крупноблочный массив без слоистости с редкими трещинами	Встречное многоточечное (0-0-0), Н-В (0-0-500), В-Н (0-0-500), Н-Ц и В-Ц (0-500-0) или Ц-Н и ЦВ (500-0-500)	3
	Сеть множества мелких или крупных трещин во всем борту с преобладанием нарушения в верхней части	Встречное многоточечное Н-В (0-0-500)	
	Сеть множества мелких или крупных трещин во всем борту с преобладанием нарушения в нижней части	Встречное многоточечное В-Н (0-0-500)	
	Сеть множества мелких или крупных трещин во всем борту с преобладанием нарушения в средней части	Встречное многоточечное Н-Ц и В-Ц (0-500-0)	
	Сеть множества мелких или крупных трещин во всем борту с преобладанием нарушения в верхней и нижней части	Встречное многоточечное Ц-Н и Ц-В (500-0-500)	
	Сеть множества мелких или крупных трещин во всем борту	Встречное многоточечное (0-0-0), Н-В (0-0-500), В-Н (0-0-500), Н-Ц и В-Ц (0-500-0) или Ц-Н и ЦВ (500-0-500)	

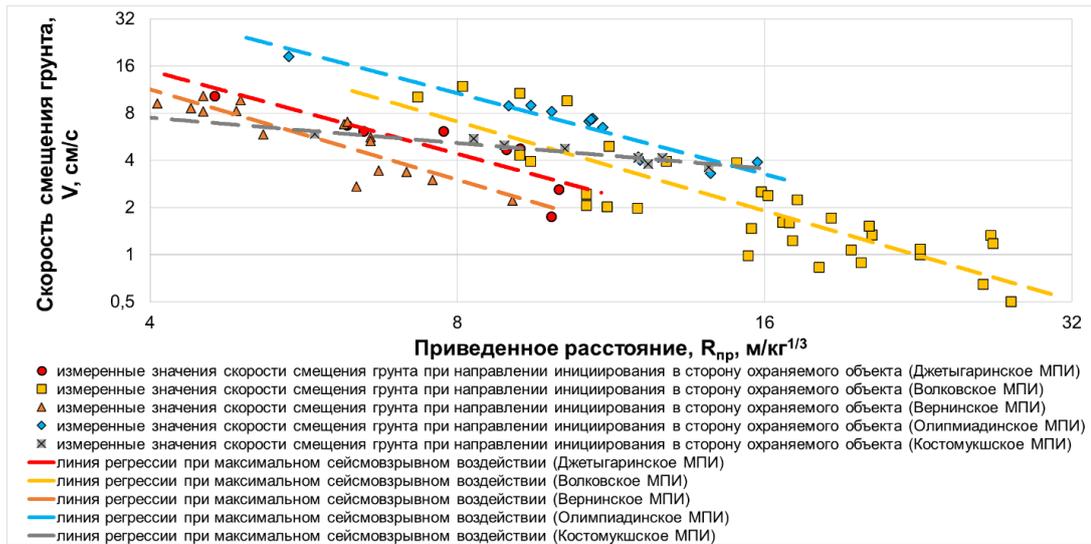
В, Н, Ц – верхнее, нижнее и центральное расположение ПД в скважине

Таблица 2

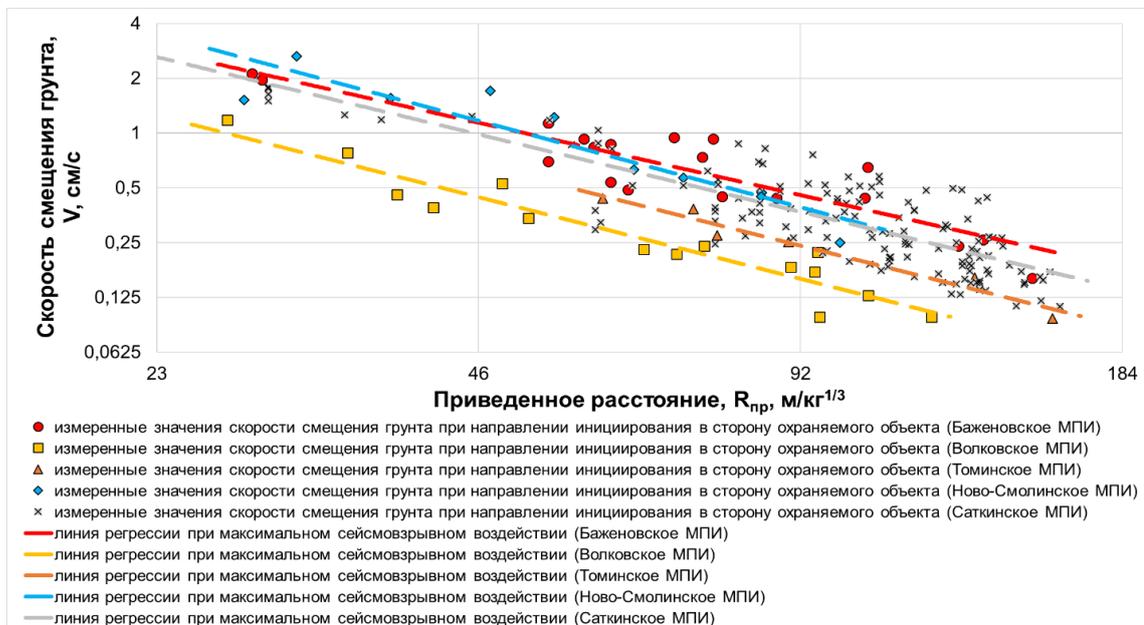
Определение рациональных масс и типов ПД для применяемых ЭВВ

ип ЭВВ	Постоянная плотность ЭВВ, г/см ³	Уравнение	Коэффициент детерминации	Максимальная скорость детонации, м/с	Оптимальная масса ПД	Диапазон оптимальных масс ПД	Рекомендуемые типы ПД
Фортис 70	1,15	$D(1,15) = -0,0169 \cdot Q_{\text{ПД}}^2 + 21,771 \cdot Q_{\text{ПД}} - 1130,7$	0,709	5900	650	600 - 750	ПДП-600, ПТ-600Л, Т-600Г, ПТ-П750
Фортис 85	1,15	$D(1,15) = -0,4158 \cdot Q_{\text{ПД}}^2 + 460,98 \cdot Q_{\text{ПД}} - 121783$	0,347	5900	550	500 - 600	ПТ-П500, ТС-500Л, Т-500Л, ПДП-600, ПТ-600Л, Т-600Г
Фортис 100	1,1	$D(1,1) = -0,0173 \cdot Q_{\text{ПД}}^2 + 26,515 \cdot Q_{\text{ПД}} - 4300$	0,852	5900	780	750 - 800	ПТ-П750, Т-400Г (2 шт.), ТП-400 (2 шт.), БШД-800У, Т-800, РУВ-800
	1,15	$D(1,15) = -0,0085 \cdot Q_{\text{ПД}}^2 + 10,092 \cdot Q_{\text{ПД}} + 2522,2$	0,981	5525	580	500 - 600	ПТ-П500, ТС-500Л, Т-500Л, ПДП-600, ПТ-600Л, Т-600Г
	1,17	$D(1,17) = -0,0142 \cdot Q_{\text{ПД}}^2 + 18,331 \cdot Q_{\text{ПД}} - 136,85$	0,939	5775	650	600 - 750	ПДП-600, ПТ-600Л, Т-600Г, ПТ-П750
	1,2	$D(1,2) = -0,0108 \cdot Q_{\text{ПД}}^2 + 16,991 \cdot Q_{\text{ПД}} - 507,83$	0,646	6200	800	750 - 850	ПТ-П750, Т-400Г (2 шт.), ТП-400 (2 шт.), БШД-800У, Т-800, РУВ-800, ТГФ-850Э
Гранэммит ОМ-70	1,1	$D(1,1) = -0,0136 \cdot Q_{\text{ПД}}^2 + 14,935 \cdot Q_{\text{ПД}} + 1291,1$	0,964	5400	550	500 - 600	ПТ-П500, ТС-500Л, Т-500Л, ПДП-600, ПТ-600Л, Т-600Г
Нитронит Э-70	1,11	$D(1,11) = -0,0033 \cdot Q_{\text{ПД}}^2 + 6,4637 \cdot Q_{\text{ПД}} + 2906,8$	0,496	6100	950	850 - 1000	ТГФ-850Э, ПТ-П500 (2 шт.), ТС-500Л (2 шт.), Т-500Л (2 шт.), ТС-1000Л, ТГУ-1000К
	1,12	$D(1,12) = -0,0016 \cdot Q_{\text{ПД}}^2 + 3,686 \cdot Q_{\text{ПД}} + 3327,7$	0,997	5400	1150	1000 - 1200	ПТ-П500 (2 шт.), ТС-500Л (2 шт.), Т-500Л (2 шт.), ТС-1000Л, ТГУ-1000К, ПДП-600 (2 шт.), ПТ-600Л (2 шт.), Т-600Г (2 шт.)
	1,15	$D(1,15) = -0,0024 \cdot Q_{\text{ПД}}^2 + 5,2893 \cdot Q_{\text{ПД}} + 2710$	0,570	5600	1100		Т-400Г, ТП-400, ПТ-П500, ТС-500Л, Т-500Л
	1,2	$D(1,2) = -0,009 \cdot Q_{\text{ПД}}^2 + 8,5969 \cdot Q_{\text{ПД}} + 2243,7$	0,326	4300	475	400 - 500	Т-400Г, ТП-400, ПТ-П500, ТС-500Л, Т-500Л
	1,23	$D(1,23) = -0,0098 \cdot Q_{\text{ПД}}^2 + 10,721 \cdot Q_{\text{ПД}} + 2134,6$	0,449	5070	550	500 - 600	ПТ-П500, ТС-500Л, Т-500Л, ПДП-600, ПТ-600Л, Т-600Г
	1,25	$D(1,25) = -0,0136 \cdot Q_{\text{ПД}}^2 + 14,433 \cdot Q_{\text{ПД}} + 1568,6$	0,578	5400	525	500 - 600	
Порэммит-1А	1,11	$D(1,11) = -0,0686 \cdot Q_{\text{ПД}}^2 + 113,27 \cdot Q_{\text{ПД}} - 41204$	0,583	5550	825	800 - 850	Т-400Г (2 шт.), ТП-400 (2 шт.), БШД-800У, Т-800, РУВ-800, ТГФ-850Э,
	1,26	$D(1,26) = -0,1683 \cdot Q_{\text{ПД}}^2 + 239,45 \cdot Q_{\text{ПД}} - 79232$	0,698	5900	710	700 - 750	ПТ-П750

При исследовании и анализе данных замеров сейсмике ближней и промежуточной зон взрыва (рис. 2а), в области приведенных расстояний $4 \leq R_{пр} < 28$, в условиях карьеров Джетыгаринского, Костомукшского, Вернинского, Олимпиадинского и Волковского месторождений установлено, что коэффициент пропорциональности между приведенным расстоянием и скоростью смещения при среднем прогнозе сейсмозрывного воздействия $K'_{ср} = 83,8 - 659,6$, а при максимальном прогнозе $K'_{макс} = 95 - 840$, для всех исследуемых грунтов с коэффициентами крепости $f = 6 - 19$ и категориями по трещиноватости $K_{тр} = II - IV$, при положительной и отрицательной температурах грунта. Показатель степени затухания сейсмических колебаний находился в диапазоне $n = 1,47 - 1,92$. При максимальном прогнозе сейсмозрывного воздействия для всех исследуемых грунтов, с отрицательной и положительной температурой, средние значения $K' = 468$ и $n = 1,7$.



а – ближняя и промежуточная зоны взрыва



б – дальняя зона взрыва

Рис. 2. Зависимость $V = f(R_{пр})$ при массовых взрывах в условиях месторождений Урала, Сибири, Карелии и Казахстана

Исследования сейсмике дальней зоны взрыва (рис. 2б) в области приведенных расстояний $28 \leq R_{пр} \leq 161$, в условиях Баженовского, Волковского, Саткинского, Томинского, Ново-Смолинского месторождений и близлежащих населенных пунктов, по-

казали, что коэффициент пропорциональности при среднем прогнозе сейсмозрывного воздействия $K'_{cp} = 133,6 - 730,2$, а при максимальном прогнозе $K'_{max} = 210 - 890$, для всех исследуемых грунтов с коэффициентами крепости $f = 5 - 16$ и категориями по трещиноватости $K_{тр} = II - IV$, при положительной и отрицательной температурах грунта. Показатель степени затухания сейсмических колебаний находился в диапазоне $n = 1,32 - 1,56$. При максимальном прогнозе сейсмозрывного воздействия для всех исследуемых грунтов, с отрицательной и положительной температурой, средние значения $K' = 550$ и $n = 1,44$.

В результате анализа экспериментальных данных разработан комплексный подход к обоснованию параметров БВР, который подразумевает поэтапное уточнение параметров зарядов ВВ в зависимости от уточняющейся во времени информации о параметрах разрушающего воздействия и свойствах массива горных пород. Последовательность этапного подхода к определению параметров БВР представлена на рис. 3.

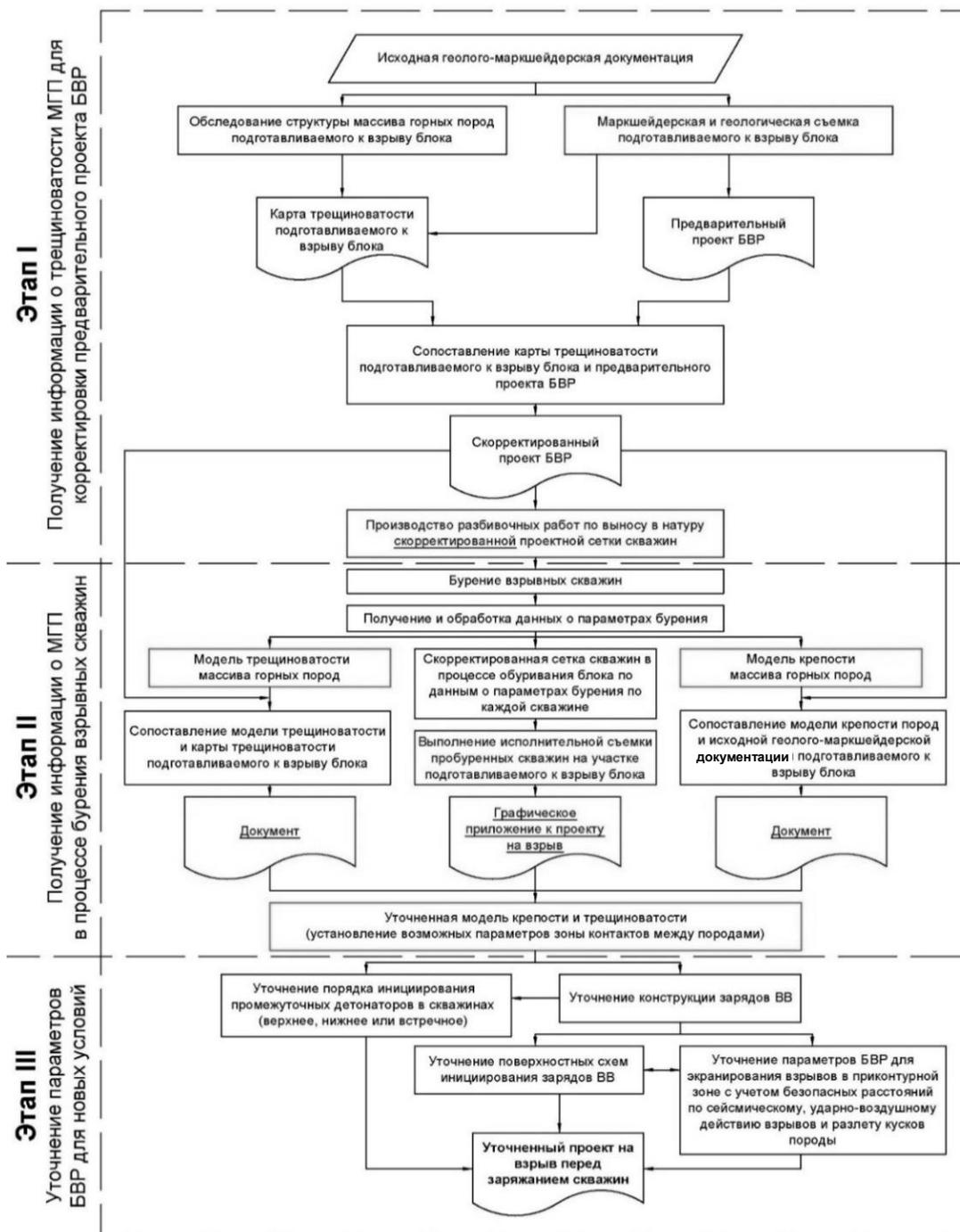


Рис. 3. Поэтапное обоснование параметров БВР к изменяющимся горно-геологическим условиям в динамике открытой разработки ПИ

Выводы

Разработан комплексный подход обоснования параметров БВР с учетом изменчивости свойств массива горных пород и разрушающей взрывной нагрузки в динамике горных работ в карьере, отличающийся от известных подходов тем, что свойства массива горных пород и разрушающей нагрузки уточняются по мере отработки месторождения систематически и оперативно с применением специальных технических средств. В основе комплексного подхода лежат усовершенствованные приемы определения показателей изменчивости физико-механических свойств горных пород, получаемых на основе данных обуривания выемочных блоков; регрессионных связей между свойствами зарядов ЭВВ и их детонационными характеристиками, в том числе меры по стабилизации этих характеристик; параметров промежуточных детонаторов и схем их размещения в зарядах в соответствии с уточненной информацией о структурном состоянии массива горных пород; а также прогнозных значений сейсмического воздействия технологических взрывов. Комплексный подход включает геометризацию массива горных пород по трещиноватости, уточнение свойств пород выемочного блока по данным бурения и поэтапную корректировку параметров БВР при подготовке к взрыву.

Список литературы

1. Реготунов А.С., Жариков С.Н., Сухов Р.И., Кутуев В.А., 2021. Оценка современного состояния буровзрывных работ и необходимость осуществления переходных процессов на некоторых крупных горных предприятиях Урала и Сибири. *Проблемы недропользования*, № 2(29), С. 52-62. DOI 10.25635/2313-1586.2021.02.052.
2. Реготунов А.С., Меньшиков П.В., Жариков С. Н., Кутуев В.А., 2022. Современные технические решения для адаптации параметров взрывного разрушения горных пород на карьерах. *Проблемы недропользования*, № 3(34), С. 114-127. DOI 10.25635/2313-1586.2022.03.114.
3. Яковлев В.Л., 2019. *Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов*. Екатеринбург: УрО РАН, 284 с.
4. Котяшев А.А., Шеменев В.Г., 2015. Апробация технологии разрушения массивов скальных пород с применением рассредоточенных зарядов. *Горный журнал Казахстана*, № 7, С. 30-34.
5. Рожков А.А., 2019. Оценка влияния параметров рассредоточения скважинных зарядов на выход некондиционной фракции кварцевой руды. *Проблемы недропользования*, № 1(20), С. 63-69. DOI 10.25635/2313-1586.2019.01.063.
6. Корнилков М.В., Лохни Х., Шеменев В.Г. и др., 2015. Промышленные испытания эмульсионного взрывчатого вещества "Фортис". *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 6, С. 40-44.
7. Шеменев В.Г., Матухно Н.С., Флягин А.С., Леонтьева И.А., 2018. Испытания образцов пористой аммиачной селитры (ПАС) производства НАК "АЗОТ" на совместимость с эмульсией порэмита 1А. *Взрывное дело*, № 119-76, С. 98-106.
8. Зимин А.С., Соснин В.А., Шмотьев А.С., Соломин Е.С., 2021. Исследование физико-химических и детонационных характеристик эмульсионного взрывчатого состава на микросферах FORESPHERE производства ООО "ФОРЭС". *Взрывное дело*, № 131-88, С. 115-123.
9. Соснин В.А., Межеричкий С.Э., Печенев Ю.Г. и др., 2016. Особенности механизма детонации эмульсионных взрывчатых веществ. *Вестник Технологического университета*, Т. 19, № 19, С. 28-33.
10. Жданов Ю.В., Андержанов С.Р., Соснин В.А., Соснин А.В., 2016. Полимерные микросферы в эмульсионных взрывчатых веществах. *Вестник Технологического университета*, Т. 19, № 19, С. 7-10.

11. Садовский М.А., 2004. *Избранные труды: Геофизика и физика взрыва*. Москва: Наука, 440 с.
12. Миронов П.С., 1973. *Взрывы и сейсмобезопасность сооружений*. Москва: Недра, 168 с.
13. Фадеев А.Б., Картузов М.И., Кузнецов Г.В., 1977. *Методические указания по обеспечению устойчивости откосов и сейсмической безопасности зданий и сооружений при ведении взрывных работ на карьерах*. Ленинград: ВНИМИ, 17 с.
14. Верховланцев А.В., Дягилев Р.А., Шулаков Д.Ю., Шкурко А.В., 2019. Мониторинг сейсмического воздействия взрывов на карьере «Шахтау». *ФТПРПИ*, №2, С. 59-69.
15. Duvall W.I., Petkof B., 1959. *Spherical Propagation of Explosion-Generated Strain Pulses in Rock*; USBM: Washington, DC, USA, 21 pp.
16. Holmberg R., Persson P.-A., 1978. The Swedish approach to contour blasting. *Proceedings of the 4th Conference on Explosives and Blasting Technique, Society of Explosives Engineers, New Orleans, Louisiana, 10-15 February*, pp. 113-127.
17. Тангаев И.А., 1978. *Буримость и взрываемость горных пород*. Москва: Недра, 184 с.
18. Bilgin N., Kahraman S., 2003. Drillability prediction in rotary blast hole drilling. *1st International Mining Congress and Exhibition of Turkey, IMCET*, P. 177-182.
19. Liu H., Karen Yin K., 2001. Analysis and interpretation of monitored rotary blasthole drill data. *International Journal of Surface Mining Reclamation and Environment*, August 15 (3), P. 177-203.
20. Hatherly P., Scheduling S. J., Leung R., Robinson D., 2015. Drill monitoring results reveal geological conditions in blasthole drilling. *International Journal of Rock mechanics and Mining Sciences*, September, № 78, P. 144-154.
21. Zhou H., Hatherly P., Monteiro S. T., Ramos F., Oppolzer F., Nettleton E., Scheduling S.J., 2012. Automatic rock recognition from drilling performance data. *Proceedings, IEEE International Conference on Robotics and Automation. RiverCentre, Saint Paul, Minnesota, USA, May 14-18*. P. 3407-3412.
22. Kelessidis V.C., 2011. Rock drillability prediction from in situ determined unconfined compressive strength of rock. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, V. 111, P. 429-436.
23. Khorzoughi M.B., Hall R., Apel D., 2018. Rock fracture density characterization using measurement while drilling (MWD) techniques. *International Journal of Mining Science and Technology*, V. 28, № 6, P. 859-864. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.01.001.
24. Radosław W., Waldemar K., Łukasz B., Waldemar R., 2021. Identification of rock mass critical discontinuities while borehole drilling. *Energies. MDPI*, V. 14 (10), P. 1-21. DOI: 10.3390/en14102748.
25. Teale R., 1965. The concept of specific energy in rock drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, V 2, P. 57-73.
26. Коваленко В.А., Стубарев В.М., Мамедов М.Х. и др., 2001. Автоматизированная система сбора данных с буровых станков. *Горный журнал*, № 2, С. 37-39.
27. Regotunov A.S., Sukhov R.I., 2019. Automated device to study the properties of rocks during drilling blast holes in open-pit mines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 262, no. 1, article 012057. DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012057.
28. Сухов Р.И., Реготунов А.С., Гращенко Д.А., 2019. Развитие метода получения информации о состоянии массива горных пород в процессе бурения технологических скважин. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S37, С. 446-454. DOI: 10.25018/02361493-2019-11-37-446-454.

29. Жариков С.Н., 2017. Взаимосвязь процессов шарошечного бурения и взрывного разрушения массива горных пород. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 2, С. 62-67.

30. Яковлев В.Л., Жариков С.Н., Реготунов А.С., Кутуев В.А., 2024. Методика измерения детонационных характеристик эмульсионных ВВ и экспресс-определения прочностных свойств горных пород. *Горная промышленность*, №5, С. 37-44, DOI 10.30686/1609-9192-2024-5-37-

References

1. Regotunov A.S., Zharikov S.N., Sukhov R.I., Kutuev V.A., 2021. Otsenka sovremennogo sostoyaniya burovzryvnykh работ i neobkhodimost' osushchestvleniya perekhodnykh protsessov na nekotorykh krupnykh gornyykh predpriyatiyakh Urala i Sibiri [Assessment of the current state of drilling and blasting operations and the need for transitional processes at some large mining enterprises in the Urals and Siberia]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 2(29), P. 52-62. DOI 10.25635/2313-1586.2021.02.052.

2. Regotunov A.S., Men'shikov P.V., Zharikov S. N., Kutuev V.A., 2022. Sovremennye tekhnicheskie resheniya dlya adaptatsii parametrov vzryvnogo razrusheniya gornyykh porod na kar'erakh [Modern technical solutions for adapting the parameters of explosive rock destruction in quarries]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 3(34), P. 114-127. DOI 10.25635/2313-1586.2022.03.114.

3. Yakovlev V.L., 2019. Issledovanie perekhodnykh protsessov – novoe napravlenie v razvitiy metodologii kompleksnogo osvoeniya georesurov [Study of transition processes as a new direction in the development of the methodology of integrated exploration of georesources]. Ekaterinburg: UrO RAN, 284 p.

4. Kotyashov A.A., Shemenov V.G., 2015. Aprobatsiya tekhnologii razrusheniya mas-sivov skal'nykh porod s primeneniem rassredotochennykh zaryadov [Approbation of the technology of destruction of rock formations using dispersed charges]. *Gornyy zhurnal Kazakhstana*, № 7, P. 30-34.

5. Rozhkov A.A., 2019. Otsenka vliyaniya parametrov rassredotocheniya skvazhinnykh zaryadov na vykhod nekonditsionnoi fraktsii kvartsevoi rudy [Assessment of the influence of downhole charge dispersal parameters on the yield of substandard quartz ore fraction]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 1(20), P. 63-69. DOI 10.25635/2313-1586.2019.01.063.

6. Kornilov M.V., Lokhni Kh., Shemenov V.G. i dr., 2015. Promyshlennyye ispytaniya emul'sionnogo vzryvchatogo veshchestva "Fortis" [Industrial tests of the emulsion explosive "Fortis"]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*, № 6, P. 40-44.

7. Shemenov V.G., Matukhno N.S., Flyagin A.S., Leont'eva I.A., 2018. Ispytaniya obraztsov poristoi ammiachnoi selitry (PAS) proizvodstva NAK "AZOT" na sovместimost' s emul'siei poremita 1A [Tests of samples of porous ammonium nitrate (PAN) produced by AZOT for compatibility with poremite 1A emulsion]. *Vzryvnoe delo*, № 119-76, P. 98-106.

8. Zimin A.S., Sosnin V.A., Shmot'ev A.S., Solomin E.S., 2021. Issledovanie fiziko-khimicheskikh i detonatsionnykh kharakteristik emul'sionnogo vzryvchatogo sostava na mikrosferakh FORESPHERE proizvodstva OOO "FORES" [Investigation of physical-chemical and detonative characteristics of an emulsion explosive composition on FORESPHERE microspheres manufactured by FORES]. *Vzryvnoe delo*, № 131-88, P. 115-123.

9. Sosnin V.A., Mezheritskii S.E., Pechenev Yu.G. i dr., 2016. Osobennosti mekhanizma detonatsii emul'sionnykh vzryvchatykh veshchestv [Features of the detonation mechanism of emulsion explosives]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, Vol. 19, № 19, P. 28-33.

10. Zhdanov Yu.V., Anderzhanov S.R., Sosnin V.A., Sosnin A.V., 2016. Polimernyye mikrosfery v emul'sionnykh vzryvchatykh veshchestvakh [Polymer microspheres in emulsion explosives]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, Vol. 19, № 19, P. 7-10.

11. Sadvovskii M.A., 2004. *Izbrannye trudy: Geofizika i fizika vzryva* [Selected works: Geophysics and physics of explosion]. Moscow: Nauka, 440 p.
12. Mironov P.S., 1973. *Vzryvy i seismobezopasnost' sooruzhenii* [Explosions and earthquake safety of structures]. Moscow: Nedra, 168 p.
13. Fadeev A.B., Kartuzov M.I., Kuznetsov G.V., 1977. *Metodicheskie ukazaniya po obespecheniyu ustoichivosti otkosov i seismicheskoi bezopasnosti zdaniy i sooruzhenii pri vedenii vzryvnykh rabot na kar'erakh* [Methodological guidelines for ensuring slope stability and seismic safety of buildings and structures during blasting operations in quarries]. Leningrad: VNIMI, 17 p.
14. Verkholyantsev A.V., Dyagilev R.A., Shulakov D.Yu., Shkurko A.V., 2019. *Monitoring seismicheskogo vozdeistviya vzryvov na kar'ere "Shakhtau"* [Monitoring of the seismic effects of explosions at the Shakhtau quarry]. *FTPRPI*, №2, P. 59-69.
15. Duvall W.I., Petkof B., 1959. *Spherical Propagation of Explosion-Generated Strain Pulses in Rock*; USBM: Washington, DC, USA, 21 pp.
16. Holmberg R., Persson P-A., 1978. The Swedish approach to contour blasting. *Proceedings of the 4th Conference on Explosives and Blasting Technique, Society of Explosives Engineers, New Orleans, Louisiana, 10-15 February*, pp. 113-127.
17. Tangaev I.A., 1978. *Burimost' i vzryvaemost' gornyykh porod*. Moscow: Nedra, 184 p.
18. Bilgin N., Kahraman S., 2003. Drillability prediction in rotary blast hole drilling. *1a International Mining Congress and Exhibition of Turkey*, IMCET, P. 177-182.
19. Liu H., Karen Yin K., 2001. Analysis and interpretation of monitored rotary blasthole drill data. *International Journal of Surface Mining Reclamation and Environment*, August 15 (3), P. 177-203.
20. Hatherly P., Scheduling S. J., Leung R., Robinson D., 2015. Drill monitoring results reveal geological conditions in blasthole drilling. *International Journal of Rock mechanics and Mining Sciences*, September, № 78, P. 144-154.
21. Zhou H., Hatherly P., Monteiro S. T., Ramos F., Oppolzer F., Nettleton E., Scheduling S.J., 2012. Automatic rock recognition from drilling performance data. *Proceedings, IEEE International Conference on Robotics and Automation. RiverCentre, Saint Paul, Minnesota, USA, May 14-18*. P. 3407-3412.
22. Kelessidis V.C., 2011. Rock drillability prediction from in situ determined unconfined compressive strength of rock. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, V. 111, P. 429-436.
23. Khorzoughi M.B., Hall R., Apel D., 2018. Rock fracture density characterization using measurement while drilling (MWD) techniques. *International Journal of Mining Science and Technology*, V. 28, № 6, P. 859-864. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.01.001.
24. Radosław W., Waldemar K., Łukasz B., Waldemar R., 2021. Identification of rock mass critical discontinuities while borehole drilling. *Energies. MDPI*, V. 14 (10), P. 1-21. DOI: 10.3390/en14102748.
25. Teale R., 1965. The concept of specific energy in rock drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, V 2, P. 57-73.
26. Kovalenko V.A., Stubarev V.M., Mamedov M.Kh. i dr., 2001. *Avtomatizirovannaya sistema sbora dannykh s burovykh stankov* [Automated data collection system from drilling rigs]. *Gornyy zhurnal*, № 2, P. 37-39.
27. Regotunov A.S., Sukhov R.I., 2019. Automated device to study the properties of rocks during drilling blast holes in open-pit mines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 262, no. 1, article 012057. DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012057.
28. Sukhov R.I., Regotunov A.S., Grashchenko D.A., 2019. *Razvitie metoda polucheniya informatsii o sostoyanii massiva gornyykh porod v protsesse bureniya tekhnologicheskikh skvazhin* [Development of a method for obtaining information about the state of a rock

mass during the drilling of technological wells]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № S37, P. 446-454. DOI: 10.25018/02361493-2019-11-37-446-454.

29. Zharikov S.N., 2017. Vzaimosvyaz' protsessov sharoshechnogo bureniya i vzryvnogo razrusheniya massiva gornykh porod. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii [Relationship between the processes of ball drilling and explosive destruction of rock mass]. Gornyi zhurnal, № 2, P. 62-67.

30. Yakovlev V.L., Zharikov S.N., Regotunov A.S., Kutuev V.A., 2024. Metodika izmereniya detonatsionnykh kharakteristik emul'sionnykh VV i ekspress-opredeleniya prochnostnykh svoistv gornykh porod [Method for measuring the detonation characteristics of emulsion explosives and express determination of the strength properties of rocks]. Gornaya promyshlennost', №5, P. 37-44, DOI 10.30686/1609-9192-2024-5-37-

УДК 622.235

Флягин Александр Сергеевич
младший научный сотрудник,
лаборатория разрушения горных пород,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: flyingdr@mail.ru

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ
ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭМУЛЬСИОННЫХ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ
ДЕТОНАТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ
ДЕТОНАЦИОННОГО ПРОЦЕССА***

Аннотация:

В статье представлено исследование по определению физических характеристик промежуточных детонаторов, изготовленных из ЭВВ. При проведении исследований применялись интерпретация, анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Используемые в настоящее время промышленные ВВ целенаправленно (по соображениям безопасности при изготовлении, хранении, перевозке и применении) создают малочувствительными к инициирующему импульсу первичных средств инициирования – (капсулей-детонаторов, детонирующих шнуров). Для возбуждения и поддержания детонации в зарядах таких ВВ используют промежуточные детонаторы: заряды небольшой массы, представляющие собой чувствительное к вышеуказанным первичным средствам инициирования ВВ, размещенное в оболочку для сохранения формы такого заряда, снабженное устройствами для ввода и крепления первичных средств инициирования. Для обеспечения полноты детонации скважинного заряда ЭВВ необходимо согласовать параметры заряда ЭВВ и ПД, что достигается регулируемым воздействием на характеристики ЭВВ (начальная плотность, структура и рецептура), на конструкцию заряда ЭВВ и на параметры ПД, связанные как с его характеристиками (ВВ, из которого изготовлен ПД, размеры ПД), так и условиями его применения (место установки ПД в заряде ЭВВ, конструкция ПД, установка нескольких ПД / многоточечное инициирование и (или) встречное инициирование).

Экспериментальными данными, полученными в условиях полигона, подтверждаются теоретические положения о детонации зарядов. В экс-

DOI: 10.25635/2313-1586.2024.04.109

Flyagin Alexander S.
Junior Researcher,
Laboratory of rock destruction,
Institute of Mining UB RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: flyingdr@mail.ru

**THEORETICAL ASSESSMENT
OF THE IMPACT PHYSICAL
CHARACTERISTICS OF EMULSION
INTERMEDIATES DETONATORS ON
CHARACTERISTICS OF DETONATION
PROCESS**

Abstract:

The article describes the study on the determination of the physical characteristics of intermediate detonators made of EE. The research applies interpretation, analysis and generalization of the results of theoretical and experimental studies.

Currently used industrial explosives are purposefully (for safety reasons during manufacture, storage, transportation, and use) are less insensitive to the initiating pulse of the primary means of initiation (detonator caps, detonating cords). Intermediate detonators are used to excite and maintain detonation in charges of such explosives: charges of small mass, which are explosives sensitive to the above-mentioned primary means of initiation, placed in a shell to preserve the shape of such a charge, equipped with devices for inserting and attaching primary means of initiation. To ensure the completeness of the detonation of the downhole charge of the explosives, it is necessary to coordinate the parameters of the EE and ID charge, which is achieved by regulating the characteristics of the EE (initial density, structure and formulation), the design of the EE charge and the ID parameters related to both its characteristics (the explosive from which the ID is made, the size of the ID), and the conditions of its applications (location of the ID in the EE charge, ID design, installation of multiple ID / multipoint initiation and (or) counter initiation).

Experimental data obtained in the conditions of the test site confirm the theoretical provisions on the detonation of charges. In the experiment, the explosive NPGM-P-II-M and NPGM-70, NPGM-100 were used as the main charge. Initiation was performed from an ED-8 electric detonator. NPGM-P-II-M was sensitized with ForeSphere glass microspheres. NPGM-70 and NPGM-100 are sensitized by the gas-generating additive sodium nitrite. The

* Исследования выполнены в рамках Государственного задания №075-00412-22 ПР, тема 1 (2022-2024): Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005), пер. №1021062010531-8-1.5.1, а также при дополнительном привлечении хозяйственных средств.

перименте использовалось в качестве ПД взрывчатое вещество НПГМ-П-П-М и НПГМ-70, НПГМ-100 в качестве основного заряда. Иницирование производилось от электродетонатора ЭД-8. НПГМ-П-П-М сенсублизовано стеклянными микросферами ForeSphere. НПГМ-70 и НПГМ-100 сенсублизовано газогенерирующей добавкой нитрит натрия. Для НПГМ-100 критический диаметр 75 мм, а НПГМ-75 – 90 мм; диаметр ПД равен диаметру основного заряда.

Ключевые слова: эмульсионное взрывчатое вещество, взрывные работы, разрушение горных пород, скорость детонации, критический диаметр, начальный импульс, плотность, промежуточный детонатор.

critical diameter for NPGM-100 is 75 mm, and for NPGM-75 it is 90 mm; the diameter of the ID is equal to the diameter of the main charge.

Key words: emulsion explosive, blasting, rock destruction, detonation velocity, critical diameter, initial pulse, density, intermediate detonator.

Введение

Известно, что на скорость детонации и характеристики детонационного процесса оказывают влияние как химические характеристики (теплота взрыва), так и физические характеристики заряда взрывчатого вещества (ВВ): его диаметр, плотность, агрегатное состояние, размер частиц, однородность, наличие оболочек и др. [1 – 3]. Начальным импульсом называется определенное количество внешней энергии, которое необходимо приложить к заряду для начала процесса взрывчатого превращения ВВ, а иницированием называется сам процесс приложения начального импульса к заряду. Чувствительностью ВВ называется его восприимчивость к определенному виду внешнего воздействия [4, 5].

Необходимая минимальная величина начального импульса зависит от чувствительности ВВ и степени восприимчивости к внешним воздействиям и различается для разных типов ВВ [6]. Большинство крупных горнодобывающих предприятий перешло на приготовление смесевых ВВ непосредственно на местах применения. Одним из положительных эффектов данного перехода является механизация изготовления и заряжания ВВ в скважины, а отрицательным – снижение качества заряда ВВ, особенно эмульсионных ВВ (ЭВВ) относительно применения индивидуальных ВВ. Используемые в настоящее время промышленные ВВ целенаправленно (по соображениям безопасности при изготовлении, хранении, перевозке и применении) создают малочувствительными к иницирующему импульсу первичных средств иницирования (капсюлей-детонаторов, детонирующих шнуров). Для возбуждения и поддержания детонации в зарядах таких ВВ используют промежуточные детонаторы: заряды небольшой массы, представляющие собой чувствительное к вышеуказанным первичным средствам иницирования ВВ, размещенное в оболочке для сохранения формы такого заряда, снабженное устройствами для ввода и крепления первичных средств иницирования. Таким образом, масса промежуточного детонатора (чувствительного к первичным средствам иницирования) составляет менее 1 % от массы иницируемого основного заряда промышленного ВВ (не чувствительного к первичным средствам иницирования), что существенно снижает риски и повышает безопасность при изготовлении, хранении, перевозке и применении ВВ.

Теория вопроса

Влияние начального импульса на скорость детонации ВВ отмечалось еще До-тришем для пикриновой кислоты. Как отмечали Андреев К.К. и Беляев А.Ф. [7], аналогичное явление наблюдается в том случае, если ВВ с малой скоростью детонации ини-

цируется мощным промежуточным детонатором, тогда на начальном участке скорость детонации становится выше нормальной, но с расстоянием по заряду ВВ скорость детонации начнет убывать или становится равной скорости детонации в стационарном режиме. Роль начального импульса сводится только к возбуждению взрыва. Это явление давно уже было обнаружено у динамитов, нитроглицерина, а также позже было установлено у жидких нитроэфиров и порошкообразных вторичных ВВ (тротил, тетрил, пикриновая кислота, ТЭН и гексоген), но для них различие в скоростях детонации было не столь велико, как для жидких ВВ [7].

Для эмульсионных ВВ, состоящих из жидкой и сухой фазы, различия в скоростях детонации в зависимости от разной мощности начального импульса могут быть значительными, но они наблюдаются только на начальных участках зарядов в разгонной части, в дальнейшем, при переходе на стационарный режим, скорость детонации будет зависеть только от плотности заряжения, диаметра заряда, равномерной газификации ВВ по всему заряду, а также дисперсности частиц ВВ.

Условия возникновения детонации

Процесс детонации возбуждается ударной волной, с помощью взрыва детонатора или в результате высокоскоростного удара осколка при его попадании в заряд ВВ [8]. Возникающие во взрывчатой системе при ударе и взрыве ударные волны (УВ) создают зону сжатия конечных размеров. В этой зоне сразу за фронтом УВ возникают экзотермические реакции. Для неоднородных (гетерогенных) ВВ наиболее высокая скорость химических реакций имеет место в горячих точках (зоны локального разогрева, порождающие быстрые реакции, получили название «горячих точек» (ГТ). В пористых ВВ и ЭВВ причинами возникновения горячих точек является, главным образом, адиабатическое сжатие газовых включений. Если параметры УВ, возникающие в ВВ, выше критических значений, то в заряде возбуждается детонация. Детонация в заряде ВВ возбуждается при условии, если давление во фронте инициирующей ударной волны (ИУВ) $P_{и}$ или ее массовая скорость $U_{и}$ будут больше критического значения $P_{кр}$ или $U_{кр}$ для данного ВВ:

$$P_{и} \geq U_{и}; \quad (1)$$

$$P_{кр} \geq U_{кр}. \quad (2)$$

При этом согласно теоретическим исследованиям [8, 9] диаметр очага инициирования УВ $d_{и}$ должен быть больше критического диаметра детонации ВВ $d_{кр}$:

$$d_{и} \geq d_{кр}. \quad (3)$$

Экспериментально установлено, что глубина, на которую ИУВ возбуждает детонацию в заряде ВВ, составляет $l_p \approx 2,5d_{кр}$. Величина диаметра $d_{кр}$ учитывает совокупность физических и физико-химических свойств ВВ.

Согласно теоретическим исследованиям [10] область граничных значений $d_{и}$ находится в диапазоне

$$2 d_{кр} \leq d_{и} \leq 3 d_{пр}, \quad (4)$$

где $d_{кр}$ – критический диаметр детонации инициируемого заряда ВВ с минимальной скоростью детонации $D_{кр}$;

$d_{пр}$ – предельный диаметр инициируемого заряда ВВ с максимальной скоростью детонации $D_{пр}$.

В этой области зависимость критических параметров ИУВ ($U_{и}$) от $d_{и}$ сравнительно слабая. Она становится очень сильной при $d_{и} \leq 2 d_{кр}$, а при $d_{и} > 3 d_{пр}$ – почти отсутствует.

При $d_{и} = d_{кр}$ критические параметры ИУВ должны соответствовать химическому пику детонационной волны, распространяющейся по заряду с диаметром, равным критическому.

Если же $d_{и} < d_{кр}$, то для возбуждения детонации необходимо создать пересжатую относительно детонационной УВ.

Согласно исследованиям [10] диаметры заряда ВВ, инициируемого ПД, $d_{кр}$, $d_{и}$, $d_{пр}$ взаимосвязаны со скоростями детонации в них $D_{пр}$, $D_{кр}$, $D_{ВВ}$ соотношениями вида (5) и (6) без снижения точности расчетов диаметра промежуточного детонатора (ПД) по формуле: скорость детонации ВВ $D_{пр}$ в предельном диаметре заряда $d_{пр}$ может быть приравнена к идеальной скорости детонации, соответствующей условию детонации бесконечно большого диаметра заряда ВВ – $D_{пр} \approx D_{и}$:

$$\frac{d_{пр}}{d_{кр}} = \left(\frac{D_{пр}}{D_{кр}}\right)^2; \quad (5)$$

$$\frac{d_{пр}}{d_{ВВ}} = \left(\frac{D_{пр}}{D_{ВВ}}\right)^2. \quad (6)$$

Различие физических свойств ПД и ВВ при преломлении энергии ИУВ на границе раздела в зависимости от детонационных импедансов ПД и ВВ в формуле

$$d_{д} = d_{кр} F_1 \left(1 + 2 \ln \frac{\sqrt[4]{\frac{d_{пр}}{d_{кр}} - 1}}{\sqrt[4]{\frac{d_{пр}}{d_{ВВ}} - 1}}\right) \quad (7)$$

выражается коэффициентом F_1 , который рассчитывается по формуле

$$F_1 = 0,5 \sqrt{\frac{D_{ВВ}}{D_{д}} \left(\frac{n_{д}^2 - 1}{n_{ВВ}^2 - 1}\right) \left(1 + \frac{\rho_{ВВ} D_{ВВ}}{\rho_{д} D_{д}}\right)}, \quad (8)$$

где $\rho_{д}$, $\rho_{ВВ}$ – плотность ПД и ВВ;

$D_{д}$, $D_{ВВ}$ – скорость детонации ПД и заряда ВВ;

$n_{д}$, $n_{ВВ}$ – показатели политропы для ПД и ВВ.

Итоговая расчетная формула для определения диаметра промежуточного детонатора $d_{пр}$, обеспечивающего инициирование скважинного заряда ВВ в стационарном режиме, может быть представлена как функция детонационных параметров ПД и ВВ в виде конечного выражения:

$$d_{д} = d_{кр} F_1 \left(1 + 2 \ln \frac{F_2}{F_3}\right), \quad (9)$$

где

$$F_2 = \sqrt[4]{\frac{D_{и}}{D_{кр}} - 3}; \quad (10)$$

$$F_3 = \sqrt[4]{\frac{D_{и}}{D_{ВВ}} - 3}. \quad (11)$$

Значения показателей политропы $n_{д}$ и $n_{ВВ}$ принимаются в зависимости от соответствующей плотности ρ_i и идеальной скорости $D_{и}$ ПД и ВВ, соответственно:

$$n_i = \rho_i (7,5 - 0,714 D_{иi}) - 1, \quad (12)$$

где n_i – показатель политропы ПД ($n_{д}$) или ВВ ($n_{ВВ}$);

ρ_i – плотность ПД ($\rho_{д}$) или ВВ ($\rho_{ВВ}$), г/см³;

$D_{иi}$ – идеальная скорость детонации ПД или ВВ, км/с.

Параметры ПД (масса $M_{д}$ и длина $l_{д}$) для инициирования скважинных зарядов принимаются исходя из условий соответствия геометрических размеров ПД значениям максимальной активной массы заряда, зависящей от его диаметра $d_{д}$, рассчитанного по выражению:

$$M_d = 1,766\rho_d d_d^3, \text{ кг}; \quad (13)$$

$$l_d = 2,25d_{\text{п}}, \text{ м}. \quad (14)$$

Данное выражение (14) подтверждается экспериментальными данными, полученными сотрудниками ИГД УрО РАН в условиях полигона. В эксперименте использовалось в качестве ПД взрывчатое вещество НПГМ-П-П-М и НПГМ-70, НПГМ-100 в качестве основного заряда. Инициирование производилось от электродетонатора ЭД-8. НПГМ-П-П-М сенсibilизировано стеклянными микросферами ForeSphere. НПГМ-70 и НПГМ-100 сенсibilизировано газогенерирующей добавкой нитрит натрия. Для НПГМ-100 критический диаметр 75 мм, а НПГМ-75 – 90 мм. Диаметр ПД равен диаметру основного заряда (рис. 1).

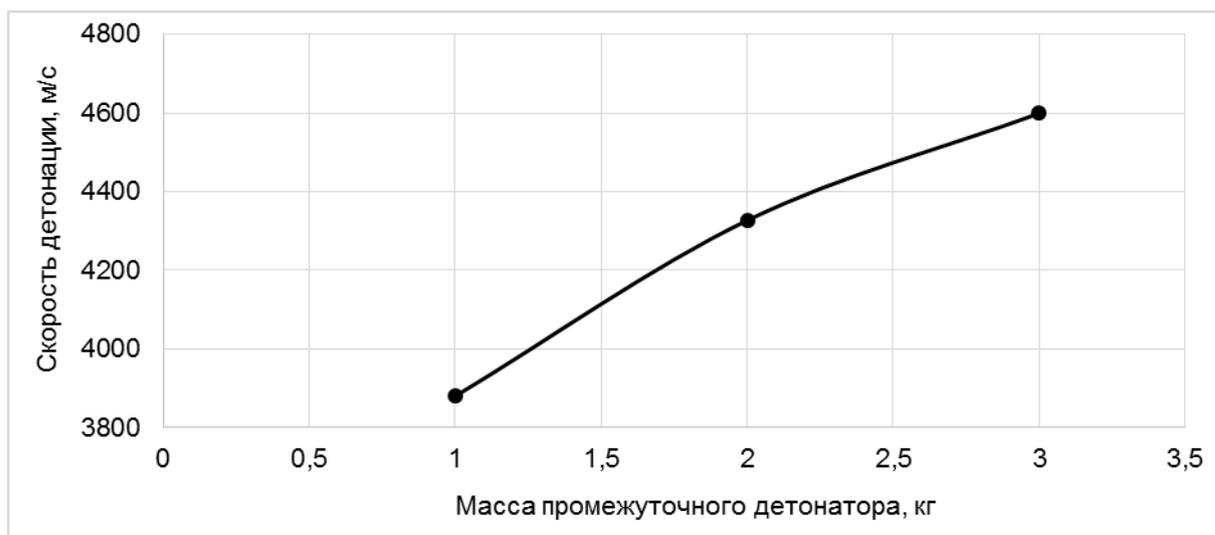


Рис. 1. Зависимость скорости детонации ЭВВ от массы ПД из ЭВВ

Из графика видно, что при массе ПД 3 кг получена наибольшая скорость детонации основного заряда. Это соответствует указанным выше выражениям и обусловлено тем, что длина ПД, равная трем диаметрам заряда, позволила разогнаться детонации в ПД до идеальной скорости и передать детонационный импульс основному заряду ВВ на значениях, близких по ТУ к максимальным для данного типа ВВ. Отсюда следует, что для получения высокого значения скорости детонации в основном заряде эмульсионного ВВ необходимо использовать ПД диаметром, максимально приближенным к диаметру основного заряда и длиной не менее 2,5 диаметров ПД.

Согласно [12] для обеспечения полноты детонации скважинного заряда ЭВВ необходимо согласовывать параметры заряда ЭВВ и ПД, что достигается регулируемым воздействием на характеристики ЭВВ (начальная плотность, структура и рецептура), на конструкцию заряда ЭВВ и на параметры ПД, связанные как с его характеристиками (ВВ, из которого изготовлен ПД, размеры ПД), так и условиями его применения (место установки ПД в заряде ЭВВ, конструкция ПД, установка нескольких ПД (многоточечное и/или встречное инициирование)). В нашем случае мы попытались решить одну из ключевых задач – произвести оценку необходимых физических характеристик ПД из однотипного ЭВВ.

Ниже представлены данные, полученные на основании теоретической расчетной модели, описанной выше. В табл. 1 указаны параметры из ТУ эмульсионных взрывчатых веществ разных производителей и соответствующие им параметры ПД.

Таблица 1

**Параметры промежуточных детонаторов для эмульсионных ВВ
разных производителей**

№ п/п	Параметры заряда ВВ (ГУ)									Параметры заряда ПД						
	Наименование ЭВВ, марка		Плотность ЭВВ, г/см ³	Скорость детонации ВВ, км/с	Критическая скорость детонации, км/с	Идеальная скорость детонации, км/с	Теплота взрыва ВВ ккал/кг	Удельный объем взрывных газов ВВ, л/кг	Критический диаметр ВВ, мм	плотность ПД, г/см ³	Скорость детонации ПД, км/с	Критическая скорость детонации ПД, км/с	Идеальная скорость детонации, км/с	Диаметр ПД, мм	Масса ПД, кг	Длина ПД, м
1	Фортис	Фортис	1	4	4	5,8	798	850	60	1,2	5	4	6	76,35	0,94	0,17
2	НПГМ-П-П	Н	1	5,1	4	5,8	750	1050	60	1,2	5	4	6	92,78	1,69	0,21
3	НПГМ-П-П	К	1	5,4	4	5,8	830	1080	60	1,2	5	4	6	94,89	1,81	0,21
4	НПГМ-П-П	Н	1	5,1	4	5,8	560	1050	60	1,2	5	4	6	92,78	1,69	0,21
5	НПГМ	А-100	1,05	5,4	4	5,8	558	1059	60	1,2	5	4	6	96,64	1,91	0,22
6	Уралит	УТ-70	1,05	5,83	4	5,8	785	1017	60	1,2	5	4	6	99,67	2,10	0,22
7	Оммикс	ОМ-100С	1,1	5	4	5,8	643	900	60	1,2	5	4	6	95,38	1,84	0,21
8	Оммикс	ОМ-30	1,1	4,5	4	5,8	779	986	60	1,2	5	4	6	83,20	1,22	0,19
9	Оммикс	ОМ-30	1,1	4,5	4	5,8	779	986	60	1,2	5	4	6	91,50	1,62	0,21
10	Уралит	УТ-30	1,1	4,44	4	5,8	779	988	60	1,2	5	4	6	91,03	1,60	0,20
11	Уралит	У50	1,15	5,4	4	5,8	844	1009	60	1,2	5	4	6	100,10	2,13	0,23
12	Оммикс	ОМ-100	1,2	4,5	4	5,8	652	900	60	1,2	5	4	6	94,53	1,79	0,21
13	Оммикс	ОМ-100	1,2	5,5	4	5,8	652	900	60	1,2	5	4	6	102,59	2,29	0,23
14	Уралит	УТ-30	1,2	5,1	4	5,8	779	988	60	1,2	5	4	6	99,44	2,08	0,22
15	Уралит	УТ-70	1,2	5,25	4	5,8	785	1017	60	1,2	5	4	6	100,63	2,16	0,23
16	Уралит	У50	1,25	5,4	4	5,8	844	1009	60	1,2	5	4	6	103,51	2,35	0,23
17	НПГМ	А-75	1,25	5,1	4	5,8	689	1015	60	1,2	5	4	6	101,07	2,19	0,23
18	НПГМ	А-30	1,32	4,2	4	5,8	511	988	60	1,2	5	4	6	95,39	1,84	0,21
19	Фортис	Фортис	1,35	5,8	4	5,8	798	1050	60	1,2	5	4	6	111,90	2,97	0,25

Выводы

Применение ЭВВ в качестве средств инициирования и взрывания в карьерах позволит усовершенствовать процесс формирования скважинного заряда и уменьшить риски.

ЭВВ могут эффективно использоваться как для инициирования, так и для основного взрыва, что делает их многофункциональными. Это особенно актуально в условиях карьеров, где требуется высокая адаптивность к различным геологическим условиям. Использование одного типа ВВ для инициирования и подрыва позволяет сократить расходы на закупку и хранение различных видов взрывчатых веществ, что упростит логистику и уменьшит общие расходы на взрывные работы.

ЭВВ, как правило, обладают более высокой устойчивостью к внешним воздействиям, что снижает риск непреднамеренных взрывов. Изменение способа обращения с ВМ при формировании зарядов может положительно отразиться на повышении уровня безопасности при ведении БВР.

Физические характеристики промежуточных детонаторов существенно влияют на параметры детонационного процесса. Оптимизация массы, диаметра и начального импульса ПД является ключевой задачей для повышения эффективности взрывных работ в горнодобывающей промышленности. Необходимы дальнейшие исследования для разработки универсальных моделей, учитывающих взаимосвязь между этими параметрами и характеристиками взрывчатых веществ.

Список литературы

1. Юхансон К., Персон П., 1973. *Детонация взрывчатых веществ*: Пер. с англ. Москва: Мир, 352 с.
2. Кутуев В.А., Меньшиков П.В., Жариков С.Н., 2016. Анализ методов исследования детонационных процессов ВВ. *Проблемы недропользования*, № 3, (10), С. 78-87.
3. Sinitsyn V., Menshikov P., Kutuev V., 2018. Estimation of Influence of Explosive Characteristics of Emulsion Explosives on Shotpile Width, *E3S Web Conf., Volume 56, France, 2018, VII International Scientific Conference "Problems of Complex Development of Georesources"* (PCDG 2018), 01003, P. 5.
4. Колганов Е.В., Соснин В.А., 2007. Безопасность эмульсионных промышленных взрывчатых веществ. *Записки горного института*, Т.171, С.203-212.
5. Kramarczyk B., Pytlik M., Mertuszka P., Jaszcz K., Jarosz T., 2022. Novel Sensitizing Agent Formulation for Bulk Emulsion Explosives with Improved Energetic Parameters. *Materials*, 15(3), 900; P. 1-16.
6. Оника С.Г., Стасевич В.И., Кузьмич А.К., 2020. *Разрушение горных пород взрывом*: пособие для студентов специальности 1-51 02 01 «Разработка месторождений полезных ископаемых». Минск: БНТУ, 113 с.
7. Андреев Л.Ф., Беляев К.К., 1960. *Теория взрывчатых веществ*. Москва: Оборонгиз, 596 с.
8. Баум Ф.А., Орленко Л.П. и др., 1975. *Физика взрыва*. Под ред. К.П. Станюкович. Изд. 2, перераб. Москва: Изд-во «Наука», 704 с.
9. Кантор В.Х., 2022. Оценка работоспособности и определение оптимальных параметров скважинных зарядов эмульсионных взрывчатых веществ при взрыве в горных породах. *Проблемы недропользования*, № 3 (34). С. 14-26.
10. Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И., 1988. *Промышленные взрывчатые вещества*. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Недра, 358 с.
11. Баринов А.В., Раднер С.С., Репринцев В.А., Треушков И.В., Пасечник Ю.В., 2019. *Теория горения и взрыва*: Учебник. Химки: АГЗ МЧС России, 396 с.
12. Горинов С.А., 2020. *Инициирование и детонация эмульсионных взрывчатых веществ*. Под редакцией В.В. Адушкина. Йошкар-Ола: СТРИНГ, 214 с.

References

1. Yuxhanson K., Person P., 1973. Detonatsiya vzryvchatykh veshchestv [Detonation of explosive]: Per. s angl. Moscow: Mir, 352 p.
2. Kutuev V.A., Men'shikov P.V., Zharikov S.N., 2016. Analiz metodov issledovaniya detonatsionnykh protsessov VV [Analysis of methods for studying explosive detonation processes]. Problemy nedropol'zovaniya, № 3, (10), P. 78-87.
3. Sinitsyn V., Menshikov P., Kutuev V., 2018. Estimation of Influence of Explosive Characteristics of Emulsion Explosives on Shotpile Width, E3S Web Conf., Volume 56, France, 2018, VII International Scientific Conference "Problems of Complex Development of Georesources" (PCDG 2018), 01003, P. 5.
4. Kolganov E.V., Sosnin V.A., 2007. Bezopasnost' emul'sionnykh promyshlennykh vzryvchatykh veshchestv [Safety of emulsion industrial explosives]. Zapiski gornogo instituta, Vol.171, P.203-212.
5. Kramarczyk B., Pytlik M., Mertuszka P., Jaszcz K., Jarosz T., 2022. Novel Sensitizing Agent Formulation for Bulk Emulsion Explosives with Improved Energetic Parameters. Materials, 15(3), 900; P. 1-16.
6. Onika S.G., Stasevich V.I., Kuz'mich A.K., 2020. Razrushenie gornykh porod vzryvom: posobie dlya studentov spetsial'nosti 1-51 02 01 "Razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh" [Rock destruction by explosion: a manual for students of specialty 1-51 02 01 "Mining of mineral deposits"]. Minsk: BNTU, 113 p.
7. Andreev L.F., Belyaev K.K., 1960. Teoriya vzryvchatykh veshchestv [Theory of explosives]. Moscow: Oborongiz, 596 p.
8. Baum F.A., Orlenko L.P. i dr., 1975. Fizika vzryva [Physics of explosion]. Pod red. K.P. Stanyukovich. Izd. 2, pererab. Moscow: Izd-vo "Nauka", 704 p.
9. Kantor V.Kh., 2022. Otsenka rabotosposobnosti i opredelenie optimal'nykh parametrov skvazhinnykh zaryadov emul'sionnykh vzryvchatykh veshchestv pri vzryve v gornykh porodakh [Assessment of operability and determination of optimal parameters of borehole charges of emulsion explosives during an explosion in rocks]. Problemy nedropol'zovaniya, № 3 (34). P. 14-26.
10. Dubnov L.V., Bakharevich N.S., Romanov A.I., 1988. Promyshlennye vzryvchatye veshchestva [Industrial explosives]. 3-e izd., pererab. i dop. Moscow: Nedra, 358 p.
11. Barinov A.V., Radner S.S., Reprintsev V.A., Treushkov I.V., Pasechnik Yu.V., 2019. Teoriya gorenii i vzryva [Theory of burning and explosion]: Uchebnik. Khimki: AGZ MChS Rossii, 396 p.
12. Gorinov S.A., 2020. Initsirovanie i detonatsiya emul'sionnykh vzryvchatykh veshchestv [Initiation and detonation of emulsion explosives]. Pod redaktsiei V.V. Adushkina. Ioshkar-Ola: STRING, 214 p.



ОБОГАЩЕНИЕ

УДК 622.765

Драпей Анатолий Витальевич
младший научный сотрудник, лаборант,
Тихоокеанский государственный университет,
685035, г. Хабаровск,
ул. Тихоокеанская, д. 136
e-mail: 2021100489@pnu.edu.ru

Козловская Мария Максимовна
лаборант,
Тихоокеанский государственный университет
e-mail: 2021100489@pnu.edu.ru

Мисютинская Валерия Андреевна
преподаватель,
Тихоокеанский государственный университет,
e-mail: 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

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФЛОТАЦИОННЫХ РЕАГЕНТОВ ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ ЗОЛОТОСУЛЬФИДНЫХ РУД*

Аннотация:

В статье представлен сравнительный анализ флотационных реагентов для обогащения золотосульфидных руд месторождения Маломыр, расположенного в Амурской области. Руды данного месторождения характеризуются сложным вещественным составом, включающим сульфидные минералы, углистое вещество и тонкодисперсное золото, что создает значительные трудности при их флотационном обогащении. Целью работы является экспериментальное исследование флотационного обогащения с целью повышения извлечения золота в концентрат. Для достижения этой цели были поставлены задачи, включающие изучение влияния реагентных режимов и предварительной ультразвуковой обработки руды на эффективность флотации, а также разработку рациональной технологической схемы обогащения. В ходе исследования использовались различные реагенты, такие как собиратели, депрессоры и вспениватели, а также проводились эксперименты на механических флотомашинах. Результаты показывают, что углистое вещество и тонкодисперсное золото оказывают негативное влияние на процесс флотации, приводя к потерям золота в хвостах. Научная новизна работы заключается в комплексном исследовании влияния реагентных режимов и ультразвуковой обработки на показатели флотационного обогащения. Практическая значимость состоит в разработке эффективной технологической схемы, обеспечивающей высокое извлечение золота из руд месторождения Маломыр. Данная работа направлена на решение актуальной задачи повышения эффективности переработки золотосульфидных руд.

Ключевые слова: тонкодисперсное золото, углистое вещество, флотационное обогащение, реагентный режим, избирательное концентрирование, сульфидные минералы, технологические параметры.

DOI: 10.25635/2313-1586.2024.04.118

Drapey Anatoly V.
Junior Researcher, Laboratory Assistant,
Pacific National University,
685035 Khabarovsk,
136 Tikhookeanskaya Str.
e-mail: 2021100489@pnu.edu.ru

Kozlovskaya Maria M.
Laboratory Assistant,
Pacific National University
e-mail: 2021100489@pnu.edu.ru

Misyutinskaya Valeria A.
Lecturer,
Pacific National University
e-mail: 2021100489@pnu.edu.ru

Prokhorov Konstantin V.
Candidate of Technical Sciences,
Leading Researcher,
Institute of Mining, Far Eastern Branch of RAS,
685000 Khabarovsk, 51 Turgenev Str.
e-mail: 2021100489@pnu.edu.ru

COMPARATIVE ANALYSIS OF FLOTATION REAGENTS FOR THE BENEFICIATION OF GOLD-SULFIDE ORES

Abstract:

The paper presents a comparative analysis of flotation reagents for the beneficiation of gold-sulfide ores from the Malomyr deposit located in the Amur region. The ores from this deposit are characterized by a complex material composition that includes sulfide minerals, carbonaceous matter, and finely dispersed gold, which creates significant challenges during their flotation enrichment. The aim of the study is to experimentally investigate flotation beneficiation to improve gold recovery in the concentrate. To achieve this goal, tasks were set, including studying the influence of reagent regimes and preliminary ultrasonic treatment of the ore on flotation efficiency, as well as developing a rational technological scheme for enrichment. Various reagents such as collectors, depressants, and frothers were used in the research, along with experiments conducted on mechanical flotation machines. The results show that carbonaceous matter and finely dispersed gold negatively affect the flotation process, leading to gold losses in the tails. The scientific novelty of the work lies in the comprehensive study of the impact of reagent regimes and ultrasonic treatment on flotation beneficiation indicators. The practical significance consists in the development of an effective technological scheme that ensures high gold recovery from the ores of the Malomyr deposit. This work is aimed at solving the urgent problem of improving the efficiency of processing gold-sulfide ores.

Key words: fine gold, carbonaceous matter, flotation enrichment, reagent regime, selective concentration, sulfide minerals, technological parameters.

* Исследования проводились при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации в рамках ГЗ № FEME-2024-0006

Введение

Месторождение Маломыр является одним из крупных золоторудных месторождений Амурской области. Руды месторождения характеризуются сложным вещественным составом, включающим в себя сульфидные минералы, углистое вещество, а также тонкодисперсное золото, что затрудняет их эффективное извлечение традиционными методами обогащения.

Особенности вещественного состава руд месторождения Маломыр

Руды месторождения Маломыр относятся к золотосульфидному типу. Основными рудными минералами являются пирит, арсенопирит, халькопирит, реже встречаются сфалерит и галенит. Золото в рудах находится в тонкодисперсной форме, ассоциируя с сульфидами. Кроме того, в рудах присутствует значительное количество углистого вещества, которое также содержит тонкодисперсное золото. Наличие в рудах углистого вещества и тонкодисперсного золота существенно осложняет процесс их флотационного обогащения. Углистое вещество в рудах месторождения Маломыр обладает высокой природной флотуемостью, что приводит к его избирательному концентрированию в пенных продуктах флотации. Это, в свою очередь, ведет к потерям золота, которое ассоциировано с углистым веществом. Кроме того, адсорбция собирателей на поверхности углистого вещества снижает их эффективность в отношении сульфидных минералов, содержащих золото.

Тонкодисперсное золото в рудах месторождения Маломыр, ассоциированное как с сульфидными минералами, так и с углистым веществом, характеризуется низкой флотуемостью. Это приводит к потерям золота в хвостах флотации.

Таким образом, сложный вещественный состав руд месторождения Маломыр, включающий в себя сульфидные минералы, углистое вещество и тонкодисперсное золото, создает значительные трудности при их флотационном обогащении и требует тщательного подбора реагентных режимов и технологических параметров процесса.

Целью данной работы является экспериментальное исследование флотационного обогащения золотосульфидных руд месторождения Маломыр с целью повышения извлечения золота в концентрат.

Задачи исследования

1. Изучение влияния реагентных режимов (собиратели, депрессоры, вспениватели) на показатели флотационного обогащения.
2. Исследование влияния предварительной ультразвуковой обработки руды на эффективность флотации.
3. Разработка рациональной технологической схемы флотационного обогащения руд месторождения Маломыр.

Научная новизна работы заключается в комплексном исследовании влияния реагентных режимов и предварительной ультразвуковой обработки на показатели флотационного обогащения золотосульфидных руд месторождения Маломыр, характеризующихся сложным вещественным составом.

Практическая значимость работы состоит в разработке рациональной технологической схемы флотационного обогащения руд месторождения Маломыр, обеспечивающей высокое извлечение золота в концентрат.

Таким образом, данная работа направлена на решение актуальной научно-практической задачи повышения эффективности переработки золотосульфидных руд месторождения Маломыр.

Литературный обзор

Флотация является важным методом обогащения полезных ископаемых и активно применяется в горной и металлургической промышленности для разделения полез-

ных компонентов и пустой породы. В данной работе рассматриваются результаты исследований, посвященных флотации таких минералов, как касситерит и арсенопирит с акцентом на конкретных реагентах и их влиянии на эффективность процесса.

Касситерит, как основной источник олова, требует особого внимания к выбору реагентов для повышения его извлечения. В исследованиях, касающихся флотации касситерита из руд месторождения Депутатское, использовались такие реагенты, как ксантогенат натрия в качестве собирателя и серноокислый натрий в качестве депрессора. Эти реагенты обеспечивают высокую селективность флотации, при этом ксантогенат натрия способствует адгезии касситерита к пузырькам воздуха, в то время как серноокислый натрий подавляет флотацию нежелательных минералов, таких как кварц и полевой шпат [1, 4].

Также значительное влияние на флотацию касситерита оказала оптимизация pH раствора. Установлено, что при pH 7-9 эффективность извлечения касситерита значительно увеличивается, что связано с оптимальными условиями для взаимодействия реагентов [2]. В некоторых работах также подчеркивается роль дополнительно введенных активаторов, таких как хлористый никель, который улучшает селективность флотации [3].

Арсенопирит, находящийся в составе золотосодержащих руд, также исследовался с точки зрения использования различных флотационных реагентов. В работах, посвященных флотации арсенопирита, боковые реакции, происходящие между арсенопиритом и другими минералами, негативно влияют на общий выход золота. Использование собирателей, таких как ксантогенат и дитиокарбаматы, вместе с депрессорами, такими как известь и сульфаты, позволяет контролировать селективность флотации, снижая потери золота при обогащении [5, 6].

Исследования показали, что добавление кальцийсодержащих реагентов, таких как фосфат кальция, может улучшить расслоение арсенопирита и золота. Это действие связано с тем, что фосфат кальция увеличивает смачиваемость арсенопирита, помогая ему отделяться от других минералов [2]. Важно отметить, что комбинирование реагентов позволяет добиться более высоких показателей извлечения, благодаря чему можно рассматривать эффективные схемы флотации как многокомпонентные системы.

Флотация касситерита и арсенопирита также требует применения специфических технологий разделения. В исследованиях по разработке технологий разделения касситерита и арсенопирита была использована комбинация реагентов. В частности, использование ксантогената натрия для флотации касситерита и дитиокарбамата для флотации арсенопирита продемонстрировало возможность достижения селективного извлечения этих минералов в одностепенной флотомеханической установке [5]. Это подчеркивает важность не только правильного выбора реагентов, но и их взаимодействия в процессе флотации.

Совсем недавние исследования также акцентируют внимание на роли комплексообразователей. В работе, где рассматривались показатели флотации олова, было показано, что применение органических комплексообразователей, таких как хелатированные соединения, может существенно повысить селективность выделения касситерита, уменьшая уровень пирита в концентрате [6]. Эти взаимодействия также распространяются на флотомеханический процесс, в котором присутствие комплексообразователей помогает лучше контролировать уровень сгораемости минералов.

Обзор литературы показывает, что выбор конкретных флотационных реагентов, таких как ксантогенаты, дитиокарбаматы и комплексообразователи, имеет существенное влияние на эффективность флотации касситерита и арсенопирита. Подбор реагентов должен проводиться с учетом свойств перерабатываемого материала и условий процесса флотации. Будущие исследования должны сосредоточиться на улучшении технологий обогащения и повышении экологической безопасности процессов, что поз-

волит более эффективно использовать ресурсы и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду.

Оборудование и реагенты

1. Исследования проводились на пробе Рядовая 5 блок как на основной пробе со средним содержанием золота из трех представленных.

2. Лабораторные исследования выполнялись на механических флотомашинах 240 ФЛ с объемами камер 0,25, 1, 1,5 литра.

3. В качестве реагентов использовались:

– депрессоры: силикат натрия (жидкое стекло), кремнефтористый натрий, лигносульфат;

– собиратели: бутиловый ксантогенат калия, дитиофосфат натрия, дистилляты талловых масел, неонол;

– вспениватели: сосновое масло, Т-80.

4. Исследования включали 13 серий экспериментов, при этом результаты первых двух серий не приведены из-за плохой пробоподготовки.

5. Серии исследований включали две принципиальные схемы флотации (рис. 1):

– выведение углистого концентрата в голове процесса;

– депрессия углистого вещества.

6. Серии отличались реагентным режимом и количеством перечисток и концентратов.

7. Углистый концентрат в голове процесса выделялся по принципу «голодного» реагентного режима, чтобы максимально извлечь углистое вещество и снизить адсорбцию собирателя на свободном золоте или золоте в сростках.

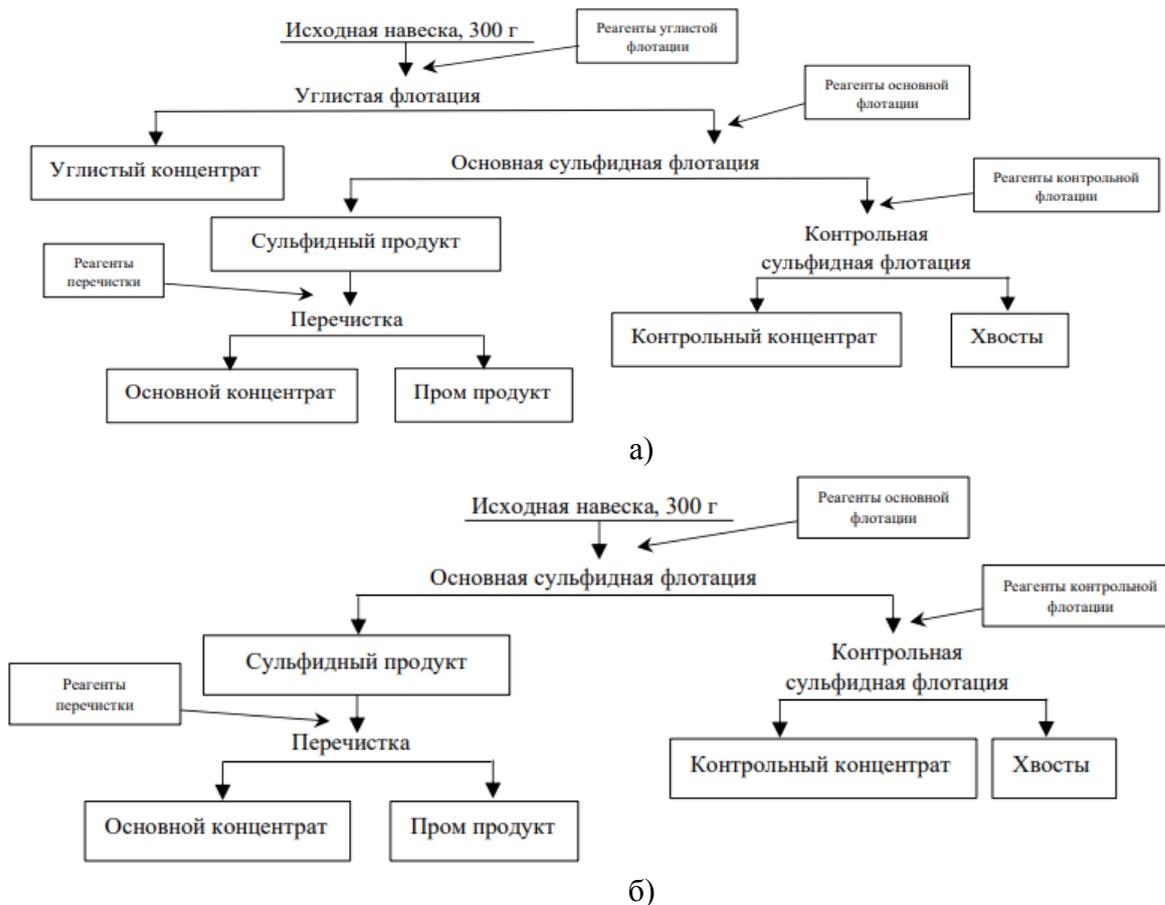


Рис. 1. Схемы флотации:

а) схема с углистой флотацией; б) схема без углистой флотации

Флотационные испытания золотосульфидных руд месторождения Маломир включали в себя 13 серий экспериментов, которые отличались реагентным режимом и количеством перемешиваний и концентратов. Исследования проводились на механических флотомашинах с использованием различных реагентов-депрессоров, собирателей и вспенивателей.

Основными показателями, по которым оценивались результаты обогащения, являются выход, содержание и извлечение золота, серебра, меди, железа, мышьяка и органического углерода в различных продуктах флотации.

Так как первые 2 серии эксперимента были неудачными, принято решение их в исследовании не учитывать.

Проведем сравнительный анализ флотационных реагентов для обогащения золотосульфидных руд на основе экспериментов серий 3 – 8.

Серия 3:

- в качестве модификатора использовался Na_2CO_3 в количестве 2,5 кг/т;
- в качестве депрессоров применялась смесь ЖС, КФН и КБТ в количестве 100, 100 и 50 г/т, соответственно;
- собиратели: ксантогенат калия (ХтК) в количестве 60 г/т и дитиофосфат натрия (ДТФ) в количестве 45 г/т;
- в качестве вспенивателя использовался Т-80 в количестве 50 г/т.

Серия 4:

- модификатор Na_2CO_3 в количестве 1,5 кг/т;
- депрессоры: ЖС, КФН и КБТ в количестве 100, 100 и 50 г/т, соответственно;
- собиратели: ХтК в количестве 80 г/т и ДТФ в количестве 50 г/т;
- вспениватель Т-80 в количестве 50 г/т.

Серия 5:

- модификатор Na_2CO_3 в количестве 1,5 кг/т;
- депрессоры: ЖС, КФН и КБТ в количестве 200, 200 и 100 г/т, соответственно;
- собиратели: ХтК в количестве 100 г/т и ДТФ в количестве 50 г/т;
- вспениватель Т-80 в количестве 50 г/т.

Серия 6:

- модификатор Na_2CO_3 в количестве 1,5 кг/т;
- депрессоры: ЖС, КФН и КБТ в количестве 200, 200 и 100 г/т, соответственно;
- собиратели: ХтК в количестве 100 г/т и ДТФ в количестве 30 г/т;
- вспениватель Т-80 в количестве 50 г/т.

Серия 7:

- углистая флотация: ДТМ в количестве 20 г/т, С.М. в количестве 30 г/т;
- основная флотация: модификатор Na_2CO_3 в количестве 1,5 кг/т, депрессоры ЖС, КФН и КБТ в количестве 200, 200 и 100 г/т, соответственно, собиратели ХтК в количестве 40 г/т и ДТФ в количестве 30 г/т.

Серия 8:

- углистая флотация: ДТМ в количестве 30 г/т, Т-80 в количестве 50 г/т;
- основная флотация: модификатор Na_2CO_3 в количестве 1,5 кг/т, депрессоры ЖС, КФН и КБТ в количестве 200, 200 и 100 г/т, соответственно, собиратель ХтК в количестве 150 г/т, вспениватели С.М. и Т-80 в количестве 50 г/т каждый.

Сравнительный анализ:

1. Модификатор Na_2CO_3 использовался во всех сериях в количестве 1,5 – 2,5 кг/т, что является стандартным для золотосульфидных руд.

2. Депрессоры ЖС, КФН и КБТ применялись во всех сериях, при этом их количество варьировалось от 100+100+50 г/т до 200+200+100 г/т. Увеличение количества депрессоров, вероятно, было направлено на подавление флотации пустой породы и углистого вещества.

3. Собиратели ХтК и ДТФ использовались во всех сериях, при этом их количество также варьировалось. Наиболее эффективным сочетанием, по-видимому, является ХтК в количестве 80–100 г/т и ДТФ в количестве 30–50 г/т.

4. Вспениватели Т-80 и С.М. применялись в различных сериях. Т-80 показал себя более эффективным, обеспечивая стабильную пену и лучшее извлечение золота.

5. Серии 7 и 8 включали предварительную углистую флотацию с использованием ДТМ и Т-80 или С.М. Это позволяло удалить углистое вещество перед основной флотацией, что, вероятно, способствовало улучшению показателей обогащения.

Таким образом, наиболее эффективная комбинация реагентов для флотационного обогащения золотосульфидных руд, по результатам экспериментов серий 3–8, включает:

- модификатор: Na_2CO_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.

Наиболее эффективные режимы были выявлены в сериях 7–8, где применялась углистая флотация в сочетании с оптимизированными концентрациями депрессоров, собирателей и вспенивателей в основной флотации.

Список литературы

1. Кузнецов Ю.А., Ушаков Д.В., Кузнецов А.А., 2018. Исследование флотации касситерита из руд месторождения Депутатское. *Обогащение руд*, № 5, С. 3-9.
2. Кузнецов А.А., Кузнецов Ю.А., Ушаков Д.В., 2019. Исследование флотации арсенопирита из золотосодержащих руд. *Обогащение руд*, № 4, С. 3-8.
3. Кузнецов А.А., Кузнецов Ю.А., Ушаков Д.В., 2020. Разработка технологии флотационного обогащения золотосодержащих руд месторождения Маломыр. *Обогащение руд*, № 3, С. 3-9.
4. Кузнецов Ю.А., Ушаков Д.В., Кузнецов А.А., 2018. Исследование флотации олова из руд месторождения Депутатское. *Обогащение руд*, № 6, С. 3-8.
5. Кузнецов А.А., Кузнецов Ю.А., Ушаков Д.В., 2019. Разработка технологии разделения касситерита и арсенопирита методом флотации. *Обогащение руд*, № 5, С. 3-9.
6. Газалеева Г.И., Назаренко Л.Н., Дмитриева Е.Г., 2022. Обоснование выбора флотационных реагентов для флотации олова с использованием измерения дзета-потенциала. *Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: Материалы XXVII Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XX Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 07–08 апреля 2022 года*. Екатеринбург: ИП Русских А.В., С. 12-18. EDN СРУАКА.
7. Chen, J. hua, Liu, J., & Li, Y. qiong., 2018. Flotation separation of pyrite from arsenopyrite in the presence of oxidants. *Separation Science and Technology*, 54(17), 2933–2942. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1554685>
8. Huihui Zhou, Guijian Liu, Liqun Zhang, Chuncai Zhou, 2021. Mineralogical and morphological factors affecting the separation of copper and arsenic in flash copper smelting slag flotation beneficiation process. *Journal of Hazardous Materials*, Volume 401, 123293 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123293>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389420312826>)
9. Zhao G., Zhu D., 2021. Enhanced Flotation Separation of Cassiterite from Calcite Using Metal-Inorganic Complex Depressant. *Minerals*, 11, 880. <https://doi.org/10.3390/min11080880>
10. Limin Zhang, Sultan an Khoso, Mengjie Tian, Wei Sun, 2021. Cassiterite recovery from a sulfide ore flotation tailing by combined

gravity and flotation separations. *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, 57(1), 206-215/ISSN 1643-1049/ URL:<http://www.journalssystem.com/ppmp/>

11. Matveeva T.N., Chanturiya, V.A., Getman V.V., Gromova N.K., Ryazantseva M.V., Karkeshkina A. Y., Minaev V.A., 2020. The Effect of Complexing Reagents on Flotation of Sulfide Minerals and Cassiterite from Tin-Sulfide Tailings. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 43(3), 346–359. <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1858080>

12. Xiaoping Huang, Kaihua Huang, Yun Jia, Shuai Wang, Zhanfang Cao, Hong Zhong, 2019. Investigating the selectivity of a xanthate derivative for the flotation separation of chalcopyrite from pyrite. *Chemical Engineering Science*, Volume 205, Pages 220-229, ISSN 0009-2509, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.04.051>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250919304221>)

References

1. Kuznetsov Yu.A., Ushakov D.V., Kuznetsov A.A., 2018. Issledovanie flotatsii kassiterita iz rud mestorozhdeniya Deputatskoe [Investigation of cassiterite flotation from ores of the Deputatskoye deposit]. *Obogashchenie rud*, № 5, P. 3-9.

2. Kuznetsov A.A., Kuznetsov Yu.A., Ushakov D.V., 2019. Issledovanie flotatsii arsenopirita iz zolotosoderzhashchikh rud [Investigation of arsenopyrite flotation from gold-bearing ores]. *Obogashchenie rud*, № 4, P. 3-8.

3. Kuznetsov A.A., Kuznetsov Yu.A., Ushakov D.V., 2020. Razrabotka tekhnologii flotatsionnogo obogashcheniya zolotosoderzhashchikh rud mestorozhdeniya Malomyr [Development of technology for flotation enrichment of gold-bearing ores field of Malomyr]. *Obogashchenie rud*, № 3, P. 3-9.

4. Kuznetsov Yu.A., Ushakov D.V., Kuznetsov A.A., 2018. Issledovanie flotatsii olova iz rud mestorozhdeniya Deputatskoe [Study of tin flotation from ores of Deputatskoye deposit]. *Obogashchenie rud*, № 6, P. 3-8.

5. Kuznetsov A.A., Kuznetsov Yu.A., Ushakov D.V., 2019. Razrabotka tekhnologii razdeleniya kassiterita i arsenopirita metodom flotatsii [Development of technology for separation of cassiterite and arsenopyrite by flotation]. *Obogashchenie rud*, № 5, P. 3-9.

6. Gazaleeva G.I., Nazarenko L.N., Dmitrieva E.G., 2022. Obosnovanie vybora flotatsionnykh reagentov dlya flotatsii olova s ispol'zovaniem izmereniya dzeta-potentsiala [Justification of the choice of flotation reagents for tin flotation using zeta potential measurement]. *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogenogo syr'ya: Materialy XXVII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, provodimoi v ramkakh XX Ural'skoi gornopromyshlennoi dekady, Ekaterinburg, 07–08 aprelya 2022 goda. Ekaterinburg: IP Russkikh A.V.*, P. 12-18. EDN CPYAKA.

13. Chen, J. hua, Liu, J., & Li, Y. qiong., 2018. Flotation separation of pyrite from arsenopyrite in the presence of oxidants. *Separation Science and Technology*, 54(17), 2933–2942. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1554685>

14. Huihui Zhou, Guijian Liu, Liqun Zhang, Chuncai Zhou, 2021. Mineralogical and morphological factors affecting the separation of copper and arsenic in flash copper smelting slag flotation beneficiation process. *Journal of Hazardous Materials*, Volume 401, 123293 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123293>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389420312826>)

15. Zhao G., Zhu D., 2021. Enhanced Flotation Separation of Cassiterite from Calcite Using Metal-Inorganic Complex Depressant. *Minerals*, 11, 880. <https://doi.org/10.3390/min11080880>

16. Limin Zhang, Sultan an Khoso, Mengjie Tian, Wei Sun, 2021. Cassiterite recovery from a sulfide ore flotation tailing by combined gravity and flotation separations. *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, 57(1), 206-215/ISSN 1643-1049/ URL:<http://www.journalssystem.com/ppmp/>

17. Matveeva T.N., Chanturiya, V.A., Getman V.V., Gromova N.K., Ryazantseva M.V., Karkeshkina A. Y., Minaev V.A., 2020. The Effect of Complexing Reagents on Flotation of Sulfide Minerals and Cassiterite from Tin-Sulfide Tailings. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 43(3), P. 346–359. <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1858080>

18. Xiaoping Huang, Kaihua Huang, Yun Jia, Shuai Wang, Zhanfang Cao, Hong Zhong, 2019. Investigating the selectivity of a xanthate derivative for the flotation separation of chalcopyrite from pyrite. *Chemical Engineering Science*, Volume 205, Pages 220-229, ISSN 0009-2509, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.04.051>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250919304221>)



НОВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 622.1:004.65

DOI: 10.25635/2313-1586.2024.04.127

Ногин Святослав Александрович
младший научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
620075 г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: nsa@igduran.ru

Nogin Svyatoslav A.
Junior Researcher,
Institute of Mining UB RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: nsa@igduran.ru

ОРГАНИЗАЦИЯ ДАТАСЕТА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МАРКШЕЙДЕРСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ*

ON THE ISSUES OF ORGANIZING THE SURVEY DATA

Аннотация:

В связи с развитием средств автоматизации в сфере обработки и анализа данных геодезических наблюдений возрастает значение того, в каких форматах представлены используемые массивы данных и какие средства предоставляют базы данных для операций над ними. В статье рассматривается случай наземной наблюдательной станции и приводится разработка для него формата хранения данных на основе выбранной нереляционной (NoSQL) модели баз данных – расширяемых хранилищ записей. Описано объединение данных исходно различных форматов в единый датасет. Показано, как в полученном наборе данных реализуется логическая модель данных, принятая в расширяемых хранилищах записей. Приведен процесс реализации этой модели средствами табличного процессора на примере данных по Сарановскому и Северопесчанскому месторождениям.

Ключевые слова: датасет, маркшейдерские наблюдения, данные маркшейдерских наблюдений, расширяемые хранилища записей, хранение данных, автоматизированная обработка данных, базы данных.

Abstract:

In connection with the development of automation in the field of processing and analysis of geodetic observation data, the importance of the formats in which the used data arrays are represented and also the means of providing databases for operations on them. The paper considers the case of a ground observation station and presents the development of a data storage format based on a selected non-relational (NoSQL) database model, which is Wide Column Stores. The merging of data in initially different formats into a single dataset is described. It is shown how the logical data model adopted in wide column stores is realized in the obtained dataset. The process of realization of this model by means of a table processor on the examples of data on Saranovskoye and Severopeschanskoye deposits are given.

Key words: dataset, surveying observations, surveying data, wide column stores, data storage, automated data processing, databases.

Состояние проблемы

В ходе работы с геодезическими данными, являющимися результатами традиционных методов измерений – нивелирования и дальномерных измерений, на всех ее этапах (накопления, обработки, анализа данных и использования полученных результатов) происходит активное внедрение средств автоматизации, обусловленное как развитием применяемых при обработке и анализе ЭВМ и программного обеспечения (ПО), такого как геоинформационные системы (ГИС), так и распространением средств автоматических измерений, а зачастую и возрастающими требованиями к объемам осуществляемого мониторинга.

В целях мониторинга, постобработки и анализа результатов геодезических измерений разработаны различные программные комплексы. Они предоставляют множество возможностей: запись в режиме реального времени данных, поступающих с геодезических и геотехнических датчиков, выявление выбросов в них, определение предельно допустимых значений измеренных параметров (например, смещений при сборе данных с тахеометров или наклонов для инклинометров), 2D- и 3D-визуализация векторов смещений и величин деформаций, определение трендов деформаций и прогнозирование на их

* Статья подготовлена в рамках Госзадания №075-00412-22 ПР, тема 3 (2022-2024) (FUWE-2022-0003), рег. № 1021062010536-3-1.5.1.

основе. Наличие доступа к исходным по отношению к дальнейшей обработке данным обеспечивает корректное выполнение запросов конечного пользователя.

Примерами автоматизации могут служить обработка баз данных тахеометрической съемки [1] и организация базы данных и работа с ней средствами программы Geomarks [2] (разработка ОАО «Атомэнергопроект»), в которой формируется база данных геодезического мониторинга с данными по вертикальным и горизонтальным смещениям на полигонах АЭС, а также аналогичными данными по геодезическим знакам, заложенным в охраняемых зданиях, сооружениях и технологическом оборудовании АЭС. В Geomarks проводится анализ целостности данных в базе данных, возможна ее нормализация (обработка выбросов, интерполяция пропущенных значений, слияние временных рядов). Сама база данных ориентирована на работу с данными площадных измерений.

Аналізу больших данных на горных предприятиях также посвящены работы [3, 4], в которых предлагается схема формирования базы данных и взаимодействия искусственного интеллекта (ИИ) с данными для оценки состояния горного предприятия, однако отсутствуют примеры реализации всей предложенной схемы и ее внедрения в современную практику.

Таким образом, несмотря на наличие различных представлений данных маркшейдерских наблюдений для функций хранения, редактирования и автоматизированной обработки в ПО, для случая поверхностной наблюдательной станции сохраняется необходимость разработать формат набора данных, учитывающий то, что такая станция представляет собой сеть профилей. Помимо обеспечения перечисленных функций, также ставится задача поддержки совместимости данных текущих наблюдений с архивными данными отчетов по наблюдательным станциям указанного типа, что позволило бы проводить анализ за весь срок наблюдений, работая с единственным набором данных для выбранного объекта мониторинга.

Выбор формата хранения

В последние годы, помимо получивших широкое распространение реляционных БД, в практику вошли и другие типы БД, которые стали известны как NoSQL (сокращение от «not only SQL») [5]. Среди них, в частности, выделяют расширяемые хранилища записей (ширококолоночные хранилища записей, Wide Column Stores, WCS). Данные в них можно представить как таблицы, включающие строки с уникальными идентификаторами и столбцы (рис.1, рис.2). Основная особенность этой модели заключается в том, что одной строке может соответствовать произвольное множество столбцов, которые могут быть объединены в семейства столбцов. Данные представляются как пары «ключ-значение», где значение соответствует составному ключу, состоящему из ключа строки, имен семейства столбцов и столбца, а также необязательной временной метки. Внутри поля таблицы допустимо записывать несколько различных значений, отличающихся временными метками [5, 6, 7]. Можно показать, что WCS обладают всеми необходимыми признаками БД.

Здесь необходимо оговорить то, что существуют различные подходы к определению «базы данных» (БД) [8]. Приведем некоторые из них.

Так, согласно первому подходу, БД является массивом информации о какой-либо сфере деятельности, предназначенной для коллективного использования и допускающей компьютерную обработку [9]. В соответствии с другим, она должна представлять собой совокупность взаимосвязанных данных при минимальной избыточности, допускающей их использование оптимальным образом для одного или нескольких приложений в определенной предметной области [10]. В рамках данного определения БД является множеством связанных файлов. Есть точка зрения, что БД – это совокупность данных, организованных по определенным правилам, предусматривающим общие принципы описания, хранения и манипулирования данными, независимая от прикладных программ [11]. БД

может пониматься как контейнер файлов, предоставляющий операции добавления, изменения и удаления данных и файлов [12]. Наконец, может быть дано следующее определение [13]: БД являет собой совокупность сведений (о реальных объектах, процессах и т.п.), относящихся к определенной теме или задаче, организованную таким образом, чтобы обеспечить удобное представление как совокупности в целом, так и любой ее части.

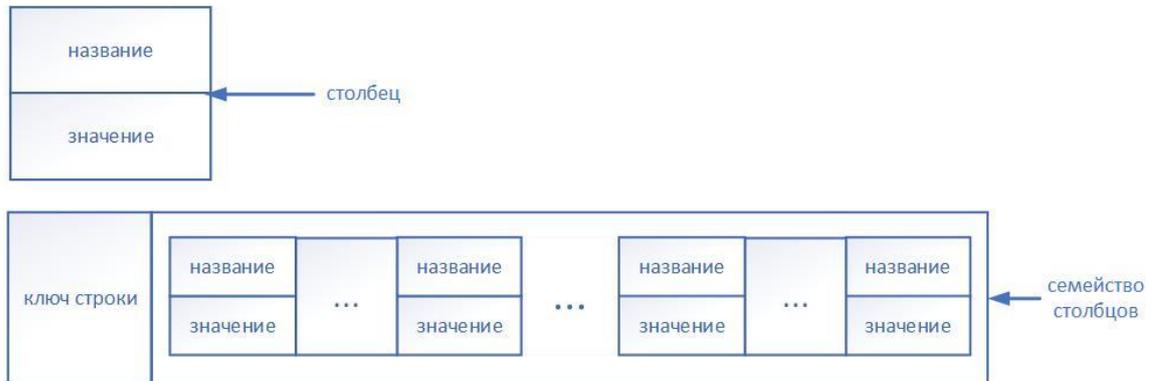


Рис.1. Схема модели WCS

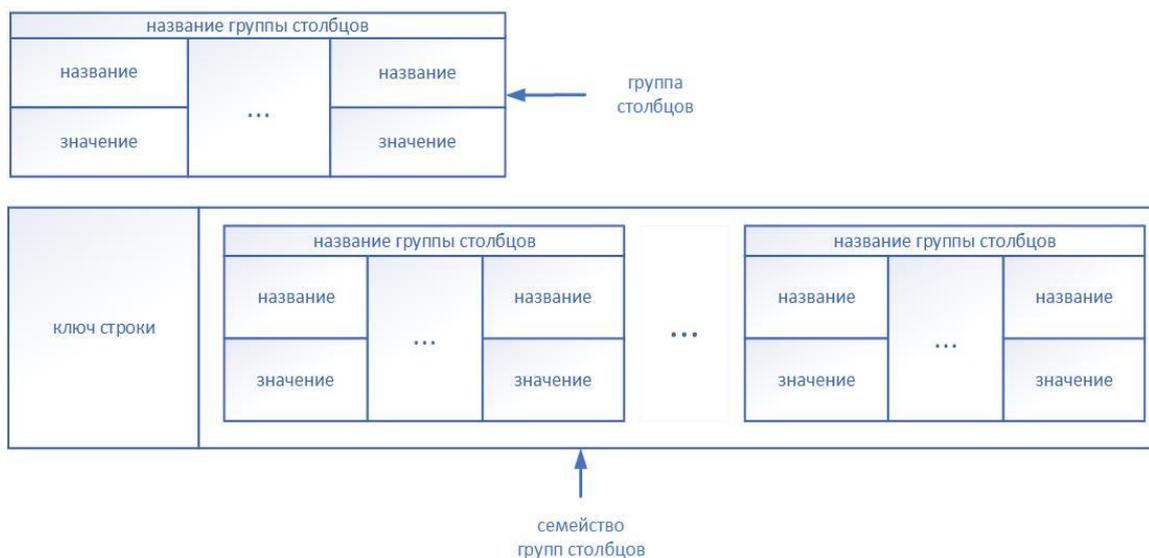


Рис.2. Схема модели WCS с хранением семейств столбцов

Из указанного выделяются следующие общие признаки баз данных: наличие упорядоченной структуры совокупности данных, построение БД согласно заданной системе правил, хранение и обработка данных в ней средствами ПО на ЭВМ, что подразумевает выбор определенного формата файла. Таким образом, легко видеть, что WCS могут рассматриваться как базы данных и, как показано далее, именно на их основе возможно предложить формат массива данных для рассматриваемого случая поверхностной наблюдательной станции. Благодаря наличию ключа у каждой строки возможно учесть порядок расположения реперов в каждом профиле. Кроме того, допустимы как пустые поля, так и значения разных типов, что позволяет упростить учет пропусков наблюдений.

Поскольку для анализа данных о сдвигении первостепенна интеграция архивных неоцифрованных данных с данными текущих наблюдений, возможно отказаться от специализированных NoSQL систем управления базой данных (СУБД), также вследствие того что обеспечиваемые ими возможности, такие как многопользовательский и удален-

ный доступ, поддержка требований ACID в рамках транзакций, обработка больших объемов данных и прочие, в рамках решаемых задач не являются необходимыми. Использование структуры данных из WCS при создании датасета средствами табличного процессора позволяет добиться такой интеграции, осуществлять хранение и добавление данных и обеспечить возможности дальнейшей обработки и анализа, которые решаются с помощью инструментов работы с электронными таблицами, такими как программные библиотеки `openpyxl` и `Pandas`.

Практическая реализация датасета

С учетом упомянутых требований и современной практики обработки результатов маркшейдерских съемок можно предложить следующий процесс построения датасета (на примере применения табличного процессора Microsoft Excel).

Данными, получаемыми после камеральной обработки данных геодезического мониторинга, являются высотные отметки реперов и длины интервалов между реперами в профиле. Важно заметить, что ведомости наблюдений архивных отчетов также содержат этот набор данных, в силу чего можно рассматривать его как минимально необходимый. При этом данные архивных документов должны быть обработаны, чтобы их можно было рассматривать как часть датасета. Остальные параметры, служащие для оценки процесса сдвижения – оседания, горизонтальные и вертикальные деформации – вычисляются на основе этого набора.

Для хранения набора данных по выбранному объекту создается книга Excel, каждой профильной линии отводится лист книги. В каждом листе содержатся (рис. 3)

- идентификатор репера – натуральное число, уникальным образом в рамках создаваемой базы определяющее репер. Это позволяет рассматривать идентификатор как ключ строки;
- наименование репера, которое в связи с утратами и восстановлениями реперов может повторяться;
- группа столбцов координат x, y ;
- две группы колонок d_n, h_n дистанций и высотных отметок, где d – колонка дистанций; h – высота над уровнем моря; n – номер серии; в случае отсутствия замеров или данных по ним одна из колонок может оставаться пустой. В каждой группе количество столбцов зависит от числа проведенных серий;
- строка дат наблюдений, записанных в соответствующих столбцах d_n, h_n ;
- строки данных, заполняемых в порядке увеличения расстояния от начала профиля при заложении репера: в каждой строке с идентификатором репера записывается его высота для указанной серии наблюдений, между строками высот – строки с дистанциями.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	id	name	x	y	d0	h0	d1	h1	d2	h
2						07.1979		1980		1
3	1	OP1				442,317		442,317		
4					52,963		52,958		52,958	
5	2	OP2				446,039		446,039		
6					56,064		56,054		56,041	
7	3	OP3	603 101,0	6 492 927,6		450,817		450,817		
8					49,599		49,604		49,589	
9	4	1	603 068,2	6 492 890,4		454,587		454,587		
10					20,893		20,890			
11	5	2				456,349		456,351		
12					25,019		25,014		45,892	
13	6	3	603 037,0	6 492 856,7		458,279		458,281		

Рис. 3. Таблица с данными наблюдений (фрагмент)

Необходимо учитывать наличествующую информацию о повреждениях реперов, чтобы отделить движения массива от подвижек реперов, им не вызванных. Решение этой проблемы также можно осуществить средствами БД: создается вторая книга Excel, содержащая идентификаторы для однозначного отождествления реперов, их наименования, годы существования по наличным данным, колонку сведений о повреждениях и утратах реперов с указанием дат этих событий, что позволяет внести соответствующие поправки в ходе дальнейшего анализа (рис.4).

Отсутствие требований атомизации атрибутов в рамках WCS позволяет при этом перечислять разнотипные данные.

	идентификаторы	реперы	годы существования		пометки
строки данных	id	name	год	последняя фиксация	замечание
1					
2	72	ОР-1а	2006		не найден (2009–2012)
3	44	ОР-1	1979		не найден (2020)
27	73	19	2006		
28	66	20	1979	1980	уничтожен строительством емкостей резервуара
29	67	21	1979	1980	уничтожен строительством емкостей резервуара
30	74	ОР4	2006	2007	
31	68	22	1979	1993	не найден (1984, 1987–1990), погнут (1988)
32	77	ОР4	2013	2018	
33	75	ОР5	2006	2018	
34	76	ОР6	2006	2019	
35	69	ОР-4	1979	1993	
36	70	ОР-5	1979	1993	не найден (1987), без дистанции (1990)
37	71	ОР-6	1979	1993	не найден (1987–1990)

Рис. 4. Второй файл БД (фрагмент)

Отличием модели данных в построенном датасете от модели WCS является то, что для отдельной колонки допустимы объединения разных строк – в случае записи дистанции, измеренной для реперов, между которыми ранее или позднее выбранной даты были заложены другие реперы. Это позволяет наглядно проследить изменения в составе профильной линии с течением времени, сохраняя неизменной структуру датасета.

Для заполнения датасетов по предложенной схеме были выбраны два объекта: Северопесчанское и Сарановское месторождения. Схема рабочего процесса над данными по этим объектам с использованием построенных датасетов представлена на рис. 5.

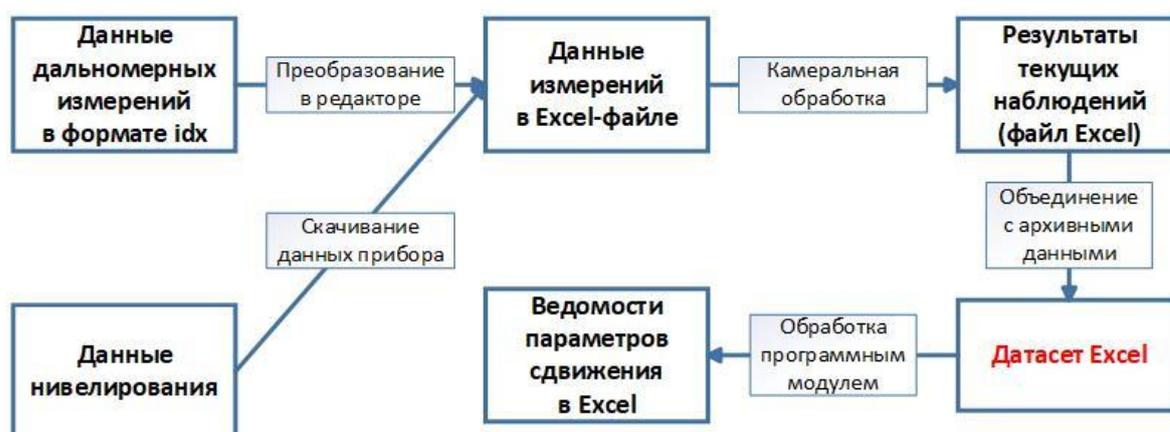


Рис. 5. Интеграция процессов над данными в рамках табличного процессора

Данные по Сарановскому месторождению включают период 1979 – 2023 гг. (с учетом дополнения новыми данными) по семи наземным профильным линиям, профилю на территории промплощадки, специальным наблюдательным станциям, включающим стеновые реперы для охраняемых зданий. Для Северопесчанского месторождения

взяты наблюдения последних лет по сохранившимся профильным линиям. По предложенной схеме для выбранных объектов созданы наборы данных, удобные как для заполнения и последующего редактирования оператором, так и для дальнейших обработки и анализа программными средствами, что повышает эффективность их использования [1], а кроме того, при необходимости, упрощает импорт данных датасета в специализированную СУБД, поддерживающую расширяемые хранилища записей.

Заключение

Согласно разработанной на основе логической модели данных, принятой в базах данных WCS (wide column stores, расширяемые хранилища записей), методике построены датасеты, содержащие обработанные данные маркшейдерских наблюдений по Сарановскому месторождению хромитов и Северопесчанскому железорудному месторождению [14, 15]. Непосредственно на их основе построены ведомости, отвечающие требованиям нормативных документов, и матричные диаграммы параметров сдвижения, что позволяет провести интеграцию рабочих процессов с данными наблюдений, как представлено на рис. 5. Это позволяет улучшить представление о развитии процесса сдвижения и получить данные для дальнейшего анализа.

Список литературы

1. Ребрин Е. Ю., 1993. Представление и обработка данных маркшейдерских съемок для построения планов горных работ на персональных компьютерах. *Известия Уральского государственного горного университета*, № 3, С. 110 – 116.
2. Веселов В.В., Сячинов А.Н., Широков В.В., Онищенко Д.Н., 2020. Программный комплекс *GeoMarks* : программа для ЭВМ. № рег. 2020660055: дата рег.: 26.08.2020: дата публ. 26.08.2020. Бюл. № 9. АО «АТОМ-ЭНЕРГОПРОЕКТ». URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_43965872_47766549.PDF (дата обращения: 20.05.2024).
3. Ческидов В.В., 2017. Современные задачи комплексного мониторинга состояния горнотехнических объектов. *Сергеевские чтения. Выпуск 19. Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых*. Москва: РУДН, 590 с.
4. Ческидов В.В., Маневич А.И., Липина А.В., 2019. Получение и анализ больших данных в практике мониторинга состояния горнотехнических сооружений. *Горная промышленность*, № 2 (144), С. 86 – 88.
5. Кузнецов С.Д., Посконин А.В., 2013. Распределенные горизонтально масштабируемые решения для управления данными. *Труды Института системного программирования РАН*, Т. 24, С. 327– 358.
6. Wiese L., Waage T., Brenner M., 2019. CloudDBGuard: A Framework for encrypted data storage in NoSQL Wide Column Stores. *Data and Knowledge Engineering*, Vol. 126, P. 101732.
7. Chen J.-K., Lee W.-Z., 2020. The Transformation of Relational Database to Wide Column Store Database. *International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)*, Taichung City, Taiwan, 2020, pp. 384-386, doi: 10.1109/IS3C50286.2020.00105.
8. Воройский Ф.С., 2006. *Информатика. Энциклопедический систематизированный словарь-справочник: введение в современные информационные и телекоммуникационные технологии в терминах и фактах*. Москва: Физматлит, 945 с.
9. Зафиевский А.В., Короткин А.А., Лататуев А.Н., 2012. *Базы данных: учебное пособие*. Ярославль: Ярославский государственный университет имени П. Г. Демидова, 164 с.
10. Бураков П.В., Петров В.Ю., 2010. *Введение в системы баз данных*. Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 129 с.

11. Карпова И.П., 2020. *Базы данных*: Учебное пособие. Санкт-Петербург: Питер, 240 с.
12. Дейт К. Дж., 2005. *Введение в системы баз данных*. 8-е издание, пер. с англ. Москва: Издательский дом "Вильямс", 1328 с.
13. Михеева В.Д., Харитоновна И.А., 2004. *Microsoft® Access 2003*. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 1072 с.
14. 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: опублик. 05.07.2023 / 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. EDN KIBLDT.
15. *Данные наблюдений за процессом сдвижения на Главном Сарановском месторождении хромитов за период 1979–2021 гг.*: база данных: свидетельство о государственной регистрации № 2022622821: дата 10.11.2022 / Усанов С.В., Ногин С.А., Коновалова Ю.П., Панжин А.А., Харисова О.Д., Усанова А.В., Панжина Н.А., Прошин В.А., Владимиров Л.С.; ИГД УрО РАН. https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=DB&DocNumber=2022622821&TypeFile=html (дата обращения: 02.08.2024 г.).

References

1. Rebrin E. Yu., 1993. Predstavlenie i obrabotka dannykh marksheiderskikh s'emok dlya postroeniya planov gornykh работ na personal'nykh komp'yuterakh [Representation and processing of surveying data for building mining plans on personal computers]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, № 3, P. 110 – 116.
2. Veselov V.V., Syachinov A.N., Shirovok V.V., Onishchenko D.N., 2020. Programmnyi kompleks GeoMarks: programma dlya EVM . [Program complex GeoMarks: computer program]. № reg. 2020660055: data reg.:26.08.2020: data publ. 26.08.2020. *Byul. № 9. АО "АТОМ-ENERGOPРОЕКТ"*. URL:https://www.elibrary.ru/download/elibrary_43965872_47766549.PDF (data obrashcheniya: 20.05.2024).
3. Cheskidov V.V., 2017. Sovremennye zadachi kompleksnogo monitoringa sostoyaniya gornotekhnicheskikh ob"ektov [Current tasks of complex monitoring of the state of mining objects]. *Sergeevskie chteniya. Vypusk 19. Geoekologicheskaya bezopasnost' razrabotki mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh*. Moscow: RUDN, 590 p.
4. Cheskidov V.V., Manevich A.I., Lipina A.V., 2019. Poluchenie i analiz bol'shikh dannykh v praktike monitoringa sostoyaniya gornotekhnicheskikh sooruzhenii [Obtaining and analyzing big data in the practice of monitoring the state of mining structures]. *Gornaya promyshlennost'*, № 2 (144), P. 86 – 88.
5. Kuznetsov S.D., Poskonin A.V., 2013. Raspredelemnnye gorizonta'l'no masshtabiruemye resheniya dlya upravleniya dannymi [Distributed horizontally scalable solutions for data management]. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN*, Vol. 24, P. 327– 358.
6. Wiese L., Waage T., Brenner M., 2019. CloudDBGuard: A Framework for encrypted data storage in NoSQL Wide Column Stores. *Data and Knowledge Engineering*, Vol. 126, P. 101732.
7. Chen J.-K., Lee W.-Z., 2020. The Transformation of Relational Database to Wide Column Store Database. *International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)*, Taichung City, Taiwan, 2020, pp. 384-386, doi: 10.1109/IS3C50286.2020.00105.
8. Voroiiskii F.S., 2006. *Informatika. Entsiklopedicheskii sistematizirovanniy slovar'-spravochnik: vvedenie v sovremennye informatsionnye i telekommunikatsionnye tekhnologii*

v terminakh i faktakh [Informatics. Encyclopedic systematized dictionary-reference: introduction to modern information and telecommunication technologies in terms and facts]. Moscow: Fizmatlit, 945 p.

9. Zafievskii A.V., Korotkin A.A., Latatuev A.N., 2012. Bazy dannykh: uchebnoe posobie [Databases: Study guide]. Yaroslavl': Yaroslavskii gosudarstvennyi universitet imeni P. G. Demidova, 164 p.

10. Burakov P.V., Petrov V.Yu., 2010. Vvedenie v sistemy baz dannykh [Introduction to database systems]. Sankt-Peterburg: SPbGU ITMO, 129 p.

11. Karpova I.P., 2020. Bazy dannykh: Uchebnoe posobie [Databases: Study guide]. Sankt-Peterburg: Piter, 240 p.

12. Deit K. Dzh., 2005. Vvedenie v sistemy baz dannykh [Introduction to database systems]. 8-e izdanie, per. s angl. Moscow: Izdatel'skii dom "Vil'yame", 1328 p.

13. Mikheeva V.D., Kharitonova I.A., 2004. Microsoft® Access 2003. Sankt-Peterburg: BKhV-Peterburg, 1072 p.

14. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh № 2023622239 Rossiiskaya Federatsiya. Dannye nablyudenii za protsessom sdvizheniya na Severopeschanskom mestorozhdenii khromitov za 2021–2022 gg. [Data of observations of the shear process at Severopeschansky 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. 1. EDN KIBLDT.

15. Dannye nablyudenii za protsessom sdvizheniya na Glavnom Saranovskom mestorozhdenii khromitov za period 1979–2021 gg. [Data of observations of the shear process at the Main Saranovskoye chromite deposit for the period 1979 – 2021]: baza dannykh: svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii № 2022622821: data 10.11.2022 / Usanov S.V., Nugin S.A., Konovalova Yu.P., Panzhin A.A., Kharisova O.D., Usanova A.V., Panzhina N.A., Proshin V.A., Vladimirov L.S.; IGD UrO RAN. https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB= DB&DocNumber=2022622821&TypeFile=html (data obrashcheniya: 02.08.2024 g.).

УДК 622.83:550.3

Далатказин Тимур Шавкатович

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией технологии снижения
риска катастроф при недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: 9043846175@mail.ru

Зуев Павел Игоревич

научный сотрудник,
лаборатория технологии снижения риска ката-
строф при недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: zuev@igduran.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭМАНАЦИОННОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК*

Аннотация:

Представлены результаты начального этапа экспериментальных исследований возможности применения радонометрии для выявления и оконтуривания подземных горных выработок на подработанных территориях. Для обеспечения безопасности строительства и эксплуатации объектов недропользования на подработанных горными работами территориях необходима диагностика геомеханического состояния подстилающего горного массива – выявление и оконтуривание участков, дезинтегрированных в результате сдвижения горных пород. Оптимальным решением данной задачи является использование геофизических методов. Предпосылками для проведения данных исследований являются свойства радиоактивного газа радон и современные представления о формировании геодинамической составляющей поля радоновых эманацй в почвенном воздухе. Зона сдвижения горных пород над выработанным пространством характеризуется чередованием участков растяжения и сжатия. На исследуемой территории выполнены эманацйонные съемки различной степени детальности, исследования по раздельному определению содержания радона и торона в эманацйях. Анализ результатов натурных измерений позволяет сделать вывод о перспективности дальнейших исследований возможности применения радонометрии для изучения подработанных территорий.

Ключевые слова: массив горных пород, дайка, тектоническое нарушение, радон, геодинамическая диагностика, сдвижения, поле радоновых эманацй.

DOI: 10.25635/2313-1586.2024.04.135

Dalatkazim Timur Sh.

Candidate of Technical Sciences,
Head of Laboratory of hazard risk
reducing in mining,
Institute of Mining UB RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.,
e-mail: 9043846175@mail.ru

Zuev Pavel I.

Researcher,
Laboratory of hazard risk
reducing in mining,
Institute of Mining UB RAS
e-mail: zuev@igduran.ru

RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF USING EMANATION SURVEYING TO IDENTIFY UNDERGROUND MINING WORKINGS

Abstract:

The article presents the results of the initial stage of experimental studies of the possibility of using radonometry to identify and delineate underground mine workings in underworked areas. Ensuring the safety of construction and operation of subsoil use facilities in areas underworked by mining operations requires diagnostics of the geomechanical state of the underlying rock massif – identification and delineation of areas disintegrated as a result of rock displacement. The optimal solution to this problem is the use of a complex of geophysical methods. The prerequisites for conducting these studies are the properties of radioactive radon gas and modern ideas about the formation of the geodynamic component of the radon emanation field in the soil air. The zone of rock displacement above the mined-out space is characterized by alternating areas of tension and compression. Emanation surveys of varying degrees of detail, studies on the separate determination of radon and thoron content in emanations were carried out on the study area. Analysis of the results of in-kind measurements allows us to conclude that further research into the possibility of using radonometry to study underworked areas is promising.

Key words: rock massif, dike, tectonic disturbance, radon, geodynamic diagnostics, displacements, radon emanation field.

* Исследования выполнены в рамках Госзадания №075-00412-22 ПП, тема 3 (2022-2024), (FUW-2022-0005), рег. No1021062010531-8-1.5.1.

Введение

При выполнении инженерно-геологических изысканий на территориях, подработанных горными работами, зачастую отсутствует документация, позволяющая определить пространственное положение подземных горных выработок. На таких территориях могут образовываться оседания поверхности и провалы (рис.1) [1].



Рис. 1. Территория г. Березовский.
Образование провала над старательской горной выработкой.
Горнотехническая документация по данной выработке отсутствует

Для обеспечения безопасности строительства и эксплуатации объектов недропользования на таких территориях необходима диагностика геомеханического состояния подстилающего горного массива – выявление и оконтуривание участков, дезинтегрированных в результате сдвижения горных пород. Оптимальным решением данной задачи является использование комплекса геофизических методов.

Институтом горного дела в 2024 г. на территории г. Березовский Свердловской области был выполнен начальный этап исследований возможности применения радонметрии для выявления и оконтуривания участков дезинтеграции горных пород, образовавшихся в результате процесса сдвижения в подработанном горном массиве.

Предпосылками для проведения данных исследований являются свойства радиоактивного газа радон и современные представления о формировании геодинамической составляющей поля радоновых эманаций в почвенном воздухе.

Радон является благородным, химически инертным газом: не вступает во взаимодействие с другими элементами, без цвета и запаха, хорошо растворяется в воде. Это источник альфа-излучения, и поэтому уверенно регистрируется даже при малых концентрациях специальными приборами; в 7,5 раз тяжелее атмосферного воздуха, обладает высокой проникающей способностью. Период полураспада радона-222 составляет 3,8 суток, торона -220 – 59 сек. Генерация его в горных породах происходит непрерывно [2, 3].

Земная кора содержит радиоактивные природные элементы, которые создают естественный радиоактивный фон. В горных породах, почве, воде, растениях и тканях живых организмов присутствуют члены радиоактивных семейств ^{238}U , ^{235}U и ^{232}Th - материнские нуклиды, которые имеют очень большие периоды полураспада: ^{238}U – $4,5 \times 10^9$ лет, ^{235}U – $0,7 \times 10^9$ лет, ^{232}Th – 14×10^9 лет. Газообразными продуктами

ми, которые рождаются в процессе распада, являются гелий-4 и изотопы радона. Наибольший вклад в газовую составляющую естественных радиоактивных элементов вносят радиоактивные семейства ^{238}U и ^{232}Th , в процессе радиоактивного распада которых образуются изотопы ^{226}Ra и ^{224}Ra . Изотопы радона – ^{222}Rn появляются непосредственно при распаде ^{226}Ra (период полураспада 1590 лет) и ^{220}Tn – при распаде ^{224}Ra (период полураспада 3,66 дня).

Повсеместное распространение изотопов радия приводит также к *повсеместному* распространению в природе и в горных породах изотопов радона. Изотопы радона являются альфа-излучателями. Изотопы радона представляют собой радиоактивные газообразные вещества – эманации.

Основной причиной формирования аномалий радоновых эманаций в почвенном воздухе над дезинтегрированными в результате сдвижения горными породами является их повышенная проницаемость для флюидов. Это позволяет предположить аномальные значения объемной активности радона в зоне сдвижения.

С целью определения возможности использования радонометрии для выявления и оконтуривания участков сдвижения горных пород на подработанных территориях на экспериментальном участке была выполнена эманационная съемка различной степени детализации.

В почвенном воздухе геодинамически активных зон различного генезиса формируются аномалии радоновых эманаций благодаря

- повышенной проницаемости горных пород, характерной для активных участков разломной зоны;
- влиянию упругих колебаний на горные породы, образующихся при геодинамических движениях;
- при тектонических подвижках в трещинах формируются локальные, импульсные участки разряжения и увеличения давления, что способствует продвижению газов по порам и микротрещинам.

Аномалии радоновых эманаций в почвенном воздухе над участками тектонических разломов формируются всем комплексом проявления современной геодинамической активности.

Таким образом, аномалии радоновых эманаций над участками тектонических разломов свидетельствуют о наличии современного геодинамического процесса, а величины радоновых эманаций непосредственно зависят от степени проявления современной геодинамической активности, независимо от глубины заложения разлома и мощности покровных отложений, что позволяет использовать результаты эманационной радоновой съемки для геодинамической диагностики горного массива [4, 5].

Характеристика исследуемого горного массива

Березовское золоторудное месторождение разрабатывается на протяжении 275 лет. Первые 150 лет казенная добыча велась в приповерхностной части месторождения на глубинах, не превышавших 45 – 50 м, ограничиваясь гидрогеологическими условиями. За этот период, согласно архивным документам, было построено более 1000 мелких шахт, пройденных по дайкам и жилам. В это же время повсеместно велась старательская добыча небольшими горными выработками – шурфами, штольнями, небольшими шахтами. По этим выработкам горнотехническая документация отсутствует.

Территория исследования расположена на юго-западной окраине г. Березовский Свердловской области, свободна от застройки, инженерных коммуникаций, леса и кустарника. На отдельных участках территории отмечены навалы грунта. Площадь территории исследований составляет 32400 м². В прошлом участок исследований использовался для выращивания сельскохозяйственных культур. В рельефе местности выработки не проявляются.

Коренные породы района работ представлены базальтами афировыми, вариолитами, туфопесчаниками, туфоалевролитами, туффитами, кремнистыми, углеродисто-кремнистыми сланцами, зелеными сланцами, микроамфиболитами, кварцитами, амфиболитами, объединенными в новоберезовскую толщу, имеющую мощность более 2000 м [6]. Породы толщи прорваны многочисленными дайками гранодиорит-порфиоров, гранит-порфиоров, плагиогранит-порфиоров, диоритов и диорит-порфиоров. Протяженность даек до 20 км, мощность 2 – 40 м, простирание близмеридиональное, падение крутое. К поперечным трещинам разрыва в дайках приурочены короткие крутопадающие кварцеворудные «лестничные» жилы, менее развиты пологие широтные и диагональные. В осадочно-вулканогенных и интрузивных породах имеются «красичные» жилы, однотипные по составу с «лестничными» и местами являющиеся их продолжением во вмещающих породах. Жилы в пределах рудного поля распространены неравномерно.

На территории в пределах глубины до 5,0 – 18,0 м присутствует линейный тип коры выветривания материнских пород. Этот тип образует клинообразные формы продуктов выветривания, которые возникли вдоль контактов пород, зон дробления и разломов. Кора выветривания представлена элювиальными образованиями глыбовой и дисперсной зон.

К глыбовой зоне отнесены:

– полускальные сильнотрещиноватые грунты (рухляки) сланцев желто-коричневого цвета, наблюдаются на глубине 4,5 – 10,0 м:

– полускальные сильнотрещиноватые грунты (рухляки) березитов желто-серого и зеленовато-серого цвета, наблюдаются на глубине 2,3 – 13,0 м.

Дисперсная зона представлена элювиальными суглинками супесями. Элювиальные образования наблюдаются на глубине залегания 1,5 – 7,7 м.

Выше по разрезу залегают четвертичные отложения делювиально-аллювиального генезиса на глубине 0,3 – 2,5 м от поверхности и представлены суглинками, участками глинами.

С поверхности территория изысканий спланирована насыпными грунтами.

Территория исследований находится в районе выхода на поверхность даек Вагнеровская и Параллельная.

Дайка Параллельная крутого восточного падения с углом 75° была затронута старыми горными работами Золотопромышленного Товарищества 1895 – 1918 гг. на глубину 30 м от поверхности.

Кроме того, здесь пройдено большое количество разведочных шурфов. Их глубина достигала 15 м от поверхности.

Дайка Вагнеровская крутого восточного падения с углом 65° была затронута старыми казенными работами 1745 – 1860 гг. на глубину 12 м от поверхности. Ниже, до глубины 30 м от поверхности, дайка отрабатывалась Золотопромышленным Товариществом в 1895 – 1918 гг. В 1941 г. дайка была отработана до горизонта горных работ 60 м от поверхности системой ортовой выемки.

Информация о горизонтальных горных выработках непосредственно в пределах исследуемой территории отсутствует.

Методы исследования

Геодинамическое районирование горного массива на основе применения эманационной съемки.

Геодинамическое районирование с использованием радонометрии с применением нормирования позволяет выявить геодинамически активные участки массива, в том числе и в зоне сдвижения. Геодинамическая составляющая поля радоновых эманаций формируется за счет

– повышенной проницаемости горных пород;

– вибровоздействия на горные породы [7].

Измерения объемной активности радона ($\text{Бк}/\text{м}^3$) в почвенном воздухе выполняются радиометрами альфа-активных газов, например, РГА-500 по профильным линиям из шпуров, глубиной 0,8 – 1,0 м.

С целью определения геодинамической составляющей формирования поля радона выполняется нормирование значений объемной активности радона в почвенном воздухе. Для этого полученные в результате измерений значения объемной активности радона группируются по принадлежности к однотипным участкам:

- по гранулометрическому составу покровных отложений;
- по вещественному составу горных пород;
- по положению уровня грунтовых вод;
- по влагонасыщенности почвы по площади и т.д.

Кроме того, при группировании учитывается временной период измерений. Рассчитываются нормированные значения объемной активности радона для каждой точки измерения группы:

$$N_i = Q_i / Q_{\text{ср. группы}},$$

где N_i – нормированная объемная активность радона точки измерения i , безразмерная величина; Q_i – значение объемной активности радона в почвенном воздухе точки измерения на профильной линии, $\text{Бк}/\text{м}^3$; $Q_{\text{ср. группы}}$ – среднее арифметическое значение объемной активности радона в почвенном воздухе группы значений, $\text{Бк}/\text{м}^3$.

Составляется карта распределения нормированных значений объемной активности радона в почвенном воздухе изучаемой территории, на основе которой осуществляется ее геодинамическое районирование [8].

При выполнении радонометрических исследований на территории г. Березовский шпур для отбора проб почвенного воздуха бурились с использованием бензинового перфоратора М 58, что существенно сократило время и трудозатраты.

Результаты исследования

На первом этапе было выполнено геодинамическое районирование всего участка исследований. Было произведено 127 измерений объемной активности радона по 5 профильным линиям. Расстояние между точками измерений на профильной линии 10 м. Расстояние между профильными линиями 30 м. Профильные линии расположены в крест простирания даек Вагнеровская и Параллельная, информация о пространственном положении которых на участке исследований получена из фондовых материалов и из результатов ранее выполненных геофизических исследований методами сейсморазведки и электротомии (Ведерников А.С., Григорьев Д.В.).

При группировании для нормирования результатов измерения по принадлежности к однотипным по вещественному составу подстилающих магматических пород использовалась информация о расположении даек Вагнеровская и Параллельная, представленных гранодиорит-порфирами, гранит-порфирами, плагиогранит-порфирами, диоритами и диорит-порфирами, отличающихся от вмещающих пород более высоким содержанием кремнезема (SiO_2), что определяет повышение здесь объемной активности радона в почвенном воздухе [1, 9-12].

Согласно полученной карте геодинамического районирования по данным радонометрии горный массив участка исследований характеризуется высоким уровнем современной геодинамической активности (рис. 2). Нормированные значения объемной активности радона в почвенном воздухе (N_i) изменяются в пределах участка от 0,1 до 3,0. Простирание геодинамически активных дизъюнктивных структур субмеридиональное. Однако при использованных параметрах сети измерений наблюдается лишь

одна (в юго-восточной части исследуемого участка) аномалия нормированных значений объемной активности радона в месте расположения устья погашенной горной выработки.

Поэтому на локальном участке возможного влияния горных работ, определенном по архивным данным, с целью выявления и оконтуривания положения подземных горных выработок в плане была выполнена эманационная съемка по сетям наблюдений 5×10 и 10×10 м. Всего было выполнено 19 измерений по 6-ти профильным линиям

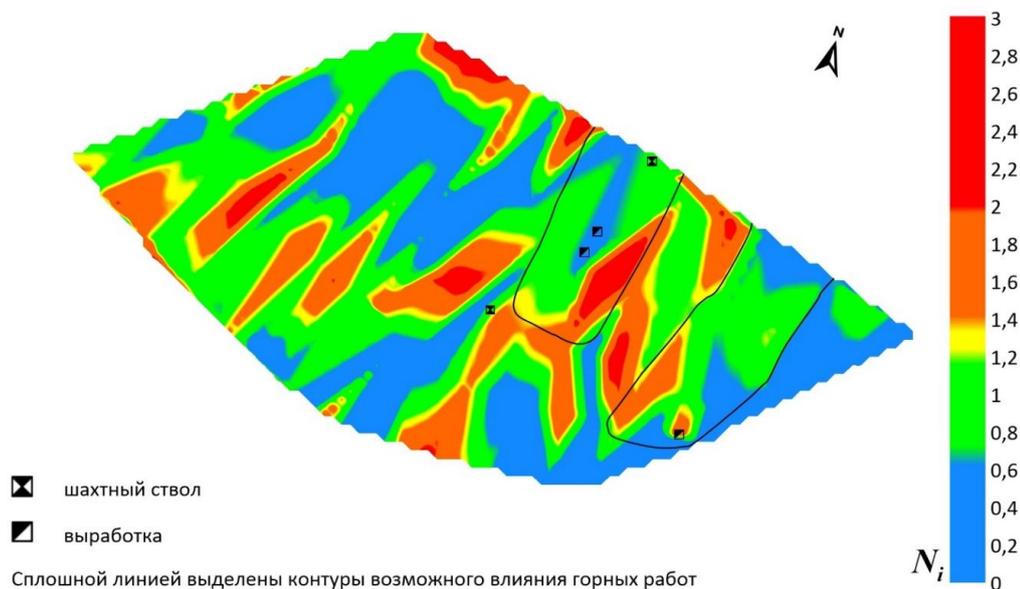


Рис. 2. Карта геодинамического районирования по данным радонометрии горного массива территории исследований (Свердловская область, юго-западная окраина г. Березовский)

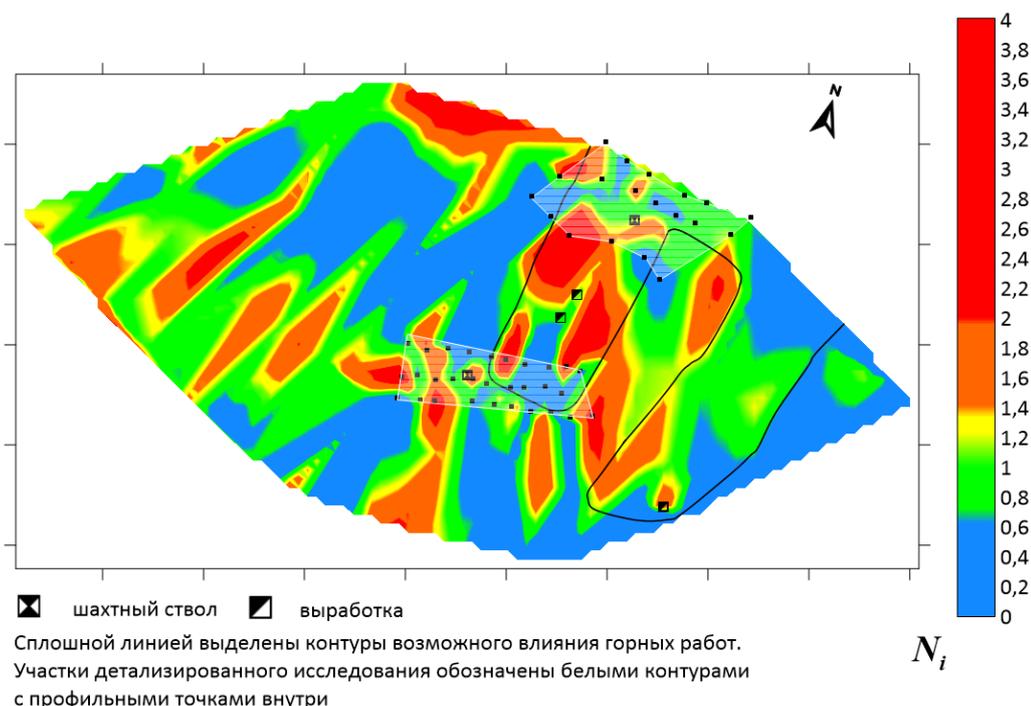


Рис. 3. Карта геодинамического районирования по данным радонометрии горного массива территории исследований (Свердловская область, юго-западная окраина г. Березовский) с детализацией на участках влияния горных работ. Интерполяция произведена на участке с белой подсветкой

Согласно полученной карте результатов геодинамического районирования по данным радонометрии с детализацией на участках, где по данным фондовых материалов расположены устья погашенных горных выработок, наблюдаются аномальные значения нормированных значений объемной активности радона в почвенном воздухе. Контуры горизонтальных выработок в плане не проявились (рис. 3).

Список литературы

1. Усанов С.В., 2011. Методика оценки безопасности застройки территорий над старыми горными выработкам. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. Отд. вып. № 11. Проблемы недропользования, С. 260 - 266.
2. Сердюкова А.С., Капитонов Ю.Т., 1969. *Изотопы радона и короткоживущие продукты их распада в природе*. Москва: Атомиздат, 312 с.
3. Уткин В.И., Юрков А.К., Козлова И.А., 2008. Выделение радона из горных пород при воздействии на них упругих колебаний различного диапазона. *Геофизика XXI столетия. Сборник трудов Девярых геофизических чтений им. В.В. Федынского*: Тверь: ООО Изд-во «ГЕРС», С. 317-320.
4. 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.
5. Далатказин Т.Ш., 2011. Использование радонометрии при изучении современной геодинамики на территориях, перекрытых мощным чехлом осадочных пород для решения задачи обеспечения безопасной эксплуатации объектов недропользования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 7, С. 249 – 253.
6. Калугина Р.Д., Копанев В.Ф., Стороженко Е.В. и др., 2017. *Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000 Издание второе. Серия Среднеуральская. Лист О-41-XXV*. Объяснительная записка. Москва: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 156 с.
7. Далатказин Т.Ш., 2015. Использование режимных наблюдений за полем радоновых эманаций в зоне техногенного воздействия при отработке южной залежи Песчанской группы месторождений. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 2, С. 162 - 167.
8. Далатказин Т.Ш., 2023. Методические вопросы геодинамического районирования массива горных пород с использованием радонометрии. *Проблемы недропользования*, № 1, С. 64-69. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.064
9. Мальцев К.А., Мухарамова С.С., 2014. *Построение моделей пространственных переменных (с применением пакета Surfer): Учебное пособие*. Казань: Казанский университет, 103 с.
10. Скворцов А.В., 2002. *Триангуляция Делоне и её применение*. Томск: Изд-во Том. ун-та, 128 с.
11. Далатказин Т.Ш., Ведерников А.С., Григорьев Д.В., Замятин А.Л., Зуев П.И., 2022. Опыт применения геофизических методов в комплексе геодинамической диагностики горного массива: журнал. *Горная промышленность*, №S1, 105–110 с.
12. Ведерников А.С., Зуев П.И., 2020. Районирование подработанных территорий города Берёзовский. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3-1. С. 37-45.

References

1. Usanov S.V., 2011. Metodika otsenki bezopasnosti zastroiki territorii nad starymi gornymi vyrobotkam [Methodology for assessing the safety of building territories over old

mine workings]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'. Otd. vyp. № 11. Problemy nedropol'zovaniya, P. 260 - 266.

2. Serdyukova A.S., Kapitonov Yu.T., 1969. Izotopy radona i korotkozhivushchie produkty ikh raspada v prirode [Radon isotopes and radon progenies decay in nature]. Moscow: Atomizdat, 312 p.

3. Utkin V.I., Yurkov A.K., Kozlova I.A., 2008. Vydelenie radona iz gornykh porod pri vozdeistvii na nikh uprugikh kolebaniy razlichnogo diapazona [Release of radon from rocks when exposed to elastic vibrations of various ranges]. Geofizika XXI stoletiya. Sbornik trudov Devyatykh geofizicheskikh chtenii im. V.V. Fedynskogo: Tver': OOO Izd-vo "GERS", P. 317-320.

4. 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 extraction as an express method for geodynamic diagnostics]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle, № 4, P. 206 – 220.

5. Dalatkazin T.Sh., 2011. Ispol'zovanie radonometrii pri izuchenii sovremennoi geodinamiki na territoriyakh, perekrytykh moshchnym chekhлом osadochnykh porod dlya resheniya zadachi obespecheniya bezopasnoi ekspluatatsii ob"ektov nedropol'zovaniya [Use of radonometry in the study of modern geodynamics in territories overlain by a heavy cover of sedimentary rocks to solve the problem of ensuring the safe operation of subsurface use facilities]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 7, P. 249 – 253.

6. Kalugina R.D., Kopanev V.F., Storozhenko E.V. i dr., 2017. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii . Masshtab 1:200000 Izdanie vtoroe. Seriya Sredneural'skaya. List O-41-XXV [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200000 Second edition. The Sredneural'skaya series. Sheet O-41-XXV]. Ob"yasnitel'naya zapiska . Moscow: Moskovskii filial FGBU "VSEGEI", 156 s.

7. Dalatkazin T.Sh., 2015. Ispol'zovanie rezhimnykh nablyudenii za polem radonovykh emanatsii v zone tekhnogennoho vozdeistviya pri otrabotke yuzhnoi zalezhi Peschanskoi gruppy mestorozhdenii [Use of regime observations of the radon emanation field in the zone of anthropogenic impact during the development of the southern part of the Peschanskaya group of deposits]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii . Gornyi zhurnal, № 2, P. 162 167.

8. Dalatkazin T.Sh., 2023. Metodicheskie voprosy geodinamicheskogo raionirovaniya massiva gornykh porod s ispol'zovaniem radonometrii [Methodological issues of geodynamic zoning of a rock mass using radonometry]. Problemy nedropol'zovaniya, № 1, P. 64-69. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.064

9. Mal'tsev K.A., Mukharamova S.S., 2014. Postroenie modelei prostranstvennykh peremennykh (s primeneniem paketa Surfer): Uchebnoe posobie [Building models of spatial variables (using the Surfer package): An educational tool]. Kazan': Kazanskii universitet, 103 p.

10. Skvortsov A.V., 2002. Triangulyatsiya Delone i ee primeneniye [Delaunay triangulation and its application]. Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta, 128 p.

11. Dalatkazin T.Sh., Vedernikov A.S., Grigor'ev D.V., Zamyatin A.L., Zuev P.I., 2022. Opyt primeneniya geofizicheskikh metodov v komplekse geodinamicheskoi diagnostiki gornogo massiva: zhurnal [Experience of using geophysical methods in the complex of geodynamic diagnostics of a mountain range: journal]. Gornaya promyshlennost', №S1, 105-110 p.

12. Vedernikov A.S., Zuev P.I., 2020. Raionirovanie podrabotannykh territorii goroda Berezovskii [Zoning of the underworked territories of the city Berezovsky]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 3-1. P. 37-45.

УДК 622.83:550.3

Далатказин Тимур Шавкатович

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией технологии снижения
риска катастроф при недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58,
e-mail: 9043846175@mail.ru

Зуев Павел Игоревич

научный сотрудник,
лаборатория технологии снижения риска ката-
строф при недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: zuev@igduran.ru;

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ
ПРИМЕНЕНИЯ РАДОНОМЕТРИИ
ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ УЧАСТКОВ
РАЗУПЛОТНЕНИЯ В ПОДРАБОТАННОМ
ГОРНОМ МАССИВЕ***

Аннотация:

Представлены результаты экспериментальных исследований возможности применения радонометрии для выявления и оконтуривания подземных горных выработок на подработанных территориях. Для обеспечения безопасности объектов недропользования на подработанных горными работами территориях необходима диагностика геомеханического состояния подстилающего горного массива – выявление участков горного массива, разуплотненных в результате сдвижения горных пород. Эффективным решением данной задачи является использование геофизических методов. Выполнены исследования возможности применения радонометрии для решения обозначенной задачи. Предпосылками для проведения данных исследований являются свойства радиоактивного газа радон и современные представления о формировании геодинамической составляющей поля радоновых эманацй в почвенном воздухе. Зона сдвижения горных пород над выработанным пространством характеризуется чередованием участков растяжения и сжатия. На исследуемой территории выполнены эманацйонная съемка и исследования по раздельному определению содержания радона и торона в почвенном воздухе, построены карты геодинамической активности по данным радонометрии, карта деформаций растяжения и карта растяжений сжатия. Анализ результатов исследований позволяет сделать вывод о перспективности дальнейших исследований возможности применения радонометрии для изучения подработанных территорий.

Ключевые слова: массив горных пород, радон, геодинамическая диагностика, радоновые эманацйи, сдвижение горных пород, деформации растяжения, деформации сжатия.

DOI: 10.25635/2313-1586.2024.04.143

Dalatkazim Timur Sh.

Candidate of Technical Sciences,
Head of Laboratory of hazard risk
reducing in mining,
Institute of Mining UB RAS,
620075 Ekaterinburg
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: 9043846175@mail.ru

Zuev Pavel I.

Researcher,
Laboratory of hazard risk
reducing in mining,
Institute of Mining UB RAS
e-mail: zuev@igduran.ru

**EXPERIMENTAL STUDIES
OF THE POSSIBILITY OF USING
RADONOMETRY TO IDENTIFY
DECAPACITY AREAS
IN UNDERWORKED ROCK MASSIF**

Abstract:

The article presents the results of experimental studies of the possibility of using radonometry to detect and delineate underground mine workings in underworked areas. Ensuring the safety of subsoil use facilities in areas underworked by mining operations requires diagnostics of the geomechanical state of the underlying rock massif – identification of areas of the rock massif that have become recompacted as a result of rock displacement. An effective solution to this problem is the use of geophysical methods. The studies have been carried out to study the possibility of using radonometry to solve the discussed problem. The prerequisites for these studies are the properties of radioactive gas radon and modern concepts of the formation of the geodynamic component of the radon emanation field in the soil air. The zone of rock displacement above the mined-out space is characterized by alternating areas of extension and compression. An emanation survey and studies on separate determination of radon and thoron content in the soil air were carried out on the study area. Maps of geodynamic activity based on radonometry data, a map of extension deformations and a map of compression extensions were constructed. Analysis of the research results allows us to conclude that further research into the possibility of using radonometry to study underworked areas is promising.

Key words: rock mass, radon, geodynamic diagnostics, radon emanations, rock displacement, tensile strain, compression strain.

* Исследования выполнены в рамках Госзадания №075-00412-22 ПП, тема 3 (2022 – 2024), (FUW-2022-0005), рег. No1021062010531-8-1.5.1.

Введение

На территории г. Березовский Свердловской области, горный массив которой подработан горными работами, зачастую отсутствует документация, позволяющая определить пространственное положение подземных горных выработок. На таких территориях могут образовываться оседания поверхности и провалы [1].

Территория г. Березовский Свердловской области характеризуется следующими особенностями:

- город полностью расположен на территории месторождения;
- месторождение разрабатывается на протяжении 265 лет с полным разнообразием технологий добычи, присущим различным периодам его существования. «Казенная добыча» золота более 150 лет велась в приповерхностной части месторождения на глубинах, не превышавших 45 – 50 м. За этот период было построено более 1000 мелких шахт. Все это время повсеместно велась браконьерская старательская добыча мелкими горными выработками, документация по которым отсутствует. Отсутствие документации, позволяющей определить пространственное положение подземных горных выработок, определяет угрозу для строительства инженерных сооружений, т.к. на подработанном участке могут образовываться оседания поверхности и провалы [1].

Для обеспечения безопасности строительства и эксплуатации объектов недропользования на таких территориях необходима диагностика геомеханического состояния подстилающего горного массива – выявление и оконтуривание участков, дезинтегрированных в результате сдвижения горных пород. Оптимальным решением данной задачи является использование комплекса геофизических методов.

Геологическая характеристика

Коренные породы района работ представлены базальтами афировыми, вариолитами, туфопесчаниками, туфоалевролитами, туффитами, кремнистыми, углеродисто-кремнистыми сланцами, зелеными сланцами, микроамфиболитами, кварцитами, амфиболитами, объединенными в новоберезовскую толщу, имеющую мощность более 2000 м. Породы толщи прорваны многочисленными дайками гранодиорит-порфиров, гранит-порфиров, плагиогранит-порфиров, диоритов и диорит-порфиров. Протяженность даек до 20 км, мощность 2 – 40 м, простираение близмеридиональное, падение крутое. К поперечным трещинам разрыва в дайках приурочены короткие крутопадающие кварцеворудные «лестничные» жилы, менее развиты пологие широтные и диагональные. В осадочно-вулканогенных и интрузивных породах имеются «красичные» жилы, однотипные по составу с «лестничными» и местами являющиеся их продолжением во вмещающих породах. Жилы в пределах рудного поля распространены неравномерно.

На территории в пределах глубины до 5,0 – 18,0 м присутствует линейный тип коры выветривания материнских пород. Этот тип образует клинообразные формы продуктов выветривания, которые возникли вдоль контактов пород, зон дробления и разломов. Кора выветривания представлена элювиальными образованиями глыбовой и дисперсной зон.

К глыбовой зоне отнесены:

- полускальные сильнотрещиноватые грунты (рухляки) сланцев желто-коричневого цвета, наблюдаются на глубине 4,5 – 10,0 м;
- полускальные сильнотрещиноватые грунты (рухляки) березитов желто-серого и зеленовато-серого цвета, наблюдаются на глубине 2,3 – 13,0 м.

Дисперсная зона представлена элювиальными суглинками супесями. Элювиальные образования наблюдаются на глубине залегания 1,5 – 7,7 м.

Институтом горного дела в 2024 г. на территории г. Березовский Свердловской области выполнялись исследования возможности применения радонометрии для выяв-

ления и оконтуривания участков сдвижения горных пород, образовавшихся в результате процесса сдвижения в подработанном горном массиве.

Свойства радиоактивного газа радон и современные представления о формировании геодинамической составляющей поля радоновых эманаций в почвенном воздухе являются предпосылками для проведения данных исследований.

Радон является благородным, химически инертным газом – не вступает во взаимодействие с другими элементами, без цвета и запаха, хорошо растворяется в воде. Это источник альфа-излучения, и поэтому уверенно регистрируется даже при малых концентрациях специальными приборами. Он в 7,5 раз тяжелее атмосферного воздуха, обладает высокой проникающей способностью. Период полураспада радона ^{222}Rn составляет 3,8 суток, торона ^{220}Rn – 59 сек. Генерация его в горных породах происходит непрерывно [2].

Земная кора содержит радиоактивные природные элементы, которые создают естественный радиоактивный фон, в том числе в горных породах, почве, воде, растениях и тканях живых организмов присутствуют члены радиоактивных семейств ^{238}U , ^{235}U и ^{232}Th – материнские нуклиды, которые имеют очень большие периоды полураспада: ^{238}U – $4,5 \times 10^9$ лет, ^{235}U – $0,7 \times 10^9$ лет, ^{232}Th – 14×10^9 лет. Газообразными продуктами, которые рождаются в процессе распада, являются гелий-4 и изотопы радона. Наибольший вклад в газовую составляющую естественных радиоактивных элементов вносят радиоактивные семейства ^{238}U и ^{232}Th , в процессе радиоактивного распада которых образуются изотопы ^{226}Ra и ^{224}Ra . Изотопы радона – ^{222}Rn появляются непосредственно при распаде ^{226}Ra (период полураспада 1590 лет) и ^{220}Rn – при распаде ^{224}Ra (период полураспада 3,66 дня).

Повсеместное распространение изотопов радия приводит также к *повсеместному* распространению в природе и в горных породах изотопов радона. Изотопы радона являются альфа-излучателями. Изотопы радона представляют собой радиоактивные газообразные вещества – эманации.

Эманация радона в почвенном воздухе представляет собой смесь радона – Rn_{222} и торона – Tn (Rn_{220}). Период полураспада Rn_{222} составляет 3,8 суток, а период полураспада Tn – 55,6 секунд. Благодаря контрастной разнице величин времени полураспада современный геодинамический процесс определяет соотношение радона – Rn_{222} и торона – Tn (Rn_{220}) в эманациях в почвенном воздухе [2, 3].

В почвенном воздухе над зоной растяжения в горном массиве аккумулируется смесь радона и торона после миграции к поверхности по раскрытым трещинам после эманации из горных пород. Значительная доля Tn в этой смеси уменьшается (по сравнению с соседними, не затронутыми деформационными процессами участками) во время миграции за счет значительно более быстрого распада по сравнению с Rn_{222} .

В почвенном воздухе над участком сжатия геодинамическая составляющая процесса эманирования радона определяется в основном вибровоздействием на горные породы, возникающим при сжимающих деформациях – трещины смыкаются, что ограничивает миграцию газообразных флюидов из глубины массива. Поступающая в почву газовая смесь здесь формируется в основном вблизи поверхности, и доля нераспавшегося торона больше по сравнению с почвенным слоем над зоной растяжения [4]. Исходя из сказанного соотношение торона и радона в почвенном воздухе можно использовать для выявления, оконтуривания и дифференциации деформаций на участки сжатия и участки растяжения.

С целью определения возможности использования радонометрии для выявления и оконтуривания участков сдвижения горных пород на подработанной территории на экспериментальном участке были выполнены:

- эманационная съемка;
- выявление зон сжатия и зон растяжения с использованием радонометрии.

Методика исследования

I. Геодинамическое районирование горного массива на основе применения эманационной съемки.

Геодинамическое районирование с использованием радонометрии с применением нормирования позволяет выявить геодинамически активные участки массива, что вызвано деформационным процессом, в том числе и в зоне сдвижения. Геодинамическая составляющая поля радоновых эманаций формируется за счет

- повышенной проницаемости горных пород;
- вибровоздействия на горные породы [5].

Измерения объемной активности радона ($\text{Бк}/\text{м}^3$) в почвенном воздухе выполняются радиометрами альфа-активных газов, например, РГА-500 по профильным линиям из шпуров, глубиной 0,8 – 1,0 м. При выполнении радонометрических исследований на территории г. Березовский шпур для отбора проб почвенного воздуха бурился с использованием бензинового перфоратора М 58, что сократило время и трудозатраты.

С целью определения геодинамической составляющей формирования поля радона выполняется нормирование значений объемной активности радона в почвенном воздухе. Для этого полученные в результате измерений значения объемной активности радона группируются по принадлежности к однотипным участкам:

- по гранулометрическому составу покровных отложений;
- по вещественному составу горных пород;
- по положению уровня грунтовых вод;
- по влагонасыщенности почвы по площади и т.д.

Кроме того, при группировании учитывается временной период измерений. Рассчитываются нормированные значения объемной активности радона для каждой точки измерения группы:

$$N_i = Q_i / Q_{\text{ср. группы}},$$

где N_i – нормированная объемная активность радона точки измерения i , безразмерная величина; Q_i – значение объемной активности радона в почвенном воздухе точки измерения на профильной линии, $\text{Бк}/\text{м}^3$; $Q_{\text{ср. группы}}$ – среднеарифметическое значение объемной активности радона в почвенном воздухе группы значений, $\text{Бк}/\text{м}^3$.

Составляется карта распределения нормированных значений объемной активности радона в почвенном воздухе изучаемой территории, на основе которой осуществляется ее геодинамическое районирование [6, 7, 8].

II. Радонометрические исследования для выявления зон растяжения и сжатия.

В зоне сдвижения наблюдается чередование зон растяжения и зон сжатия. Для оперативного выявления и оконтуривания зон деформаций растяжения и сжатия в массиве горных пород применяется методика использования соотношения Q_{Rn222} и Q_{Tn} в почвенном воздухе. Данная методика заключается в следующем:

1. Раздельное определение Rn_{222} и Tn при выполнении эманационной съемки.
2. Определение показателя растяжения и показателя сжатия по данным радонометрии.
3. Построение карт деформаций растяжения и сжатия исследуемого горного массива по данным радонометрии.

Измерения объемной активности радона ($\text{Бк}/\text{м}^3$) в почвенном воздухе выполняются радиометрами альфа-активных газов, например, РГА-500 по профильным линиям из шпуров глубиной 0,8 – 1,0 м.

Для раздельного определения Rn_{222} и Tn (Rn_{220}) в отбираемых пробах почвенного воздуха использовалась следующая методика.

В процессе выполнения эманационной съемки, после измерения объемной активности смеси ($\text{Rn}_{222} + \text{Tn}$) ($\text{Бк}/\text{м}^3$), проба почвенного воздуха остается в измеритель-

ной камере (краны закрыты) и выдерживается временная пауза продолжительностью 300 с. За этот период T_n , содержащийся в пробе, распадается. Выполняется повторное измерение, в результате которого определяется объемная активность Rn_{222} [9].

Для выявления зон растяжения горного массива исследуемой территории для каждой определяется показатель $A_{\text{раст}}$:

$$A_{\text{раст}} = \frac{Q_{Rn_{222}}}{Q_{Tn}},$$

где $Q_{Rn_{222}}$ – объемная активность Rn_{222} , Бк/м³; Q_{Tn} – объемная активность Tn , Бк/м³.

По значениям $A_{\text{раст}}$ строится карта растяжений.

Для выявления зон сжатий в горном массиве исследуемой территории определяется показатель $A_{\text{сжат}}$:

$$A_{\text{сжат}} = \frac{Q_{Tn}}{Q_{Rn_{222}}}.$$

По значениям $A_{\text{сжат}}$ строится карта сжатий [10].

Результаты исследований

На локальном участке полигона в г. Березовский в 43 точках измерения было последовательно определено по вышеприведенной методике суммарное содержание Rn и Tn ($\Sigma Rn + Tn$), содержания Rn и содержание Tn в почвенном воздухе по двум профильным линиям.

Всего выполнено 43 измерения с шагом 10 м по двум параллельным профильным линиям. Расстояние между профильными линиями 20 м.

По результатам полевых исследований были определены значения нормированной объемной активности радона в почвенном воздухе (N_i), показатель растяжения (разуплотнения) $A_{\text{раст}}$ и показатель сжатия для каждой точки измерения $A_{\text{сжат}}$ (табл. 1). Далее были построены карты каждого определенного параметра (рис. 1).

В целом по исследуемому участку зоны сжатия чередуются с зонами растяжения. В целом значения $A_{\text{раст}}$ изменяются от 0,3 до 4. Особое внимание вызывает аномальное значение показателя растяжения $A_{\text{раст}} = 38,5$. Данный показатель свидетельствует об интенсивной степени дезинтеграции горных пород и может рассматриваться как признак расположения здесь горизонтальной горной выработки.

Интересен тот факт, что в точках с аномальными значениями показателя $A_{\text{раст}}$ (в табл. 1 отмечены красным цветом), значения N_i имеют величины ниже фоновых. Это может свидетельствовать о том, что в целом данный участок имеет невысокие значения природной составляющей современной геодинамической активности. Здесь отсутствует природный канал поступления Rn (геодинамически активного дизъюнктивного нарушения). При этом разуплотнение обеспечивается объектом, вероятно, техногенного происхождения, расположенным на относительно небольшой глубине. В маломощном, приповерхностном и разуплотненном участке с повышенной пористостью Rn под влиянием диффузного (наличие градиента концентрации), конвективного (вследствие температурного градиента) и эффузионного (вызывается градиентом давления) механизмов распространения перемещается к земной поверхности. В результате разуплотнения относительно маломощного участка горного массива концентрация Rn снижается по сравнению с соседними, не разуплотненными участками. В то же время закономерность формирования долей содержания Rn и Tn сохраняется. Таким образом, аномальные значения показателя $A_{\text{раст}}$ при пониженных значениях N_i могут свидетельствовать о наличии малоглубинного объекта разуплотнения.

В точках наблюдения 8, 13, 16, 35, 36 замечено сочетание аномальных значений показателя $A_{\text{сжат}}$ и повышение значений N_i . Данный факт объясняется повышенным эманированием радона из горных пород за счет вибровоздействия на них, возникающего при сжимающих деформациях.

Таблица 1
Значения нормированной активности R_n , показателя растяжения, показателя сжатия
на локальном участке территории г. Березовский.
Жирным шрифтом выделены аномальные значения показателя $A_{\text{растяж.}}$

№ точек измерений	N_i	$A_{\text{растяж.}}$	$A_{\text{сжат.}}$
1	0,1	0,5	2,0
2	0,1	1,2	0,8
3	0,6	0,8	1,2
4	0,5	0,5	1,9
5	0,1	1,0	1,0
6	0,1	2,4	0,4
7	2,4	-	-
8	1,5	0,4	2,4
9	0,6	1,1	0,9
10	0,5	0,9	1,1
11	0,4	1,3	0,8
12	1,7	1,1	0,9
13	1,5	0,5	2,1
14	0,4	1,6	0,6
15	1,1	0,5	1,9
16	1,1	0,4	2,4
17	0,5	1,0	1,0
18	0,7	1,0	1,0
19	0,8	0,3	3,3
20	1,5	1,2	0,8
21	0,4	38,5	0,03
22	0,3	1,0	1,1
23	0,2	3,5	0,3
24	1,1	0,5	2,1
25	1,0	0,4	2,5
26	0,7	0,5	2,1
27	0,2	1,0	1,0
28	0,6	0,4	2,7
29	3,4	1,6	0,7
30	0,7	0,9	1,1
31	0,9	0,7	1,4
32	5,8	1,2	0,8
33	3,4	0,5	1,9
34	0,7	2,8	0,4
35	1,3	0,4	2,3
36	1,5	0,4	2,4
37	0,4	2,3	0,4
38	1,4	1,2	0,8
39	0,5	3,1	0,3
40	0,8	1,5	0,7
41	1,2	1,2	0,9
42	0,6	4,0	0,3
43	0,8	1,0	1,0

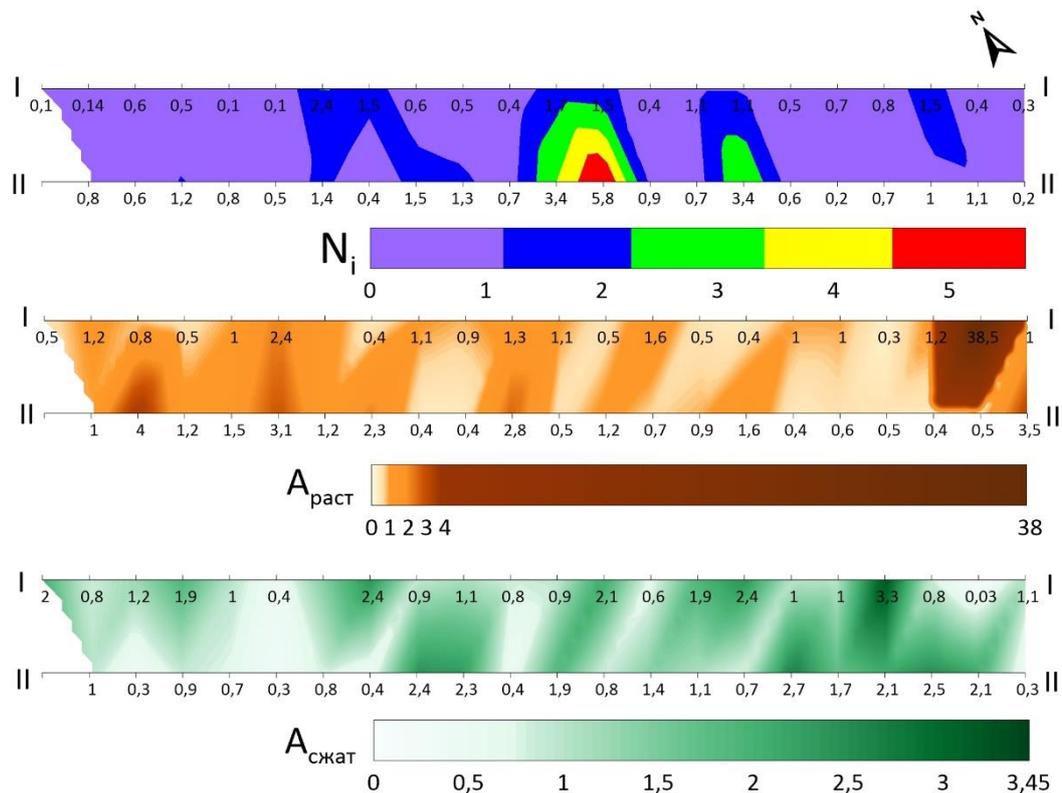


Рис. 1. Распределение зон растяжения и сжатия по данным радонометрии на исследуемом локальном участке, территория г. Березовский Свердловской области

Выводы

Результаты проведенных исследований на участке на юго-западной окраине г. Березовский Свердловской области по возможности использования радонометрии для выявления и оконтуривания подземных горных выработок, вероятно, свидетельствуют о наличии следующей закономерности: аномальные значения показателя $A_{\text{раст}}$ при пониженных значениях N_i могут свидетельствовать о наличии малоуглубленного объекта разуплотнения, что говорит о перспективности дальнейших исследований в данном направлении.

Список литературы

1. Усанов С.В., 2011. Методика оценки безопасности застройки территорий над старыми горными выработками. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, Отд. вып. № 11. Проблемы недропользования, С. 260 – 266.
2. Сердюкова А.С., Капитонов Ю.Т., 1969. *Изотопы радона и короткоживущие продукты их распада в природе*. Москва: Атомиздат.
3. Уткин В.И., Юрков А.К., Козлова И.А., 2008. Выделение радона из горных пород при воздействии на них упругих колебаний различного диапазона. *Геофизика XXI столетия. Сборник трудов Девярых геофизических чтений им. В.В. Федынского*. Тверь: ООО Изд-во «ГЕРС», С. 317– 320.
4. Далатказин Т.Ш., Коновалова Ю.П., Шевченко М.Д., Зуев П.И., 2023. Новые возможности радонометрии в комплексе геодинамической диагностики горного массива. *Проблемы недропользования*, № 4, С. 34 – 42. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.034.
5. Далатказин Т.Ш., Коновалова Ю. П., Ручкин В.И., Зуев П.И., 2019. Исследования по модернизации использования эманацционной съемки в качестве экспресс-метода при геодинамической диагностике. *Известия Тульского государственного университета*.

ного университета. *Науки о Земле*, № 4, С. 206 – 220.

6. Далатказин Т.Ш., 2023. Методические вопросы геодинамического районирования массива горных пород с использованием радонометрии. *Проблемы недропользования*, № 1, С. 64 – 69. DOI : 10.25635/2313-1586.2023.01.064.

7. Мальцев К.А., Мухарамова С.С., 2014. *Построение моделей пространственных переменных (с применением пакета Surfer): Учебное пособие*. Казань: Казанский университет, 103 с.

8. Скворцов А.В., 2002. *Триангуляция Делоне и ее применение*. Томск: Изд-во Том. ун-та, 128 с.

9. Новиков Г. Ф., Капков Ю. Н., 1965. *Радиоактивные методы разведки*. Ленинград: Недра, 759 с.

10. Далатказин Т.Ш., Коновалова Ю.П., Зуев П.И., Шевченко М.Д., 2023. Выявление зон деформаций растяжения и сжатия в массиве горных пород с использованием радонометрии. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 4, С. 324 – 332. DOI: 10.25635/r8348-0456-9118-w.

References

1. Usanov S.V., 2011. Metodika otsenki bezopasnosti zastroiki territorii nad starymi gornymi vyrabotkami [Methodology for assessing the safety of building territories over old mine workings]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, Otd. vyp. № 11. Problemy nedropol'zovaniya, P. 260 – 266.

2. Serdyukova A.S., Kapitonov Yu.T., 1969. Izotopy radona i korotkozhivushchie produkty ikh raspada v prirode [Radon isotopes and radon progenies decay in nature]. Moscow: Atomizdat.

3. Utkin V.I., Yurkov A.K., Kozlova I.A., 2008. Vydelenie radona iz gornykh porod pri vozdeistvii na nikh uprugikh kolebaniy razlichnogo diapazona [Release of radon from rocks when exposed to elastic vibrations of various ranges]. *Geofizika XXI stoletiya. Sbornik trudov Devyatykh geofizicheskikh chtenii im. V.V. Fedynskogo*. Tver': OOO Izd-vo "GERS", P. 317– 320.

4. Dalatkazin T.Sh., Konovalova Yu.P., Shevchenko M.D., Zuev P.I., 2023. Novye vozmozhnosti radonometrii v komplekse geodinamicheskoi diagnostiki gornogo massiva . [New possibilities of radonometry in the complex of geodynamic diagnostics of the mountain range]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4, P. 34 – 42. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.034.

5. 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 extraction as an express method for geodynamic diagnostics]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 4, P. 206 – 220.

6. Dalatkazin T.Sh., 2023. Metodicheskie voprosy geodinamicheskogo raionirovaniya massiva gornykh porod s ispol'zovaniem radonometrii [Methodological issues of geodynamic zoning of a rock mass using radonometry]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 1, P. 64 – 69. DOI : 10.25635/2313-1586.2023.01.064.

7. Mal'tsev K.A., Mukharamova S.S., 2014. Postroenie modelei prostranstvennykh peremennykh (s primeneniem paketa Surfer): Uchebnoe posobie [Building models of spatial variables (using the Surfer package): An educational tool]. Kazan': Kazanskii universitet, 103 p.

8. Skvortsov A.V., 2002. Triangulyatsiya Delone i ee primeneniye [Delaunay triangulation and its application]. Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta, 128 p.

9. Novikov G. F., Kapkov Yu. N., 1965. Radioaktivnye metody razvedki [Radioactive methods for exploration activities]. Leningrad: Nedra, 759 p.

10. Dalatkazin T.Sh., Konovalova Yu.P., Zuev P.I., Shevchenko M.D., 2023. Vyyavlenie zon deformatsii rastyazheniya i szhatiya v massive gornykh porod s ispol'zovaniem radonometrii. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta [Identification of zones of tension and compression deformations in a rock mass using radonometry]. Nauki o Zemle, № 4, P. 324 – 332. DOI: 10.25635/r8348-0456-9118-w.