



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

В НОМЕРЕ:

Теория
проектирования и
геотехнологические
проблемы отработки
месторождений
полезных ископаемых

Геомеханика

Разрушение горных
пород

Обогащение

Моделирование

Правовые основы
недропользования



Сайт
<http://trud.igduran.ru>

СЕТЕВОЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЕ НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ISSN 2313-1586

ПРОБЛЕМЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ PROBLEMS OF SUBSOIL USE



Выпуск 3 (42)
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. Корнилов, 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. Виктор, 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. Кожоголов, 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. Симисин, 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 журнала!

Предлагаем вам третий выпуск издания «Проблемы недропользования» за 2024 год. Этот номер посвящен итогам в 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.

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

Исследованиям в данном направлении посвящен текущий номер, тематика которого освещает, кроме того, основные рубрики журнала и знакомит читателя с результатами исследований молодых ученых в области теории проектирования горнотехнических систем, геотехнологических проблем отработки месторождений полезных ископаемых, геомеханики, разрушения горных пород, обогащения, моделирования, а также правовых основ недропользования.

Редколлегия

Содержание

ТЕОРИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

- Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., Соломенн Ю.М.** Исследование параметров и показателей комбинированной системы разработки пологих месторождений в зависимости от мощности залежи 6
- Архипов А.Б.** Подводная добыча твердых полезных ископаемых: технологии и перспективы их развития 16

ГЕОМЕХАНИКА

- Сентябов С.В., Ушаков Е.М.** Определение первоначальных напряжений массива горных пород в условиях Кызыл-Таштыгского месторождения 24
- Ломов М.А.** Исследование условий возникновения динамических проявлений горного давления на месторождении Южное (Приморский край) с применением цифровых моделей природно-технических систем 32
- Харисов Т.Ф., Авдеев А.Н., Коптяков Д.А.** Анализ результатов определения упругих характеристик горных пород в лабораторных условиях 41
- Дрибан В.А., Хохлов Б.В., Антипенко А.В.** Прогноз образования провалов на подработанных территориях методом искусственного интеллекта на основе нейронных сетей 51

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

- Чешин Д.О., Данилов Б.Б., Плохих В.В.** Повышение эффективности пневмоударного бурения горизонтальных скважин 63
- Галимьянов А.А., Мишнев В.И.** Исследование эффективности конструкции скважинных зарядов при изменении расположения точки инициирования по высоте колонки ряда..... 72

ОБОГАЩЕНИЕ

- Бунин И.Ж., Рязанцева М.В.** Об использовании низкотемпературной плазмы диэлектрического барьерного разряда для направленного регулирования кислотно-основных и технологических свойств природных сульфидов железа 79
- Хтет Зо У, Чжо Зай Яа, Горячев Б.Е.** Роль симплексного планирования эксперимента в совершенствовании прогнозирования и оптимизации составов многокомпонентных систем реагентов-модификаторов при флотации медно-цинковых руд..... 87

МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Смирнов А.Ю.** Применение комбинированных источников данных для создания цифровой модели рельефа Соколовско-Сарбайского месторождения 100

ПРАВОВЫЕ ОСНОВЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

- Славицкая Ю.О.** Индикативный подход к оценке использования земель при недропользовании на примере Свердловской области 112



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

УДК 622.273

Соколов Игорь Владимирович,
доктор технических наук, директор,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: direct@igduran.ru

Антипин Юрий Георгиевич
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией
подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: geotech@igduran.ru

Никитин Игорь Владимирович
научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии, Инсти-
тут горного дела УрО РАН

Соломенн Юрий Михайлович
научный сотрудник,
лаборатория подземной
геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛОГИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МОЩНОСТИ ЗАЛЕЖИ*

Аннотация:

Практика подземной разработки пологих месторождений бедных комплексных руд показала, что применение системы этажного принудительного обрушения с торцовым выпуском руды ведет к большим потерям и разубоживанию руды, что в свою очередь снижает рентабельность предприятия. Предложена комбинированная система разработки, сочетающая в одном добычном блоке этажно-камерную систему и систему этажного принудительного обрушения с торцовым выпуском руды. Разработаны три варианта комбинированной системы разработки, отличающихся конструкцией днища блока. Технико-экономическая оценка и сравнение вариантов комбинированной системы разработки при мощности залежи от 10 до 25 м, ширине камеры и междукammerного целика от 8 до 20 м и угле породной выпускной траншеи междукammerного целика от 55 до 65 градусов показало, что максимальная прибыль достигается при варианте, сочетающем камерную выемку с плоским днищем и этажное обрушение междукammerного целика на траншейное днище.

Ключевые слова: пологое месторождение, комбинированная система разработки, камера, междукammerный целик, мощность залежи, параметры выпускной траншеи, показатели извлечения, эксплуатационные затраты.

DOI:

Sokolov Igor V.
Doctor of Technical Sciences,
Director of the Institute of Mining,
Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: direct@igduran.ru

Antipin Yuriy G.
Candidate of Technical Sciences,
Head of the laboratory
of underground geotechnology,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: geotech@igduran.ru

Nikitin Igor V.
Research Worker,
Laboratory of underground
Geotechnology,
Institute of Mining, UB of RAS

Solomein Yuriy M.
Research Worker,
Laboratory of underground Geotechnology,
Institute of Mining, UB of RAS

RESEARCH OF PARAMETERS AND INDICATORS OF THE COMBINED MINING SYSTEM FOR FLAT DEPOSITS DEPENDING ON THE THICKNESS OF THE DEPOSIT

Abstract:

The practice of underground mining of flat deposits of low-grade complex ores has shown that the use of a forced level caving system with end release of ore leads to large losses and dilution of ore, which in turn reduces the profitability of the enterprise. A combined development system has been proposed, combining in one mining block a floor-chamber system and a system of forced level caving with end release of ore. Three variants of the combined development system have been developed, differing in the design of the block bottom. A technical and economical assessment and comparison of options for a combined development system with a deposit thickness of 10 to 25 meters, a chamber and inter-chamber pillar width from 8 to 20 m and an inter-chamber pillar rock outlet trench angle of 55 to 65 degrees showed that the maximum profit is achieved with the option combining a chamber recess with a flat bottom and a floor forced caving of the inter-chamber pillar onto a trench bottom.

Key words: flat deposit, combined mining system, chamber, inter-chamber pillar, deposit capacity, drawing trench parameters, extraction indicators, operating costs.

* Исследования выполнены в рамках Госзадания Минобрнауки №075-00412-22 ПП.
Тема 1. FUWE-2022-0005.

Введение

В настоящее время многие горные предприятия в условиях неуклонного снижения объемов добычи богатых руд вынуждены компенсировать нехватку сырья за счет вовлечения в эксплуатацию месторождений или их участков, представленных бедными рудами [1 – 3]. К числу таких предприятий следует отнести ООО «Медвежий ручей», разрабатывающее месторождение медно-никелевых руд «Норильск-1» с низким содержанием полезных компонентов. Угол падения залежей месторождения варьируется от 5 до 8°, а их мощность – от 10 до 25 м [4, 5].

Применение традиционной для указанных условий системы этажного принудительного обрушения (СЭПО) с торцовым выпуском руды при ширине очистных панелей 12,5 м, располагаемых по восстанию (вкрест простирания) залежи, и угле откоса выпускной траншеи 55° не обеспечивает необходимую полноту и качество извлечения полезных ископаемых из недр: потери и разубоживание руды составляют 25 – 30 % и более [6 – 9].

Постановка задачи исследований

С целью улучшения показателей извлечения руды разработаны варианты комбинированной системы разработки (КСР), сочетающие в одном добычном блоке этажно-камерную систему и СЭПО. Варианты КСР отличаются между собой конструкцией днища блока (рис. 1): *вариант 1* с траншейным днищем, *вариант 2* с плоским днищем, *вариант 3* с комбинированным днищем.

Геомеханически обоснованные параметры конструктивных элементов КСР с учетом мощности залежи [10] приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры конструктивных элементов КСР
в зависимости от мощности залежи**

Конструктивные элементы КСР	Мощность залежи, м			
	10	15	20	25
	Параметры (длина × ширина × высота), м			
Добычной блок, в т.ч.:	100 × 16 × 10	100 × 24 × 15	100 × 32 × 20	100 × 40 × 25
– камера	76 × 8 × 10	76 × 12 × 15	76 × 16 × 20	76 × 20 × 25
– МКЦ	76 × 8 × 10	76 × 12 × 15	76 × 16 × 20	76 × 20 × 25
– МПЦ	16 × 24 × 10	24 × 24 × 15	32 × 24 × 20	40 × 24 × 25

Технологические преимущества КСР перед СЭПО:

- двухстадийная выемка запасов блока: первая стадия – выемка запасов камер с минимальными потерями и разубоживанием, вторая стадия – выемка междуканальных (МКЦ) и междупанельных целиков (МПЦ) с потерями и разубоживанием не выше, чем при СЭПО, что обеспечивает существенное улучшение показателей извлечения руды в целом по блоку [10];

- расположение камер и МКЦ по простиранию залежи, что позволяет уменьшить длину буро-доставочных выработок и повысить эффективность работы погрузо-доставочной машины (ПДМ) на выпуске и доставке руды;

- использование скважин уменьшенного диаметра при отбойке запасов камер, что позволяет повысить качество дробления руды и производительность выпуска и доставки руды из камер и обеспечить сохранность МКЦ [11];

- осуществление принудительного обрушения налегающих пород на открытое пространство, что позволяет увеличить сетку скважин и снизить их удельный расход;

- возможность увеличения параметров (ширины и высоты) камер и МКЦ при увеличении мощности залежи, что позволяет снизить удельный объем подготовительных работ (ПНР) и потери руды;
- возможность увеличения угла откоса выпускной траншеи МКЦ до 65° , что позволяет существенно снизить потери руды [12].

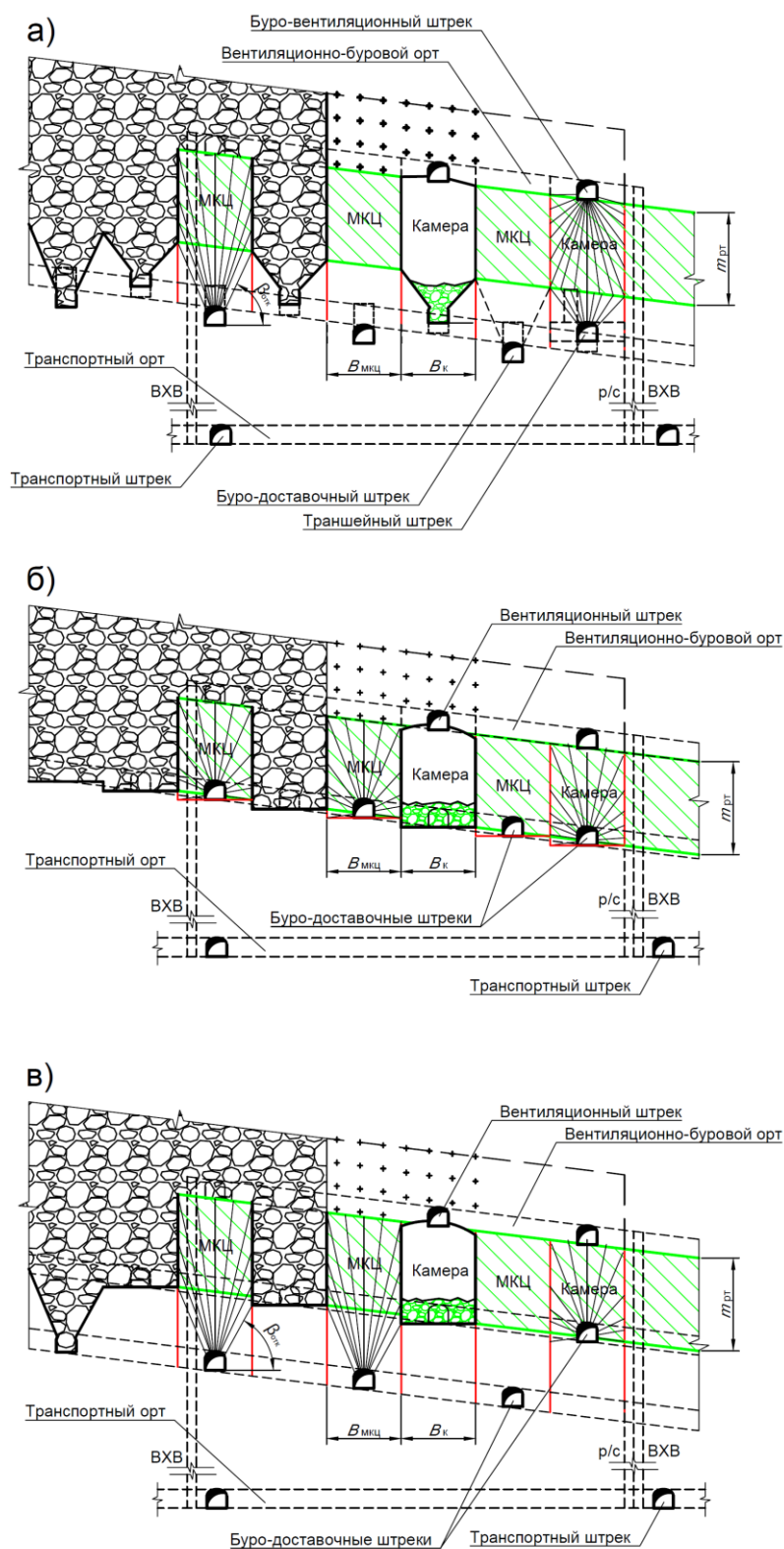


Рис. 1. Варианты КСР:

- а – вариант 1 с траншейным днищем блока; б – вариант 2 с плоским днищем блока;
в – вариант 3 с комбинированным днищем блока

Основными факторами, определяющими эффективность вариантов КСР в условиях пологих месторождений, являются:

- горно-геологические факторы – угол падения и мощность залежи;
- технологические факторы – параметры КСР: ширина и высота камеры и МКЦ, угол откоса породной выпускной траншеи МКЦ;
- экономические факторы – показатели КСР: потери и разубоживание, эксплуатационные затраты на основные процессы добычи руды.

Таким образом, исследование параметров и показателей эффективности вариантов КСР, отличающихся конструкцией днища, и СЭПО в зависимости от мощности залежи является актуальной научно-технической задачей.

Результаты исследований

На основе экономико-математического моделирования исследовано влияние параметров КСР – высоты камеры и МКЦ, равной мощности залежи ($m_{рт}$), ширины камеры (B_k) и МКЦ ($B_{мкц}$), определяемой с учетом мощности залежи (табл. 1), угла откоса выпускной траншеи МКЦ ($\beta_{отк}$), ограниченного углом истечения руды, – на показатели эффективности КСР – потери (Π) и разубоживание (P), удельные затраты на ПНР ($C_{пнр}$), отбойку ($C_{отб}$), выпуск и доставку руды ($C_{вд}$), обрушение налегающих пород ($C_{онп}$).

Результаты исследований изменения Π , P и $C_{пнр}$, $C_{отб}$, $C_{вд}$, $C_{онп}$ по вариантам 1-3 КСР в зависимости от $m_{рт}$, B_k , $B_{мкц}$ и $\beta_{отк}$ и их сопоставление с аналогичными исследованиями по СЭПО в зависимости от $m_{рт}$ приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Изменение потерь и разубоживания руды по вариантам КСР и СЭПО в зависимости от мощности залежи

Система разработки		Угол откоса траншеи МКЦ, град.	Мощность залежи, м			
			10	15	20	25
			Ширина камеры и МКЦ, м			
			8	12	16	20
			Потери / Разубоживание, %			
СЭПО		55	45,0 / 36,9	32,0 / 27,7	24,0 / 24,0	19,0 / 23,9
КСР	Вариант 1	55	22,4 / 10,8	15,6 / 11,0	11,2 / 12,1	8,1 / 15,0
		60	18,6 / 12,9	12,3 / 13,1	7,9 / 14,1	4,6 / 17,6
		65	16,1 / 14,2	9,1 / 14,4	5,5 / 16,4	2,4 / 21,6
	Вариант 2	–	34,3 / 3,3	35,2 / 1,5	35,2 / 1,2	35,0 / 1,1
	Вариант 3	55	15,8 / 9,7	11,8 / 9,9	8,7 / 10,9	6,5 / 13,4
		60	13,3 / 11,9	9,1 / 12,0	5,1 / 13,1	3,1 / 16,1
		65	11,9 / 13,3	7,0 / 13,6	3,4 / 15,4	1,5 / 20,5

На основе анализа данных табл. 2 установлено следующее:

– Π и P при вариантах 1 и 3 КСР значительно (в 2 – 8,5 раза) ниже, чем при СЭПО за счет камерной выемки части запасов блока с использованием ПДМ, оснащенной дистанционным управлением, а также выемки запасов МКЦ через породную выпускную траншею с увеличенным углом откоса;

– наименьшие Π имеет вариант 3 КСР, предусматривающий выпускную траншею только для выемки МКЦ ($\Pi=1,5$ – 15,8 %), а наибольшие – вариант 2 КСР, не предусматривающий каких-либо выпускных траншей ($\Pi=34,3$ – 35 %). Наименьшее P имеет вариант 2 КСР ($P=1,1$ – 3,3 %), а наибольшее – вариант 1 КСР ($P=10,8$ – 21,6 %).

Таблица 3

**Изменение удельных затрат на основные процессы добычи руды
по вариантам КСР и СЭПО в зависимости от мощности залежи**

Технологический процесс добычи руды	Система разработки		Угол откоса траншеи МКЦ, град.	Мощность залежи, м				
				10	15	20	25	
				Ширина камеры и МКЦ, м				
				8	12	16	20	
				Эксплуатационные затраты, руб/т				
ПНР	СЭПО		55	755	505	390	304	
	КСР	Вариант 1	55	841	498	311	219	
			60					
			65					
			Вариант 2					—
		Вариант 3	55	785	479	307	221	
			60					
			65					
Отбойка	СЭПО		55	611	586	573	566	
	КСР	Вариант 1	55	537	547	553	556	
			60	542	556	563	566	
			65	552	569	577	581	
			Вариант 2	—	489	494	497	498
		Вариант 3	55	530	537	541	544	
			60	534	542	545	547	
			65	540	550	555	556	
		Выпуск и доставка руды	СЭПО		55	314	310	312
КСР	Вариант 1		55	280	291	296	303	
			60	287	299	305	312	
			65	295	309	315	325	
	Вариант 2		—	248	252	254	255	
			Вариант 3	55	280	288	291	298
				60	285	294	298	305
	65		291	301	304	314		
Обрушение налегающих пород	СЭПО		55	241	230	225	222	
	КСР	Вариант 1	55	218	213	211	210	
			60	221	217	216	214	
			65	225	222	221	221	
			Вариант 2	—	198	198	198	198
		Вариант 3	55	218	213	211	210	
			60	221	217	216	214	
			65	225	222	221	221	

На основе анализа данных табл. 3 установлено следующее:

– $C_{\text{пнр}}$ при вариантах 1-3 КСР существенно (до 36 %) меньше, чем при СЭПО (за исключением $m_{\text{рт}}=10$ м) за счет снижения удельного объема ПНР с увеличением $B_{\text{к}}$ и $B_{\text{МКЦ}}$. Наименьшие $C_{\text{пнр}}$ имеет вариант 2 КСР ($C_{\text{пнр}}=741 - 194$ руб/т), а наибольшие – вариант 1 КСР ($C_{\text{пнр}}=841 - 219$ руб/т);

– $C_{\text{отб}}$ при вариантах 1-3 КСР существенно (до 20 %) меньше, чем при СЭПО за счет более низких затрат на отбойку запасов камеры. При этом $C_{\text{отб}}$ при вариантах 1 и 3 КСР возрастают за счет увеличения объема отбиваемой породы выпускной траншеи с увеличением $\beta_{\text{отк}}$ и $B_{\text{МКЦ}}$. Наименьшие $C_{\text{отб}}$ имеет вариант 2 КСР ($C_{\text{отб}}=489 - 498$ руб/т), а наибольшие – вариант 1 КСР ($C_{\text{отб}}=539 - 581$ руб/т);

– $C_{вд}$ при вариантах 1-3 КСР существенно (до 21 %) меньше, чем при СЭПО за счет более низких затрат на выпуск запасов камеры и применения производительных ПДМ. При этом $C_{вд}$ при вариантах 1 и 3 КСР возрастают за счет увеличения объема выпускаемой породы из траншеи с увеличением $\beta_{отк}$ и $B_{мкц}$. Наименьшие $C_{вд}$ имеет вариант 2 КСР ($C_{вд}=248-255$ руб/т), а наибольшие – вариант 1 КСР ($C_{вд}=280-325$ руб/т);

– $C_{онп}$ при вариантах 1-3 КСР существенно (до 18 %) меньше, чем при СЭПО за счет уменьшения сетки скважин при отбойке налегающих пород на выработанное пространство. Наименьшие $C_{онп}$ имеет вариант 2 КСР ($C_{онп}=198$ руб/т), а наибольшие – вариант 3 КСР ($C_{онп}=225-210$ руб/т).

В качестве критерия эффективности вариантов КСР принят максимум прибыли на 1 т погашаемых балансовых запасов (Пр) [13], определяемой как разность между извлекаемой ценностью ($C_{изв}$) и себестоимостью добычи ($C_{доб}$) и обогащения (переработки) руды ($C_{пер}$).

$C_{изв}$ определяется количеством и ценой извлекаемых при обогащении цветных (Cu, Ni, Co) и драгоценных (Pt, Pd, Au и Ag) металлов с учетом величин П и Р [13].

$C_{доб}$ включает $C_{пнр}$, $C_{отб}$, $C_{вд}$, $C_{онп}$, а также затраты на внутришахтный транспорт добытой руды до рудного склада на поверхности ($C_{вшт}=320$ руб/т) и общешахтные затраты (в среднем 40 % от $C_{доб}$) [14].

$C_{пер}$ с учетом затрат на транспортирование добытой руды от рудного склада до обогатительной фабрики составляет 1640 руб/т.

Полученные зависимости $C_{изв}$, $C_{доб}$ и Пр по вариантам 1-3 КСР и СЭПО от $m_{рт}$ и $\beta_{отк}$ представлены на рис. 2 – 4.

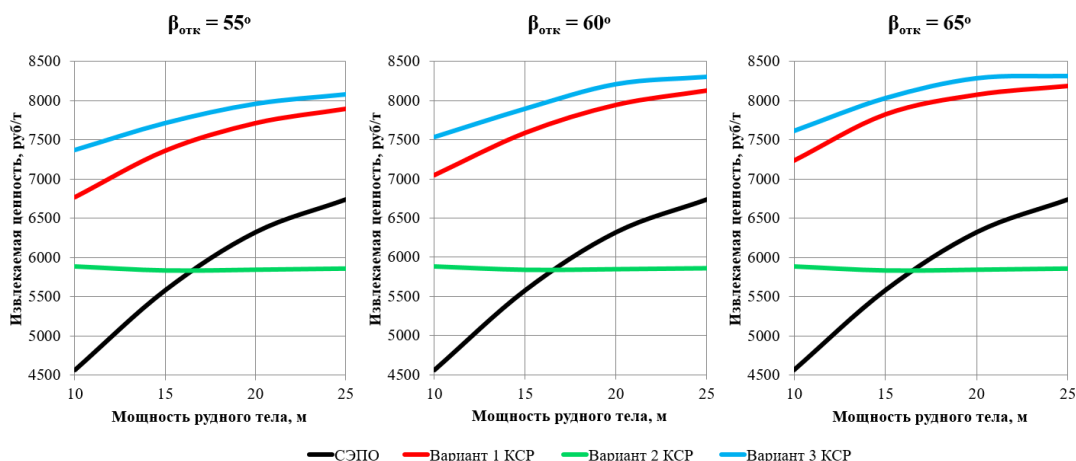


Рис. 2. Зависимости извлекаемой ценности руды по вариантам КСР и СЭПО от мощности залежи при различном угле откоса выпускной траншеи

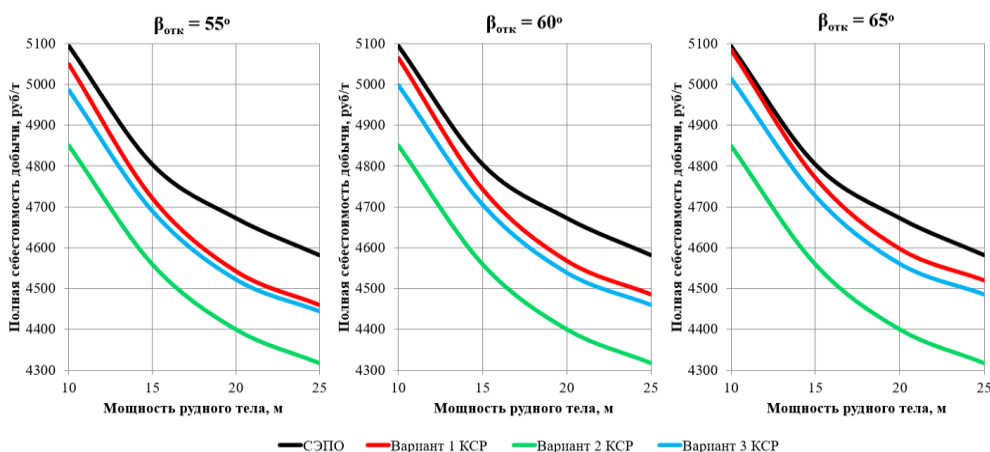


Рис. 3. Зависимости себестоимости добычи руды по вариантам КСР и СЭПО от мощности залежи при различном угле откоса выпускной траншеи

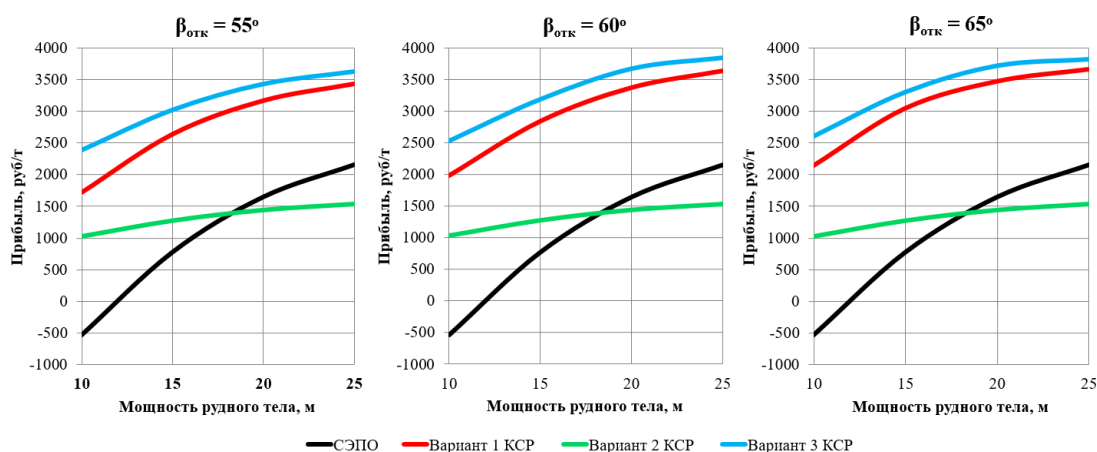


Рис. 4. Зависимости прибыли по вариантам КСР и СЭПО от мощности залежи при различном угле откоса выпускной траншеи

На основе анализа графиков (см. рис. 2 – 4) установлено следующее:

– $C_{изв}$ при вариантах 1 и 3 КСР значительно (в 1,3 – 1,8 раза) выше, чем при СЭПО за счет более низких Π и P . При этом $C_{изв}$ с увеличением $m_{рт}$ и $\beta_{отк}$ при вариантах 1 и 3 КСР возрастает за счет снижения Π . Наибольшую $C_{изв}$ имеет вариант 3 КСР (7617 – 8315 руб/т), а наименьшую – вариант 2 КСР (5837 – 5858 руб/т);

– $C_{доб}$ при вариантах 1-3 КСР существенно (в 1,2 – 1,75 раза) ниже, чем при СЭПО за счет более низких $C_{пнр}$, $C_{отб}$, $C_{вд}$, $C_{онп}$. При этом $C_{доб}$ с увеличением $m_{рт}$ при вариантах 1-3 КСР снижается за счет уменьшения $C_{пнр}$, а с увеличением $\beta_{отк}$ при вариантах 1 и 3 КСР возрастает за счет повышения $C_{отб}$ и $C_{вд}$. Наименьшую $C_{доб}$ имеет вариант 2 КСР ($C_{доб}=1677-1145$ руб/т), а наибольшую – вариант 1 КСР ($C_{доб}=1913-1346$ руб/т);

– Π при СЭПО при $m_{рт} = 10$ м отсутствует (-534 руб/т), при $m_{рт} = 15$ м составляет 776 руб/т, при $m_{рт} = 20$ м – 1650 руб/т, при $m_{рт} = 25$ м – 2160 руб/т;

– Π при вариантах 1-3 КСР существенно (в 1,2 – 1,8 раза) выше, чем при СЭПО. При этом Π с увеличением $m_{рт}$ увеличивается при варианте 1 КСР от 1717 до 3673 руб/т, при варианте 2 КСР – от 1031 до 1540 руб/т, при варианте 3 КСР – от 2389 до 3846 руб/т.

Таким образом, с увеличением $m_{рт}$ от 10 до 25 м, B_k и $B_{мкц}$ от 8 до 20 м и $\beta_{отк}$ от 55 до 65° максимальная прибыль достигается при варианте 3 КСР, сочетающем камерную выемку с плоским днищем и этажное обрушение междукammerного целика на траншейное днище. При этом прибыль выше, чем при СЭПО на 1686 – 2923 руб/т (в 1,2 – 1,8 раза) за счет увеличения извлекаемой ценности на 1573 – 2814 руб/т и снижения эксплуатационных затрат на основные процессы добычи руды на 80 – 97 руб/т.

Заключение

Исследовано влияние параметров (ширины и высоты камеры и МКЦ, угла откоса выпускной траншеи МКЦ) на основные показатели эффективности (потери и разубоживание руды, удельные эксплуатационные затраты на ПНР, отбойку, выпуск и доставку руды, обрушение налегающих пород, прибыль) вариантов КСР, отличающихся конструкцией днища, в зависимости от мощности залежи. Установлено, что в исследуемом диапазоне изменения параметров $m_{рт}=10-25$ м, $B_k=B_{мкц}=8-20$ м и $\beta_{отк}=55-65^\circ$ наибольшая прибыль достигается при варианте 3 – КСР с комбинированной конструкцией днища блока.

Список литературы

1. Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., 2018. Принципы и научно-методические основы формирования нового технологического уклада устойчивого развития горных предприятий России с подземным способом добычи руд. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, Т. 5, № 1, С. 127-134.
2. Яковлев В.Л., 2020. О методологии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых для разработки стратегии развития минерально-сырьевой базы России. *Известия вузов. Горный журнал*, № 7, С. 5-20. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-5-20.
3. Яковлев В.Л., 2023. Обсуждение назревшей проблемы особенности современного периода исследований по проблемам комплексного освоения недр и развития минерально-сырьевой базы России. *Проблемы недропользования*, № 3 (38), С. 21-34. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.03.021.
4. Опарин В.Н., 2008. *Современное состояние, проблемы и стратегия развития горного производства на рудниках Норильска*. Новосибирск: СО РАН, 371 с.
5. Рябикин В.А., Торгашин А.С., Шклярник Г.К., Осипов Р.А., 2007. Вкрапленные руды норильских медно-никелевых месторождений - перспективный источник платинометаллического сырья. *Цветные металлы*, № 7, С. 16-21.
6. Савич И.Н., 2014. Проблемы применения систем с принудительным обрушением при подземной разработке рудных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, № S1, С. 366-373.
7. Малиновский Е.Г., Ахпашев Б.А., Голованов А.И., Гильдеев А.М., 2019. Сравнение результатов физического моделирования и натурного эксперимента по торцевому выпуску руды при системе этажного принудительного обрушения для пологих залежей. *Известия Вузов. Горный журнал*, № 7, С. 34-44. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-34-44.
8. Лукичев С.В., Любин А.Н., 2016. Повышение полноты извлечения и качества руд при разработке тонких пологих месторождений. *Проблемы недропользования*, № 4 (11), С. 69-73. DOI: <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2016.04.069>
9. Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Рожков А.А., Никитин И.В., Соломеин Ю.М., 2022. Исследование влияния показателей извлечения на эффективность подземной отработки месторождений бедных комплексных руд. *Горная промышленность*, № S1, С. 46-52. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-46-52
10. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., Криницын Р.В., 2021. Обоснование конструкции и параметров комбинированной системы разработки пологой залежи бедных комплексных руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, № 5-1, С. 88-104. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-51-0-88.
11. Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Никитин И.В., Соломеин Ю.М., 2023. Совершенствование технологии отработки пологих залежей бедных комплексных руд. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 4, С. 375-385.
12. Смирнов А.А., Барановский К.В., Дьячков П.С., 2023. Система поэтажного обрушения с торцовым выпуском для выемки целиков при отработке пологих рудных тел. *Проблемы недропользования*, № 4 (39), С. 6-15. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.006.
13. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., 2021. *Методология выбора подземной геотехнологии при комбинированной разработке рудных месторождений*. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 340 с.
14. Гибадуллин З.Р., Калмыков В.Н., Петрова О.В., 2016. *Технологические схемы транспортирования рудной массы при подземной отработке приконтурных запасов карьеров*. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 159 с.

References

1. Trubetskoi K.N., Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V., 2018. Printsipy i nauchno-metodicheskie osnovy formirovaniya novogo tekhnologicheskogo uklada ustoichivogo razvitiya gornyykh predpriyatii Rossii s podzemnym sposobom dobychi rud. Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornyykh nauk [Principles and scientific and methodological foundations for the formation of a new technological structure for the sustainable development of Russian mining enterprises with underground ore mining], Vol. 5, № 1, P. 127-134.
2. Yakovlev V.L., 2020. O metodologii kompleksnogo osvoeniya zapasov mestorozhdenii tverdykh poleznykh iskopaemykh dlya razrabotki strategii razvitiya mineral'no-syr'evoi bazy Rossii [On the methodology for the integrated development of reserves of solid mineral deposits to improve the strategy for the development of the mineral resource base of Russia]. Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal, № 7, P. 5-20. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-5-20.
3. Yakovlev V.L., 2023. Obsuzhdenie nazrevshei problemy osobennosti sovremennogo perioda issledovaniya po problemam kompleksnogo osvoeniya neдр i razvitiya mineral'no-syr'evoi bazy Rossii [Discussion of the urgent problem of features of the modern period of research on the problems of integrated development of subsoil and of the development of mineral resource base of Russia]. Problemy nedropol'zovaniya, № 3 (38), P. 21-34. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.03.021.
4. Oparin V.N., 2008. Sovremennoe sostoyanie, problemy i strategiya razvitiya gornogo proizvodstva na rudnikakh Noril'ska [Current state, problems and strategy for the development of mining production at the mines of Norilsk]. Novosibirsk: SO RAN, 371 p.
5. Ryabikin V.A., Torgashin A.S., Shklyarik G.K., Osipov R.A., 2007. Vkraplennyye rudy noril'skikh medno-nikelevykh mestorozhdenii - perspektivnyi istochnik platinometall'nogo syr'ya . [Disseminated ores of the Norilsk copper-nickel deposits as a promising source of platinum metal raw materials]. Tsvetnye metally, № 7, P. 16-21.
6. Savich I.N., 2014. Problemy primeneniya sistem s prinuditel'nyim obrusheniem pri podzemnoi razrabotke rudnykh mestorozhdenii [Problems of using systems with forced caving during underground mining of ore deposits]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal), № S1, P. 366-373.
7. Malinovskii E.G., Akhpashev B.A., Golovanov A.I., Gil'deev A.M., 2019. Sravnenie rezul'tatov fizicheskogo modelirovaniya i naturnogo eksperimenta po tortsevomu vypusku rudy pri sisteme etazhnogo prinuditel'nogo obrusheniya dlya pologikh zalezhei [Comparison of the results of physical modeling and a full-scale experiment on the end release of ore using a system of forced level caving for flat deposits]. Izvestiya Vuzov. Gornyi zhurnal, № 7, P. 34-44. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-34-44.
8. Lukichev S.V., Lyubin A.N., 2016. Povyshenie polnoty izvlecheniya i kachestva rud pri razrabotke tonkikh pologikh mestorozhdenii [Increasing the completeness of extraction and the quality of ores during developing thin flat deposits]. Problemy nedropol'zovaniya, № 4 (11), P. 69-73. DOI: <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2016.04.069>
9. Antipin Yu.G., Baranovskii K.V., Rozhkov A.A., Nikitin I.V., Solomein Yu.M., 2022. Issledovanie vliyaniya pokazatelei izvlecheniya na effektivnost' podzemnoi otrabotki mestorozhdenii bednykh kompleksnykh rud [Study of the influence of recovery indicators on the efficiency of underground mining of low-grade complex ore deposits]. Gornaya promyshlennost', № S1, P. 46-52. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-46-52
10. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Krinitsyn R.V., 2021. Obosnovanie konstruktssii i parametrov kombinirovannoi sistemy razrabotki pologoi zalezhi bednykh kompleksnykh rud . [Justification of the design and parameters of a combined system for the development of a flat deposit of low-grade complex ores]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal), № 5-1, P. 88-104. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-51-0-88.

11. Antipin Yu.G., Baranovskii K.V., Nikitin I.V., Solomein Yu.M., 2023. So-
vershenstvovanie tekhnologii otrabotki pologikh zalezhei bednykh kompleksnykh rud [Im-
proving the technology for mining flat deposits of low-grade complex ores]. Izvestiya
Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle, № 4, P. 375-385.
12. Smirnov A.A., Baranovskii K.V., D'yachkov P.S., 2023. Sistema podetazhnogo
obrusheniya s tortsovym vypuskom dlya vyemki tselikov pri otrabotke pologikh rudnykh tel
[Sublevel caving system with end release for excavating pillars when mining flat ore bodies].
Problemy nedropol'zovaniya, № 4 (39), P. 6-15. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.006.
13. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., 2021. Metodologiya vybora
podzemnoi geotekhnologii pri kombinirovannoi razrabotke rudnykh mestorozhdenii [Meth-
odology for choosing underground geotechnology for combined development of ore
deposits]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo universiteta, 340 p.
14. Gibadullin Z.R., Kalmykov V.N., Petrova O.V., 2016. Tekhnologicheskie
skhemy transportirovaniya rudnoi massy pri podzemnoi otrabotke prikonturnykh zapasov
kar'erov [Technological schemes for transporting ore mass during underground mining of
quarry reserves]. Magnitogorsk: MGTU im. G.I. Nosova, 159 p.

УДК 622.271.5

Архипов Алексей Борисович

инженер,

Институт горного дела Дальневосточного
отделения Российской академии наук,
680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева 51
e-mail: aleksevarhipov97@icloud.com

**ПОДВОДНАЯ ДОБЫЧА ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ:
ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ
ИХ РАЗВИТИЯ***Аннотация:*

В настоящее время наряду с добычей полезных ископаемых на материках весьма перспективной становится добыча их со дна континентального шельфа. В связи с этим актуальной становится тема подводной разработки, что требует создания новых технологий и инструментов, обеспечивающих безопасную, эффективную и надежную работу. Обоснована необходимость развития морской горнодобывающей отрасли в России.

В статье показано, что богатым природным потенциалом обладают прибрежные зоны морей Дальнего Востока России и одним из основных ресурсов являются месторождения прибрежно-морских ильменит-титаномagnetитовых песков в качестве сырья для получения железа и титана, которые необходимо вовлечь в разработку. Важным направлением считается разработка россыпей, например, добыча морского песка, так как она сопровождается образованием значительных объемов пустой породы.

Проведен анализ существующих современных методов подводной добычи полезных ископаемых. Разработка месторождений на дне морей и океанов имеет свои особенности и требует применения специальных способов освоения и использования ряда типов горных машин и оборудования. Показано, что перспективным оборудованием для подводной добычи полезных ископаемых, сконцентрированных в залежах малой мощности, являются самоходные дистанционно управляемые выемочные агрегаты, посредством которых может вестись разработка конкреций или песков. В свою очередь, конструкция самоходного выемочного агрегата, оснащенная сортировочным устройством для отделения из горной массы непродуктивной фракции, позволит уменьшить энергоемкость процесса добычи и подъема полезного ископаемого на поверхность и увеличить рентабельность ведения работ.

Ключевые слова: подводная добыча, полезные ископаемые, методы подводной добычи.

DOI:

Arkhipov Aleksey B.

Engineer,

Institute of Mining of the Far Eastern Branch RAS,
MI FEB RAS,
51 Turgenev Str., 680000 Khabarovsk,
e-mail: aleksevarhipov97@icloud.com

**UNDERWATER MINING OF SOLID
MINERALS: TECHNOLOGIES AND THEIR
DEVELOPMENT PROSPECTS***Abstract:*

Currently, along with mining on the continents, minerals extraction from the bottom of the continental shelf is becoming very promising. In this regard, the topic of underwater mining becomes relevant, which requires the creation of new technologies and tools that ensure safe, efficient and reliable operation. The necessity of developing the offshore mining industry in Russia is substantiated.

The article shows that the coastal zones of the seas of the Russian Far East have rich natural potential and ones of the main resources are the deposits of coastal-marine ilmenite-titanomagnetite sands as raw materials for the production of iron and titanium, which must be involved in development. The development of placers, such as the extraction of sea sand, is considered an important area, since it is accompanied by the formation of significant volumes of waste rock.

The analysis of existing modern methods of underwater mining is carried out. The development of deposits at the bottom of the seas and oceans has its own characteristics and requires the use of special methods for the development and use of a number of types of mining machinery and equipment. It is shown that promising equipment for underwater mining of minerals concentrated in low-power deposits are self-propelled remotely controlled dredging units, through which nodules or sands can be developed. In turn, the design of a self-propelled dredging unit equipped with a sorting device for separating unproductive fractions from the rock mass will reduce the energy intensity for the extraction process and for the lifting minerals to the surface and will increase the profitability of work.

Key words: underwater mining, minerals, methods of underwater mining.

Введение

По прогнозам специалистов, в ближайшие полвека потребление железной руды, меди, цинка, алюминия возрастет в 1,2 – 1,7 раза, а никеля – в 2–3 раза [8]. Уменьшение континентальных запасов этих полезных ископаемых и вовлечение в разработку все более бедных по содержанию месторождений полезных ископаемых со сложными горно-геологическими и гидрологическими условиями, освоение месторождений в отдаленных и необжитых районах с неблагоприятными климатическими и метеорологическими условиями [1–7] заставляет думать о богатствах Мирового океана. Мировой океан является потенциальным источником для получения многих видов полезных ископаемых. Такими являются железомарганцевые конкреции, кобальт-марганцевые корки, глубоководные сульфиды, россыпи золота и титана, строительные материалы и др. [8 – 10]. Подводные запасы некоторых полезных ископаемых весьма значительны и экономически привлекательны для освоения, что позволяет планировать различные проекты их разработки. Подводная добыча полезных ископаемых ведется в США, Канаде, ФРГ, Франции, Великобритании, Италии, Швеции, Дании, Японии и некоторых других странах.

Одним из примеров является Япония, целиком окруженная морями, одним из которых является Японское море. Японское море – тектонически активный регион со множеством подводных вулканов, что обуславливает формирование богатых месторождений полезных ископаемых, например, фосфоритов, марганца, барита. При добыче полезных ископаемых в Японии разрабатываются прибрежно-морские россыпи, содержащие в своем составе магнетит, титаномагнетит, ильменит. Содержание диоксида титана в концентратах тяжелой фракции из этих россыпей достигает 12 %, железа – 23 – 60 %.

Образование аллювиальных отложений титаномагнетитовых песков в прибрежной части связано с формированием продуктов разрушения вулканических пород. Запасы титаномагнетитовых песков в Японии оцениваются от 160 млн до 1 млрд т, эти пески используются для производства стали, титана, ванадия. В металлургическом производстве титаномагнетитовые пески используются для усреднения шихты. Во избежание разрушения собственных островов, японская промышленность использует импортные строительные материалы различного состава, в том числе песчано-гравийные смеси. Металлургическое производство, использующее ресурсы прибрежно-морских отложений, обогащенных минералами железа и титана, имеется в Новой Зеландии.

Богатым природным потенциалом обладают прибрежные зоны морей Дальнего Востока России. Одним из основных ресурсов являются месторождения прибрежно-морских ильменит-титаномагнетитовых песков в качестве сырья для получения железа и титана. Выделены районы их сосредоточения: Южно-Курильский, Халактырский и Озерновский (южная часть Камчатки), Южно-Сахалинский и Совгаванский [11].

Халактырский район простирается на 300 км вдоль восточного побережья Камчатки и включает месторождения Халактырское, Жупановское, Кроноцкое и др. На самом крупном Халактырском месторождении выполнена детальная разведка, по результатам которой определены запасы песка 78,7 млн т. Из него может быть получено 5,85 млн т титаномагнетитового концентрата и 0,96 млн т железа растворимого. Имеются перспективы увеличения запасов песка на 25 – 30 млн т.

Наибольшее число россыпей находится в Южно-Курильском районе: месторождения Ручарское, Рейдовское, Зеркальный Пляж, Ветровое и более 20 рудопроявлений.

На острове Итуруп находится десять прибрежно-морских ильменит-магнетитовых россыпей, на острове Уруп – семь, на шельфе острова Кунашир – шесть. Прогнозные ресурсы металлов в подводных россыпях составляют: ванадий – более 1 млн т, титан – 39 млн т, железо – 315 млн т.

Запасы титаномагнетитовых песков по категории С₂ для Рейдовского и Ручарского месторождений определены в 11,8 млн т, для Ветрового – в 3,5 млн т. Концен-

траты из песков содержат около 0,5 % пентоксида ванадия. Из ценных попутных примесей отмечались платина, золото, серебро, индий, скандий, палладий и галлий. Прогнозные ресурсы песка для месторождения Зеркальный Пляж оценены в 22,8 млн т, для Рейдовского и Ручарского – в несколько десятков миллионов тонн. Прогнозные ресурсы металлов 15 россыпей оцениваются в 13,1 млн т железа, 1,65 млн т диоксида.

По оценкам специалистов разработка россыпей может быть экономически оправдана при условии получения концентрата на месте. Возможно строительство завода по производству окатышей в одном из портов Сахалинской области, там есть необходимые для этого энергетические ресурсы. Также концентраты пригодны как сырье для получения пигментного диоксида титана.

Добыча морского песка. Разработка перечисленных месторождений будет сопровождаться образованием значительных объемов пустой породы – песка как строительного материала. Песок в своем составе имеет твердые минералы, преимущественно кварц и полевые шпаты. Получение морского песка производится намывным способом. Песок имеет высокую степень чистоты, поскольку не имеет в своем составе органических примесей. Достигается такая чистота промыванием на этапах добычи. Первый этап чистки – при погрузке на баржи, второй этап чистки – при выгрузке на склады. Таким образом, действует принцип двойной фильтрации, механическая фильтрация производится на месте добычи, гидромеханическая фильтрация – на оборудовании производства. Песок классифицируется на глинистый, пылевидный, крупнозернистый. Путем фракционирования состав песка освобождают от примесей глины и пыли. Сырье имеет стойкость к выветриванию, прочность и химическую инертность, благодаря преобладанию в составе кварца. Это преимущество дает возможность использовать песок в любых строительных работах.

Применение морского песка в производстве. Спрос на песок достаточно велик, строительному производству нужен данный материал. Применяется морской песок для изготовления бетона, тротуарных плиток, колодцев для канализации, лакокрасочных изделий, дренажных установок, а также для создания ландшафтного дизайна. Ключевым фактором ценообразования любого полезного ископаемого является сложность его добычи.

Разработка месторождений на дне морей и океанов имеет свои особенности и требует применения специальных способов освоения и использования ряда типов горных машин и оборудования. Так, различают скреперный, землесосный, дражный [9] и другие способы разработки подводных месторождений твердых полезных ископаемых.

Скреперным способом разрабатывают россыпные месторождения золота, железомарганцевых конкреций, строительных материалов (песок, гравий, ракушечник, кораллы) залегающих вблизи берегов на глубинах до 5 м. Канатно-скреперные установки, размещаемые на берегу, состоят из скреперного ковша, лебедки, приводной силовой станции и комплекта тросов и блоков. Для обеспечения работы канатно-скреперных установок в створе траншеи устанавливаются головная или хвостовая опоры. Во время рабочего хода при протягивании по дну происходит загрузка ковша с последующей выгрузкой грунта на берегу, после чего ковш выполняет холостой ход в начальное положение посредством хвостовой лебедки [6, 14]. Применяемые скреперные ковши имеют вместимость от 0,75 до 3,5 м³, ширину 1 – 2 м и длину хода до 150 м.

Землесосным способом выполняют добычные, дноуглубительные и гидротехнические работы: на глубинах до 20 м – землесосами общего назначения; на глубинах до 70 м – землесосами специального назначения. По условиям эксплуатации земснаряды могут разделяться на надводные, выносные и подводные, по типу транспортировки породы – на земснаряды с грунтовым насосом, эрлифтные, эжекторные и комбинированные, а по способу передвижения – самоходные и несамоходные. Земснаряды состоят из следующих основных узлов: понтона; породозаборного устройства (всасывающей трубы), которое служит для разрушения и забора породы; устройства для транспортирова-

ния породы; папильонажной системы для осуществления рабочих перемещений породозаборного устройства и всего земснаряда [15].

Дражный способ получил распространение при разработке подводных россыпных месторождений полезных ископаемых. Драга представляет собой комплекс машин и механизмов, смонтированных на плавсредстве [15]. Драга оснащается рабочим органом в виде многочерпаковой цепи на раме для добычи песков из-под воды, промывочно-обогащительными агрегатами для их обогащения, извлечения ценных минералов и транспортно-отвальным оборудованием для укладки пустых пород в отвал. Морские драги обычно монтируются на килевых судах, обеспечивающих их нормальную плавучесть и эксплуатацию в открытом море. Для разработки глубинных морских россыпей многочерпаковые драги не применяют, наиболее целесообразным в этом случае является использование одночерпаковых драг.

Каждый из перечисленных способов имеет свои преимущества и недостатки. Так, в скреперном способе обеспечивается совмещение процессов погрузки и транспортирования груза, его перемещение в горизонтальном и наклонных (вверх и вниз) направлениях, надежность работы в сложных условиях, простое изменение дальности доставки, невысокая стоимость, простота монтажа, однако для этого способа характерны малая производительность, ограниченная дальность транспортирования, быстрый износ канатов, высокая энергоемкость. К достоинствам землесосного и дражного способов можно отнести непрерывность технологического процесса извлечения и транспортирования грунта, высокий уровень комплексной механизации и возможность автоматизации управления, высокую производительность труда, а к недостаткам – сложность работы на связных грунтах [16 – 17].

Перспективным оборудованием для подводной добычи полезных ископаемых, сконцентрированных в залежах малой мощности, являются самоходные дистанционно управляемые выемочные агрегаты, посредством которых может вестись разработка конкреций или песков. Данные агрегаты в основном представляют собой гусеничное шасси, на котором размещено рабочее оборудование, обеспечивающее выемку полезного ископаемого и подъем по трубопроводу на дневную поверхность. Одним из реализованных проектов подобных агрегатов является подводный бульдозер, предназначенный для освоения прибрежных россыпей и планировки дна при строительных работах, конструкции «ЦНИИС-1» (СССР), который может работать на глубине до 16 м [6]. В Японии подводные бульдозеры выпускаются фирмами "Komatsu" и "Hitachi", так, бульдозер Д-155-1 фирмы "Komatsu" обеспечивает работу на глубине до 20 м, управляется оператором, находящимся на глубине, или дистанционно, для точного позиционирования установки на дне применяется акустическая система [15, 18, 19].

Недостатком выемочных агрегатов является валовая выемка и подъем грунта, включающего в себя как продуктивную фракцию, так и некондиционную (пустые породы). В связи с этим предлагается оснастить подобные выемочные агрегаты сортировочными устройствами для отделения некондиционной фракции на месте добычи (под водой) и подъема на поверхность лишь продуктивной фракции, что позволит уменьшить массу и размеры трубопровода, а также снизит энергоемкость транспортировки.

Заключение

В связи с истощением запасов ряда полезных ископаемых на суше, все больше проявляется тенденция к росту добычи полезных ископаемых со дна морей. Выемка полезных ископаемых ведется преимущественно с помощью драг, землесосов, скреперных установок и другого оборудования. Перспективным оборудованием является конструкция самоходного выемочного агрегата, оснащенная сортировочным устройством для отделения из горной массы непродуктивной фракции, что позволит уменьшить энергоемкость процесса добычи и подъема полезного ископаемого на поверхность и увеличить рентабельность ведения работ.

Список литературы

1. Юматов Б.П., Валатка З.И., Секисов А.Г., Зыков Н.В., 1984. Управление рудопотоками на карьерах с использованием ЭВМ. *Горный журнал*, № 12, С. 33 – 41.
2. Секисов А.Г., Шевченко Ю.С., Лавров А.Ю., 2012. Взрывоинъекционная подготовка руд к выщелачиванию. *Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды*. Екатеринбург: Институт горного дела УрО РАН, С. 125 –132.
3. Чебан А.Ю., 2019. Совершенствование циклично-поточных технологий ведения горных работ с применением карьерных комбайнов. *Маркшейдерия и недропользование*, № 1, С. 20 – 22.
4. Frank U., 2014. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges. *Software & Systems Modeling*. Vol. 13, No. 3, P. 941 - 962.
5. Чебан А.Ю., 2019. Технология разработки крутопадающих рудных тел с применением дистанционно управляемого горного оборудования. *Маркшейдерский вестник*, № 2, С. 56 – 60.
6. Ялтанец И.М., Бессонов Е.А., 1989. *Технология разработки обводненных месторождений в условиях Крайнего Севера*. Москва: Центральное правление Всесоюзного научно-технического горного общества, 98 с.
7. Секисов Г.В., Чебан А.Ю., 2021. Малоотходная технология освоения сложно-структурных месторождений с применением комбинированных схем выемки и переработки руд. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 6, С. 110-118.
8. Кириченко Ю.В., Каширский А.С., 2015. История и перспективы развития глубоководной добычи полезных ископаемых. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11, С. 114 –122.
9. Кисляков В.Е., Катышев П.В., Шкаруба Н.А., Елизарьев В.С., Башкатова Я.П., 2021. Добыча полезных ископаемых со дна континентального шельфа автономным подводным комплексом. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3-1, С. 318 – 329.
10. Чебан А.Ю., 2016. Гидромеханизированная добыча строительных горных пород в бассейне реки Амур. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. С.О. Макарова*, № 2 (36), С. 73 – 78.
11. Архипов Г.И., Кулиш Е.А., Кулиш Л.И., Меркурьев К.М., Фрумкин И.М., 1985. *Железные и марганцевые руды Дальнего Востока*. Владивосток: ДВНЦ АН СССР. 296 с.
12. Хрунина Н.П., Чебан А.Ю., 2015. Оценка влияния водонасыщения на дезинтеграцию высокоглинистых песков при разработке россыпей благородных металлов. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*, № 4 (52), С. 50 – 55.
13. Чебан А.Ю., 2015. Комплекс для перегрузки насыпных строительных материалов в средства водного транспорта. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*, № 5 (33), С. 43 – 47.
14. Добрецов В.Б., Опышко Д.С., 2006. Канатно-скреперная разработка малых континентальных и прибрежно-морских россыпей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 10, С. 229 – 239.
15. Бруякин Ю.В., Бубис Ю.В., Молочников Л.Н., Нурок Г.А., Яблоков К.В., 1979. *Технология добычи полезных ископаемых со дна озер, морей и океанов*. Москва: Недра, 381 с.
16. Кириченко Ю.В., Каширский А.С., Иващенко Г.С., 2019. Анализ экологического воздействия разработок подводных месторождений твердых полезных ископаемых. *Горная промышленность*, №3 (145), С. 92 – 97.

17. Кириченко Ю.В., Каширский А.С., 2016. Геоэкологические аспекты рационального использования океанических месторождений твердых полезных ископаемых. *Экология и промышленность России*, № 7, С. 36 – 41.

18. *Бульдозеры для подводных работ*. URL: <https://t-magazine.ru/pages/zb/> (дата обращения: 10.10.2022).

19. *Рытье траншей для подводных трубопроводов*. URL: <http://www.transportsense.ru/transens-712-4.html> (дата обращения: 10.10.2022).

References

1. Yumatov B.P., Valatka Z.I., Sekisov A.G., Zykov N.V., 1984. Upravlenie rudopotokami na kar'erakh s ispol'zovaniem EVM [Management of ore flows in quarries using computers]. *Gornyi zhurnal*, № 12, P. 33 – 41.

2. Sekisov A.G., Shevchenko Yu.S., Lavrov A.Yu., 2012. Vzryvoyn'ektsionnaya podgotovka rud k vyshchelachivaniyu . [Explosive preparation of ores for leaching]. *Fundamental'nye problemy formirovaniya tekhnogennoi geosredy*. Ekaterinburg: Institut gornogo dela UrO RAN, P. 125 –132.

3. Cheban A.Yu., 2019. Sovershenstvovanie tsiklichno-potochnykh tekhnologii vedeniya gornykh rabot s primeneniem kar'ernykh kombainov [Improvement of cyclic-flow technologies of mining operations with the use of quarry combines]. *Marksheideriya i nedropol'zovanie*, № 1, P. 20 – 22.

4. Frank U., 2014. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges. *Software & Systems Modeling*. Vol. 13, No. 3, P. 941 - 962.

5. Cheban A.Yu., 2019. Tekhnologiya razrabotki krutopadayushchikh rudnykh tel s primeneniem distantsionno upravlyаемого gornogo oborudovaniya [Technology for the development of steeply falling ore bodies using remotely controlled mining equipment]. *Marksheiderskii vestnik*, № 2, P. 56 – 60.

6. Yaltanets I.M., Bessonov E.A., 1989. Tekhnologiya razrabotki obvodnennykh mestorozhdenii v usloviyakh Krainego Severa [Technology of development of irrigated deposits in the conditions of the Far North]. Moscow: Tsentral'noe pravlenie Vsesoyuznogo nauchno-tekhnicheskogo gornogo obshchestva, 98 p.

7. Sekisov G.V., Cheban A.Yu., 2021. Malootkhodnaya tekhnologiya osvoeniya slozhnostrukturnykh mestorozhdenii s primeneniem kombinirovannykh skhem vyemki i pererabotki rud [Low-waste technology for the development of complex-structured deposits using combined schemes of ore extraction and processing]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 6, P. 110-118.

8. Kirichenko Yu.V., Kashirskii A.S., 2015. Istoriya i perspektivy razvitiya glubokovodnoi dobychi poleznykh iskopaemykh [History and prospects of the development of deep-sea mining]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 11, P. 114 –122.

9. Kislyakov V.E., Katyshev P.V., Shkaruba N.A., Elizar'ev V.S., Bashkatova Ya.P., 2021. Dobycha poleznykh iskopaemykh so dna kontinental'nogo shel'fa avtonomnym podvodnym kompleksom [Extraction of minerals from the bottom of the continental shelf by an autonomous underwater complex]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 3-1, P. 318 – 329.

10. Cheban A.Yu., 2016. Gidromekhanizirovannaya dobycha stroitel'nykh gornykh porod v basseine reki Amur [Hydro-mechanized mining of construction rocks in the Amur River basin]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. S.O. Makarova*, № 2 (36), P. 73 – 78.

11. Arkhipov G.I., Kulish E.A., Kulish L.I., Merkur'ev K.M., Frumkin I.M., 1985. Zheleznye i margantsevye rudy Dal'nego Vostoka [Iron and manganese ores of the Far East]. Vladivostok: DVNTs AN SSSR. 296 s.

12. Khrunina N.P., Cheban A.Yu., 2015. Otsenka vliyaniya vodonasyshcheniya na dezintegratsiyu vysokoglinistykh peskov pri razrabotke rossypei blagorodnykh metallov . [Influence assessment of water saturation on the disintegration of high-clay sands during development of placers of precious metals]. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova, № 4 (52), P. 50 – 55.
13. Cheban A.Yu., 2015. Kompleks dlya peregruzki nasypnykh stroitel'nykh materialov v sredstva vodnogo transporta [A complex for transshipment of bulk construction materials into water transport vehicles]. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova, № 5 (33), P. 43 – 47.
14. Dobretsov V.B., Opryshko D.S., 2006. Kanatno-skrepernaya razrabotka malykh kontinental'nykh i pribrezhno-morskikh rossypei [Rope-scraper development of small continental and coastal-marine placers]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 10, P. 229 – 239.
15. Bruyakin Yu.V., Bubis Yu.V., Molochnikov L.N., Nurok G.A., Yablokov K.V., 1979. Tekhnologiya dobychi poleznykh iskopaemykh so dna ozer, morei i okeanov [Technology of mining from the bottom of lakes, seas and oceans]. Moscow: Nedra, 381 p.
16. Kirichenko Yu.V., Kashirskii A.S., Ivashchenko G.S., 2019. Analiz ekologicheskogo vozdeistviya razrabotok podvodnykh mestorozhdenii tverdykh poleznykh iskopaemykh [Analysis of the environmental impact of the development of underwater deposits of solid minerals]. Gornaya promyshlennost', №3 (145), P. 92 – 97.
17. Kirichenko Yu.V., Kashirskii A.S., 2016. Geoekologicheskie aspekty ratsional'nogo ispol'zovaniya okeanicheskikh mestorozhdenii tverdykh poleznykh iskopaemykh [Geocological aspects of the rational use of oceanic deposits of solid minerals]. Ekologiya i promyshlennost' Rossii, № 7, P. 36 – 41.
18. Bul'dozery dlya podvodnykh rabot [Bulldozers for underwater work]. URL: <https://t-magazine.ru/pages/zb/> (data obrashcheniya: 10.10.2022).
19. Ryt'e transhei dlya podvodnykh truboprovodov [Digging trenches for underwater pipelines]. URL: <http://www.transportsense.ru/transens-712-4.html> (data obrashcheniya: 10.10.2022).



ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.833.5

Сентябов Сергей Васильевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория геодинамики и горного давления,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: sentyabov1989@mail.ru

Ушаков Евгений Михайлович

младший научный сотрудник,
лаборатория геодинамики и горного давления,
Институт горного дела УрО РАН,
e-mail: sentyabov1989@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ КЫЗЫЛ-ТАШТЫГСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ*

Аннотация:

Оценку напряженного состояния конструктивных элементов камерных систем разработки с обрушением крепких руд необходимо производить при решении геомеханических задач на основе выявленного несоответствия параметров прочностных свойств скальных горных пород, определенных по существующим методикам, их значениям в натурных условиях. Разница между полученными значениями данных параметров может достигать 1,8 раза.

В процессе исследований определены параметры природного напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород на основе проведенных натурных исследований в условиях интенсивной разработки Кызыл-Таштыгского месторождения подземным способом.

Исследования направлены на снижение и прогнозирование риска геодинамических явлений при ведении горных работ. Данная задача неосуществима без ведения мониторинга напряженного состояния месторождения, информационного обеспечения недропользователей при геологическом изучении и разработке месторождения полезного ископаемого. Исследования проведены с помощью общепринятых методов и аппаратуры, согласно требованиям инструктивных документов.

Таким образом, расчетный геомеханический прогноз и определение первоначального напряженного состояния на рудниках остаются до настоящего времени весьма актуальными.

Ключевые слова: метод целевой разгрузки, напряженно-деформированное состояние, наблюдательная станция, устойчивость, переменные во времени напряжения, массив горных пород, физико-механические свойства.

DOI:

Sentyabov Sergey V.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of Geodynamics and Mining Pressure,
Institute of Mining, Ural Branch of the RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: sentyabov1989@mail.ru

Ushakov Evgeniy M.

Junior Researcher, Laboratory of Geodynamics and Mining Pressure, Institute of Mining,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
e-mail: sentyabov1989@mail.ru

DETERMINATION OF INITIAL STRESSES OF A ROCK MASSIF IN CONDITIONS OF THE KYZYL-TASHTYG DEPOSIT

Abstract:

An assessment of the stress state of structural elements of chamber mining systems with the collapse of hard ores is to be made when solving geomechanical problems based on the identified discrepancy between the parameters of the strength properties of rocks, determined by existing methods, and their values in natural conditions. The difference between the obtained values of these parameters can reach 1.8 times.

In the process of research, the parameters of the natural stress-strain state (SSS) of the rock mass were determined based on field studies carried out under the conditions of intensive underground development of the Kyzyl-Tashtyg deposit.

Research is aimed at reducing and predicting the risk of geodynamic phenomena during mining operations. This task is not feasible without monitoring the stressed state of the deposit and providing information to subsoil users during the geological study and development of a mineral deposit. The studies were carried out using generally accepted methods and equipment, in accordance with the requirements of the instructional documents.

Thus, the calculated geomechanical forecast and determination of the initial stress state in mines remain very relevant to this day.

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

Введение

Месторождение расположено в северной части Кызыл-Таштыгской депрессии и локализовано в нижнекембрийских слаботрещинчатых скальных и полускальных породах. Депрессия сложена вулканогенным и осадочным комплексами пород, входящими в состав верхней подсвиты туматтайгинской и сыынакской свит. Депрессия имеет блоковое строение, внутри ее выделяются прогибы и поднятия.

* Исследования выполнены по государственному заданию № №075-00412-22 ПП, тема № (FUWE-2022-0003), рег. №1021062010536-3-1.5.1.

Вулканогенно-осадочные вмещающие породы подвержены различной степени выветривания и трещиноватости.

Рудные тела в основном залегают согласно с контактами литологических разновидностей вмещающих пород, реже залегание их обусловлено развитием тектонических зон. В плане рудные тела расположены в пределах участка протяженностью 1000 м и шириной 150 – 200 м, по падению на глубину до 350 – 500 м.

Вмещающие породы в зависимости от структурно-текстурных особенностей в основном имеют достаточно высокие прочностные показатели.

Породы надрудной толщи представлены диабазовыми порфиритами, туфами смешанного и кислого состава и зеленокаменными породами, относятся к породам средней и высокой крепости, которая по шкале М.М. Протодяконова составляет в среднем $f = 6 \div 9$, для незатронутых процессами метаморфизма вулканогенных пород коэффициент крепости составляет 10 – 15.

Устойчивые участки массива горных пород и участки средней устойчивости представлены альбитофирами, кварцитами, порфиритами крепостью 10 – 15.

Ограниченно устойчивые участки массива представлены серицитовыми и хлоритовыми сланцами, кварц-хлоритовыми породами крепостью 3 – 4.

Возникающие в массиве горных пород тектонические напряжения необходимо рассматривать как изменяющиеся по амплитуде горизонтальные нагрузки с определенной периодичностью. Реальный подход к оценке напряженного состояния пород – экспериментальные натурные измерения в пространстве рудников и во времени с установлением закономерностей их роста с глубиной и изменения в пространстве [2 – 3].

Методы определения изменения НДС массива горных пород

На данный момент методы определения НДС делятся на 3 основных вида – геологические, геомеханические, геофизические и др. методы [4 – 10].

Геомеханические методы обладают относительно высокой точностью определения напряжений, так как основаны на прямых измерениях деформационных процессов в области массива. Но они являются весьма трудозатратными, а результаты имеют локальный характер. Методы можно разделить на 3 группы [2], представленные в табл. 1.

Таблица 1

Геомеханические методы

Деформационные методы	Компенсационные методы	Методы полной разгрузки керна
Метод частичной разгрузки	Метод гидроразрыва	Метод ВНИМИ
Метод разности давлений	Метод плоских домкратов	Метод Хаста
Метод щелевой разгрузки	Метод компенсационной нагрузки	Метод Лимана
Метод параллельных скважин	Метод буровых скважин	
Метод упругих включений		

В основе деформационных методов – определение упругих деформаций и пересчет их в НДС массива.

Метод частичной разгрузки

Метод основан на измерении деформаций области массива, разгруженной центральным отверстием.

Этот метод имеет 3 модификации:

- метод разгрузки с наклеиванием тензодатчиков;
- метод разгрузки с использованием съемных тензометров;
- метод разгрузки на большой базе.

Погрешности данных методов зависят от погрешностей измерения исходных величин и упругих характеристик горных пород [3].

Метод щелевой разгрузки

Этот метод является одним из основных методов для оценки деформаций массива после нарушения его целостности. По сравнению с другими методами разгрузки, метод щелевой разгрузки характеризуется меньшей зависимостью от разномодульности горных пород в зоне измерений [1].

Методика позволяет исключить большинство ураганных значений напряжений, возникающих от влияния локальных одиночных трещин, по сравнению с измерениями деформаций в буровых скважинах. Методика позволяет оперативно получить количественные характеристики первоначального поля напряжений в масштабе основных конструктивных элементов систем разработки (рис. 1) [1].

Методика измерения первоначального напряженно-деформированного состояния массива горных пород

Измерение напряжений горных пород производилось по методике ИГД УрО РАН [1 – 3]. Основные положения методики приведены ниже.

Метод щелевой разгрузки является одним из видов натурных измерений напряжений, основанным на оценке деформаций массива после нарушения его сплошности [11 – 14]. По сравнению с другими методами разгрузки, метод щелевой разгрузки характеризуется меньшей зависимостью от разномодульности горных пород в зоне измерений.

Метод щелевой разгрузки основан на измерении деформаций стенки выработки, возникающих при создании в ней полости в виде щели и измерения при этом соответствующих реакций в виде деформаций по распорным реперам, установленным перпендикулярно разгрузочной щели (см. рис. 1). Метод достаточно помехоустойчив за счет осреднения информации на базе около 3 диаметров образованной щели.

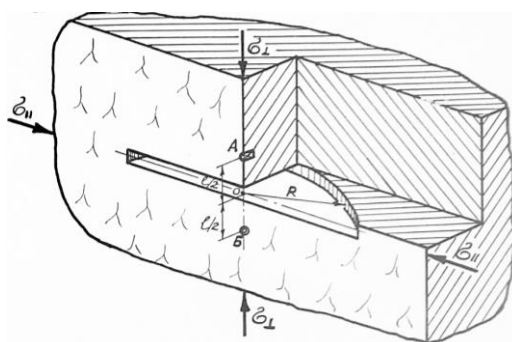


Рис. 1. Схема к измерению напряжений методом щелевой разгрузки

В вышеизложенном порядке на различных горизонтах рудника в процессе закладки наблюдательных станций горного давления выполнено 15 разгрузочных щелей. Фотографии, фиксирующие этапы производства работ, приведенные в данном отчете, взяты из фотоархива по полевым работам, а также предоставлены специалистами геомеханической службы, осуществлявшей содействие и сопровождение в проведении полевых работ по закладке наблюдательных станций горного давления.

Для горизонтальной и вертикальной щелей при производстве работ на станции основное отличие в ориентировании пропила – вертикально или горизонтально. Соответственно, в результате производятся измерения горизонтальных (вертикальных) деформаций.

Определение первоначального напряженно-деформированного состояния массива горных пород

Вмещающие породы и руды Кызыл-Таштыгского месторождения по своим физическим свойствам представлены двумя типами: скальными и полускальными (табл. 2).

Таблица 2

Физико-механические свойства пород Кызыл-Таштыгского месторождения

Наименование руд и пород	Категория крепости по буримости	Коэффициент крепости по Протодьяконову	Объемный вес, т/м ³	Пористость, %	Влажность, %
Массивная медно-свинцово-цинковая руда	IX-X	8-10-15	4,1	0,26	0,24
Вкрапленная медно-свинцово-цинковая руда	VIII-X	8-10-15	3,9	0,18	-
Массивная медно-цинковая руда	IX-X	8-10-15	4,2	0,23	0,26
Вкрапленная медно-цинковая руда в кварц-карбонатной породе	VIII-X	8-10-15	3,5	0,59	0,27
Вкрапленная медно-цинковая руда в кварц-хлоритовых сланцах	V-VII	3	3,4	-	-
Массивные колчеданные руды	IX-X	8-10-15	4,5	0,65	0,22
Альбитофиры	IX-X	15	2,6	0,08	-
Кремнистые сланцы	X-XI	15	2,6	0,05	-
Кварциты	X-XI	15	2,6	0,06	-
Кварц-карбонатная порода	VIII-X	8	2,7	0,45	-
Диабазовый порфирит	VIII-IX	10	2,8	0,11	-
Туфопорфириды	VIII-X	10	2,6	0,41	-
Зеленокаменная порода	VIII-X	4-10	2,6	0,16	-
Хлоритовые сланцы	V-VII	3	2,7	0,03	-
Туффиты	VIII-X	4-10	2,6	0,13	-
Плагипорфириты	VIII-X	4-10	2,6	0,07	-
Кварц-хлоритовая порода	V-VII	3	2,7	0,26	-
Туфы кислого состава	VIII-X	4-10	2,6	0,18	-
Серицитовые сланцы	V-VII	3	2,7	0,10	-
Порфириды	VIII-X	10	2,6	0,15	-
Туфы смешанного состава	VIII-X	4-10	2,6	0,19	-

К скальным породам относятся массивные сплошные руды всех типов, альбитофиры, порфириты, туфы, зеленокаменные породы, кварцево-карбонатные породы и кремнистые сланцы. Для скальных пород характерны высокая прочность, крепость, монолитность, устойчивость в условиях выветривания, способность выдерживать вертикальные откосы в обнажениях в течение длительного времени. По буримости скальные породы относятся к 8 – 12 категориям. Объемный вес их составляет $2,56 - 2,80 \text{ т/м}^3$, величина пористости $0,05 - 0,3 \%$, влажность не превышает $0,3 \%$.

К полускальным породам относятся туфопорфирииды, порфирииды, порфиритоиды, серицитовые и хлоритовые сланцы, серицитизированные туффиты и филлитизированные кремнистые сланцы. Эти породы имеют склонность к размоканию (особенно сланцы), неустойчивы в условиях выветривания и подземных выработок, обладают пониженными прочностью и крепостью. Категория полускальных пород по буримости высокая – до 8.

Результаты замера первоначального напряженно-деформированного состояния массива горных пород

Принято решение в качестве режущего инструмента использовать отрезную машину по камню с алмазным диском. Данное оборудование полностью автономно, не требует подключения к магистралям со сжатым воздухом, привязки к электрическим сетям и водопроводу, что позволяет существенно увеличить количество экспериментальных замеров для получения натурных данных, т.к. время на выполнение замера не превышает 20 мин, а также расширяет возможности выбора мест производства исследований. Реперы также претерпели изменения, вместо съемных цанговых появилась возможность применять постоянные оловянные. Это позволило снизить себестоимость их производства, а также появилась возможность производить измерения напряженного состояния во времени. Схема расположения замерных станций методом щелевой разгрузки горизонт п/э -120 м Кызыл-Таштыгского подземного рудника представлена на рис. 2.

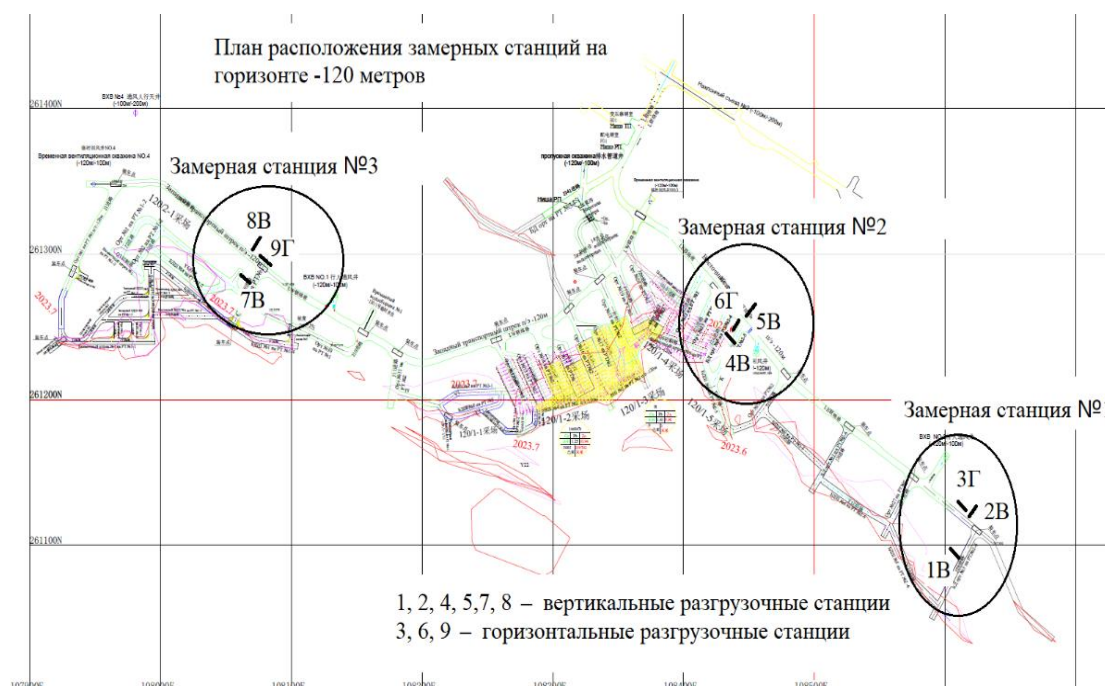


Рис. 2. Схема расположения замерных станций методом щелевой разгрузки горизонт п/э -120 м Кызыл-Таштыгского подземного рудника

Напряжения в массиве горных пород вычисляются по формулам:

$$\sigma_{z(\perp)} = \frac{\sigma_{z(\perp)}^K - \sigma_{//} K_{z(//)}}{K_{z(z)}}; \quad \sigma_{z(//)} = \frac{\sigma_{z(//)}^K - \sigma_{\perp} K_{z(\perp)}}{K_{z(z)}};$$
$$\sigma_{\perp} = \sigma_{\perp}^K - \mu [\sigma_z (K_{z(z)} - 1) + \sigma_{//} (K_{z(//)} - 1)];$$
$$\sigma_{//} = \sigma_{//}^K - \mu [\sigma_z (K_{z(z)} - 1) + \sigma_{\perp} (K_{z(\perp)} - 1)],$$

где $\sigma_{z(\perp)}^K$, $\sigma_{z(//)}^K$ – вертикальные напряжения на контуре выработок, ориентированные, соответственно, вкрест и по простиранию рудного тела; $\sigma_{(\perp)}^K$, $\sigma_{(//)}^K$ – горизонтальные напряжения на контуре выработок; $K_{z(z)}$, $K_{z(\perp)}$, $K_{z(//)}$ – коэффициенты концентрации напряжений на контуре выработок в конкретных сечениях.

Среднеквадратическое отклонение результатов для средних величин напряжений определяются по формуле:

$$\rho = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n-1}},$$

где Δ – разность между средними значениями напряжения и отдельным результатом определения, МПа; n – число единичных определений напряжений.

Выводы

Наиболее благоприятным местом для определения природного напряженного состояния массива, по данным визуального обследования, является гор. п/э -120 м. Замерная станция № 1 находится на пересечении восточного транспортного штрека и буродоставочного орта № 27. Замерная станция № 2 находится на пересечении восточного транспортного штрека и буродоставочного орта № 24. Замерная станция № 3 находится на пересечении западного транспортного штрека и буродоставочного орта № 8. На этом участке заложены станции горного давления в форме 9 разгрузочных щелей по вышеприведенной методике.

Максимальными действующими напряжениями в массиве являются горизонтальные поперечные, продольные напряжения составляют 80 % от поперечных. В среднем отношение горизонтальных напряжений к вертикальным составляет 0,62. Можно предположить, что кровля горных выработок на нижних горизонтах рудника будет менее устойчива, чем стенки.

Заключение

В результате проведенных исследований в значительной мере повышена степень геомеханической изученности массива горных пород Кызыл-Таштыгского месторождения.

Сформированная система мониторинга деформационных процессов, возникающих в конструктивных элементах системы разработки, учитывает закономерности распределения параметров природных и техногенных напряжений, протекающих в массиве горных пород как решающий фактор в разрушении и деформировании конструктивных элементов системы разработки.

Список литературы

1. Зубков А.В., 2001. *Геомеханика и геотехнология*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 333с.
2. Шкурятник В.Л., Николенко П.В., 2012. *Методы определения напряжённо-деформированного состояния массива горных пород: научно-образовательный курс*. Москва: МГГУ, 112 с.
3. Влох Н.П., 1994. *Управление горным давлением на подземных рудниках*. Москва: Недра, 208 с.

4. Курленя М.В., Кулаков Г.И., Храмцов В.Ф., 1990. Влияние разгрузочной щели на напряженное состояние днища рудных блоков. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 3, С. 3-6.
5. Барышников В.Д., Курленя М.В., Гахова Л.Н., 1998. Опыт применения метода параллельных скважин для оценки действующих напряжений в бетонном массиве. *Гидротехническое строительство*, № 9, С. 59.
6. Катков Т.А., 1978. *Исследование горного давления с применением фотоупругих элементов: монография*. Москва: Наука, 130 с.
7. Курленя М.В., Леонтьев А.В., Попов С.Н., 1994. Развитие метода гидроразрыва для исследования напряженного состояния массива горных пород. *ФТПРПИ*, № 1, С. 3 – 20.
8. Гребёнкин С.С., Павлыш В.Н., Самойлов В.Л., Петренко Ю.А., 2010. *Управление состоянием массива горных пород*. Донецк: "ВИК", 193 с.
9. Зубков А.В., Феклистов Ю.Г., Липин Я.И. и др., 2016. Деформационные методы определения напряженного состояния пород на объектах недропользования. *Проблемы недропользования*, № 4, С. 41-49.
10. Сентябов С.В., 2022. Выбор методов управления горным давлением при освоении глубокозалегающих месторождений. *Проблемы недропользования*, № 1, С. 7-15. DOI:10.25635/2313-1586.2022.01.007
11. Sentyabov S.V., 2021. The Influence of Time-Varying Stresses in the Rock Mass on the Stress State of Mine Workings. *IOP of Conferences Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 720, P. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012013
12. Yang Z.-S., Peng F.-L., Qiao Y.-K., Hu Y.-Y., 2019. A new cryogenic sealing process for the launch and reception of a tunnel shield. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 85, P. 406-417.
13. Hu X., Fang T., Chen J., Ren H., Guo W., 2018. A large-scale physical model test on frozen status in freeze-sealing pipe roof method for tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 72, P. 55-63.
14. Rib S.V., 2018. The influence of rock interlayer location on the stress-strain state of the rock massif near the underground mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 206, P. 1-4 (012011) (accessed: <http://library.sibsui.ru>).

References

1. Zubkov A.V., 2001. *Geomekhanika i geotekhnologiya* [Geomechanics and geotechnology]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 333 p.
2. Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V., 2012. *Metody opredeleniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornyx porod: nauchno-obrazovatel'nyi kurs* [Methods for determining the stress-strain state of a rock mass: a scientific and educational course]. Moscow: MGGU, 112 p.
3. Vlokh N.P., 1994. *Upravlenie gornym davleniem na podzemnykh rudnikakh* [Management of rock pressure in underground ores]. Moscow: Nedra, 208 p.
4. Kurlenya M.V., Kulakov G.I., Khramtsov V.F., 1990. Vliyanie razgruzochnoi shcheli na napryazhennoe sostoyanie dnishcha rudnykh blokov [Influence of the loading gap on the stress state of the bottom of ore blocks]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 3, P. 3-6.
5. Baryshnikov V.D., Kurlenya M.V., Gakhova L.N., 1998. Opyt primeneniya metoda parallel'nykh skvazhin dlya otsenki deistvuyushchikh napryazhenii v betonnom massive [Experience of using the parallel borehole method to assess the operating stresses in a concrete massif]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, № 9, P. 59.
6. Katkov T.A., 1978. *Issledovanie gornogo davleniya s primeneniem fotouprugikh elementov: monografiya* [Investigation of rock pressure using photoelastic elements: monograph]. Moscow: Nauka, 130 p.

7. Kurlenya M.V., Leont'ev A.V., Popov S.N., 1994. Razvitie metoda gidrorazryva dlya issledovaniya napryazhennogo sostoyaniya massiva gornykh porod [Development of the hydraulic fracturing method for studying the stress state of a rock mass]. *FTPRPI*, № 1, P. 3-20.
8. Grebenkin S.S., Pavlysh V.N., Samoilov V.L., Petrenko Yu.A., 2010. Upravlenie sostoyaniem massiva gornykh porod [Management of the state of the rock mass]. Donetsk: "VIK", 193 p.
9. Zubkov A.V., Feklistov Yu.G., Lipin Ya.I. i dr., 2016. Deformatsionnye metody opredeleniya napryazhennogo sostoyaniya porod na ob"ektakh nedropol'zovaniya [Deformation methods for determining the stress state of rocks at subsurface use facilities]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4, P. 41-49.
10. Sentyabov S.V., 2022. Vybory metodov upravleniya gornym davleniem pri osvoenii glubokozalegayushchikh mestorozhdenii [Choosing the methods for rock pressure managing during development of deep-lying deposits]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 1, P. 7-15. DOI:10.25635/2313-1586.2022.01.007
11. Sentyabov S.V., 2021. The Influence of Time-Varying Stresses in the Rock Mass on the Stress State of Mine Workings. *IOP of Conferences Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 720, P. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012013.
12. Yang Z.-S., Peng F.-L., Qiao Y.-K., Hu Y.-Y., 2019. A new cryogenic sealing process for the launch and reception of a tunnel shield. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 85, P. 406-417.
13. Hu X., Fang T., Chen J., Ren H., Guo W., 2018. A large-scale physical model test on frozen status in freeze-sealing pipe roof method for tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 72, P. 55-63.
14. Rib S.V., 2018. The influence of rock interlayer location on the stress-strain state of the rock massif near the underground mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 206, P. 1-4 (012011) (accessed: <http://library.sibsiu.ru>).

УДК 662.831

Ломов Михаил Андреевич

младший научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН,
680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51
e-mail: 9241515400@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ
ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ
НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ЮЖНОЕ
(ПРИМОРСКИЙ КРАЙ)
С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ
ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ***

Аннотация:

Для предупреждения аварий при добыче полезных ископаемых необходимо своевременно определять зоны, где могут возникнуть проявления горного давления, и разрабатывать эффективные методы управления напряженно-деформированным состоянием горного массива.

В данной работе рассматривается месторождение Южное в Приморском крае, которое с 1986 г. отнесено к опасным по горным ударам. Анализ характера возникновения сейсмоакустических событий, основанный на интерпретации данных сейсмического мониторинга автоматизированной системы контроля горного давления «Prognoz-ADS» и визуальных наблюдений, проводился в сочетании с разработанной цифровой моделью природно-технической системы месторождения. В результате работы получены новые данные, которые после дополнительных исследований с помощью системы «Prognoz-ADS» помогут установить факторы удароопасности и разработать необходимый комплекс геомеханических мер для обеспечения безопасности горных работ на нижележащих глубоких горизонтах месторождения Южное. Анализ данных сейсмоакустического мониторинга показал, что количество АЭ-событий за день до толчков увеличивалось в полтора раза по сравнению с предыдущими днями. Отработанный блок № 1 между горизонтами +440 и +480 м, а также область, где горные выработки пересекаются с зоной разломов Эльдorado и разломом Рудный в районе отработанных блоков № 2 и 3, были признаны самыми опасными для горных ударов в зоне действия сети геофонов.

Количество АЭ-событий за день до толчков увеличивалось в полтора раза по сравнению с предыдущими днями. Удароопасность горного массива месторождения Южное больше зависит от техногенных воздействий,

DOI:

Lomov Mikhail A.

Junior Researcher,
Institute of Mining, Far Eastern Branch of RAS,
680000 Khabarovsk, 51 Turgenev Str.
e-mail: 9241515400@mail.ru

**STUDY OF THE CONDITIONS FOR
THE OCCURRENCE OF DYNAMIC
MANIFESTATIONS OF ROCK PRESSURE
AT THE YUZHNOYE DEPOSIT
(PRIMORSKY KRAI)
USING DIGITAL MODELS
OF NATURAL-TECHNICAL SYSTEMS**

Abstract:

To prevent accidents in the extraction of minerals, it is necessary to timely identify areas where manifestations of rock pressure may occur, and to develop effective methods for managing the stress-strain state of the rock mass.

This work considers the Yuzhnoye deposit in the Primorsky Krai, which has been classified as dangerous due to rock bursts since 1986. The analysis of the nature of the occurrence of seismic acoustic events, based on the interpretation of seismic monitoring data of the automated rock pressure control system “Prognoz-ADS” and visual observations, was conducted in combination with the developed digital model of the natural-technical system of the deposit. As a result of the work, new data were obtained, which after additional research using the “Prognoz-ADS” system will help to establish the factors of shock hazard and develop the necessary complex of geomechanical measures to ensure the safety of mining operations at the lower deep horizons of the Yuzhnoye deposit.

The analysis of seismic acoustic monitoring data showed that the number of AE-events per day before the shocks increased one and a half times compared to the previous days. Mined out stope No. 1 between the level +440 and +480m, as well as the area where the mine workings intersect with the Eldorado fault zone and the Rudny fault in the area of mined out stope No. 2 and No. 3, were recognized as the most dangerous for rock bursts in the area of the geophone network.

The number of AE-events per day before the shocks increased one and a half times compared to the previous days. The shock hazard of the rock mass of the Yuzhnoye deposit depends more on anthropogenic impacts associated with the extraction of minerals than on climatic factors, which have a negligible influence. The influence of air temperature and climate in general on the number of manifestations of rock pressure without reference to the year is not traced. The distribution of shocks is on average the same every month. The highest activity is observed in June, July, and October.

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

связанных с добычей полезных ископаемых, чем от климатических факторов, которые имеют незначительное влияние. Влияние температуры воздуха и климата в целом на количество проявлений горного давления без привязки к году не прослеживается. Распределение толчков в среднем одинаково каждый месяц. Наибольшая активность наблюдается в июне, июле и октябре.

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

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

Введение

Добыча твердых полезных ископаемых сопровождается постоянным увеличением глубины и усложнением условий в горном массиве. В этом случае в подземных работах наибольшую угрозу создают динамические проявления горного давления. Проблема предупреждения горных ударов и техногенных землетрясений, а также их последствий при подземном развитии недр имеет большую сложность из-за многофакторности условий и причин возникновения геодинамических событий, высокой неоднородности свойств и состояния горных пород, которые испытывают интенсивные техногенные воздействия при их разработке, а также низкого уровня знания геомеханических процессов, протекающих в напряженных геосредах [1].

Динамические проявления горного давления – это результат взаимодействия многих факторов, среди которых физико-механические характеристики пород, геологическое строение массива, форма и режим подземных выработок, способ разработки и разные внешние воздействия, например, природные землетрясения, атмосферные давления, гидрогеологические условия, температурные режимы и т. д. Чтобы предсказать и предупредить динамические проявления горного давления, нужно учитывать все эти факторы и проводить комплексные исследования и наблюдения за состоянием горного массива и выработок.

Чтобы предотвратить аварии в процессе добычи полезного ископаемого, необходимо заранее выявлять участки, где может возникнуть проявление горного давления, и разрабатывать действенные способы его регулирования. Для этого требуется комплексное применение региональных и локальных методов, позволяющих оценить и контролировать геомеханическое состояние обрабатываемого горного массива [2 – 4].

Методы и объект исследований

В данной работе рассматривается с 1986 г. отнесенное к опасным по горным ударам месторождение Южное, расположенное в Приморском крае.

На месторождении Южное исследования удароопасности с 1986 г. осуществлялись посредством визуальных наблюдений и инструментальных измерений параметров сейсмоакустической активности массива горных пород.

В декабре 2022 г. на Южном месторождении была установлена геоакустическая система (АСКГД) «Prognoz-ADS» [5].

Этот комплекс работ помогает определить причины возникновения горных ударов в массиве, что важно для улучшения точности прогнозов и предупреждения аварий в будущем [6, 7].

Анализ природы возникновения сейсмоакустических событий, базирующийся на интерпретации данных сейсмического мониторинга автоматизированной системы контроля горного давления «Prognoz-ADS» и визуальных наблюдений, проводился в

совокупности с разработанной цифровой моделью природно-технической системы месторождения.

Анализ динамических проявлений годного давления и результатов сейсмоакустического мониторинга

С 1986 по 1987 г. на глубинах от 150 до 170 м впервые произошли горные удары, вызвавшие серьезные динамические последствия. За весь период с 1986 по 2023 г. на месторождении было зарегистрировано 2185 случаев динамического горного давления (рис. 1 – 2).

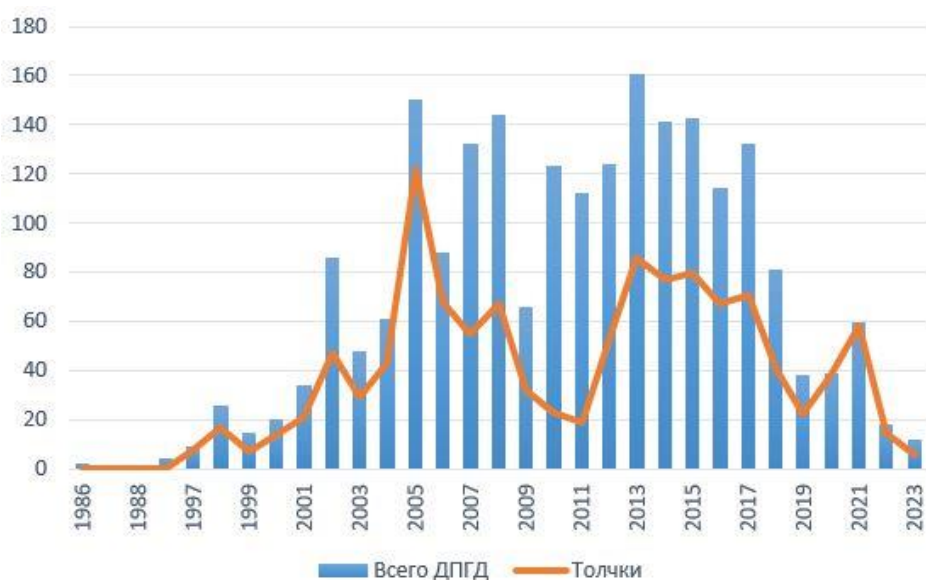


Рис. 1. Распределение по годам динамических проявлений горного давления на месторождении Южное

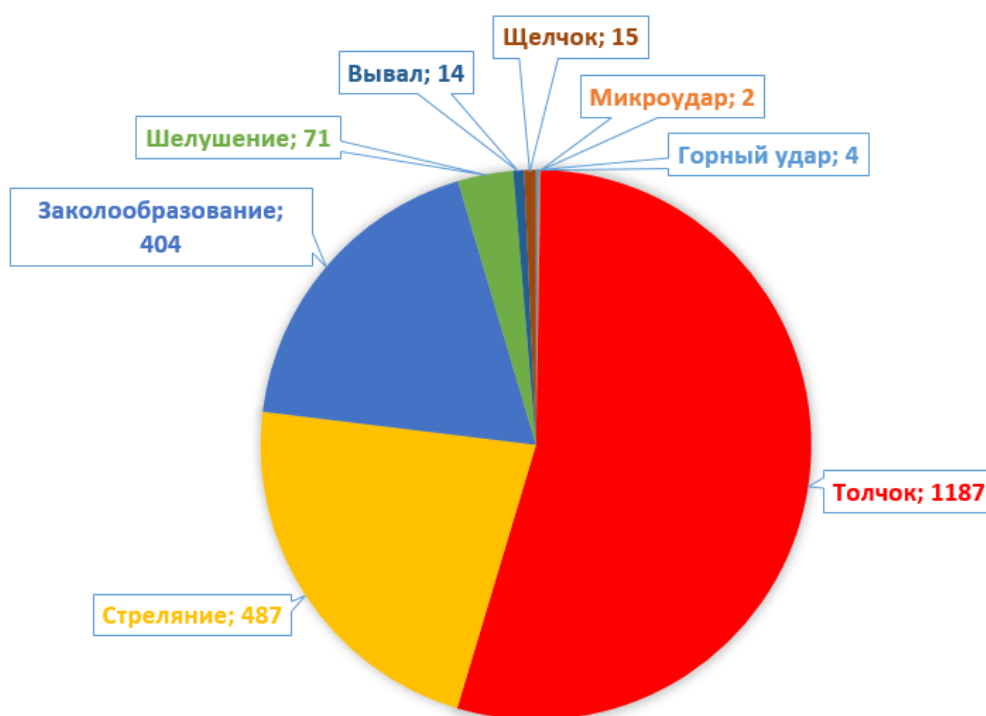


Рис. 2. Виды динамических проявлений горного давления на месторождении Южное с указанием их количества в период 1986 – 2023 гг.

Наибольшие концентрации толчков зафиксированы на горизонте 480 в 2 и 3 отработанных блоках (рис. 3).

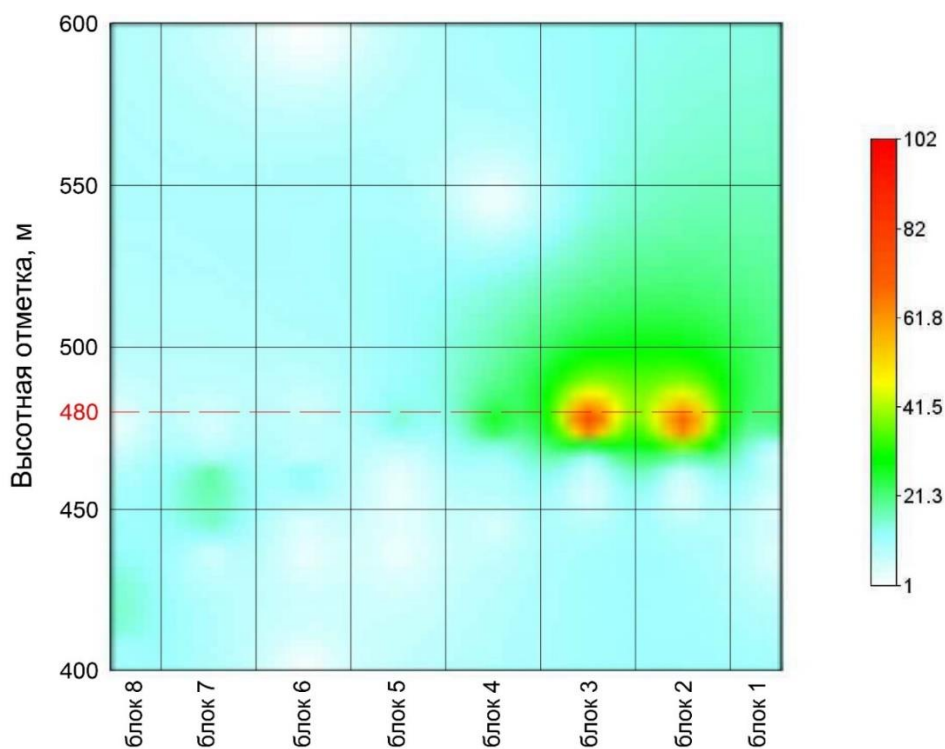


Рис. 3. Схема расположения толчков на месторождении Южное

Влияние температуры воздуха и климата в целом на количество проявлений горного давления без привязки к году не прослеживается. Распределение толчков в среднем одинаково каждый месяц. Наибольшая активность наблюдается в июне, июле и октябре (рис. 4).

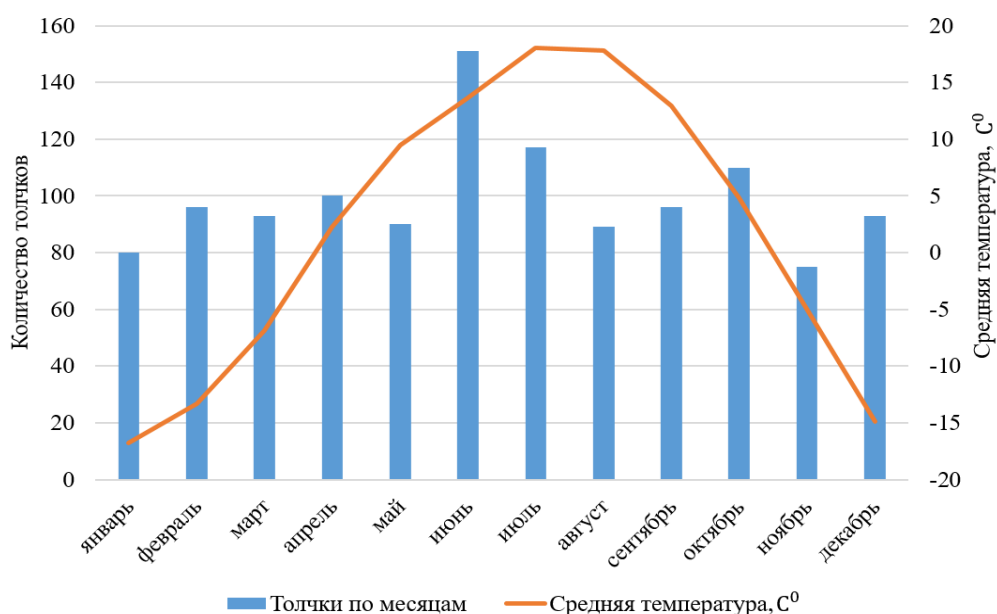


Рис. 4. График распределения количества толчков по месяцам в 1986 – 2023 гг. на месторождении Южное и среднемесячной температуры воздуха в Дальнеморске (без привязки в году)

Основной задачей геомеханического мониторинга является изучение изменения НДС горнотехнических систем и проявлений горного давления [8, 9] в виде горного удара, микроударов, толчков и стреляний [10 – 12].

За 2023 г. с помощью системы «Prognoz-ADS» было зарегистрировано 3117 сейсмоакустических событий, в том числе 7 толчков (рис. 5).

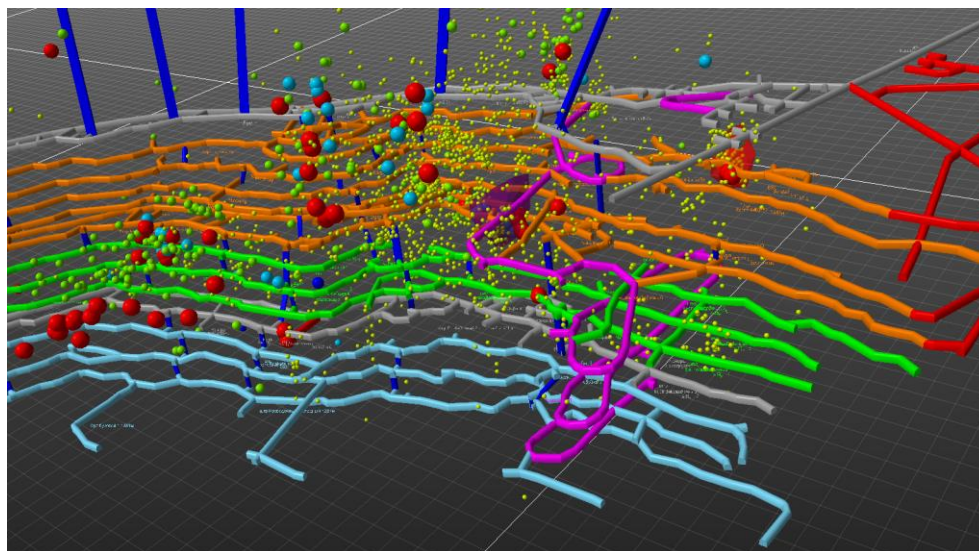


Рис. 5. 3D модель акустической активности месторождения Южное за 2023 г.

Распределение количества и суммарной энергии АЭ-событий, зарегистрированных системой «Prognoz-ADS», представлено на рис. 6.

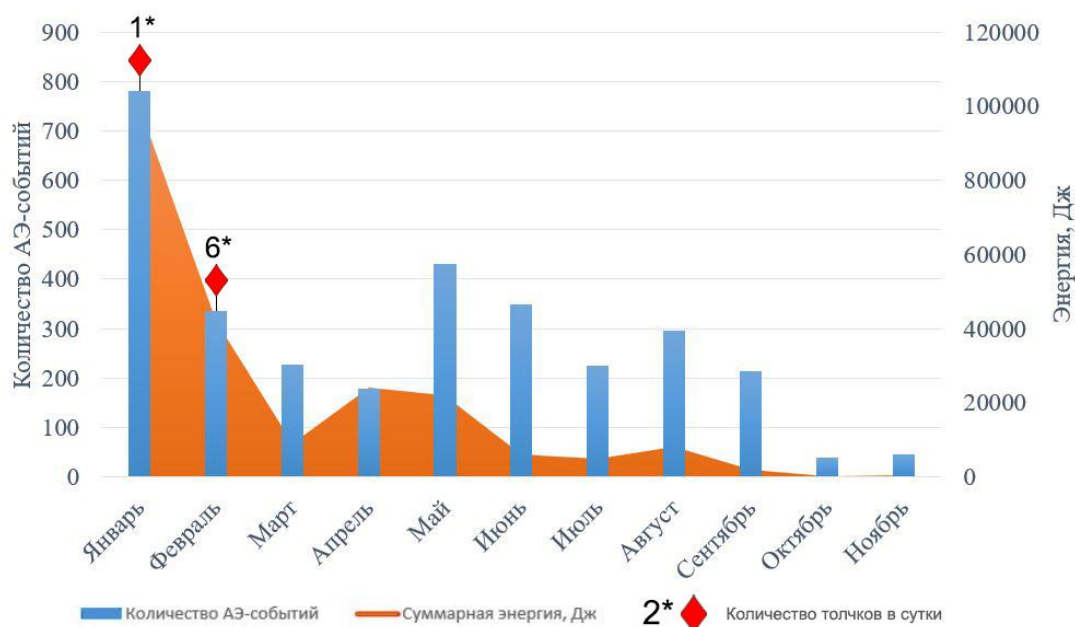


Рис. 6. График распределения количества, суммарной энергии АЭ-событий и толчки, зафиксированные на месторождении Южное в 2023 г.

Анализ распределения количества толчков показывает, что на удароопасность массива горных пород месторождения Южное значительное влияние оказывают техногенные работы по добыче полезного ископаемого. На рис. 7 прослеживается четкая зависимость количества АЭ-событий от объема отбойки руды.

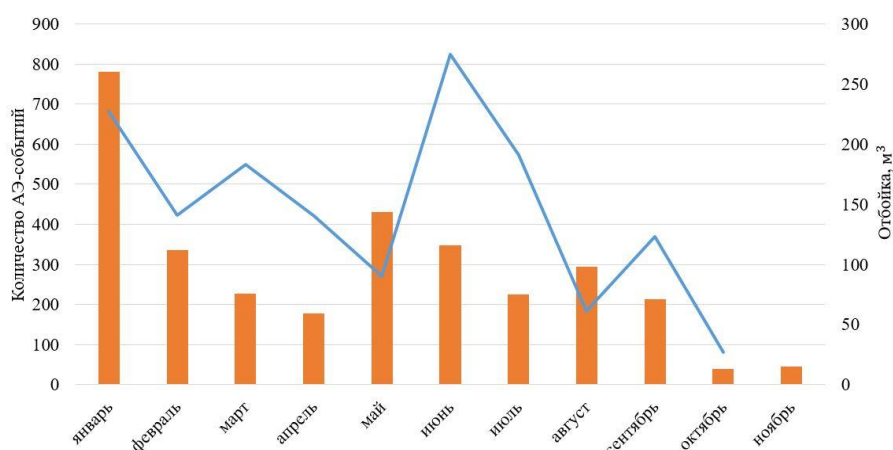


Рис. 7. График распределения количества АЭ-событий и объема отбойки горной породы на месторождении Южное в 2023 г.

На рис. 8 и 9 представлены графики распределения количества АЭ-событий за 2023 г. в зависимости от температуры воздуха и объема осадков в Дальнеморске. Анализ данных графиков показывает слабое влияние климатических факторов на удароопасность месторождения Южное.

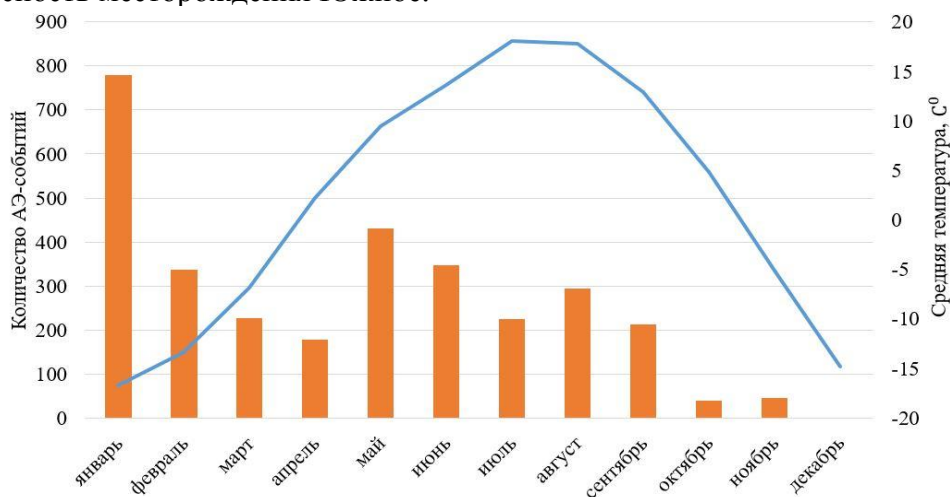


Рис. 8. График распределения количества АЭ-событий в 2023 г. на месторождении Южное и среднемесячной температуры воздуха в Дальнеморске (без привязки в году)

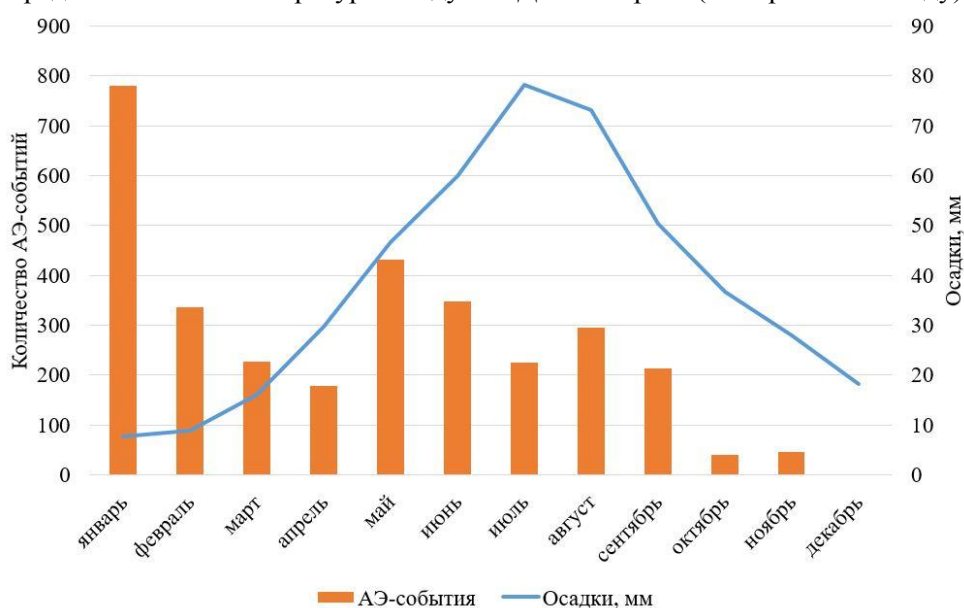


Рис. 9. График распределения количества АЭ-событий в 2023 г. на месторождении Южное и среднемесячного объема осадков в Дальнеморске (без привязки в году)

Наиболее высокая сейсмоакустическая активность массива горных пород с выделением большой энергии на месторождении наблюдалась в январе и феврале 2023 г. Количество АЭ-событий за день до толчков увеличивалось в полтора раза по сравнению с предыдущими днями [5].

Проявления сейсмичности в январе были зарегистрированы 23-го числа (1 толчок в 21:17 с энергией 1131.32 Дж), в феврале были зарегистрированы 2-го числа (1 толчок в 18:36 с энергией 593.09 Дж), 5-го (1 толчок в 18:05 с энергией 664.23 Дж), 16-го (1 толчок в 18:19 с энергией 1200.96 Дж), 18-го (2 толчка в 14:20 с энергией 6016.81 и 2250.85 Дж, соответственно). Разрушений горных выработок не наблюдалось.

Посредством сопоставления данных распределения сейсмоакустической активности массива горных пород с геологическим строением и выработанным пространством в цифровой модели природно-технической системы месторождения было установлено, что наибольшая концентрация АЭ-событий расположена в районе отработанного блока № 1 в промежутке с г. 440 по г. 480, а также в районе пересечения горных выработок с лежащим боком зоны разломов Эльдorado и с другими геологическими разломами в районе отработанных блоков № 2 и 3 (рис. 10).

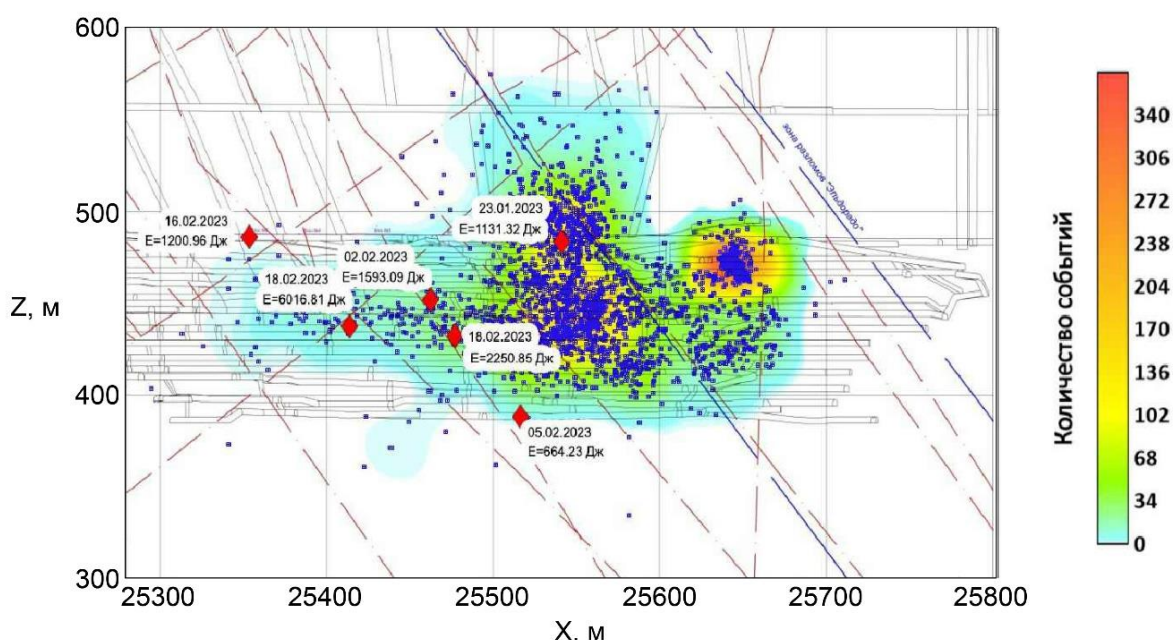


Рис. 10. Сейсмоакустическая активность и толчки, зарегистрированные в массиве Южного месторождения за 2023 г. в проекции на наклонный разрез, проходящий через рудное тело

Выводы

В результате работы получены новые данные, которые после дополнительных исследований с помощью системы «Prognoz-ADS» помогут определить причины удароопасности и разработать необходимый набор геомеханических мер для обеспечения безопасности горных работ на глубоких горизонтах Южного месторождения.

Анализ данных сейсмоакустического мониторинга показал, что количество АЭ-событий за день до толчков увеличивалось в полтора раза по сравнению с предыдущими днями. Отработанный блок № 1 между горизонтами +440 и +480 м, а также область, где горные выработки пересекаются с зоной разломов Эльдorado и разломом Рудный в районе отработанных блоков № 2 и 3, были признаны самыми опасными для горных ударов в зоне действия сети геофонов.

Удароопасность горного массива Южного месторождения больше зависит от техногенных воздействий, связанных с добычей полезного ископаемого, чем от климатических факторов, которые имеют незначительное влияние.

Список литературы

1. Криницын Р.В., 2022. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород при отработке месторождений Урала. *Горная промышленность*, № 5, С. 79-82. DOI 10.30686/1609-9192-2022-5-79-82.
2. Сидоров Д.В., Пономаренко Т.В., 2020. Методология оценки геодинамического состояния природно-техногенных систем при реализации проектов освоения месторождений. *Горный журнал*, № 1, С. 49-52. DOI 10.17580/gzh.2020.01.09.
3. Potapchuk M.I., Kursakin G.A., Sidlyar A.V., 2014. Improvement of safety of development of bump hazardous vein deposits of eastern primorye. *Eurasian Mining*, No. 1, P. 18-22.
4. Потапчук М.И., Курсакин Г.А., Сидляр А.В., 2013. Повышение безопасности разработки удароопасных жильных месторождений Восточного Приморья. *Горный журнал*, № 10, С. 30-34.
5. Ломов М.А., Сидляр А.В., Константинов А.В., Грунин А.П., 2023. Геомеханические проблемы отработки нижних горизонтов месторождения Южное (Приморский край). *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 12-2, С. 87-99. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_122_0_87.
6. Lomov M., 2020. 3D modeling system of seismoacoustic monitoring results at the Nikolaevskoye field. *E3S Web of Conferences: 8, Khabarovsk, 08–10 сентября 2020 года*. Khabarovsk, P. 04008. DOI 10.1051/e3sconf/202019204008.
7. Ломов М.А., Сидляр А.В., 2021. Оценка факторов удароопасности Николаевского месторождения с помощью системы 3D моделирования результатов сейсмоакустического мониторинга. *Проблемы недропользования*, № 1(28), С. 64 – 72. DOI 10.25635/2313-1586.2021.01.064.
8. Kozyrev, A. A., Panin, V. I., Semenova, I. E., & Zhuravleva, O. G., 2018. Geodynamic safety of mining operations under rockburst-hazardous conditions in the Khibiny apatite deposits. *Journal of Mining Science*, 54(5), 734-743. doi:10.1134/S1062739118054832
9. Lovchikov A.V., 2013. Review of the strongest rockbursts and mining-induced earthquakes in Russia. *Journal of Mining Science*, 49(4), 572-575. doi:10.1134/S1062739149040072
10. Zhou J., Li X., & Mitri H. S., 2016. Classification of rockburst in underground projects: Comparison of ten supervised learning methods. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30(5) doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000553.
11. Sun F., Fan J., Guo J., Shi X., Liu X., Zhu B. & Zhang H., 2021. Rockburst proneness criterion based on energy principle. [基于能量原理的岩爆倾向性判据] Gaoya Wuli Xuebao. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 35(3) doi:10.11858/gywlxb.20200650
12. He M., e Sousa L. R., Miranda T. & Zhu G., 2015. Rockburst laboratory tests database - application of data mining techniques. *Engineering Geology*, 185, 116-130. doi:10.1016/j.enggeo.2014.12.008

References

1. Krinitsyn R.V., 2022. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie massiva gornyxh porod pri otrabotke mestorozhdenii Urala [Stress-strain state of the rock mass during mining deposits of the Urals]. *Gornaya promyshlennost'*, № 5, P. 79-82. DOI 10.30686/1609-9192-2022-5-79-82.
2. Sidorov D.V., Ponomarenko T.V., 2020. Metodologiya otsenki geodinamicheskogo sostoyaniya prirodno-tekhnogennykh sistem pri realizatsii projektov osvoeniya mestorozhdenii

[Methodology for assessing the geo-dynamic state of natural and man-made systems during the implementation of field development projects]. *Gornyi zhurnal*, № 1, P. 49-52. DOI 10.17580/gzh.2020.01.09.

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

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

5. Lomov M.A., Sidlyar A.V., Konstantinov A.V., Grunin A.P., 2023. Geomekhanicheskie problemy otrabotki nizhnikh gorizontov mestorozhdeniya Yuzhnoe (Primorskii krai) [Geomechanical problems of mining the lower horizons of the Yuzhnoye deposit (Primorsky Krai)]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 12-2, P. 87-99. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_122_0_87.

6. . Lomov M., 2020. 3D modeling system of seismoacoustic monitoring results at the Nikolaevskoye field. *E3S Web of Conferences: 8, Khabarovsk, 08–10 сентября 2020 года*. Khabarovsk, P. 04008. DOI 10.1051/e3sconf/202019204008.

7. Lomov M.A., Sidlyar A.V., 2021. Otsenka faktorov udaroopasnosti Nikolaevskogo mestorozhdeniya s pomoshch'yu sistemy 3D modelirovaniya rezul'tatov seismoakusticheskogo monitoring [Assessment of the rockburst resistance of the Nikolaevsky field with the help of a 3D modeling system for seismic and acoustic monitoring results]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 1(28), P. 64 – 72. DOI 10.25635/2313-1586.2021.01.064.

8. Kozyrev, A. A., Panin, V. I., Semenova, I. E., & Zhuravleva, O. G., 2018. Geodynamic safety of mining operations under rockburst-hazardous conditions in the Khibiny apatite deposits. *Journal of Mining Science*, 54(5), 734-743. doi:10.1134/S1062739118054832

9. Lovchikov A.V., 2013. Review of the strongest rockbursts and mining-induced earthquakes in Russia. *Journal of Mining Science*, 49(4), 572-575. doi:10.1134/S1062739149040072

10. Zhou J., Li X., & Mitri H. S., 2016. Classification of rockburst in underground projects: Comparison of ten supervised learning methods. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30(5) doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000553.

11. Sun F., Fan J., Guo J., Shi X., Liu X., Zhu B. & Zhang H., 2021. Rockburst proneness criterion based on energy principle. [基于能量原理的岩爆倾向性判据] *Gaoya Wuli Xuebao. Chinese Journal of High Pressure Physics*, 35(3) doi:10.11858/gywlxb.20200650

12. He M., e Sousa L. R., Miranda T. & Zhu G., 2015. Rockburst laboratory tests database - application of data mining techniques. *Engineering Geology*, 185, 116-130. doi:10.1016/j.enggeo.2014.12.008

УДК 622.831.3:622.02

Харисов Тимур Фаритович

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией геомеханики
подземных сооружений,
Институт горного дела УрО РАН
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, д. 58;
доцент кафедры шахтного строительства,
Уральский государственный
горный университет,
г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Авдеев Аркадий Николаевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория геодинамики и горного давления,
Институт горного дела УрО РАН

Коптяков Дмитрий Александрович

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

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ ПОРОД В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ*

Аннотация:

В работе описываются и сравниваются методы определения модуля упругости горных пород при их одноосном нагружении. Испытания с предварительным уплотнением образцов, при котором деформации измеряются экстензометрами, как правило, дают наилучшие результаты. Разница между сравниваемыми методами при определении модуля упругости достигает 25 %. Из анализа результатов был сделан вывод, что на результаты определения упругих постоянных при испытаниях в условиях одноосного сжатия влияет выбор прямолинейного участка кривой напряжение-деформация.

Ключевые слова: модуль упругости, модуль деформации, предел прочности при одноосном сжатии, продольные и поперечные деформации, упругость горных пород, перидотиты, Баженовское месторождение, кривая напряжение-деформация.

DOI:

Kharisov Timur F.

Candidate of Technical Sciences,
Head of the Laboratory of geomechanics
of underground structures,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiriyaka Str.;
Associate Professor of the Department
of Mine Construction.
Ural State Mining University,
620026 Ekaterinburg,
30 Kuibysheva Str.

Avdeev Arkady N.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of geodynamics and mountain pressure,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS

Koptyakov Dmitry A.

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

RESULTS ANALYSIS OF DETERMINING THE ELASTIC CHARACTERISTICS OF ROCKS IN THE LABORATORY CONDITIONS

Abstract:

The paper describes and compares methods for determining the modulus of elasticity of rocks under uniaxial loading. Tests with pre-compaction of samples, in which deformations measured with extensometers, usually give the best results. The difference between the compared methods when determining the modulus of elasticity reaches 25 %. From the analysis of the results, we noted that the results of determining elastic constants, when tested under uniaxial compression conditions are influenced by the choice of a rectilinear section of the stress-strain curve.

Key words: modulus of elasticity, modulus of deformation, tensile strength under uniaxial compression, axial and lateral deformations, rock elasticity, peridotites, Bazhenovskoye deposit, stress-strain curve.

* Статья подготовлена по материалам выполнения госзадания № 075-00412-22 ПР. Тема 2 (2022-2024) «Разработка геотехнологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процессов в недропользовании» (FUWE-2022-0002), рег. № 1021062010532-7-1.5.1.

Введение

Для оценки степени защищенности горнопромышленных территорий и прогноза негативных последствий добычи необходимы наблюдения за массивом в контексте понимания изменчивости свойств горных пород. Получаемые в ходе лабораторных определений сведения о поведении горных пород дополняют обоснованность технологических решений и дают основу для мониторинга и прогнозирования развития негативных процессов при эксплуатации месторождений твердых полезных ископаемых.

Свойства, характеризующие поведение пород под воздействием механических усилий, проявляются в их сопротивлении разрушению и деформации. Определение механических характеристик в лабораторных условиях представляет из себя исследование закономерностей изменений зависимости напряжений и деформаций. Условия приложения нагрузки, ее величина, скорость приложения, длительность действия могут оказывать влияние на однозначность зависимости напряжений и деформаций [1–5]. Применительно к горным породам, упругие характеристики: модуль Юнга, коэффициент Пуассона – определяются по линейному участку диаграммы напряжения-деформации [6, 7]. При этом процедуры испытаний и определений деформационных свойств, принятые в различных стандартах, имеют некоторые отличия, что может вносить неопределенность в природу характера деформаций горных пород [7–9].

В работе представлен сравнительный анализ методов определения механических свойств горных пород: ASTM D7012, DIN EN 14580 и ГОСТ 28985 [10–12]. Каждый из методов предлагает подход к определению деформационных свойств, имея особенности и применимость в различных условиях. Цель исследования – предоставить всестороннее сравнение результатов, полученных с использованием методик, выявить отличия и определить степень разброса значений модуля упругости между методами.

Систематизированный анализ результатов позволит лучше понять особенности каждого метода, предложить рекомендации для оптимизации процессов измерений, выявить возможные пробелы и неопределенности в стандартах.

Материалы и методы

Для проведения исследования были рассмотрены горные породы Баженовского месторождения: перидотиты, габбро, диориты, серпентиниты и тальк-карбонатные метасоматиты (рис. 1). Выбор был сделан в том числе на основе доступности материалов и изученности месторождения [13, 14]. Куски породы – штуфы – отбирались без учета возможного влияния буровзрывных работ, процессов выветривания и без видимых нарушений. Линейные размеры кусков породы составили не менее 200×200×200 мм.

Каждый штуф был осмотрен для исключения видимых трещин, неоднородностей и включений, которые могли бы привести к неверной интерпретации результатов. Дальнейшая подготовка образцов, пригодных для определения упругих свойств, соответствовала процедурам, описанным в ASTM D4543 и ГОСТ 21153.0 с учетом ASTM D7012 и ГОСТ 28985, и заключалась в изготовлении цилиндров правильной геометрической формы с установленными допусками при отношении длины к диаметру не менее 2. Выбуривание кернов из отобранных штуфов производилось установкой Husqvarna DMS160A с подачей воды при оборотах до 1000 в минуту. Для образования торцевых поверхностей и обеспечения их параллельности использовались камнерезная и шлифовальная установки СВК-1000 и СОТОК-1А, соответственно, при оборотах до 1000 в минуту. Все образцы были высушены в нормальных условиях для проведения испытаний в воздушно-сухом состоянии.



Рис. 1. Снимок Баженовского месторождения хризотил-асбеста и места отбора проб горной породы:

П – перидотиты, Габбро, Тальк-Карбонаты; Д – диориты; Д-КЗ – диориты крупнозернистые

Лабораторные испытания

Используемый пресс производства APS GmbH Wille Geotechnik для испытания образцов горной породы представляет из себя гидравлический агрегат с датчиком давления и нагрузочную раму 30101-A2-001 (1500 кН). Для приложения вертикальной нагрузки к образцу пресс оснащен приспособлением одноосного сжатия со сферическим шарниром ГТ 2.5.11 производства НПП ГЕОТЕК. Образцы горной породы и датчики деформаций помещаются на базовую опору и закрепляются симметрично, вдоль оси приложения нагрузки (рис. 2).



Рис. 2. Приспособление одноосного сжатия и датчики измерения деформаций образца горной породы

Изменения прилагаемой нагрузки и базы датчиков фиксировались с помощью электронно-преобразующего блока ГТ 6.0.31. Затем для определения предела прочности при одноосном сжатии образцы нагружали с постоянной скоростью до их разрушения.

Для изучения деформационных свойств образцов горной породы использовалась система датчиков продольной и поперечной деформаций, работающих совместно с электронно-преобразующим блоком ГТ 6.0.31 и программным комплексом АСИС. Система сбора данных непрерывно регистрирует величину нагрузки и соответствующие перемещения датчиков деформаций, а также времени на протяжении всех испытаний. Определение прочности при одноосном сжатии в образце горной породы необходимо для планирования условий нагружения горной породы при определении ее упругих характеристик. В случае обнаружения нехарактерных для данной породы дефектов (трещины, видимые повреждения, жилы, включения) результаты испытаний рассматривались отдельно или принимались как недействительные.

Определения деформационных характеристик были проведены на подготовленных образцах в соответствии с ASTM D7012, ГОСТ 28985 и DIN EN 14580. Гидравлический агрегат и программное обеспечение были модифицированы таким образом, чтобы обеспечивалась многократность нагрузки-разгрузки образца до заданной величины осевой нагрузки (рис. 3).

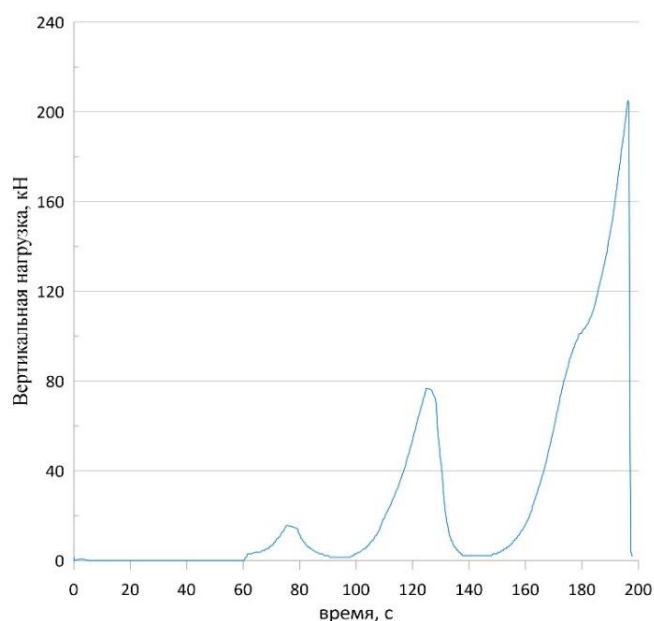


Рис. 3. Предварительное уплотнение образца и его разрушение

Упругие свойства определялись по диаграммам напряжение-деформация при заданных интервалах напряжений. Образцы, содержащие какие-либо скрытые повреждения, не учитывались в результатах.

Обработка и анализ результатов испытаний

В общем случае напряжение при сжатии в испытуемом образце, σ (МПа) рассчитывалось путем деления осевой нагрузки P (кН) на начальную площадь поперечного сечения A_0 (см²):

$$\sigma = P/A_0. \quad (1)$$

Для определения предела прочности при одноосном сжатии σ_u (МПа) принималось пиковое значение нагрузки P (кН). И в случае отличия размеров образца от рекомендуемых вводится безразмерный поправочный коэффициент k в соответствии с нормативной документацией.

Осевая деформация ε_a рассчитывается следующим образом:

$$\varepsilon_a = \Delta l / l, \quad (2)$$

где l – база измерения осевой деформации образца, мм; Δl – изменение базы при изменении нагрузки на образце, мм.

Поперечная деформация ε_l рассчитывается так:

$$\varepsilon_l = \Delta d / d, \quad (3)$$

где d – диаметр образца до приложения нагрузки, мм; Δd – изменение диаметра при изменении нагрузки на образце, мм.

В ASTM D7012 модуль упругости (Юнга) определяется по графику напряжение-деформация: касательный E_t – по тангенсу угла наклона при заданном уровне напряжений; средний E_{av} – по наклону линейного участка; секущий E_s – по наклону секущей из начала координат (рис. 4). Коэффициент Пуассона ν может быть рассчитан аналогичным способом, при котором определялся модуль Юнга.

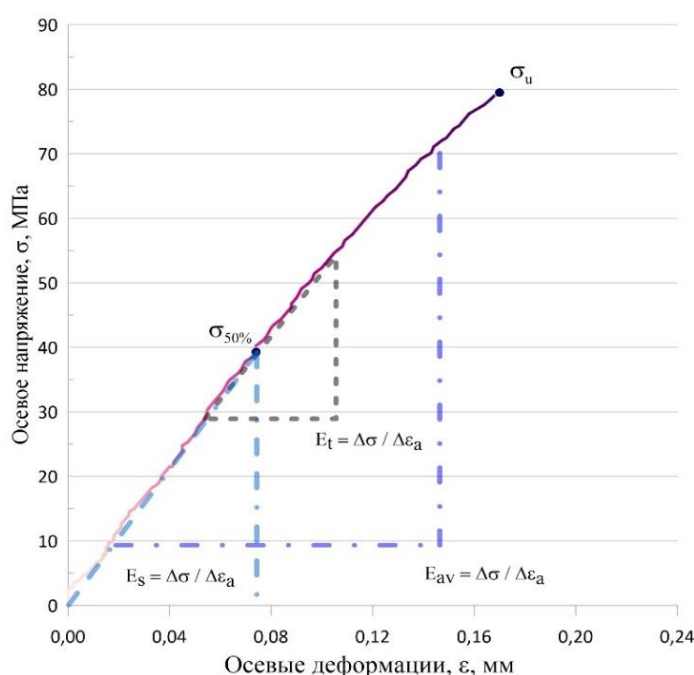


Рис. 4. Способы определения модуля упругости (Юнга), рассматриваемые в ASTM D7012: E_t – касательный, E_{av} – средний, E_s – секущий

Относительная объемная деформация ε_v рассчитывается следующим образом:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2 \varepsilon_d. \quad (4)$$

Предварительное уплотнение образцов (рис. 5) необходимо при определении модуля упругости по DIN EN 14580, который рассчитывается на участке кривой, соответствующей 2...33 % от предела прочности σ_u :

$$E = (0,33\sigma_u - 0,02\sigma_u) / (\varepsilon_{a0,33} - \varepsilon_{a0,02}), \quad (5)$$

где $\varepsilon_{a0,02}$ и $\varepsilon_{a0,33}$ – измеренные осевые деформации при уровне напряжений 0,02 σ_u и 0,33 σ_u .

При определении упругих свойств по ГОСТ 28985 (рис. 6) модуль деформации E_d и коэффициент поперечной деформации ν рассчитывались на заданном интервале напряжений $\sigma_H \dots \sigma_K$ по нагрузочной ветви зависимости $\sigma - \varepsilon$:

$$E_d = (\sigma_K - \sigma_H) / (\varepsilon_{1K} - \varepsilon_{1H}); \quad (6)$$

$$\nu = (\varepsilon_{2K} - \varepsilon_{2H}) / (\varepsilon_{1K} - \varepsilon_{1H}), \quad (7)$$

где ε_{1K} и ε_{1H} – относительные продольные деформации образца при заданном уровне напряжений; ε_{2K} и ε_{2H} – относительные поперечные деформации образца при том же уровне напряжений.

Аналогично, модуль упругости E_Y и коэффициент Пуассона μ рассчитываются в этом же диапазоне напряжений $\sigma_H \dots \sigma_K$, но по разгрузочной ветви $\sigma - \varepsilon$:

$$E_Y = (\sigma_K - \sigma_H) / (\varepsilon'_{1K} - \varepsilon'_{1H}); \quad (8)$$

$$\mu = (\varepsilon'_{2K} - \varepsilon'_{2H}) / (\varepsilon'_{1K} - \varepsilon'_{1H}), \quad (9)$$

где $\varepsilon'_{1K}, \varepsilon'_{1H}, \varepsilon'_{2K} - \varepsilon'_{2H}$ – относительные продольные и поперечные деформации при разгрузке.

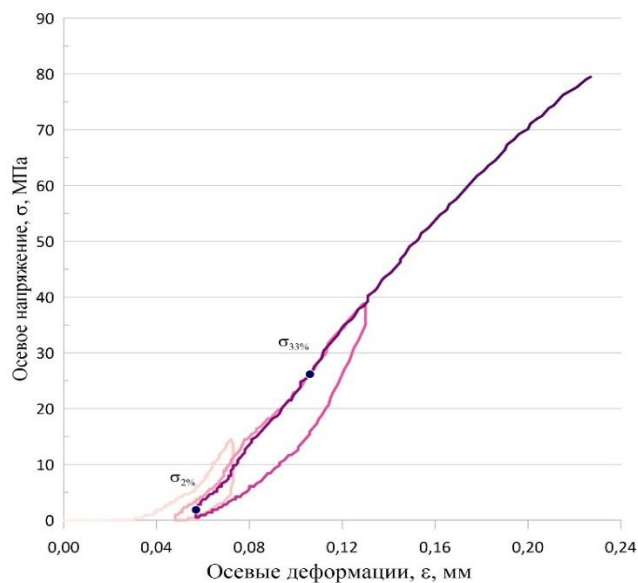


Рис. 5. Определение модуля упругости при нагружении образца после предварительного уплотнения в заданном интервале напряжений

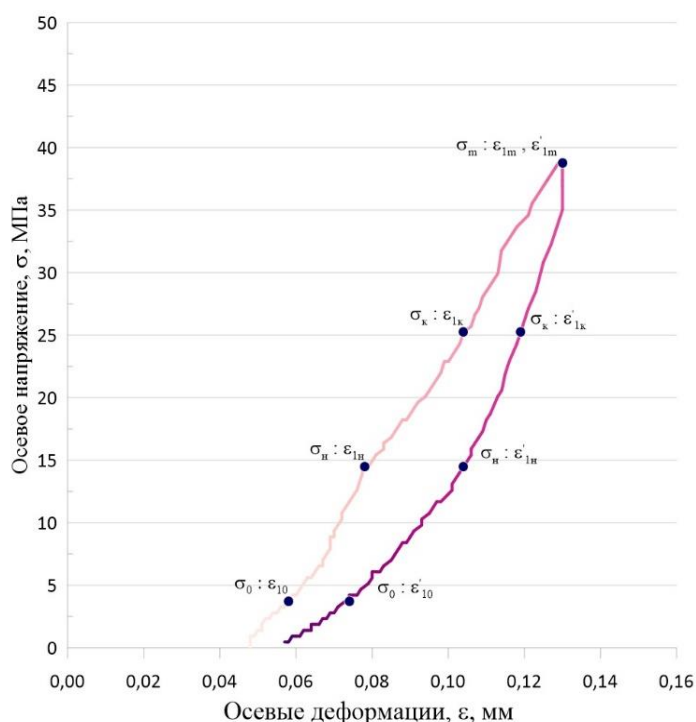


Рис. 6. Определение упругих свойств по ГОСТ 28985

Результаты

В «Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии» ГОСТ 28985 модуль упругости следует определять в диапазоне требуемых напряжений от 5 до 50 % от предела прочности при одноосном сжатии σ_u .

Модуль упругости E_u определен по ветви разгрузки образца в интервале заданных напряжений. Эмпирически установлено, что верхняя граница упругого участка графика лежит, как правило, в интервале 30 – 50 % от предела прочности на сжатие. Перидотиты демонстрируют значительное разнообразие в значениях модуля упругости. Среднее значение модуля упругости для перидотитов составляет 39461 МПа.

Значения модуля упругости по ASTM D7012 подчеркивают различия в результатах, полученных при применении методик, и свидетельствуют о необходимости дополнительных исследований для установления границ линейного участка графика «напряжение-деформация».

Методика испытаний образцов горных пород и расчета модуля упругости DIN EN 14580 предусматривает предварительное уплотнение образцов путем последовательной его нагрузки и разгрузки. Для расчета используются значения, зафиксированные при третьем нагружении образца. Модуль упругости E вычисляется при диапазоне напряжений 2 – 33 % от предела прочности исследуемой породы.

Сравнение с результатами по ASTM D7012, DIN EN 14580, ГОСТ 28985

В табл. 1 представлено сопоставление результатов модуля упругости по методикам ASTM D7012 ГОСТ 28985 и DIN EN 14580. Видно, что значения модуля упругости различаются в зависимости от примененной методики. Максимальные значения были получены по ASTM D7012, в то время как минимальные - по DIN EN 14580. Разброс значений между максимальным и минимальным составил 25 %.

Таблица 1

Результаты расчетов модуля упругости по методикам ASTM D7012, DIN EN 14580 и ГОСТ 28985

Проба №	Образец №	Касательный модуль упругости (ASTM D7012) E_t , МПа	Средний модуль упругости (ASTM D7012) E_{av} , МПа	Секущий модуль упругости (ASTM D7012-10) E_c , МПа	Модуль упругости E (DIN EN 14580), МПа	Модуль упругости E_u , МПа (ГОСТ 28985)
1	П1.3	19761	13311	17450	18100	16400
	П1.7	43727	36181	25912	24117	40380
	П1.11	38065	35799	41120	37259	56460
	П1.15	45576	48252	69464	83483	75390
	П1.17	23616	24690	13022	18757	20340
	П1.19	35994	29182	24078	20847	59940
	П1.22	29659	25688	21570	21366	30520
	П1.24	42382	35271	36319	34384	19270
2	П2.1	66696	52362	51907	41688	18460
	П2.2	46365	50073	41622	40428	69470
	П2.3	39865	38377	26775	24223	29400
	П2.4	39966	44335	32253	30838	25730
	П2.6	22259	21434	19168	19075	20480
	П2.7	57895	54262	40073	36960	16230
	П2.8	16466	19432	20783	26064	46470
	П2.9	119910	94100	50365	41647	74140
	П2.10	38137	36588	21963	20394	87590
3	П3.1	19761	13311	17450	18100	25650
	П3.2	43727	36181	25912	24117	40520
	П3.4	38065	35799	41120	37259	18370
Среднее значение модуля упругости, МПа		42726	38785	32579	31743	39461

Обсуждение и выводы

В ходе исследования физико-механических свойств горных пород была проведена комплексная оценка модуля упругости горных пород, отобранных на Баженовском месторождении. Для выявления различий в подходах определения деформационных свойств использовались наиболее репрезентативные результаты испытаний образцов перидотита: предел прочности на сжатие по пробе, в образцах и модуль упругости. Существенные различия в описанных процедурах оказывают влияние и вносят неоднозначность в интерпретацию закономерности изменений деформаций и прочности горной породы.

Метод ASTM D7012 выделился максимальным значением модуля упругости, в то время как DIN EN 14580 показал минимальные значения. ГОСТ 28985 оказался на промежуточной позиции. Полученные различия могут быть обусловлены особенностями методов измерения, их чувствительностью к структурным особенностям горных пород.

Для более точных и надежных результатов необходимы дополнительные исследования, направленные на уточнение границ линейного участка графика «напряжение-деформация» с использованием статистических методов анализа данных.

Полученные в ходе исследования данные могут служить основой для улучшения методологии оценки физико-механических свойств горных пород, что важно для промышленности строительства и горной деятельности.

Полученные в ходе исследования результаты являются первым шагом в более глубоком понимании физико-механических свойств горных пород. Однако для более полного и точного анализа необходимо проведение дополнительных исследований и уточнение некоторых аспектов:

- включение в исследование дополнительных образцов горных пород с различными геологическими характеристиками для более широкого покрытия;
- применение статистических методов для более точного определения границ линейного участка графика «напряжение-деформация» и уменьшения разброса результатов;
- доработка методик измерений, особенно в части учета структурных особенностей горных пород с целью повышения точности результатов;
- рассмотрение влияния различных условий (температура, влажность и др.) на физико-механические свойства горных пород;
- создание универсальной методологии, которая учитывает разнообразие геологических формаций и обеспечивает единый и более сопоставимый подход к оценке свойств.

Эти перспективы исследований будут способствовать более глубокому пониманию механических характеристик горных пород и разработке более точных методов их измерения, что имеет важное значение для инженерной практики и строительной отрасли.

Список литературы

1. Ломтадзе В.Д., 1990. *Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований*. Ленинград: Недра, 328 с.
2. Gercek H., 2007. Poisson's ratio values for rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Volume 44, Issue 1, January, P. 1–13.
3. Yi Liu, Feng Dai, 2021. A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Volume 13, Issue 5, October, P. 1203–1230.
4. Shahverdiloo, M.R., Zare, S., 2021. A New Correlation to Predict Rock Mass Deformability Modulus Considering Loading Level of Dilatometer Tests. *Geotech Geol Eng*,

Volume 39, December, P. 5517–5528.

5. Hans J. Mueller, 2013. Measuring the elastic properties of natural rocks and mineral assemblages under Earth's deep crustal and mantle conditions. *Journal of Geodynamics*, Volume 71, November, P. 25–42.

6. Комарцов Н.М., Кулагина М.А., Рычков Б.А., 2018. О трактовке модуля упругости горных пород. *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физ.-мат. науки*, Т. 22, № 3. С. 487–503.

7. Кулагина М.А., Рычков Б.А., Степанова Ю.Ю., 2019. Определение упругих констант горных пород. *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физ.-мат. науки*, Т. 23, № 2, С. 284–303.

8. Сукнев С.В., Федоров С.П., 2014. Методы определения упругих свойств горных пород. *Наука и образование*, № 1, С. 18–24.

9. Винников В.А., Высотин Н.Г., 2018. Методика проведения испытаний по определению статического модуля упругости горных пород с использованием результатов лазерно-ультразвуковой спектроскопии. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S1, С. 90–101.

10. ASTM D7012–10. *Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures*. West Conshohocken: ASTM International, 2010.

11. DIN EN 14580:2005. *Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 2005.

12. ГОСТ 28985–91. *Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии*. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2004, 10 с.

13. Алексеев А.Ф., Грязнов О.Н., 2013. Физико-механические свойства метасоматитов серпентинитовой формации Баженовского месторождения хризотил-асбеста. *Инженерная геология*, № 4, С. 54–59.

14. Алексеев А.Ф., 2005. *Инженерная петрология гипербазитов Баженовского и Джетыгаринского месторождений хризотил-асбеста: специальность 25.00.08 "Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение"*: дис. ... кандидата геолого-минералогических наук. Екатеринбург, 192 с.

References

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

2. Gercek H., 2007. Poisson's ratio values for rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Volume 44, Issue 1, January, P. 1–13.

3. Yi Liu, Feng Dai, 2021. A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Volume 13, Issue 5, October, P. 1203–1230.

4. Shahverdiloo, M.R., Zare, S., 2021. A New Correlation to Predict Rock Mass Deformability Modulus Considering Loading Level of Dilatometer Tests. *Geotech Geol Eng*, Volume 39, December, P. 5517–5528.

5. Hans J. Mueller, 2013. Measuring the elastic properties of natural rocks and mineral assemblages under Earth's deep crustal and mantle conditions. *Journal of Geodynamics*, Volume 71, November, P. 25–42.

6. Komartsov N.M., Kulagina M.A., Rychkov B.A., 2018. O traktovke modulya uprugosti gornykh porod. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Physical and mechanical properties of rocks. Methods of laboratory research]. Ser. Fiz.-mat. nauki, Vol. 22, № 3. P. 487–503.

7. Kulagina M.A., Rychkov B.A., Stepanova Yu.Yu., 2019. Opredelenie uprugikh konstant gornyx porod [Determination of elastic constants of rocks]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo univer-siteta. Ser. Fiz.-mat. nauki, Vol. 23, № 2, P. 284-303.
8. Suknev S.V., Fedorov S.P., 2014. Metody opredeleniya uprugikh svoystv gornyx porod [Methods for determining the elastic properties of rocks]. Nauka i obrazovanie, № 1, P. 18–24.
9. Vinnikov V.A., Vysotin N.G., 2018. Metodika provedeniya ispytaniy po opredeleniyu staticheskogo modulya uprugosti gornyx porod s ispol'zovaniem rezul'tatov lazerno-ul'trazvukovoi spektroskopii [Method of conducting tests to determine the static modulus of elasticity of rocks using the results of laser-ultrasonic spectroscopy]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № S1, P. 90–101.
10. ASTM D7012–10. *Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures*. West Conshohocken: ASTM International, 2010.
11. DIN EN 14580:2005. *Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 2005.
12. GOST 28985–91. Porody gornye. Metod opredeleniya deformatsionnykh kharakteristik pri odnoosnom szhatii [Rocks are mountainous. A method for determining deformation characteristics in uniaxial compression]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 2004, 10 p.
13. Alekseev A.F., Gryaznov O.N., 2013. Fiziko-mekhanicheskie svoystva metasomatitov serpentinitovoi formatsii Bazhenovskogo mestorozhdeniya khrizotil-asbesta [Physical and mechanical properties of metasomatites of the serpentinite formation of the Bazhenovskoye chrysotile asbestos deposit]. Inzhenernaya geologiya, № 4, P. 54–59.
14. Alekseev A.F., 2005. Inzhenernaya petrologiya giperbazitov Bazhenovskogo i Dzhetygarinskogo mestorozhdenii khrizotil-asbesta [Engineering petrology of the hyperbasites of the Bazhenovskoye and Dzhetygarinskoye deposits of chrysotile asbestos]: spetsial'nost' 25.00.08 "Inzhenernaya geologiya, merzlotovedenie i gruntovedenie": dis. ... kandidata geologo-mineralogicheskikh nauk. Ekaterinburg, 192 p.

УДК 622.834

Дрибан Виктор Александрович

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

Хохлов Борис Валентинович

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

Антипенко Антон Викторович

ведущий инженер, отдел горного давления,
Республиканский академический
научно-исследовательский и
проектно-конструкторский институт
горной геологии, геомеханики, геофизики и
маркшейдерского дела ФГБНУ «РАНИМИ»
e-mail: ministrxp@mail.ru

ПРОГНОЗ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВАЛОВ НА ПОДРАБОТАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ МЕТОДОМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Аннотация:

В статье приведены результаты анализа геомеханической обстановки в пределах горного отвода шахты им. В. М. Бажанова.

В настоящее время массовое закрытие угольных шахт с их последующим затоплением привело к кардинальному перераспределению гидродинамического режима подземных вод. Это стало причиной активизации геомеханических процессов, в том числе процессов самоликвидации сохранившихся горных выработок и пустот в горном массиве, вплоть до образования провалов земной поверхности. Как следствие, нарушаются эксплуатационные способности (в некоторых случаях вплоть до разрушения) зданий, сооружений и других объектов, расположенных на земной поверхности, что существенно образом увеличивает риски при ведении хозяйственной деятельности, а также создает угрозу жизни и здоровью людей.

Поэтому для поля шахты им. В. М. Бажанова был выполнен прогноз вероятности образования провалов земной поверхности по двум методикам: нормативной и с применением искусственного интеллекта. Представленная нейронная сеть разработана в отделе горного давления ФГБНУ «РАНИМИ» на основе нормативной методики, с учетом требований нормативных документов и проведенных исследований.

DOI:

Driban Viktor A.

Doctor of Technical Sciences,
Senior Researcher,
acting Director of the Republican Academic
Research and Design Institute of Mining Geology,
Geomechanics, Geophysics and Surveying,
RANIMI Federal State Budgetary Institution,
Donetsk, 291 Chelyuskintsev Str.
e-mail: viktor-driban@yandex.ru

Khokhlov Boris V.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Head of the Mining Department,
Republican Academic Research and Design
Institute of Mining Geology, Geomechanics,
Geophysics and Surveying of RANIMI
Federal State Budgetary Institution
e-mail: hbv@bk.ru

Antipenko, Anton V.

Leading Engineer, Mining Department,
Republican Academic Research and Design
Institute of Mining Geology, Geomechanics,
Geophysics and Surveying of RANIMI
Federal State Budgetary Institution
e-mail: ministrxp@mail.ru

USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS TO PREDICT THE DANGEROUSNESS OF UNDERMINED AREAS OF THE EARTH'S SURFACE

Abstract:

The article presents the results of an analysis of the geomechanical situation within the mining allotment of the mine named after V. M. Bazhanov.

Currently, the mass closure of coal mines with subsequent flooding has led to a radical redistribution of the hydrodynamic regime of underground waters. This has led to the activation of geomechanical processes, including the self-liquidation processes of remaining mine workings and voids in the rock mass, up to the formation of ground surface collapses. As a result, the operational capabilities (in some cases, up to destruction) of buildings, structures, and other objects located on the ground surface are disrupted, significantly increasing the risks associated with economic activities and posing a threat to the lives and health of people.

Therefore, a forecast of the probability of ground surface collapses was carried out for the mine named after V. M. Bazhanov, using two methods: normative and with the application of artificial intelligence. The neural network presented was developed by the Mining Pressure Department of the Federal State Budgetary Institution RANIMI based on the normative methodology, considering the requirements of regulatory documents and conducted research. The resulting program can predict the probability of surface collapses over old mine workings with an accuracy of up to 94.6% and has been tested at several mines in the Donetsk-Makeevsky and Torez-

Полученная программа способна осуществлять прогноз вероятности образования провалов на земной поверхности над старыми горными выработками с точностью до 94,6 % и была опробована на ряде шахт Донецко-Макеевского и Торезско-Снежнянского угленосных районов Донбасса, а также на шахтах Восточного Донбасса.

В результате выполненного анализа с использованием нейронного алгоритма установлено, что на территории горного отвода шахты им. В. М. Бажанова вероятность провалообразования в настоящее время сохраняется только в двух нейрозонах, на территории которых расположено несколько частных домовладений. При этом значительные территории земной поверхности в пределах нормативных провалоопасных зон с расположенными в них зданиями, сооружениями и промышленными объектами определены вполне безопасными, так как процессы провалообразования в них давно завершились.

Ключевые слова: горная выработка, земная поверхность, провалообразование, методика прогноза, нейронная сеть.

Snezhnyansky coal-bearing regions of the Donbass, as well as in the mines of Eastern Donbass.

As a result of the analysis using the neural algorithm, it was established that in the territory of the mine named after V.M. Bazhanov, the probability of failure formation currently only remains in two neural zones, where several private residential buildings are located. At the same time, significant areas of the ground surface within the normative failure zones, with buildings, structures, and industrial objects located in them, have been determined to be entirely safe, as the failure processes in them have long been completed.

Key words: mine workings, earth surface, failure, prediction technique, neural network.

Введение

Добыча угля в Донецком бассейне ведется уже более 200 лет. Практически вся поверхность региона оказалась подработанной на малых глубинах (20 – 100 м). В Донецком регионе имеется более 10 тыс. горных выработок, имеющих выход на земную поверхность. Только на территории города Донецка их около тысячи [1], и ликвидировались они в разные годы, зачастую без соблюдения существующих норм и правил.

Массовое затопление шахт Донецкого региона, обусловленное закрытием нерентабельных угледобывающих предприятий, вызвало кардинальное изменение гидрогеологической обстановки. Это повлекло за собой активизацию процессов сдвижения горного массива с последующей самоликвидацией подземных пустот от старых горных выработок, что, в свою очередь, привело к высоким рискам образования провалов на земной поверхности [2]. Как следствие – нарушение эксплуатационных способностей объектов на поверхности вплоть до их полного разрушения.

Для обеспечения безопасной жизнедеятельности техногенно нагруженных, подработанных территорий требуется надежный прогноз развития возможных опасных деформаций дневной поверхности и провалообразования. От правильной оценки вероятности и определения времени возможного возникновения провала зависит своевременность принятия мер по минимизации вреда, наносимого подземным коммуникациям и объектам, расположенным на земной поверхности [3].

Оценка степени провалоопасности до настоящего времени осуществляется по нормативной методике [4]. Однако полученные по этой методике расчетные параметры провалоопасных зон на территориях горных отводов шахт в изменившихся условиях не являются достаточно достоверными. Это обусловлено несколькими причинами. На сегодняшний день не существует единого нормативного документа, устанавливающего правила построения границ провалоопасных зон на дневной поверхности. Разработанная в ФГБНУ «РАНИМИ» методика [4] опирается на несколько нормативных документов, в которых уделялось внимание вопросам провалообразования над горными выработками. Применяемые в них расчетные формулы встречаются еще в нормативных документах 1970-х годов, и выводились они без учета возможности подтопления потенциально провалоопасных территорий и возраста горных выработок. Нормативная методика предполагает, что дневная поверхность представляет собой плоскость. Такое допущение может приводить к существенным ошибкам при определении глубины расположения выработок, так как мезорельеф представляет собой поверхность топографиче-

ского порядка со значительной разницей высотных отметок в пределах исследуемых участков.

В отделе горного давления ФГБНУ «РАНИМИ», с учетом исследований [4] – [10] и нормативных документов [11] – [13], была разработана и натренирована нейронная сеть [1] для прогноза образования провалов на земной поверхности над старыми горными выработками, с точностью около 95 %. Эта система основана на искусственных нейронных сетях и генетических алгоритмах. В качестве исходных факторов, способствующих развитию повреждений земной поверхности над старыми горными выработками, были выбраны глубина расположения выработки; степень диагенеза вмещающих пород; возраст выработки; углы наклона породных слоев и самой выработки; а также техногенный фактор, учитывающий взаимовлияние смежных выработок, влияние зон ПГД, обводненность, наличие пливунов и прочих негативных факторов, повышающих вероятность образования провала.

Сеть была создана на основе перцептрона и генетического алгоритма, включающего в себя шесть входных нейронов, семь промежуточных и два исходящих нейрона. Подобная архитектура сети обусловлена физическим смыслом процессов, лежащих в основе прогнозируемого явления.

На шесть входных нейронов подаются главные факторы, обуславливающие процесс долговременного уменьшения устойчивости массива горных пород над старой горной выработкой. На вход первого нейрона поступает сигнал глубины расположения выработки. На второй – степень диагенеза. На третий – время от момента проведения выработки до момента возникновения провала. Если провала не было – до настоящего времени. На четвертый – угол залегания пород. На пятый – угол наклона выработки. На шестой – фактор условий эксплуатации выработки.

Нейроны 7 – 13 организованы в два скрытых слоя. Именно эти нейроны отвечают за моделирование нелинейных процессов, которые являются основными физическими процессами в механизме потери устойчивости нагруженного собственным весом массива горных пород. Нейроны 14 и 15 выдают исходящие данные в виде наличия/отсутствия вероятности провала и времени его образования.

Были построены три группы номограмм для слабо-, средне-, и высокометаморфизованных горных массивов. Номограммы позволяют провести предварительную оценку сроков появления провалов на дневной поверхности в зависимости от глубины расположения выработок, при действующих шести группах влияющих факторов: благоприятные условия поддержания выработки; выработка находится в зоне тектонической нарушенности; выработка находится в зоне влияния горных работ; негативные гидрогеологические условия; выработка находится в зоне пливунов; комплекс негативных факторов. Данная методика была апробирована на шахтах Донецко-Макеевского и Торезско-Снежнянского районов Донбасса [14] и на шахтах Восточного Донбасса [15].

Шахта им. В. М. Бажанова расположена в северо-восточной части города Макеевки, Донецкой Народной Республики. Часть территории горного отвода шахты отнесена к потенциально провалоопасным, и имеет весьма сложное строение. В приповерхностной зоне отрабатывались два сближенных пласта n_1^B и n_1^H с мощностью междупластья 6 – 10 м. Выходы под наносы обоих пластов расположены на западном склоне балки «Сухая Калиновая». Направление падения пород – с запада на восток. Несмотря на то что вдоль дна балки по обоим пластам расположены целики, они неоднократно были прорезаны наиболее опасными с точки зрения провалообразования протяженными горными выработками различного назначения.

Возраст горных выработок находится в достаточно большом диапазоне от 55 до 100 лет и более. Угол падения увеличивается с глубиной от 3 до 5°. В кровле верхнего пласта залегает песчаник мощностью 20 – 30 м. О мощности наносов имеются лишь фрагментарные данные, однако следует отметить, что при прогнозе опасности провалообразования необходимо учитывать только глубину по карбону, т.е. коренным поро-

дам. Так как прочностные характеристики наносов на порядок ниже, чем у коренных пород, то купол обрушения, развивающийся до поверхности карбона, неизбежно выйдет на дневную поверхность в виде провала. Все эти факторы делают прогноз провалообразования на основе нормативной методики чрезвычайно сложным и недостаточно надежным. В связи с этим было принято решение применить метод прогноза на основе расчетов нейронной сети.

На начальном этапе работ были выполнены следующие подготовительные работы:

- проведен анализ планов горных работ по отработанным и действующим горизонтам и пластам, а также горно-геологических и горнотехнических условий отработки угольных пластов на горном отводе шахты;
- на горном отводе определены все выработки, имеющие выход на земную поверхность и участки близкого к поверхности расположения горных выработок;
- проведено обследование выработок, имеющих выход на земную поверхность и участков близкого к поверхности расположения горных выработок с оценкой их состояния;
- выполнено координатное позиционирование каждого объекта на спутниковой карте с визуализацией в геоинформационной системе “Google Earth Pro” (рис. 1). Полученные материалы позволили создать координатную базу позиционирования всех известных устьев горных выработок, выходящих на поверхность в пределах горного отвода шахты, и дают возможность проанализировать окружающий ее рельеф местности.

Оценка провалоопасности конкретных участков поверхности проводилась в три этапа. **На первом этапе** производились предварительные построения. В графическом редакторе к цифровой растровой копии плана поверхности привязывались аналогичные копии планов горных выработок обоих пластов. За основу была взята поверхность верхнего пласта n_1^B как более опасного. На план поверхности переносилась линия выхода пласта n_1^B под наносы. Далее эта линия клонировалась в сторону падения с интервалами по глубине в 20 м, учитывающими изменение угла падения. Таким образом, на плане дневной поверхности был получен график изолиний, приблизительно соответствующий поверхности пласта.

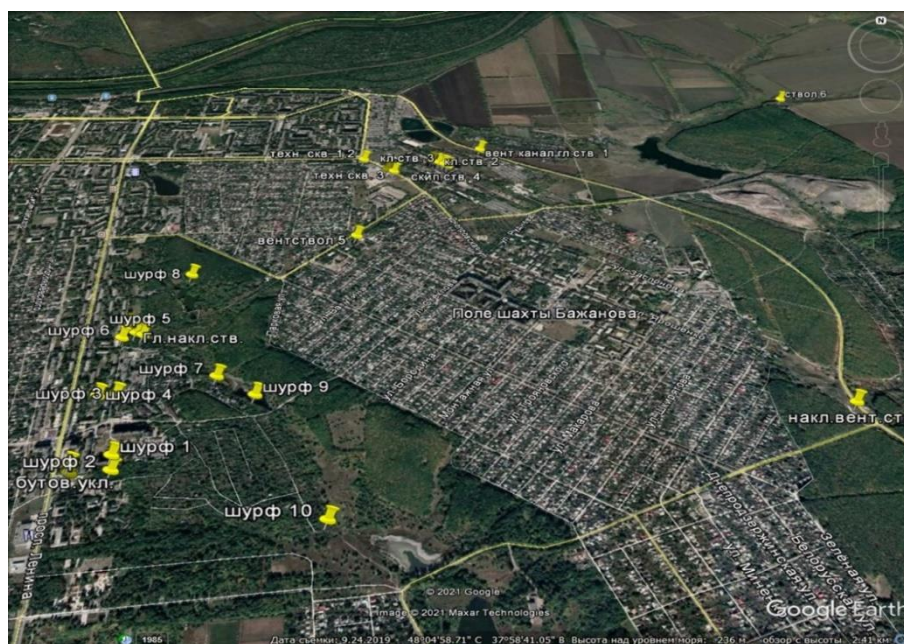


Рис. 1. Обследованные объекты шахты им. В. М. Бажанова

Далее были намечены четыре линии, вдоль которых построены вертикальные разрезы. Линии дневной поверхности и пластов на разрезах строились по соответствующим планам, а линия поверхности карбона строилась по имеющимся данным о мощности наносов. Для удобства построений горизонтальный масштаб разрезов был выбран соответствующим масштабу плана поверхности (1:5000), а вертикальный масштаб равен 1:1000.

На заключительном шаге предварительных построений предполагаемая линия поверхности карбона клонировалась вертикально вниз с интервалом, соответствующим 20 м, до глубины 160 м. Точки пересечения данных линий с линией пласта n_1^B переносились на план поверхности, где соединялись линиями. Полученный в результате график соответствует поверхности пласта в изоглубинах по карбону.

На втором этапе на плане изоглубин по карбону пласта n_1^B была выделена 41 зона с учетом реальных контуров горных выработок по обоим пластам, возраста и типа выработок, по интервалам глубин 20 м. На этом этапе панельные уклоны и бремс-берги, охраняемые целиками по обоим пластам, сразу выделялись в отдельные зоны.

Следующим шагом на совмещенный план поверхности и горных выработок была вынесена линия возможного уровня затопления, соответствующая для рассматриваемого участка поля шахты им. Бажанова отметке +206,1 м. По этой линии зона № 1 была разделена на четыре, а зона № 3 – на две новых зоны. Для каждой зоны были определены диапазон глубин по карбону (методом интерполяции), средний возраст выработок, а также время образования провалов по трем номограммам для горного массива средней степени метаморфизма (рис. 2). Результаты представлены в табл. 1.

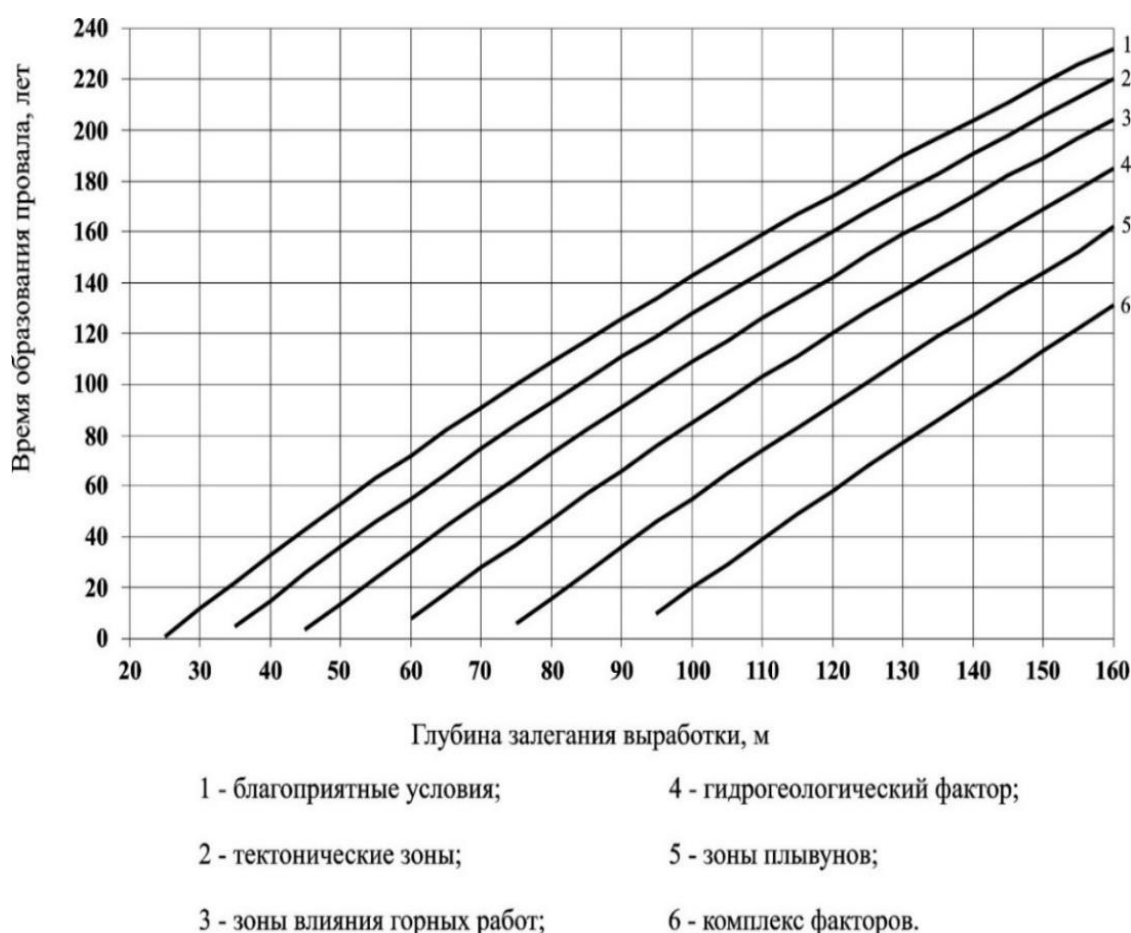


Рис. 2. Номограммы для установления времени развития провала в зависимости от глубины при средней степени метаморфизма [10]

Таблица 1

**Результаты определения провалоопасности выделенных участков
земной поверхности, по номограммам**

№ зоны	Интервал глубин по карбону, м	Средний возраст выработок, лет	Время формирования провалов, лет		
			Благоприятные условия (график 1)	В зоне влияния горных работ (график 3)	Гидрогеологический фактор (график 4)
1	2	3	4	5	6
1.1	0-8	100	0	0	0
1.2	0-5	100	0	0	0
1.3	8-15	100	0	0	0
1.4	8-20	100	0	0	0
2	10-20	80	0	0	0
3.1	5-8	90	0	0	0
3.2	8-20	90	0	0	0
4	20-40	75	0-35	0	0
5	20-40	100	0-35	0	0
6	20-40	85	0-35	0	0
7	54-60	55	60-75	25-35	0-10
8	40-60	70	35-75	0-35	0-10
9	40-60	100	35-75	0-35	0-10
10	40-60	75	35-75	0-35	0-10
11	46-60	75	45-75	—	0-10
12	60-80	55	75-110	35-75	10-45
13	60-80	65	75-110	35-75	10-45
14	60-80	100	75-110	35-75	10-45
15	60-80	70	75-110	35-75	10-45
16	60-80	70	75-110	—	10-45
17	80-100	55	110-145	75-110	45-85
18	80-100	60	110-145	75-110	45-85
19	80-100	100	110-145	75-110	45-85
20	80-100	60	110-145	75-110	45-85
21	80-100	65	110-145	—	45-85
22	83-100	55	110-145	—	45-85
23	100-120	55	145-175	110-145	85-120
24	100-120	60	145-175	110-145	85-120
25	100-120	60	145-175	110-145	85-120
26	100-120	60	145-175	110-145	85-120
27	100-120	60	145-175	—	85-120
28	100-120	55	145-175	—	85-120
29	100-120	55	145-175	—	85-120
30	120-140	55	175-205	145-165	120-155
31	120-140	60	175-205	145-165	120-155
32	120-140	60	175-205	145-165	120-155
33	120-140	60	175-205	145-165	120-155
34	120-140	60	175-205	—	120-155
35	120-140	55	175-205	—	120-155
36	140-160	55	205-235	165-205	155-185
37	140-160	60	205-235	165-205	155-185
38	140-160	60	205-235	165-205	155-185
39	140-160	60	205-235	165-205	155-185
40	140-160	60	205-235	—	155-185
41	140-160	55	205-235	—	155-185

По результатам анализа данных табл. 1 ячейки выделены по следующим правилам:

- прочерк (отсутствие данных) в ячейках пятой колонки означает, что в данной зоне отрабатывался только пласт n_1^B без подработки по нижнему пласту, соответственно, фактор влияния горных работ можно исключить;
- светло-серым цветом обозначены ячейки, в которых время образования провалов меньше, чем средний возраст выработок (третья колонка). Это означает, что в данных зонах процесс провалообразования уже должен был завершиться и для объектов на поверхности угроза отсутствует;
- косой штриховкой обозначены ячейки, в которых время образования провалов существенно больше среднего возраста выработок (третья колонка). Соответственно, в ближайшем будущем образование провалов в этих зонах маловероятно;
- темно-серым цветом обозначены ячейки четвертой и пятой колонок, если возраст выработок зоны укладывался в диапазон времени образования провалов. Ячейки шестой колонки обозначены таким же цветом, если при появлении гидрогеологического фактора время провалообразования становилось равным либо меньше возраста выработок. Известно, что при насыщении водой прочность горных пород существенно снижается, а это, в свою очередь, ускоряет процесс провалообразования;
- вертикальная штриховка ячеек шестой колонки означает ситуацию некоторой неопределенности. Например, зона № 7 по фактору благоприятных условий станет опасной через 5 лет. В то же время по фактору влияния горных работ процесс провалообразования в ней должен был уже закончиться. Так как данная оценка носит вероятностный характер, нельзя исключать возможность обоих вариантов и при затоплении выработок вероятность образования провалов в зоне резко возрастет.

Предварительный анализ ситуации показал следующее:

- зоны № 1-6 и 9 уже неопасны, так как процессы провалообразования в них уже должны были закончиться;
- зоны № 23-41 еще не опасны, а с учетом того, что выработки этих зон находятся на глубинах 100 м и более, вероятность провалообразования в них невелика;
- зоны № 7-22 (за исключением № 9) требуют более подробного изучения на третьем этапе анализа.

На третьем этапе выполнялся детальный анализ времени образования провалов методом прямого расчета по нейронному алгоритму.

Первым шагом анализа стал поиск в пределах указанных зон объектов, представляющих наибольшую опасность с точки зрения возможности образования провалов на земной поверхности. К таковым были отнесены охраняемые целиками выработки на обоих пластах при отсутствии их непосредственной подработки или надработки горными работами соседнего пласта. Очистные работы, с учетом незначительной мощности междупластья (6-10 м), существенно нарушают исходное состояние массива и исключают возможность развития над протяженными выработками узких куполов обрушения, которые и приводят к образованию провалов.

Наличие объектов, являющихся источниками возможного образования провалов, установлено в трех зонах № 14, 19 и 20. Зоны № 14 и 19 были построены над центральным уклоном пласта n_1^H . В зоне № 20 объекты-источники локализованы в пределах двух небольших участков, поэтому были выделены две зоны с номерами 20.1 и 20.2.

Следующим шагом анализа было уточнение исходных параметров объектов, а именно глубины расположения и возраста выработок. Так же для прямого расчета по нейронному алгоритму требуются следующие данные: степень метаморфизма (в данном случае Г); угол падения пород (изменяется от 3 до 5°); угол наклона выработки; фактор влияния горных работ и горно-геологических условий (в отобранных зонах отсутствует). Далее для установленных условий был произведен расчет времени образования провалов с точностью до одного года. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Ячейки табл. 2 выделены так же, как и ячейки табл. 1.

Таблица 2

Результаты прямого расчета провалоопасности с учетом затопления выработок

№ зоны	Опасный объект	Возраст объекта, лет	Глубина по карбону, м	Угол падения пород, град	Угол наклона выработки, град	Время провала по расчету, лет	
						Благоприятные условия	Гидрогеологический фактор
1	2	3	4	5	6	7	8
14	Центральный уклон пл. n_1^H	100	70-90	4	4	75-107	11-45
19	Центральный уклон пл. n_1^H	100	90-110	5	5	107-137	45-77
20.1	Участок 4-го транспортного штрека пл. n_1^H в целике под вент. ств. №5	65	110	5	0	151	94
20.2	Центральные вспомогательный и транспортный бремсберги и ходок центрального бремсберга пл. n_1^H	60	110	5	5	137	77

По результатам анализа полученных расчетных параметров установлено, что зоны № 20.1 и № 20.2 даже в случае затопления не должны представлять особой опасность еще в течение 20 – 30 лет. Возраст выработок зон № 20.1 и 20.2, позволяет предположить, что они были закреплены металлической рамной крепью и полноценно погашены, и с учетом их фактической глубины расположения и наличия мощного песчаника в кровле пласта n_1^B эти зоны можно считать достаточно безопасными.

Возраст выработок зон № 20.1 и 20.2 позволяет предположить, что они были закреплены металлической рамной крепью и полноценно погашены, и с учетом их фактической глубины расположения и наличия мощного песчаника в кровле пласта n_1^B эти зоны можно считать достаточно безопасными.

Наиболее велика вероятность образования провалов на сегодняшний день в зоне № 14. В зоне № 19 вероятность образования провалов незначительна, но в случае затопления выработок она существенно возрастет. Большая часть нормативной зоны № 8 (построенной по нормативной методике) относится к этому же уклону, но она не пересекается с нейронными зонами № 14 и 19, а заканчивается выше по падению. Таким образом, нормативная зона № 8 занимает те участки (нейрозоны № 1.4, 5 и частично 9 в табл. 1), которые по нейрорасчетам относятся к уже безопасным с точки зрения возможного провалообразования.

Нормативные зоны № 21 и 22 занимают значительную площадь и на большей ее части накладываются друг на друга, что по нормативной методике означает повышенную опасность провалообразования, в то время как предварительный анализ по номограммам (см. рис. 3) показал, что большая часть этой территории уже безопасна, поскольку процессы провалообразования на них уже завершились.

Выводы

1. Разработанная нейронная сеть позволяет прогнозировать время образования провалов на земной поверхности со средней погрешностью не более 5 %. Такая погрешность является полностью приемлемой и объясняется природными случайными погрешностями определения исходных данных.

2. По результатам проведенного дополнительного анализа вероятность провалообразования на территории горного отвода шахты им. В. М. Бажанова существует только в нейрозоне № 14 и в нейрозоне № 19 при условии затопления горных выработок. В границах этих нейрозон на поверхности расположены несколько частных домов-строений. В то же время значительные территории в границах нормативных зон с расположенными на них промышленными и хозяйственными объектами, многоэтажными домами и пр. признаны вполне безопасными, так как процессы провалообразования в них или уже завершились, или возможность образования провалов в них отсутствует.

Список литературы

1. Driban V., Nazimko V., Feofanov A., Khalymendyk I., 2010. Vorhersage des erdoberflächeabsturzes oberhalb der alten kohlegrubenräumen. *Altbergbau – Kolloquium*, Freiberg, 04. bis 06. November, P. 391-400.
2. Славиковская Ю.О., 2021. Техногенные пустоты недр как фактор негативного воздействия на окружающую среду при разработке месторождений твердых полезных ископаемых. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 2, С. 33-44.
3. Кирков А.Е., Федосеев В.В., Кужим О.М., 2022. Превентивное обнаружение и локализация провалов подработанной земной поверхности – основа решения региональных проблем моногородов в горнопромышленных регионах. *Золото. Полиметаллы. XXI век: Устойчивое развитие: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Челябинск, 02–03 марта 2022 года*. Челябинск: Институт проблем комплексного освоения недр РАН, С. 49-51.
4. Хохлов Б. В., Дрибан В.А., Голдин С.В., Терлецкий А.М., Рожко М.Д., 2019. Методика построения и обследования зон, опасных по провалам. *Труды РАНИМИ: сб. науч. тр., Донецк*, № 7 (22), С. 142-157.
5. Постоев Г.П., 2020. Модели механизма формирования и расчета параметров провалов земной поверхности над подземными полостями. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, № 4, С. 36-47.
6. Хамидуллина Н.В., Прокопова М.В., Прокопов А.Ю., 2019. Физическое моделирование провалов земной поверхности. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*, № 2(74), С. 124-131.
7. Гавриленко Ю.Н., Петрушин А.Г., 2003. Основные принципы моделирования сдвижений и деформаций земной поверхности методом конечных элементов. *Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-геологічна*, Донецьк, Випуск 62, С. 100 – 114.
8. Усанов С.В., Мельник В.В., Замятин А.Л., 2013. Мониторинг трансформации структуры горного массива под влиянием процесса сдвижения. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 6, С.83-89.
9. Усанов С.В., Усанова А.В., 2015. Сдвигение земной поверхности при затоплении железорудной шахты. *Проблемы недропользования*, №1, С. 55-64.
10. Дрибан В.А., Феофанов А.Н., Назимко И.В., 2009. Разработка системы прогноза обрушений земной поверхности над погашенными горными выработками. *Проблеми гірського тиску. Сб. науч. праць*, №17, С.22 – 57.
11. *Методическое руководство «О порядке выделения провалоопасных зон и выбора комплекса технических мероприятий по выявлению и ликвидации пустот на ликвидируемых шахтах Восточного Донбасса»*. Москва: ИПКОН РАН, 2007, 34 с.

12. ГСТУ 101.00159226.001 – 2003. Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом. Введ. 01.01.2004. Киев, 2004, 128 с.

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

14. Дрибан В.А., Хохлов Б.В., Хламов Д.М., Антипенко А.В., 2023. Прогноз провалоопасности подработанных территорий при затоплении горных выработок шахт Торезско-Снежнянского района на основе методов искусственного интеллекта. *Труды РАНИМИ*, № 20-21(35-36), С. 47-65.

15. Дрибан В.А., Хохлов Б.В., Антипенко А.В., Голдин С.В. 2024. Прогноз вероятности образования провалов земной поверхности на горном отводе шахты «Ростовская» при ее затоплении. *Труды РАНИМИ*, № 1(39), С. 63-77.

References

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

2. Slavikovskaya Yu.O., 2021. Tekhnogennyye pustoty nedr kak faktor negativnogo vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu pri razrabotke mestorozhdenii tverdykh poleznykh iskopaemykh [Man-made subsurface voids as a factor of negative impact on the environment during the development of solid mineral deposits]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 2, P. 33-44.

3. Kirkov A.E., Fedoseev V.V., Kuzhim O.M., 2022. Preventivnoe obnaruzhenie i lokalizatsiya provalov podrobotannoi zemnoi poverkhnosti – osnova resheniya regional'nykh problem monogorodov v gornopromyshlennykh regionakh . [Preventive detection and localization of failures of the mined earth's surface as the basis for solving regional problems of single-industry towns in mining regions]. *Zoloto. Polimetallogy. XXI vek: Ustoichivoe razvitie: Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, Chelyabinsk, 02–03 marta 2022 goda. Chelyabinsk: Institut problem kom-pleksnogo osvoeniya nedr RAN, P. 49-51.

4. Khokhlov B. V., Driban V.A., Goldin S.V., Terletskii A.M., Rozhko M.D., 2019. Metodika postroeniya i obsledovaniya zon, opasnykh po provalam [Methodology for the construction and inspection of zones dangerous for collapses]. *Trudy RANIMI: sb. nauch. tr.*, Donetsk, № 7 (22), P. 142-157.

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

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

7. Gavrilenko Yu.N., Petrushin A.G., 2003. Osnovnye printsipy modelirovaniya sdvizhenii i deformatsii zemnoi poverkhnosti metodom konechnykh elementov [Basic principles of modeling the movements and deformations of the Earth's surface by the method of fi-

nite elements]. Naukovi pratsi DonNTU. Seriya girnicho-geologichna, Donets'k, Vipusk 62, P. 100 – 114.

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

9. Usanov S.V., Usanova A.V., 2015. Sdvizhenie zemnoi poverkhnosti pri zatoplenii zhelezorudnoi shakhty [Displacement of the Earth's surface during the flooding of an iron ore mine]. Problemy nedropol'zovaniya, №1, P. 55-64.

10. Driban V.A., Feofanov A.N., Nazimko I.V., 2009. Razrabotka sistemy prognoza obrushenii zemnoi poverkhnosti nad pogashennymi gornymi vyrabotkami [Development of a system for forecasting collapses of the Earth's surface over extinguished mining workings]. Problemi girs'kogo tisku. Sb. nauch. prats', №17, P.22 – 57.

11. Metodicheskoe rukovodstvo "O poryadke vydeleniya provaloopasnykh zon i vybora kompleksa tekhnicheskikh meropriyatiy po vyyavleniyu i likvidatsii pustot na likvidiruemykh shakhtakh Vostochnogo Donbassa' [Methodological guide "On the procedure for the allocation of sinkholes and the selection of a set of technical measures to identify and eliminate voids in the liquidated mines of Eastern Donbass"]. Moscow: IPKON RAN, 2007, 34 p.

12. GSTU 101.00159226.001 – 2003. Pravila podrobotki zdaniy, sooruzhenii i prirodnykh ob'ektov pri dobyche uglia podzemnym sposobom [Rules for the mining of buildings, structures and natural objects during underground coal mining. 01.01.2004]. Vved. 01.01.2004. Kiev, 2004, 128 p.

13. Metodicheskie polozeniya po resheniyu gidrogeologicheskikh zadach pri razrabotke proekta likvidatsii shakhty (posobie proektirovshchiku) [Methodological guidelines for solving hydrogeological problems in the development of a mine liquidation project (designer's manual)] RTM 6.04.95 . Donetsk: Dongiproshakht, 1995, 17 p.

14. Driban V.A., Khokhlov B.V., Khlamov D.M., Antipenko A.V., 2023. Prognoz provaloopasnosti podrobotannykh territorii pri zatoplenii gornykh vyrabotok shakht Torezsko-Snezhnyanskogo raiona na osnove metodov iskusstvennogo intellekta [The forecast of the sinkhole hazard of the mined areas in case of flooding of the mine workings of the Torezsko-Snezhnyansky district based on artificial intelligence methods]. Trudy RANIMI, № 20-21(35-36), P. 47-65.

15. Driban V.A., Khokhlov B.V., Antipenko A.V., Goldin S.V. 2024. Prognoz veroyatnosti obrazovaniya provalov zemnoi poverkhnosti na gornom otvode shakhty "Rostovskaya" pri ee zatoplenii [The forecast of the probability of formation of sinkholes of the Earth's surface at the mining outlet of the Rostovskaya mine during its flooding]. Trudy RANIMI, № 1(39), P. 63-77.



РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.233.53

Чещин Дмитрий Олегович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
отдел горной и строительной геотехники,
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала
СО РАН,
630091, Новосибирск,
ул. Красный проспект, 54
e-mail: dimixch@mail.ru

Данилов Борис Борисович

доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
отдел горной и строительной геотехники,
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала
СО РАН

Плохих Вадим Валерьевич

младший научный сотрудник,
отдел горной и строительной геотехники,
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала
СО РАН

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПНЕВМОУДАРНОГО БУРЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН

Аннотация:

Сооружение скважин в массиве горных пород ударно-вращательным способом с помощью пневмоударников достаточно распространено как в России, так и за рубежом. Однако вынос разрушенной породы с помощью энергии воздушной струи накладывает ограничения на предельную длину бурения скважины, что вызвано физической природой движения частиц в воздушном потоке. Особенно остро этот вопрос встает при сооружении горизонтальных скважин. В статье рассматривается способ повышения эффективности пневмоударного бурения горизонтальных скважин. Отмечены особенности пневмоударного бурения и сферы его применения. Выявлены недостатки классического способа бурения пневмоударниками, связанные с пневмотранспортированием разрушенной породы по кольцевому каналу. Предложен способ повышения эффективности пневмоударного бурения путем применения кольцевых пневмоударных механизмов и двойной буровой колонны – метода бурения с обратной циркуляцией очистного агента или RC-бурения. В отличие от классического метода бурения пневмоударниками, эффективность транспортирования частиц при RC-бурении не снижается при увеличении диаметра буримой скважины. Показано, что пневмотранспортирование по вращающемуся каналу позволяет осуществлять удаление разрушенной породы при меньших скоростях воздушного потока. Также путем имитационного моделирования определены скорости потока воздуха для двух систем транспортирования разрушенной породы с аналогичным диаметром бурения: классического пневмоударного бурения и бурения с обратной циркуляцией. В результате проведенного сравнительного анализа скоростей потока воздуха установлено, что скорость воздушного потока в двойной буровой колонне более чем в 2,5 раза выше, чем в классическом пневмоударном бурении, что позволяет увеличить эффективность и предельно возможную длину транспортирования разрушенной породы.

DOI:

Cheshchin Dmitry O.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Department of Mining and
Construction Geotechnics, N.A.Chinakal
Institute of Mining SB RAS,
630091 Novosibirsk,
54 Krasny prospect,
e-mail: dimixch@mail.ru.

Danilov Boris B.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Department of Mining and
Construction Geotechnics, N.A. Chinakal
Institute of Mining SB RAS

Plokhikh Vadim V.

Junior Researcher,
department of Mining and
Construction Geotechnics, N.A. Chinakal
Institute of Mining SB RAS

INCREASING THE EFFICIENCY OF PNEUMATIC PERCUSSION DRILLING OF HORIZONTAL WELLS

Abstract:

The construction of wells in rock masses using the rotary impact method using air hammers is quite common both in Russia and abroad. However, the removal of destroyed rock using the energy of an air jet imposes restrictions on the maximum length of the drilling well, caused by the physical nature of the movement of particles in the airflow. This issue arises especially acutely when constructing horizontal wells. The article considers a method for increasing the efficiency of air percussion drilling of horizontal wells. The features of pneumatic percussion drilling and the scope of its application are noted. The disadvantages of the classical method of drilling with air hammers, associated with pneumatic transportation of the destroyed rock through the annular channel, have been identified. A method has been proposed to increase the efficiency of air percussion drilling by using annular air percussion mechanisms and a double drill string – a drilling method with reverse circulation of a cleaning agent or RC drilling. Unlike the classical method of drilling with air hammers, the efficiency of particle transportation during RC drilling does not decrease as the diameter of the drilled hole increases. It has been shown that pneumatic transportation through a rotating channel makes it possible to remove destroyed rock at lower air flow rates. In addition, through simulation modeling, airflow rates were determined for two systems of transporting destroyed rock with a similar drilling diameter: classical air percussion drilling and reverse circulation drilling. As a result of a comparative analysis of air flow rates, it was found that the air flow speed in a double drill string is more than 2.5 times higher than in classical air percussion drilling, which allows increasing the efficiency and maximum possible length of transportation of destroyed rock.

Ключевые слова: пневмотранспорт, частица, бурение, пневмоударник, шлам, скважина, продувка, шламотранспорт.

Key words: pneumatic transport, particle, drilling, pneumatic hammer, slurry, well, blowing, slurry transport.

Введение

Одним из наиболее эффективных способов проходки скважин в массиве горных пород является ударно-вращательный [1]. Для его реализации на горных предприятиях как в России, так и за рубежом получили развитие погружные машины ударного действия – погружные пневмоударники. Они применяются в качестве рабочего органа бурового станка, который через систему штанг осуществляет подвод энергоносителя, передачу осевого усилия и вращающего момента.

Наибольшее распространение пневмоударники получили при бурении взрывных скважин в технологии ударно-вращательного бурения (УВБ) по породам средней и высокой крепости. УВБ с использованием пневмоударников имеет особенность в том, что удар и вращение выполняются независимо друг от друга [2]. Ударно-циклическое воздействие на буровое долото обеспечивает ударный узел машины, вращатель бурового станка обеспечивает вращение всего бурового става, механизм подачи станка создает усилие прижатия пневмоударника к забою скважины для гашения реакции отдачи машины с учетом его мощностных характеристик и прочности пород.

Одной из сфер применения пневмоударников является бурение горизонтальных и наклонных скважин, например, для дегазации угольных пластов из подземных условий. В настоящее время основным методом сооружения дегазационных скважин в подземных условиях является вращательное бурение с промывкой водой. При этом отработанная вода скапливается в зумпфе, откуда откачивается насосными установками. Увеличение объема буримых скважин вызывает повышение водопритока, что приводит к подтоплению шахтного пространства и повышенной нагрузке на насосное оборудование. Применение пневмоударников позволяет не только решить эту проблему, но и увеличить скорость проходки скважин, в особенности при прохождении крепких прослоек в угольном массиве.

Постановка проблемы

Специалистами ИГД СО РАН был проведен ряд производственных испытаний по бурению погружным пневмоударником в шахтных условиях. При этом выявилась проблема недостаточного давления воздуха в шахтной магистрали, что является значимым фактором, ограничивающим предельную длину скважин, пройденных с пневматическим транспортированием продукта бурения. Недостаток давления в шахтной воздушной магистрали вызван такими труднопреодолимыми обстоятельствами, как износ компрессорного оборудования, значительная протяженность шахтной воздушной сети, ветхое состояние напорных трубопроводов и т.д. Давление воздуха в рабочей зоне не всегда достигает значения и 0,4 МПа, а при подключении устройств со значительным расходом воздуха этот показатель и вовсе может снижаться в 1,5÷2 раза. Наиболее критичным следствием этого является нарушение процесса транспортирования продукта бурения.

Рассмотрим процесс транспортирования породных частиц воздушным потоком по трубопроводу. На рис. 1 показаны силы, действующие при этом на породную частицу. Ключевое значение здесь имеет гидродинамическая подъемная сила. Подъемная сила $F_{\text{п}}$ возникает при несимметричном обтекании частицы воздушным потоком. Кроме этой силы на частицу действуют силы тяжести, трения и лобового давления потока воздуха.

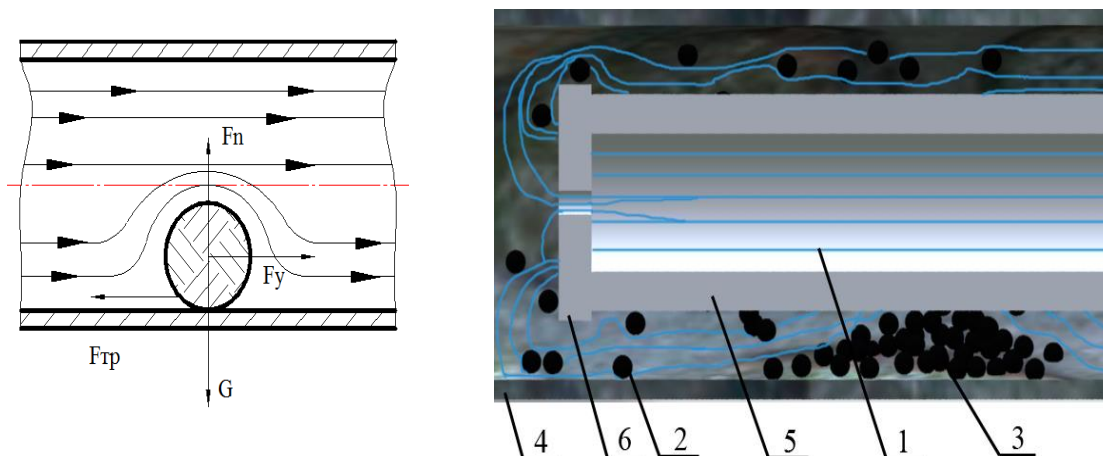


Рис. 1. Схема действия сил на частицу и схема движения потока воздуха и частиц шлама при бурении пневмоударником:

1 – поток воздуха; 2 – частица шлама; 3 – осевшие частицы; 4 – скважина; 5 – буровая колонна; 6 – буровая коронка

Обтекание частицы потоком практически всегда имеет несимметричный характер. Либо форма частицы несимметрична относительно направления обтекания, либо поток обтекает частицу с разных сторон с различной скоростью. Если частица лежит на дне трубопровода, то скорость воздуха над частицей больше, чем под ней. Давление воздуха над частицей в этих случаях будет меньше, чем под ней, вследствие чего возникает подъемная сила. Это явление называется эффектом Магнуса [3, 4].

Гидродинамическая подъемная сила, действующая на частицу, меняет свою величину в процессе движения частицы вместе с потоком. После подъема частицы увеличивается скорость ее обтекания снизу. По мере ускорения частицы в направлении потока уменьшается относительная скорость ее обтекания. Поэтому после подъема и разгона частица вновь опускается на дно трубопровода. В результате частицы в трубе движутся скачками. В процессе такого перемещения они перемешиваются вследствие турбулентности потока, группируются по фракциям.

Из частиц, осевших на дне трубопровода, образуется подстилающий слой. Этот слой имеет различную толщину по длине трубопровода. При определенных условиях подстилающий слой может стабилизироваться, а затем перерасти в пробку, закупоривающую трубопровод. Неблагоприятная с аэродинамической точки зрения кольцевая форма поперечного сечения скважины и ее далеко не гладкие стенки дополнительно усугубляют эту проблему.

Проведенный анализ физических явлений, лежащих в основе транспортирования частиц газовым потоком, позволяет понять природу проблем, затрудняющих удаление из скважины продукта бурения, и предложить методы их устранения.

Для увеличения диапазона технических возможностей пневмоударной технологии бурения горизонтальных и наклонных скважин в подземных условиях необходимо повысить эффективность и увеличить дальность транспортирования продукта бурения воздушным потоком. Одним из наиболее подходящих способов решения этой задачи является использование технологии бурения с обратной циркуляцией очистного агента (рис. 2), называемое в мировой практике «RC» бурением (аббревиатура от «ReverseCirculation») [5, 6].

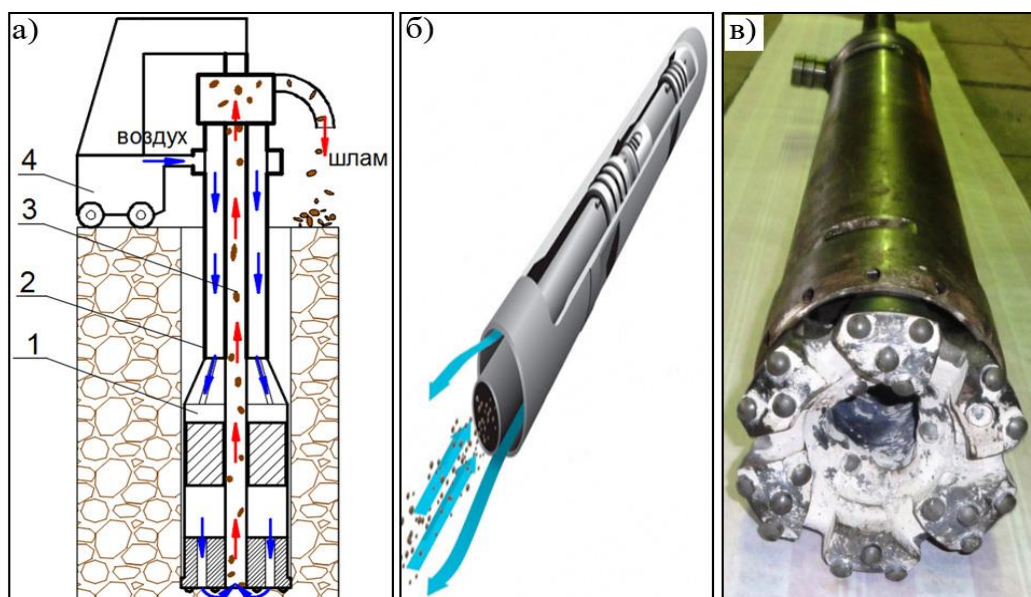


Рис. 2. Технология пневмоударного бурения скважин с обратной циркуляцией:
а) – схема бурения кольцевым пневмоударником; б) – двойная буровая колонна;
в) – кольцевой пневмоударник ПК-132;
1 – пневмоударник; 2 – внешняя буровая колонна; 3 – внутренняя буровая колонна;
4 – буровой станок

Отличительными особенностями этой технологии является использование двойной буровой колонны и кольцевых пневмоударников [7].

Основное отличие кольцевых пневмоударников заключается в том, что они имеют сквозной осевой канал, по которому отработанный воздух выносит на поверхность разрушенную при бурении породу. Буровая колонна также состоит из двух концентрически расположенных труб. Пространство между внутренней и наружной трубой используется для подачи сжатого воздуха, а полость внутренней трубы – для транспортирования продукта бурения (рис. 3).

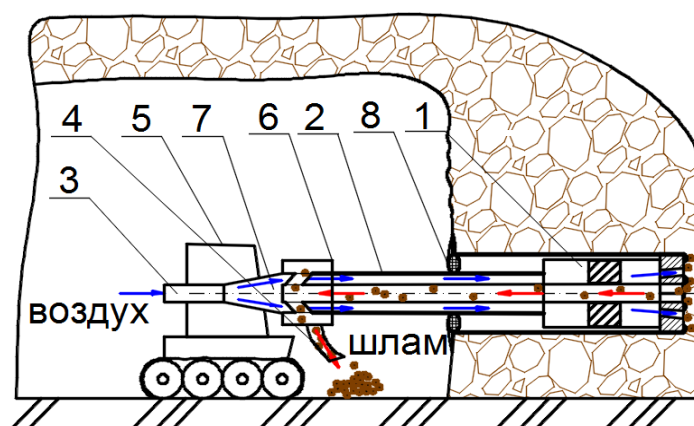


Рис. 3. Бурение с обратной циркуляцией очистного агента:
1 – пневмоударник; 2 – двойная буровая колонна; 3 – впускная магистраль;
4 – выпускная магистраль; 5 – каретка бурового станка; 6 – превентор;
7 – адаптер; 8 – герметизатор

Повышение эффективности и увеличение дальности транспортирования по внутренней трубе вращающейся буровой колонны обусловлено иной физической сущностью движения породных частиц в полости вращающейся трубы по сравнению с

классической пневмотранспортной системой. На рис. 4 показаны силы, действующие на породную частицу при повороте трубопровода на некоторый угол.

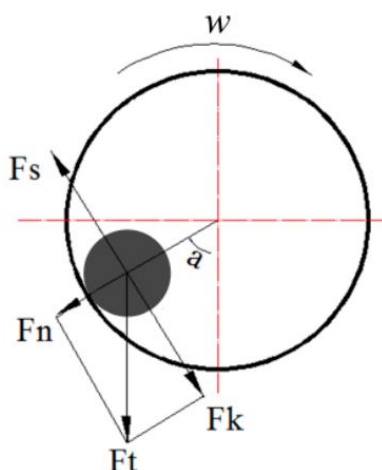


Рис. 4. Схема действия сил на частицу во вращающемся трубопроводе:
 F_s – сила трения; F_t – сила тяжести; F_n – сила нормального давления;
 F_k – касательная составляющая силы тяжести; w – скорость вращения трубопровода;
 a – угол поворота трубы

При вращении трубопровода частицы материала, соскальзывая по стенке трубы, стремятся перейти во взвешенное состояние. При этом они могут транспортироваться при существенно меньшей скорости воздушного потока [8]. Кроме того, при таком характере движения затрудняется образование подстилающего слоя из неподвижных частиц на дне трубопровода. Это является существенным фактором повышения надежности процесса транспортирования.

При вращении транспортного трубопровода улучшается также и транспортирование увлажненной породной массы, частицы которой при механическом контакте склонны к слипанию в единую массу. Эти свойства, как правило, тем больше, чем выше степень влажности. Транспортирование такой увлажненной породной массы может происходить порциями, которые по мере накопления в процессе вращения трубопровода образуют подобие пластичного поршня, который под действием давления воздуха выдавливается по трубопроводу.

Еще одно достоинство технологии бурения с двойной колонной заключается в том, что условия транспортирования могут оставаться неизменными, если в силу какой-либо необходимости будет увеличен диаметр бурильной скважины. В классическом же пневмоударном бурении вынос буровой мелочи, как было отмечено, производится в кольцевом канале между стенкой скважины и буровой штангой. При увеличении диаметра бурильной скважины и при той же буровой колонне площадь сечения затрубного пространства увеличивается и происходит снижение скорости потока воздуха, что неблагоприятно сказывается на эффективности транспортирования шлама.

Сравнительный анализ скорости воздушного потока, необходимой для выноса буровой мелочи в классическом и "RC"-бурении

Для анализа эффективности пневмотранспортирования бурового шлама определим скорость воздушного потока при использовании бурильных штанг различного диаметра « $d_{ш}$ » для двух диаметров бурильной скважины « $D_{ск}$ ». Скорость потока воздуха в затрубном пространстве определим при помощи метода имитационного моделирования в программе ITI SimulationX [9], для чего на основании принятых параметров построена модель и проведены расчеты.

Таблица 1

**Результаты определения скорости воздушного потока
при классическом пневмоударном бурении**

Скорость воздушного потока, м/с		
	$d_{ш}=55$ мм	$d_{ш}=62,5$ мм
$D_{ск}=76$ мм $Q_B=2,8$ м ³ /мин	20,0	27,9
$D_{ск}=93$ мм $Q_B=4,0$ м ³ /мин	14,5	17,0

В расчете учтено, что для бурения скважин разного диаметра будут использованы пневмоударники разных типоразмеров. Соответственно, расход воздуха был принят в соответствии с паспортными данными пневмоударников. Как видно из табл. 1, при увеличении диаметра скважины происходит снижение скорости воздушного потока ($\approx 27 \div 39$ %), даже с учетом увеличения расхода воздуха (43 %) пневмоударником.

Надежно транспортирующую скорость воздуха v для горизонтального пневмотранспорта определим из выражения $v=(3,5 \div 4) \cdot v_B$, где v_B – скорость витания частицы, м/с [3, 10].

На рис. 5 представлены графики среднего значения надежно транспортирующей скорости воздуха (v) и скорости витания частицы (v_B) в скважине для эквивалентного диаметра частиц угля от 0,2 до 5 мм и плотностью $\rho_T=1300$ кг/м³ [3].

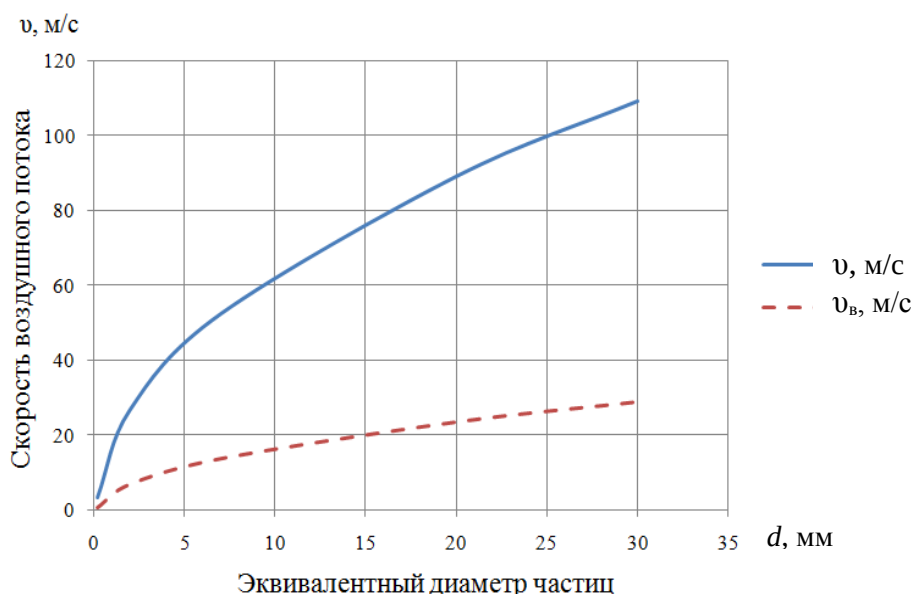


Рис. 5. Зависимости надежно транспортирующей скорости воздушного потока v и скорости витания частицы v_B от эквивалентного диаметра частиц d

Проведя сравнительный анализ полученных результатов, можно сделать вывод, что для скважин диаметром 93 и 76 мм с бурильной колонной диаметром 62,5 мм скорость воздушного потока величиной $v=17$ и 20 м/с, позволяет надежно транспортировать частицы до $d=1$ мм и $d=1,2$ мм, соответственно. При этом более крупные фракции (до 10 – 15 мм) будут перемещаться по скважине нестабильно.

К достоинству технологии с обратной циркуляцией, как было отмечено выше, можно отнести постоянство сечения шланготранспортного канала, что позволяет проводить бурение скважин различного диаметра без снижения эффективности процесса выноса буровой мелочи.

Определена скорость потока воздуха в шланготранспортном канале двойной буровой колонны, параметры которой выбраны в соответствии с серийно выпускаемыми буровыми трубами.

В качестве внешней трубы примем бурильную трубу, согласно [11], внешним диаметром 60,3 мм и внутренним – 46,08 мм. В качестве внутренней – трубу [12] внешним диаметром 33 мм и внутренним 25 мм.

Площадь кольцевого сечения пневмомагистрали принята с двукратным запасом по сравнению с минимально возможным сечением в пневматической линии (поперечное сечение канала в быстроразъемных соединениях).

Скорость потока воздуха в шланготранспортном канале также определена при помощи метода имитационного моделирования в программе ITI SimulationX [9]. В результате была установлена зависимость скорости потока в шланготранспортном канале v от расхода воздуха Q (рис. 6).

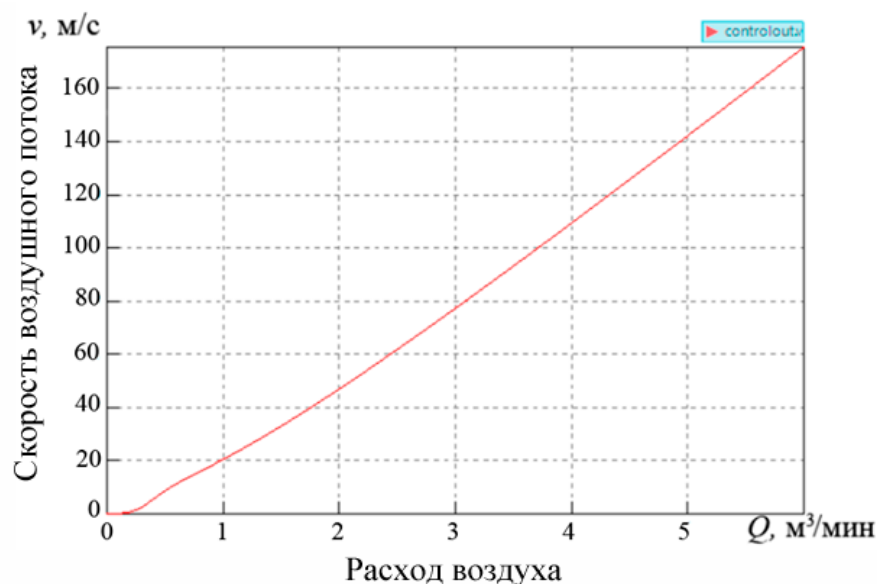


Рис. 6. Зависимость скорости потока в шланготранспортном канале v от расхода воздуха Q

Анализ результатов и выводы

Сравнивая полученные результаты с результатами в табл. 1, можно заметить, что скорость потока воздуха составила для скважины $D=76$ мм и расхода $Q=2,8$ м³/мин $v=71$ м/с, а для $D=93$ мм и $Q=4$ м³/мин – $v=109$ м/с, что, соответственно, в 2,5 и 6,4 раза выше, чем в классическом пневмоударном бурении. Полученное значение скорости воздушного потока позволяет без труда транспортировать частицы с эквивалентным диаметром до 15 мм. Рост скорости потока воздуха обеспечивает повышение эффективности очистки скважины, тем самым увеличивая и предельно возможную длину проходки. При этом в проведенном расчете еще не учитывались другие дополнительные преимущества использования двойной буровой колонны, такие, как ее более хорошее гидродинамическое качество и улучшение условий транспортирования шлама за счет вращения трубопровода.

Таким образом, совершенствование RC технологии с применением кольцевых пневмоударников позволит не только проводить очистку скважины наиболее эффек-

тивным способом по сравнению с классическим пневмоударником, но и в перспективекратно повысить предельную длину сооружаемой скважины с 70 – 90 до 200 – 250 м.

Для реализации этой перспективной технологии бурения потребуются провести разработку энергоэффективных кольцевых пневмоударников, двойной буровой колонны и герметизатора устья скважины, что является не только инженерной, но и серьезной научной задачей. Важно отметить, что рассмотренную технологию «РС» бурения можно использовать уже с существующими и применяемыми буровыми установками. Необходимо лишь оснастить их специальными адаптерами и переходниками для соединения вращателя буровой установки с двойной буровой колонной.

Список литературы

1. Алексеев С.Е., Кубанычбек Б., 2023. Инструмент для проходки скважин прямоугольного сечения. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, Т. 2, № 1, С. 49-55. DOI 10.33764/2618-981X-2023-2-1-49-55.
2. Алексеев С.Е., Данилов Б.Б., Чешин Д.О., Кубанычбек Б., 2024. Система вздухораспределения погружного пневмоударника с разрядным клапаном для использования в роботизированных буровых системах. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, Т.11, № 1, С. 42-47.
3. Чешин Д.О., 2023. Обоснование возможности применения способа интервальной продувки при бурении горизонтальных скважин пневмоударниками. *Проблемы недропользования*, № 2 (37), С. 66-76. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.06622.06.2023
4. Урбан Я., 1967. *Пневматический транспорт*. Под ред. Л.М. Шведова. Москва: Машиностроение, 256 с.
5. Харламов Ю.П., 2023. Создание кольцевых пневмоударников для работы на высоком давлении энергоносителя. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, Т. 2, № 1, С. 248-256. DOI 10.33764/2618-981X-2023-2-1-248-256; 08.08.2023
6. Нескромных В.В., Попова М.С., Петенев П.Г. и др., 2020. *Современные технологии бурения на твердые полезные ископаемые*: учебник. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 340 с.
7. Алексеев С.Е., Харламов Ю.П., Примычкин А.Ю., Кубанычбек Б., 2021. Техника ускоренного получения материала для идентификации горных пород. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, Т. 8, № 2. С. 172-177. DOI 10.15372/FPVGN2021080226
8. Данилов Б.Б., 2009. Теория и практика создания оборудования для бурения в грунте горизонтальных скважин с пневмотранспортом разрушенного материала по вращающемуся трубопроводу: дис. ... докт. техн. наук. Новосибирск, 246 с.
9. *Официальный сайт SimulationX*. Загл. с экрана. URL: <http://www.simulationx.com/> (дата обращения: 18.12.2023)
10. Кантаев А.С., Брус И.Д., Тураев Н.С., 2015. *Расчет установок пневмотранспорта: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Оборудование производств редких элементов» для студентов IV курса, обучающихся по специальности 240501 Химическая технология материалов современной энергетики*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 28 с.
11. ГОСТ 631-75 *Трубы бурильные с высаженными концами и муфты к ним*. Москва: Стандартинформ, 2010, 23 с.
12. ГОСТ 3262-75 *Трубы стальные водогазопроводные*. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1997, 12 с.

References

1. Alekseev S.E., Kubanychbek B., 2023. Instrument dlya prokhodki skvazhin pryamougol'nogo secheniya. *Interekspo Geo-Sibir'* [A tool for drilling rectangular wells], Vol. 2, № 1, P. 49-55. DOI 10.33764/2618-981X-2023-2-1-49-55.

2. Alekseev S.E., Danilov B.B., Cheshchin D.O., Kubanychbek B., 2024. Sistema vozdukhoraspredeleniya pogruzhnogo pnevmoudarnika s razryadnym klapanom dlya ispol'zovaniya v robotizirovannykh burovnykh sistemakh [Air distribution system of a submersible pneumatic hammer with a discharge valve for use in robotic drilling systems]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*, Vol.11, № 1, P. 42-47.
3. Cheshchin D.O., 2023. Obosnovanie vozmozhnosti primeneniya sposoba interval'noi produvki pri burenii gorizontallykh skvazhin pnevmoudarnikami [Substantiation of the possibility of using the interval purge method when drilling horizontal wells with pneumatic strikers]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 2 (37), P. 66-76. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.06622.06.2023
4. Urban Ya., 1967. Pnevmaticheskii transport [Pneumatic transport]. Pod red. L.M. Shvedova. Moscow: Mashinostroenie, 256 p.
5. Kharlamov Yu.P., 2023. Sozdanie kol'tsevykh pnevmoudarnikov dlya raboty na vysokom davlenii energonositelya [Creation of annular pneumatic hammers for operation at high pressure of an energy carrier]. *Interkspo Geo-Sibir'*, Vol. 2, № 1, P. 248-256. DOI 10.33764/2618-981X-2023-2-1-248-256; 08.08.2023
6. Neskromnykh V.V., Popova M.S., Petenev P.G. i dr., 2020. Sovremennyye tekhnologii bureniya na tverdye poleznye iskopaemye: uchebnik [Modern drilling technologies for solid minerals: textbook]. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 340 s.
7. Alekseev S.E., Kharlamov Yu.P., Primychkin A.Yu., Kubanychbek B., 2021. Tekhnika uskorennoogo polucheniya materiala dlya identifikatsii gornykh porod. Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk [The technique of accelerated production of material for the identification of rocks], Vol. 8, № 2. P. 172-177. DOI 10.15372/FPVGN2021080226
8. Danilov B.B., 2009. Teoriya i praktika sozdaniya oborudovaniya dlya bureniya v grunte gorizontallykh skvazhin s pnevmotransportom razrushennogo materiala po vrashchayushchemusya truboprovodu [Theory and practice of creating equipment for drilling horizontal wells in the ground with pneumatic transportation of crushed material through a rotating pipeline]: dis. ... dokt. tekhn. nauk. Novosibirsk, 246 p.
9. Ofitsial'nyi sait SimulationX. Zagl. s ekrana [The official website of SimulationX]. URL: <http://www.simulationx.com/> (data obrashcheniya: 18.12.2023)
10. Kantaev A.S., Brus I.D., Turaev N.S., 2015. Raschet ustanovok pnevmotransporta: metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu laboratornykh rabot po kursu "Oborudovanie proizvodstv redkikh elementov" dlya studentov IV kursa, obuchayushchikhsya po spetsial'nosti 240501 Khimicheskaya tekhnologiya materialov sovremennoi energetiki [Calculation of pneumatic transport installations: methodological guidelines for the performance of laboratory work on the course "Equipment for the production of rare elements" for IV-year students studying in the specialty 240501 Chemical technology of materials of modern energy]. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 28 p.
11. GOST 631-75 Truby buril'nye s vysazhennymi kontsami i mufty k nim [Drill pipes with planted ends and couplings to them]. Moscow: Standartinform, 2010, 23 p.
12. GOST 3262-75 Truby stal'nye vodogazoprovodnye [Steel water and gas pipes]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 1997, 12 p.

УДК 622.235.62

Галимьянов Алексей Алмазович

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН,
обособленное подразделение ХФИЦ ДВО РАН,
г. Хабаровск, ул. Тургенева 51
e-mail: azot-1977@mail.ru

Мишнев Владимир Игоревич

младший научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН, обособлен-
ное подразделение ХФИЦ ДВО РАН e-mail:
mishnev.vl@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКЦИИ СКВАЖИННЫХ ЗАРЯ- ДОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ РАСПОЛОЖЕ- НИЯ ТОЧКИ ИНИЦИИРОВАНИЯ ПО ВЫ- СОТЕ КОЛОНКИ ЗАРЯДА

Аннотация:

Нарастающие объемы горных работ выявили ряд задач, одной из которых является разрушение горного массива буровзрывным способом. В настоящее время на открытых горных работах уникальным и практически единственным высокоэффективным способом подготовки горного массива к выемке является его разрушение энергией взрыва при производстве. Выбор вариантов инициирования скважинных зарядов является одной из важнейших задач в горной промышленности. В статье приводится исследование эффективности конструкции скважинных зарядов при изменении расположения точки инициирования по высоте столба заряда в зависимости от параметров буровзрывных работ и свойств горного массива посредством производства экспериментальных взрывов на открытых горных работах. Данное исследование поможет улучшить подготовку горного массива к выемке буровзрывным способом и значительно сократит расходы на проведение взрывных работ.

Ключевые слова: верхнее и нижнее инициирование заряда, удельный межскважинный интервал замедления, скорость детонации, скорость распространения продольной волны, горный массив, колонка заряда, буровзрывные работы, экспериментальный взрыв.

DOI:

Galimyanov Alexey A.

Candidate of Technical Sciences,
Leading Researcher, Institute of Mining,
Far Eastern Branch of RAS,
separate division of the KhFRC FEB RAS,
Khabarovsk, 51 Turgeneva Str.
e-mail: azot-1977@mail.ru

Mishnev Vladimir I.

Junior Researcher, Institute of Mining,
Far Eastern Branch of RAS,
separate division of the KhFRC FEB RAS
e-mail: mishnev.vl@mail.ru

EFFICIENCY STUDY OF THE DESIGN OF BOREHOLE CHARGES WHEN CHANGING THE LOCATION OF THE INITIATION POINT ACCORDING TO THE HEIGHT OF THE CHARGE COLUMN

Abstract:

The increasing volumes of mining work have revealed a number of tasks, one of which is the destruction of the mountain range by drilling and blasting. Currently, in open-pit mining, a unique and practically the only highly effective way to prepare a rock mass for excavation is its destruction by explosion energy during production. Selecting options for initiating borehole charges is one of the most important tasks in the mining industry. The article provides a study of the effectiveness of the design of borehole charges when changing the location of the initiation point along the height of the charge column, depending on the parameters of drilling and blasting operations and the properties of the rock mass through the production of experimental explosions in open-pit mining. This study will help to improve the preparation of the rock mass for excavation by drilling and blasting and will significantly reduce the cost of blasting.

Key words: upper and lower charge initiation, specific inter-well deceleration interval, detonation speed, longitudinal wave propagation speed, rock mass, charge column, drilling and blasting operations, experimental explosion.

Введение

В настоящее время инициирование скважинных зарядов взрывчатых веществ (ВВ) производится по-разному [1 – 4] в зависимости от конструкции заряда и массы промежуточного детонатора [5 – 6] (рис. 1): с одним боевиком в нижней (рис. 1а), верхней (рис. 1б) или средней (рис. 1в) части заряда; с несколькими боевиками, рассредоточенными по длине заряда (рис. 1г); линейное инициирование заряда по всей длине мощным ДШ с навеской 20, 40 г/м (рис. 1д) [7 – 8].

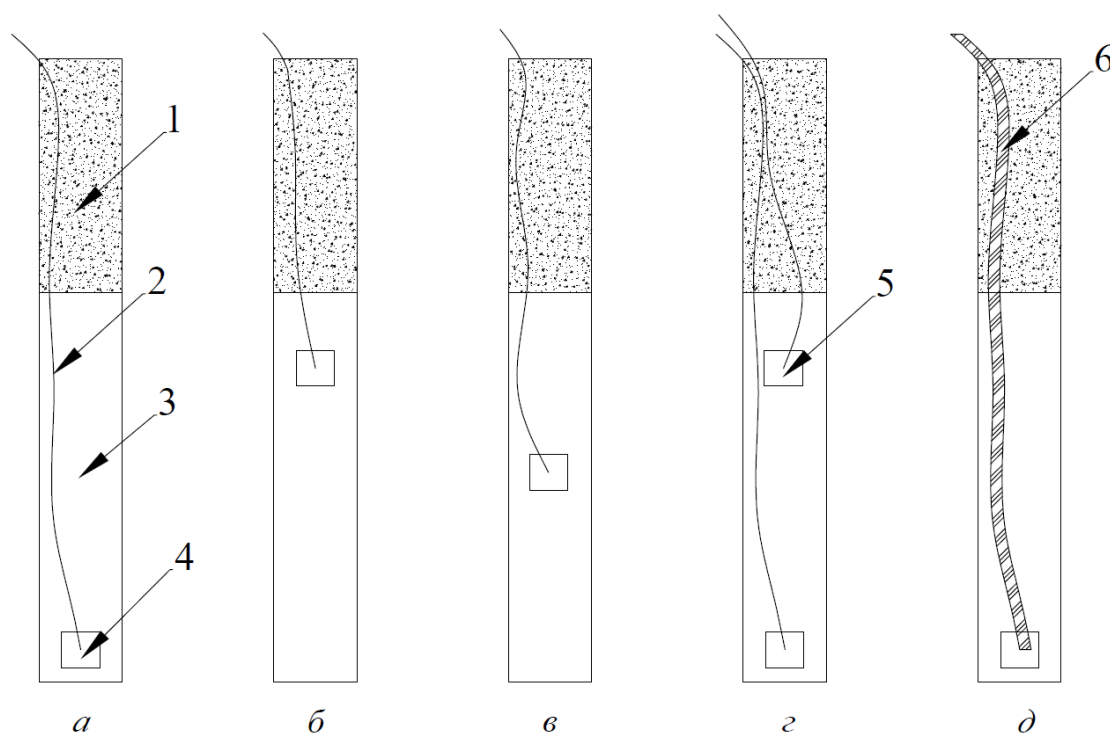


Рис. 1. Точка инициирования заряда в скважине:
1 – недозаряд; 2 – волновод; 3 – столб заряда; 4 – боевик;
5 – дублирующий боевик; 6 – детонирующий шнур

Экспериментами установлено, что проработка подошвы уступа и степень дробления улучшаются, если произвести инициирование скважинного заряда не сверху (рис. 2, а), а снизу (рис. 2, б).

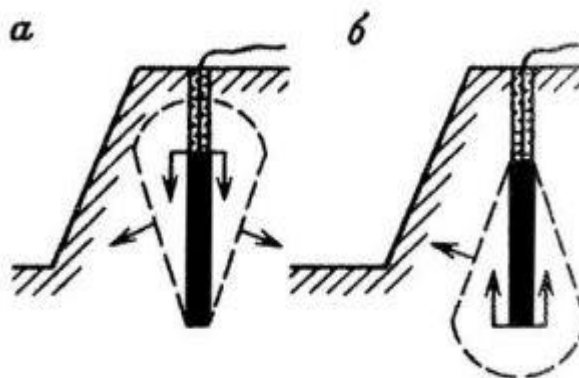


Рис. 2. Изменение напряженного состояния массива в зависимости от направления инициирования зарядов

При этом, как показывают съемки на прозрачных и оптических активных моделях, фронт волны напряжений при инициировании снизу более равномерно воздействует на массив, а время действия энергии взрыва увеличивается за счет увеличения продолжительности разрушения массива. В определенных случаях для интенсивности дробления может быть использовано одновременное многоточечное инициирование (см. рис. 1г), а также линейное инициирование заряда (см. рис. 1д).

Также существуют методы расчета для определения места размещения боевика для прямого и обратного инициирования расчетным путем [9].

По данным проф. В.Н. Мосинца, перспективно применять инициирование заряда снизу (обратное), если скорость детонации выше скорости распространения продольной волны в массиве в 1,6 раза и более. Если соотношение скоростей менее 1,6, лучше применять прямое (верхнее) инициирование [10].

Методика исследований

В целях определения оценки эффективности работы скважинных зарядов при разном расположении точки инициирования на разрезе «Буреинский» и «Правобережный» АО «Ургалуголь» проведена серия экспериментальных взрывов с использованием взрывчатого вещества Гранулит-М и эмульсионного взрывчатого вещества НПГМ-70.

Для упрощения расчетов ввели показатель эффективности направления инициирования заряда – $n_{\text{эниз}}$, вычисляемый по формуле (1):

$$n_{\text{эниз}} = \frac{D}{C_p} \quad (1)$$

При этом, если $n_{\text{эниз}} < 1,6$, то целесообразнее применение прямого инициирования заряда.

В табл. 1 и графиках (рис. 3 – 4) представлены результаты исследований.

Таблица 1

Основные показатели исследуемых блоков

Производительность экскаватора Komatsu PC-1250, м³/сут (обратное)	Производительность экскаватора Komatsu PC-1250, м³/сут (прямое)	Коэффициент крепости по шк. проф. Протодяконова	Скорость детонации заряда ВВ, км/сек	Скорость продольной волны в горном массиве, км/сек	Показатель эффективности направления инициирования заряда	Удельный интервал замедления по диагонали сетки скважин, мс/м
P_3	P_3	f	D	C_p	$n_{\text{эниз}}$	Δt_d
р. Правобережный, ЭВВ НПГМ-70.						
6753	6061	4	5	3	1,7	2,0
6811	6234	4	5	3	1,7	2,9
6843	6408	4	5	3	1,7	4,9
6940	6513	4	5	3	1,7	7,9
6956	6589	4	5	3	1,7	23,6
р. Правобережный, ВВ - Гранулит-М.						
6511	6614	4	3,4	3	1,1	2,0
6650	6713	4	3,4	3	1,1	2,9
6657	6801	4	3,4	3	1,1	4,9
6713	6834	4	3,4	3	1,1	7,9
6851	6931	4	3,4	3	1,1	23,6
р. Буреинский, ЭВВ НПГМ-70.						
6170	6699	10	5	4,5	1,1	2,0
6322	6821	10	5	4,5	1,1	2,9
6457	6859	10	5	4,5	1,1	4,9
6580	6923	10	5	4,5	1,1	7,9
6670	6971	10	5	4,5	1,1	23,6

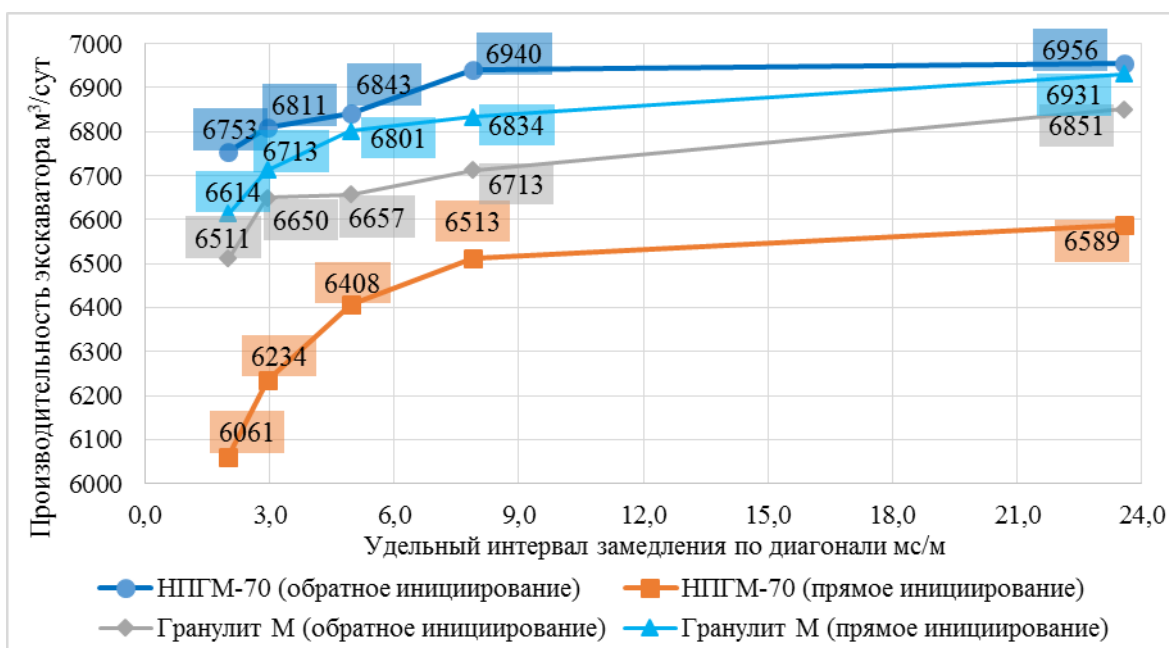


Рис. 3. График зависимости производительности экскаватора от диагонального удельного интервала замедления на р. Правобережный

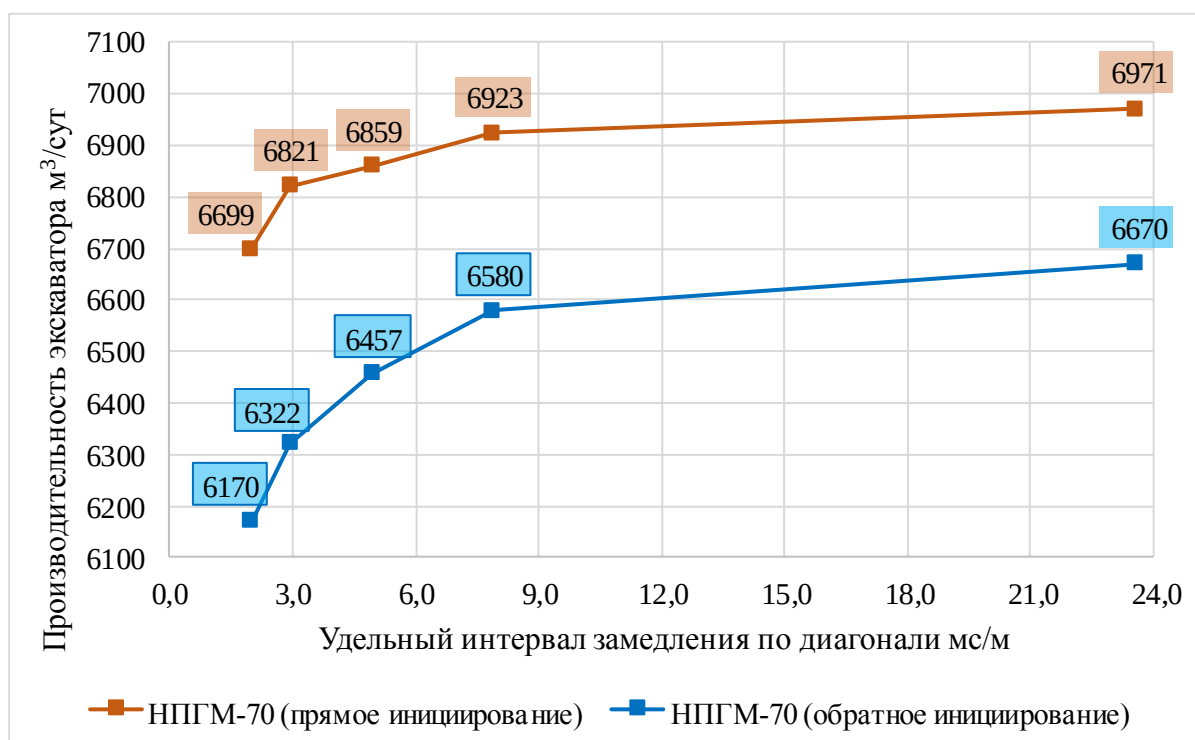


Рис. 4. График зависимости производительности экскаватора от диагонального удельного интервала замедления на р. Буреинский

Выводы

На разрезе «Правобережный» при использовании в качестве скважинного заряда ЭВВ НПГМ-70 рекомендуется применение метода обратного инициирования в связи с тем, что $n_{\text{эниз}} > 1,6$, тогда как при применении ВВ Гранулит М целесообразно прямое инициирование заряда в связи с тем, что $n_{\text{эниз}} < 1,6$.

На разрезе «Буреинский» исследованы методы инициирования скважинных зарядов с ЭВВ НПГМ-70, которые показали, что при данных горно-геологических усло-

виях и с применением ЭВВ НПГМ-70 целесообразно использование прямого инициирования скважинных зарядов в связи с тем, что $n_{\text{эниз}} < 1,6$.

В результате проведения исследований эффективности конструкции заряда в зависимости от места расположения боевика по высоте колонки заряда, при изменении параметров буровзрывных работ и горно-геологических условий на разрезах «Буреинский» и «Правобережный» АО «Ургалуголь», установлена целесообразность применения прямого инициирования скважинного заряда при условии применения межскважинного диагонального интервала замедлением 4,9 мс/м и более; если отношение скорости детонации заряда ВВ к скорости распространения продольной волны в горном массиве менее 1,6, т.е. $n_{\text{эниз}} < 1,6$; осуществление забойки является необходимым при применении прямого инициирования.

Список литературы

1. Кутузов Б.Н., 2009. *Методы ведения взрывных работ*. Часть 1. Разрушение горных пород взрывом. Учебник для вузов. Москва: Издательство Московского государственного горного университета, 471 с.
2. Андриевский А.П., 2009. *Физико-техническое обоснование параметров разрушения горного массива взрывом удлиненных зарядов*: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.20. Новосибирск, 38 с.
3. Галимьянов А.А., Соболев А.А., 2022. Повышение эффективности процесса подготовки горной массы к выемке за счет применения новых параметров технологии буровзрывных работ. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 3, С. 107-121.
4. Нифадьев В.И., Додис Я.М., 2009. Оценка уровня потерь энергии взрыва при прямом и обратном инициировании зарядов. *Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета*, Т. 9, № 11, С. 106-110.
5. Галимьянов А.А., Рудницкий К.А., Гильденбрант К.В. и др., 2023. Влияние параметров промежуточного детонатора на скорость детонации смесевых взрывчатых веществ. *Горная промышленность*, № 3, С. 130-133. DOI 10.30686/1609-9192-2023-3-130-133.
6. Меньшиков П.В., Флягин А.С., Кутуев В.А., 2022. Влияние начального импульса промежуточного детонатора и плотности эмульсионного ВВ на скорость детонации заряда. *Взрывное дело*, № 137-94, С. 22-36.
7. Старокожев В.Ф., 2007. Требования, предъявляемые к детонирующим и огнепроводным шнурам по европейским стандартам. *Безопасность труда в промышленности*, № 8, С. 28-30.
8. Шакиров Р.А., Драчев А.Н., Неупокоев А.М., Шуров В.М., 2012. Измерение параметров детонирующих шнуров. *Каротажник*, № 12(222), С. 69-79.
9. Пат. № 2524065 С2 Российская Федерация, МПК F42D 1/08, F42D 3/04. *Способ взрывания удлиненных скважин (варианты)* / С.И. Григорьев; патентообладатель С.И. Григорьев - № 2011134405/03, заявл. 16.08.2011, опубл. 27.07.2014.
10. Мосинец В.Н., 1976. *Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах*. Москва: Недра, 270 с.

References

1. Kutuzov B.N., 2009. *Metody vedeniya vzryvnykh rabot* [Methods of blasting] Chast' 1. Razrushenie gornykh porod vzryvom. Uchebnik dlya vuzov. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 471 p.
2. Andrievskii A.P., 2009. *Fiziko-tekhnicheskoe obosnovanie parametrov razrusheniya gornogo massiva vzryvom udlinennykh zaryadov* [Physical and technical substantiation of the

parameters of destruction of a mountain massif by the explosion of elongated charges]: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk: 25.00.20. Novosibirsk, 38 p.

3. Galim'yanov A.A., Sobolev A.A., 2022. Povyshenie effektivnosti protsessa podgotovki gornoj massy k vyemke za schet primeneniya novykh parametrov tekhnologii burovzryvnykh rabot [Increasing the efficiency of the process of preparing rock mass for excavation through the use of new parameters of drilling and blasting technology]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle, № 3, P. 107-121.

4. Nifad'ev V.I., Dodis Ya.M., 2009. Otsenka urovnya poter' energii vzryva pri pryamom i obratnom initsirovanii zaryadov [Estimation of the level of explosion energy losses during direct and reverse initiation of charges]. Vestnik Kyrgyzsko-Rossiiskogo Slavyanskogo universiteta, Vol. 9, № 11, P. 106-110.

5. Galim'yanov A.A., Rudnitskii K.A., Gil'denbrant K.V. i dr., 2023. Vliyanie parametrov promezhutochnogo detonatora na skorost' detonatsii smesevykh vzryvchatykh veshchestv [Influence of the parameters of the intermediate detonator on the detonation rate of mixed explosives]. Gornaya promyshlennost', № 3, P. 130-133. DOI 10.30686/1609-9192-2023-3-130-133.

6. Men'shikov P.V., Flyagin A.S., Kutuev V.A., 2022. Vliyanie nachal'nogo impul'sa promezhutochnogo detonatora i plotnosti emul'sionnogo VV na skorost' detonatsii zaryada [Influence of the initial pulse of an intermediate detonator and the density of an emulsion explosive on the charge detonation rate]. Vzryvnoe delo, № 137-94, P. 22-36.

7. Starokozhev V.F., 2007. Trebovaniya, pred'yavlyayemye k detoniruyushchim i ogneprovodnym shnuram po evropeiskim standartam [Requirements for detonating and fire cords according to European standards]. Bezopasnost' truda v promyshlennosti, № 8, P. 28-30.

8. Shakirov R.A., Drachev A.N., Neupokoev A.M., Shurov V.M., 2012. Izmerenie parametrov detoniruyushchikh shnurov . [Measurement of parameters of detonating cords]. Karotazhnik, № 12(222), P. 69-79.

9. Pat. № 2524065 C2 Rossiiskaya Federatsiya, MPK F42D 1/08, F42D 3/04. Sposob vzryvaniya udlinennykh skvazhin (varianty) [Method of blasting elongated wells (options)] / S.I. Grigor'ev; patentoobladatel' S.I. Grigor'ev - № 2011134405/03, zayavl. 16.08.2011, opubl. 27.07.2014.

10. Mosinets V.N., 1976. Drobyashchee i seismicheskoe deistvie vzryva v gornykh porodakh [Crushing and seismic action of explosion in rocks]. Moscow: Nedra, 270 p.



ОБОГАЩЕНИЕ

УДК 622.765+533.9+544.5

Бунин Игорь Жанович

доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник,
Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н.В. Мельникова РАН,
111020 г. Москва, Крюковский тупик, 4
e-mail: bunin_i@mail.ru

Рязанцева Мария Владимировна

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н.В. Мельникова РАН
e-mail: ryzanceva@mail.ru

**ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО
РАЗРЯДА ДЛЯ НАПРАВЛЕННОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ
КИСЛОТНО-ОСНОВНЫХ И
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПРИРОДНЫХ СУЛЬФИДОВ ЖЕЛЕЗА**

Аннотация:

Работа отражает данные, полученные при изучении взаимосвязи параметров плазменной обработки, реализуемой в условиях диэлектрического барьерного разряда с кислотно-основными, физико-химическими (сорбционная способность по отношению к бутиловому ксантогенату калия) и технологическими свойствами (флотационная активность) природных сульфидов железа (пирита и арсенопирита). Установлено, что в результате НТП-обработки происходит усиление акцепторных, снижение электронодонорных свойств поверхности пирита, а также снижение акцепторной способности арсенопирита, что обуславливает рост сорбционной способности по отношению к электронодонорному гидрофобизирующему реагенту и, как следствие, флотационной активности пирита и снижение у арсенопирита.

Ключевые слова: пирит, арсенопирит, низкотемпературная плазма, флотация, диэлектрический барьерный разряд, кислотно-основные свойства поверхности.

DOI:

Bunin Igor Zh.

Doctor of Technical Sciences,
Leading Researcher,
N.V. Melnikov Institute of Problems
of Integrated Subsoil Development of RAS,
111020 Moscow, 4 Kryukovsky Str.,
e-mail: bunin_i@mail.ru

Ryazantseva Maria V.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
N.V. Melnikov Institute of Problems
of Integrated Subsoil Development, RAS
e-mail: ryzanceva@mail.ru

**ON THE APPLICATION
OF LOW TEMPERATURE DIELECTRIC
BARRIER DISCHARGE PLASMA
FOR DIRECTED VARIATION
OF ACID-BASE AND TECHNOLOGICAL
PROPERTIES OF NATURAL
IRON SULFIDES**

Abstract:

The paper discusses the data obtained during the study of the relationship between the dielectric barrier discharge plasma treatment parameters with the acid-base, physical and chemical (sorption ability with respect to potassium butyl xanthate) and technological properties (floatability) of natural iron sulfides (pyrite and arsenopyrite). The growth of the acceptor properties and the drop of the electron-donor properties of the pyrite surface was defined. At the same time, the decrease in the acceptor ability of arsenopyrite was identified. It causes an increase in the sorption ability towards electron-donor hydrophobizing reagent (butyl xanthate) in the pyrite case and therefore it results to the pyrite flotation activity improving. The arsenopyrite sorption activity dropped as result of surface negative charge rising, and it causes the loss of the floatability.

Key words: pyrite, arsenopyrite, low-temperature plasma, flotation, dielectric barrier discharge, acid-base surface properties.

Введение

Изменение структуры минерально-сырьевой базы, обусловленное истощением и выработкой богатых месторождений, характеризуется вовлечением в переработку минерального сырья, отличающегося сложным вещественным составом, низким содержанием и близостью технологических свойств выделяемых компонентов [1, 2]. В сложившейся ситуации перед исследователями стоит задача изыскивания резервов для повышения эффективности действующих обогащательных процессов. При этом важнейшую роль играет совершенствование одного из основных процессов обогащения минерального сырья – флотации.

Применение концентрированных потоков энергии различной физической природы (электронные пучки, ионные пучки, лазерное излучение, плазменные струи и дуги, электродуговые, микродуговые и электроимпульсные воздействия) с целью интенсификации процессов переработки минерального сырья представляется одним из весьма перспективных направлений [3, 4].

Цель данной работы заключалась в изучении влияния плазменной обработки (НТП), реализуемой в условиях диэлектрического барьерного разряда (ДБР) на структурно-функциональное состояние поверхности пирита и арсенопирита, а также в выявлении взаимосвязи параметров ДБР-обработки с физико-химическими и технологическими свойствами сульфидов.

Материалы и методы исследования

Исследования проведены на мономинеральных (98 – 99 %) фракциях пирита и арсенопирита (Дарасун, Красноярский край), а также пирит-арсенопиритном концентрате месторождения «Олимпиадинское» (табл. 1).

Таблица 1

**Химический состав флотационного концентрата ЗИФ № 2
месторождения «Олимпиадинское»**

Химические элементы							
Au	Ag	As	Sb	S	Fe	Ca	C
г/т		%					
105,0	1,32	6,18	14,78	21,2	22,8	4,01	2,4

Условия обработки ДБР: напряжение на электродах в ячейке генератора барьерного разряда (DBD) – 20 кВ, длительность импульса – 8 мкс, длительность переднего фронта импульса ~300 нс, частота повторения импульсов – 16 кГц; длина межэлектродного промежутка ~5 мм. В условиях воздействия низкотемпературной неравновесной плазмы (НТП) диэлектрического барьерного разряда (DBD) в воздухе температура газа в рабочей зоне разрядной ячейки не превышала температуру диэлектрического барьера и оставалась порядка комнатной температуры в течение $t_{\text{treat.}}=10-150$ с.

При выявлении основных закономерностей изменения структурно-химических свойств поверхности пирита и арсенопирита в условиях воздействия ДБР использовались ИК- и РФЭ-спектроскопии [5 – 8], а также метод адсорбции кислотно-основных индикаторов Гаммета [9 – 11]. Сорбционная активность минералов по отношению к бутиловому ксантогенату калия исследовалась при помощи ИК-спектроскопии, кроме этого, проведены флотационные эксперименты.

Результаты исследования и их обсуждение

Использование спектроскопических методик, традиционно используемых исследователями (ИК- и РФЭ-спектроскопии) с целью выявления структурно-химического состояния поверхности сульфидов, в данном случае не позволило идентифицировать особенности состояния и закономерности изменения фазового состава поверхности при варьировании параметров (время обработки) НТП.

В этой связи для выявления таковых был использован метод адсорбции кислотно-основных индикаторов с различными значениями кислотности (рКа), которые селективно адсорбируются на поверхностных функциональных группах с соответствующими значениями рКа [12 – 14] (рис.1). В соответствии с [12] индикаторы с наиболее низкими (как правило, отрицательными) значениями рКа селективно адсорбируются на активных центрах основного льюисовского типа (содержащих неподеленную пару электронов и способных к диссоциативной адсорбции молекул воды с отщеплением

протона). Далее по мере роста значений pK_a индикаторов их селективная адсорбция происходит на бренстедовских кислотных ($pK_a = 0 - 7$, поверхностные группы OH , с тенденцией к отщеплению протона), бренстедовских основных ($pK_a = 7 - 14$, поверхностные группы OH с тенденцией к отщеплению гидроксил-иона) и на льюисовских кислотных центрах ($pK_a > 14$, атомы со свободной орбиталью, способные к диссоциативной адсорбции воды с отщеплением и захватом гидроксила).

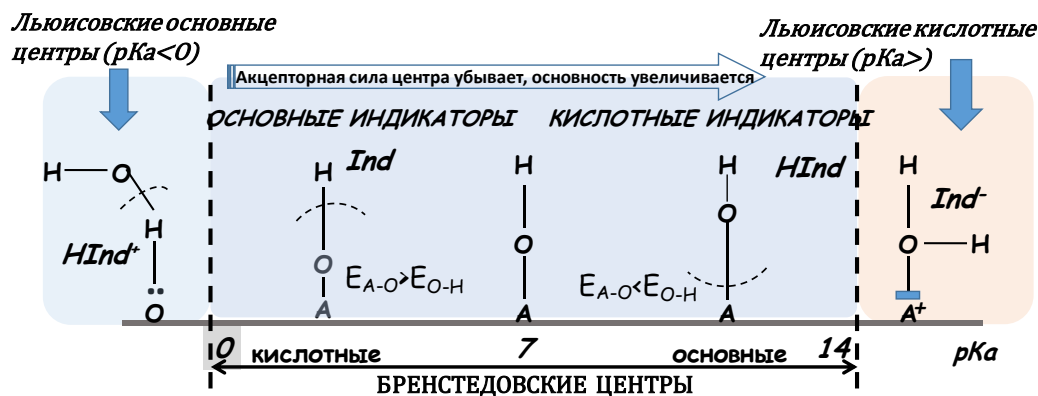


Рис. 1. Схема кислотно-основных центров частично гидратированного твердого тела

Содержание соответствующих центров адсорбции определяли по изменению оптической плотности растворов индикаторов, при длинах волн, соответствующих максимуму поглощения, с использованием спектрофотометра UV – 1700 (Shimadzu). Полученные экспериментальные данные представлены на рис. 2.

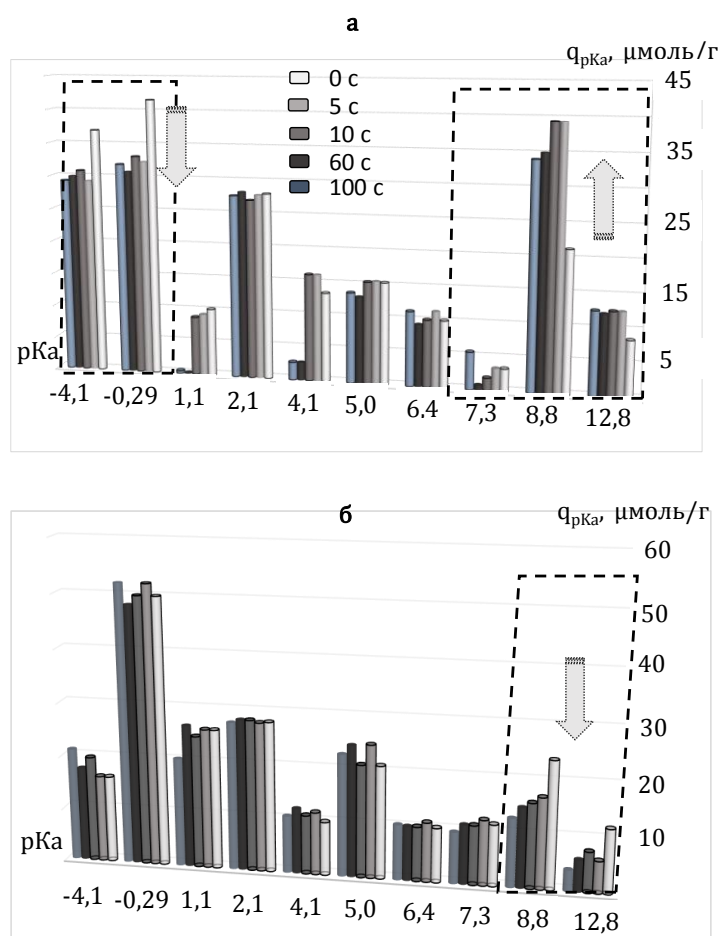


Рис. 2. Распределение активных центров на поверхности пирита (а) и арсенопирита (б) в зависимости от продолжительности обработки ДБР

Анализ полученных данных позволил установить следующие изменения функционального состояния поверхности минералов в процессе взаимодействия с плазмой диэлектрического барьерного разряда: для пирита количество активных центров с $pK_a = 12,8$ и $8,8$ увеличивается в 1,5 и 1,5 – 1,8 раза, соответственно (с 8,7 до 12,7 $\mu\text{моль / г}$ и с 21,3 до 39,3 $\mu\text{моль / г}$). Вместе с этим число $pK_a = -0,29$ и $-4,4$ снижается в 1,3 (с 41,5 до 32,3 $\mu\text{моль / г}$) и 1,4 раза (с 36,9 до 29,2 $\mu\text{моль / г}$). Для арсенопирита наблюдается снижение числа активных центров с $pK_a = 12,8$ и $8,8$ в 1,9 – 3 (с 12,2 до 6, 2 $\mu\text{моль / г}$) и 1,4 – 1,6 раза (с 23,8 до 15,9 $\mu\text{моль / г}$). Основываясь на представлении о поверхности твердого тела как совокупности кислотных и основных центров бренстедовского и льюисовского типов и имея в виду полученные результаты, можно полагать, что ДБР обработка пирита усиливает акцепторные свойства (на этот факт указывает рост центров с $pK_a 12,8$ и $8,8$), а кроме того, снижает электронодонорные свойства поверхности минерала (снижение количества центров с $pK_a = -0,29$ и $-4,4$). В то же время акцепторные свойства арсенопирита снижаются, так как снижается число центров с $pK_a = 12,8$ и $8,8$.

Таким образом, полученные результаты указывают на то, что предварительная НТП-обработка минералов, по всей видимости, будет способствовать росту сорбционной активности пирита по отношению к электронодонорным собирателям, например, ксантогенату и снижению его адсорбции на поверхности арсенопирита.

Проведенные сорбционные эксперименты подтвердили это предположение. Данные, полученные при адсорбции кислотно-основных индикаторов, результаты сорбционных экспериментов представлены на рис. 3.

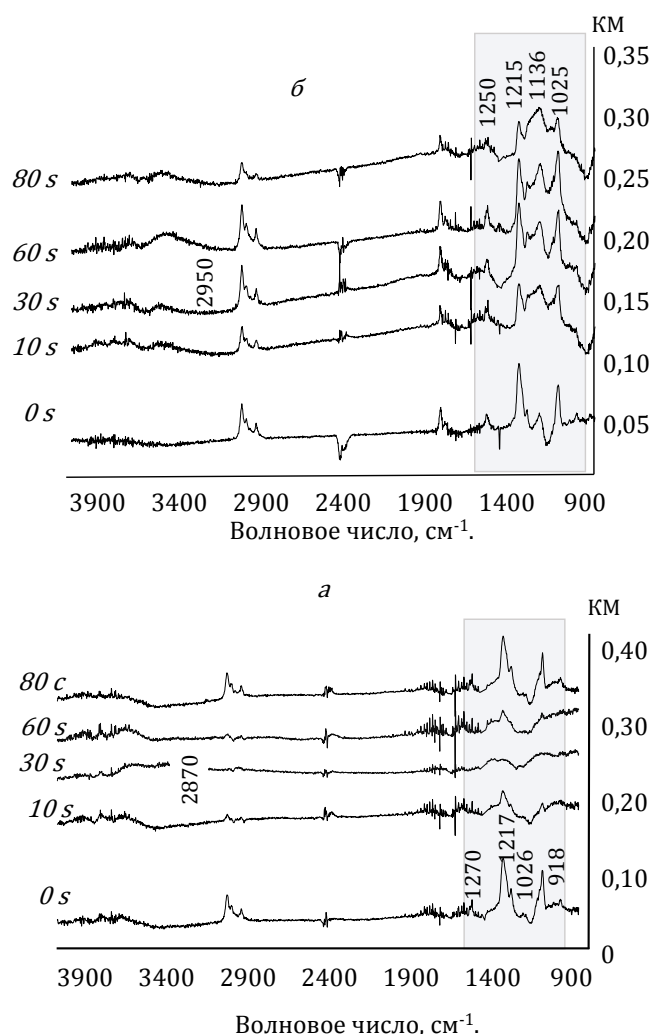


Рис. 3. ИК-спектры арсенопирита (а) и пирита (б) до и после обработки ДБР

Из рис. 3 видно, что обработка ДБР образцов пирита при $t_{\text{treat}} = 10 - 60$ с способствует росту адсорбции БКс на поверхности минерала, что следует из увеличения в 1,2 – 1,3 раза интегральных интенсивностей полос поглощения, описывающих валентные колебания связи С – Н (2950 см^{-1}) углеводородного скелета собирателя и полос 1025^{-1} , 1136^{-1} , 1215^{-1} и 1250 см^{-1} , относящихся к вибрациям связей функциональной группы реагента. Дальнейший рост времени обработки ДБР (80 – 120 с) обуславливает снижение сорбционной активности минерала.

Противоположная тенденция описывает изменения сорбционной активности арсенопирита: площади под спектральной кривой в интервалах, соответствующих поглощению адсорбированного поверхностью минерала реагента, снижается в 1,1 – 1,2 раза.

Данные о влиянии ДБР на сорбцию БКС на поверхности минералов подтверждены результатами флотационных экспериментов (рис. 4).

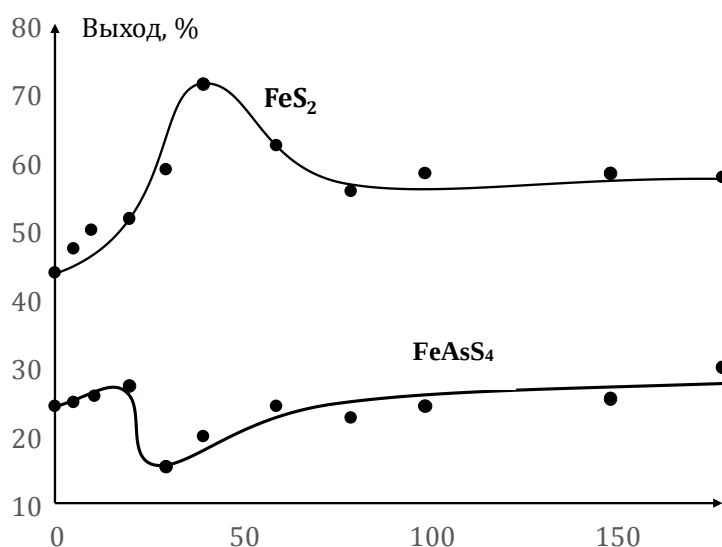


Рис. 4. Зависимость флотационной активности пирита и арсенопирита от времени обработки ДБР

В условиях мономинеральной флотации прирост извлечения пирита составляет до 27 %, а снижение извлечения арсенопирита – 10 – 12 %.

Обработка ДБР образцов флотационного концентрата ЗИФ №2, перерабатывающей руду месторождения «Олимпиадинское», позволяет (табл. 2) снизить выход мышьяка в пенный продукт флотации на 10 – 11 %, при этом содержание мышьяка в концентрате снижается на 0,71 – 0,78 %.

Таблица 2

Влияние ДБР на показатели флотации (флотационный промпродукт ЗИФ № 2 месторождения «Олимпиадинское»)

t_{treat}	продукт	Вес		As	$\varepsilon_{\text{As конц.}}, \%$	$\varepsilon_{\text{As хв.}}, \%$
		г.	$\gamma, \%$	$\beta, \%$		
0	Конц.	27,57	55,17	4,62	50,70	
	Хв.	22,40	44,83	5,33		49,30
	Итого	49,97	100	4,72	100	
40 с	Конц.	22,65	46,60	3,86	39,94	
	Хв.	25,95	53,39	5,07		60,05
	Итого	48,60	100	4,51	100	
40 с	Конц.	22,78	48,05	3,91	39,41	
	Хв.	27,22	51,95	5,61		60,58
	Итого	48,29	100	4,78	100	

Заключение

Таким образом, на основании проведенных исследований выявлен механизм изменения структурно-химического состояния поверхности пирита и арсенопирита в процессе взаимодействия с неравновесной плазмой диэлектрического барьерного разряда, заключающийся в усилении акцепторных и снижении электронодонорных свойств поверхности пирита и снижении акцепторной способности арсенопирита, что обуславливает рост сорбционной и флотационной активности пирита и снижение у арсенопирита. В условиях мономинеральной флотации прирост извлечения пирита составляет 27 %, снижение выхода арсенопирита – 10 – 12 %. Предварительная НТП-обработка образцов флотационного концентрата ЗИФ №2 (месторождение Олимпиадинское) позволило снизить выход мышьяка в пенный продукт флотации на 10 – 11 %, при этом содержание мышьяка снизилось на 0,71 – 0,78 %.

Список литературы

1. Земсков В.В., Прасолов В.И., 2021. Истощение минеральных ресурсов как угроза экономической безопасности России. *Экономика: вчера, сегодня, завтра*, Том 11, № 10А, С. 195 – 205.
2. Оганесян Л.В. Мирлин Е.Г., 2019. Проблема исчерпания минерально-сырьевых ресурсов земной коры. *Горная промышленность*, №6, С. 100 – 105.
3. Чантурия В.А., Николаев А.И., Александрова Т.Н., 2023. Инновационные экологически безопасные процессы извлечения редких и редкоземельных элементов из комплексных руд сложного вещественного состава. *Геология рудных месторождений*, Т. 65, №5, С. 402 – 415.
4. Чантурия В.А., Миненко В.Г., Самусев А.Л., Копорулина Е.В., Кожевников Г.А., 2022. Физико-химическое и энергетическое воздействие на процесс выщелачивания эвдиалитового концентрата. *Доклады Российской академии наук. Науки о земле*, Т. 505, № 2, С. 149 – 158.
5. Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Рязанцева М.В., Хабарова И.А., 2012. Влияние наносекундных электромагнитных импульсов на фазовый состав поверхностных нанообразований, электрохимические, сорбционные и флотационные свойства халькопирита и сфалерита. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 4, С. 155 – 164.
6. Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Рязанцева М.В., Хабарова И.А., 2013. Изучение методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии изменения состава и химического состояния атомов поверхности халькопирита и сфалерита до и после обработки наносекундными электромагнитными импульсами. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 3, С. 157 – 168.
7. Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Рязанцева М.В., Хабарова И.А., Копорулина Е.В., Анашкина Н.Е., 2014. Активация поверхности и направленное изменение физико-химических и технологических свойств галенита при воздействии наносекундных электромагнитных импульсов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 3, С. 154 – 169.
8. Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Рязанцева М.В., Хабарова И.А., 2013. О структурно-фазовых преобразованиях поверхности сульфидных минералов при воздействии наносекундных электромагнитных импульсов. *Известия РАН. Серия «Физическая»*, Т. 77, № 9, С. 1213 – 1217.
9. Нечипоренко А.П., Буренина Т.А., Кольцов С.И., 1985. Индикаторный метод исследования поверхностной кислотности твердых веществ. *Журнал общей химии*, Т. 55, № 9, С. 1907 – 1912.
10. Нечипоренко А.П., 1995. *Дорно-акцепторные свойства поверхности твердых окислов и халькогенидов*: специальность: химия, физика и технология поверхности

... дис. доктора химических наук. Санкт –Петербург: Санкт-Петербургский Государственный технологический университет, 508 с.

11. Рязанцева М.В., Бунин И.Ж., 2015. Модифицирование кислотно – основных свойств поверхности кальцита, флюорита и шеелита в процессе электромагнитной импульсной обработки. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 5, С. 140 – 145.

12. Танабе К., 1973. *Твердые кислоты и основания*. Москва: Мир, 185.

13. Sychoy M.M., Nakanishi Y., Mjakin S.V., 2003. Surface properties of ZnS and AC powder electroluminescent phosphors. *J. SID*, № 11, P. 33 – 38.

14. Sychoy M.M., Mjakin S.V., Nakanishi Y., Korsakov V.G., Vasiljeva I.V., Bakhmetjev V.V., Solovjeva O.V., Komarov E.V., 2005. Study of active surface centers in electroluminescent ZnS: Cu,Cl phosphors. *Applied Surface Science*, № 244, P.461 – 464.

References

1. Zemskov V.V., Prasolov V.I., 2021. Istoshchenie mineral'nykh resursov kak ugroza ekonomicheskoi bezopasnosti Rossii [Depletion of mineral resources as a threat to Russia's economic security]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra*, Vol. 11, № 10A, P. 195 – 205.

2. Oganessian L.V. Mirlin E.G., 2019. Problema ischerpaniya mineral'no-syr'evykh resursov zemnoi kory [The problem of exhaustion of mineral resources of the Earth's crust]. *Gornaya promyshlennost'*, №6, P. 100 –105.

3. Chanturiya V.A., Nikolaev A.I., Aleksandrova T.N., 2023. Innovatsionnye ekologicheski bezopasnye protsessy izvlecheniya redkikh i redkozemel'nykh elementov iz kompleksnykh rud slozhnogo veshchestvennogo sostava [Innovative environmentally safe processes for the extraction of rare and rare-earth elements from complex ores of integrated material composition]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*, Vol. 65, №5, P. 402 – 415.

4. Chanturiya V.A., Minenko V.G., Samusev A.L., Koporulina E.V., Kozhevnikov G.A., 2022. Fiziko-khimicheskoe i energeticheskoe vozdeistvie na protsess vyshchelachivaniya evdialitovogo kontsentrata [Physical-chemical and energy effects on the leaching process of eudialyte concentrate]. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o zemle*, Vol. 505, № 2, P. 149 – 158.

5. Chanturiya V.A., Bunin I.Zh., Ryazantseva M.V., Khabarova I.A., 2012. Vliyanie nanosekundnykh elektromagnitnykh impul'sov na fazovyi sostav poverkhnostnykh nanoobrazovaniy, elektrokhimicheskie, sorbtionnye i flotatsionnye svoystva khal'kopirita i sfalerita [The effect of nanosecond electromagnetic pulses on the phase composition of surface nanoformations, electrochemical, sorption and flotation properties of chalcopyrite and sphalerite]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 4, P. 155 – 164.

6. Chanturiya V.A., Bunin I.Zh., Ryazantseva M.V., Khabarova I.A., 2013. Izuchenie metodom rentgenovskoi fotoelektronnoi spektroskopii izmeneniya sostava i khimicheskogo sostoyaniya atomov poverkhnosti khal'kopirita i sfalerita do i posle obrabotki nanosekundnymi elektromagnitnymi impul'sami [X-ray photoelectron spectroscopy study of changes in the composition and chemical state of chalcopyrite and sphalerite surface atoms before and after treatment with nanosecond electromagnetic pulses]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 3, P. 157 – 168.

7. Chanturiya V.A., Bunin I.Zh., Ryazantseva M.V., Khabarova I.A., Koporulina E.V., Anashkina N.E., 2014. Aktivatsiya poverkhnosti i napravlennoe izmenenie fiziko-khimicheskikh i tekhnologicheskikh svoystv galenita pri vozdeistvii nanosekundnykh elektromagnitnykh impul'sov [Activation of the surface and a directional change in the physical and chemical as well technological properties of galena under the influence of nanosecond electromagnetic pulses]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 3, P. 154 – 169.

8. Chanturiya V.A., Bunin I.Zh., Ryazantseva M.V., Khabarova I.A., 2013. O strukturno-fazovykh preobrazovaniyakh poverkhnosti sul'fidnykh mineralov pri vozdeistvii nanosekundnykh elektromagnitnykh impul'sov [On structural and phase transformations of the surface of sulfide minerals under the influence of nanosecond electromagnetic pulses]. Izvestiya RAN. Seriya "Fizicheskaya", Vol. 77, № 9, P. 1213 – 1217.

9. Nechiporenko A.P., Burenina T.A., Kol'tsov S.I., 1985. Indikatornyi metod issledovaniya poverkhnostnoi kislotnosti tverdykh veshchestv . [Indicative method for studying the surface acidity of solids]. Zhurnal obshchei khimii, Vol. 55, № 9, P. 1907 – 1912.

10. Nechiporenko A.P., 1995. Dorno-aktseptornye svoistva poverkhnosti tverdykh okislov i khal'kogenidov [Doric-acceptor properties of the surface of solid oxides and chalcogenides] spetsial'nost': khimiya, fizika i tekhnologiya poverkhnosti ... dis. doktora khimicheskikh nauk. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskii Gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet, 508 p.

11. Ryazantseva M.V., Bunin I.Zh., 2015. Modifitsirovanie kislotno – osnovnykh svoistv poverkhnosti kal'tsita, fliuorita i sheelita v protsesse elektromagnitnoi impul'snoi obrabotki [Modification of acid-base properties of calcite, fluorite and scheelite surfaces during electromagnetic pulse treatment]. Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh, № 5, P. 140 – 145.

12. Tanabe K., 1973. Tverdye kisloty i osnovaniya [Solid acids and bases]. Moscow: Mir, 185.

13. Sychoy M.M., Nakanishi Y., Mjakin S.V., 2003. Surface properties of ZnS and AC powder electroluminescent phosphors. *J. SID*, № 11, P. 33 – 38.

14. Sychoy M.M., Mjakin S.V., Nakanishi Y., Korsakov V.G., Vasiljeva I.V., Bakhmetjev V.V., Solovjeva O.V., Komarov E.V., 2005. Study of active surface centers in electroluminescent ZnS: Cu,Cl phosphors. *Applied Surface Science*, № 244, P.461 – 464.

УДК 622.765

Хтет Зо У

аспирант, НИТУ «МИСиС»,
119049, г. Москва,
Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1
e-mail: mghtetzawmisa@gmail.com

Чжо Зай Яа

кандидат технических наук,
стажер-докторант,
НИТУ «МИСиС»
e-mail: kokyawgyi49@gmail.com

Горячев Борис Евгеньевич

доктор технических наук, профессор,
НИТУ «МИСиС»
e-mail: beg@mis.ru

**РОЛЬ СИМПЛЕКСНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ
ЭКСПЕРИМЕНТА В СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ
СОСТАВОВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ
СИСТЕМ РЕАГЕНТОВ-МОДИФИКАТОРОВ
ПРИ ФЛОТАЦИИ МЕДНО-ЦИНКОВЫХ РУД**

Аннотация:

Проведено изучение возможности повышения эффективности извлечения ценных металлов из медно-цинковых колчеданных руд при их флотации с применением композиций медного, цинкового купоросов и сернистого натрия. В работе предложен подход к совершенствованию технологии флотации медно-цинковых колчеданных руд на основе симплексного планирования экспериментов и последующего математического моделирования составов смесей реагентов-модификаторов. Установлено влияние композиций выбранных модификаторов на флотуемость минералов меди, железа и цинка в концентрат. Представлены результаты экспериментальных исследований флотации медно-цинковой руды, а также выполнено сравнение полученных данных между различными экспериментами. Предложены расчеты коэффициентов уравнения регрессии для построения математических моделей. Разработаны математические модели и определены оптимальные составы смесей реагентов-модификаторов данного процесса. Разработанные математические модели позволяют прогнозировать оптимальные составы смесей реагентов-модификаторов с целью максимизации извлечения меди и цинка при одновременной минимизации извлечения пирита в концентрат. Предложенный подход предоставляет инструментарий для улучшения технологических параметров процесса флотации медно-цинковых колчеданных руд и повышения его эффективности.

Ключевые слова: флотация, медно-цинковые руды, извлечение, медь, цинк, железо, реагенты-модификаторы, симплексное планирование, оптимизация.

DOI:

Htet Zaw Oo

Ph. D student, NUST MISIS,
119049 Moscow,
4 Leninsky Av., b. 1
e-mail: mghtetzawmisa@gmail.com

Kyaw Zay Ya

Candidate of Technical Sciences,
intern-doctoral student,
NUST MISIS
e-mail: kokyawgyi49@gmail.com

Goryachev Boris E.

Doctor of Technical Sciences, Professor,
NUST MISIS,
e-mail: beg@mis.ru

**ROLE OF SIMPLEX EXPERIMENTAL
PLANNING IN ENHANCING
THE PREDICTION AND OPTIMIZATION
OF MULTICOMPONENT SYSTEM
COMPOSITIONS OF REAGENT-MODIFIERS
IN THE FLOTATION OF COPPER-ZINC ORES**

Abstract:

The potential enhancement of valuable metal extraction from copper-zinc pyrite ores through flotation, using compositions comprising copper sulfate, zinc sulfate, and sodium sulfide, has been studied. The paper presents an approach aimed at enhancing the flotation technology of copper-zinc pyrite ores through the application of simplex experimental design and subsequent mathematical modeling of reagent-modifiers mixtures. The effect of the compositions of the selected modifiers on the floatability of copper, iron and zinc minerals in the concentrate has been established. The results of experimental studies on copper-zinc ore flotation are presented, and the obtained data are compared across various experiments. Additionally, calculations of regression equation coefficients are provided for the development of mathematical models. Mathematical models have been formulated to determine the optimal compositions of reagent modifiers in the process. These models facilitate the prediction of optimal mixtures, aiming to maximize the recovery of copper and zinc while concurrently minimizing the recovery of pyrite in the concentrate. The proposed approach offers a systematic framework for enhancing the technological parameters of the copper-zinc pyrite ore flotation process and increasing its efficiency.

Key words: flotation, copper-zinc ores, recovery, copper, zinc, iron, reagents-modifiers, simplex planning, optimization

Введение

Медно-цинковые руды в России в основном представлены месторождениями Урала и могут быть классифицированы как труднообогатимые [1, 2]. Основным процессом обогащения таких руд является флотация, и лишь малая их часть подвергается металлургической переработке или обогащению другими методами [3]. Флотационное обогащение медно-цинковых руд представляет собой сложный процесс, сопряженный с определенными трудностями в достижении высокого качества конечных продуктов. Основной проблемой является близость флотационных свойств сульфидов меди, цинка и железа, а также сложность их вещественного состава и характера вкрапленности [4 - 6].

Из практики обогатительных фабрик медно-цинковых руд следует, что получение высококачественных концентратов [7] невозможно без применения в процессе флотации различных реагентов-модификаторов. В качестве таких модификаторов используются сульфаты меди (II), цинка и сульфида натрия в щелочной известковой среде [8, 9]. В настоящее время совершенствование технологии флотации медно-цинковых руд проводится по нескольким направлениям. Одним из основных направлений повышения технологических показателей обогащения этих руд является совершенствование реагентного режима флотации [10, 11].

Однако сложные взаимосвязи между различными составами реагентов-модификаторов (факторы) и их характеристиками флотации (отклики) до конца не исследованы. В связи с этим оптимизация составов многокомпонентных смесей модификаторов для прогнозирования и анализа их влияния на процесс флотации медно-цинковых руд является актуальной задачей. Для решения этой проблемы в рамках нашего исследования был проведен дизайн и разработка трехкомпонентных систем реагентов-модификаторов для флотации медно-цинковых руд. В работе основные методы совершенствования реагентного режима ориентированы на использование симплекс-метода, математического моделирования составов смесей реагентов-модификаторов и программного обеспечения Design Expert® [12, 13].

Материалы и методы исследования.

Материалы, использованные в работе

Объектом исследований являлась медно-цинковая колчеданная руда одного из месторождений Урала. Средние массовые доли меди и цинка в частных пробах руды составили $0,65 \pm 0,02\%$ и $1,37 \pm 0,08\%$ [14]. Флотореагенты, использованные в работе: собиратель – бутилксантогенат калия, пенообразователь – сосновое масло, регулятор среды – известь, модификаторы – медный, цинковый купоросы и сульфид натрия.

Аппараты и приборы

Дробление руды проводилось в лабораторной щековой дробилке ДЩ 80x150; дробленая руда измельчалась в лабораторной шаровой мельнице МШЛ-1; флотация руды осуществлялась в лабораторной флотомашине механического типа ФЛ-137. Определение содержания меди, железа и цинка во флотоконцентрат проводилось на рентгенофлуоресцентном спектрометре ElvaX.

Метод симплексного планирования эксперимента

В данной работе применен симплекс–решетчатый план четвертого порядка Шеффе в соответствии с методом симплексного планирования эксперимента [15 – 17]. Применение симплекс-метода позволило, при ограниченном числе экспериментов с меньшим шагом планирования, получить математические модели. Симплекс-решетчатый план четвертого порядка Шеффе представлен на рис. 1.

Каждая точка на графике представляет собой состав – массовое содержание каждого из компонентов в смеси. В качестве факторов были выбраны три компонента смеси, включая CuSO_4 (x_1), ZnSO_4 (x_2) и Na_2S (x_3). Для решения поставленной задачи на

основе анализа научных данных была составлена матрица математического планирования эксперимента, состоящая из 15 экспериментальных опытов (табл. 1).

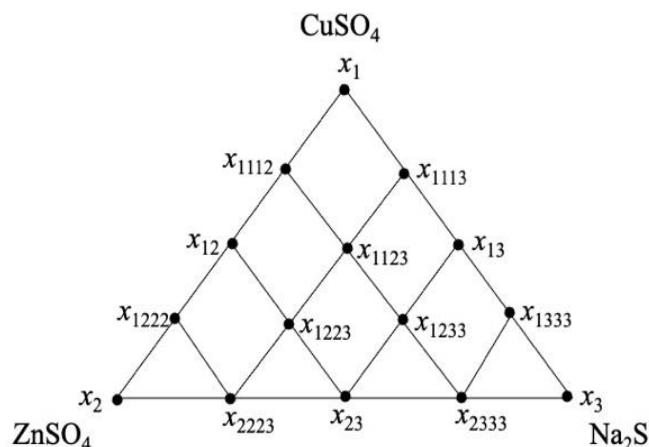


Рис. 1. Симплекс-решетчатый план четвертого порядка Шеффе

Таблица 1

Обозначение откликов в матрице планирования для {3,4}-решетки

№ опыта	Пропорции компонентов, доли ед.			Обозначение точки	Отклики
	x_1	x_2	x_3		
1	1	0	0	x_1	y_1
2	0	1	0	x_2	y_2
3	0	0	1	x_3	y_3
4	0,5	0,5	0	x_{12}	y_{12}
5	0,5	0	0,5	x_{12}	y_{12}
6	0	0,5	0,5	x_{23}	y_{23}
7	0,75	0,25	0	x_{1112}	y_{1112}
8	0,25	0,75	0	x_{1222}	y_{1222}
9	0,75	0	0,25	x_{1113}	y_{1113}
10	0,25	0	0,75	x_{1333}	y_{1333}
11	0	0,75	0,25	x_{2223}	y_{2223}
12	0	0,25	0,75	x_{2333}	y_{2333}
13	0,5	0,25	0,25	x_{1123}	y_{1123}
14	0,25	0,5	0,25	x_{1223}	y_{1223}
15	0,25	0,25	0,5	x_{1233}	y_{1233}

Методика проведения флотации

Исходная руда дробилась в щековой дробилке до крупности – 3 мм, из которой после усреднения и сокращения формировались частные пробы массой 250 г. Частные пробы измельчались до крупности 80 % класса -74 мкм и направлялись на флотацию [18]. В лабораторных условиях проведены серии флотационных опытов в соответствии с технологической схемой, которая включает в себя флотацию I и флотацию II. Схема флотации медно-цинковой руды представлена на рис. 2.

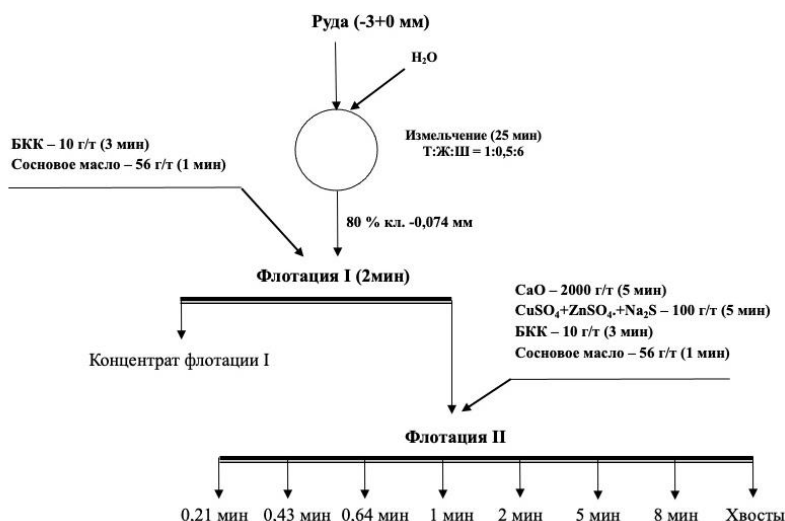


Рис. 2. Схема флотации медно-цинковой руды

Результаты исследования и их обсуждение Исследование флотации I медно-цинковой руды без реагентов-модификаторов

Как показано на схеме флотации медно-цинковой руды, в процессе флотации I дозируются только собиратель – бутиловый ксантогенат калия и пенообразователь – сосновое масло. Флотация I была проведена в течение 2 минут, результаты на рис. 3.

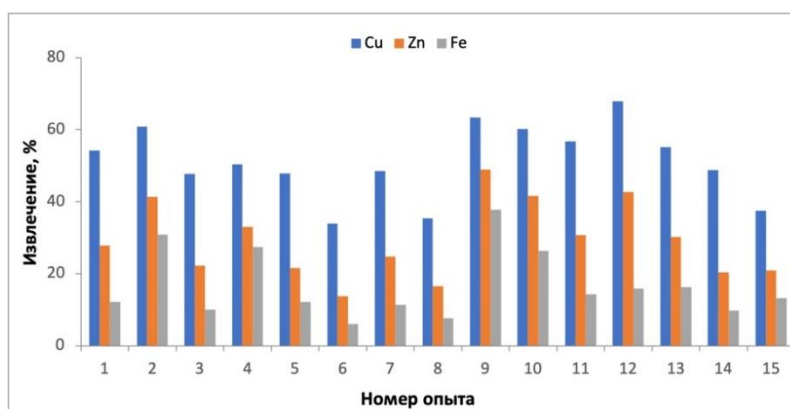


Рис. 3. Результаты флотации I медно-цинковой руды без модификаторов

На основе анализа полученных результатов флотации I установлено, что извлечение меди в концентрат варьируется от 33,91 до 67,95 %, цинка – от 13,7 до 48,88 %, а железа – от 6 до 37,73 %, что свидетельствует о значительных различиях в эффективности извлечения сульфидных минералов при отсутствии модификаторов. Общий тренд показывает, что извлечение меди и цинка чаще выше, чем извлечение железа в рассматриваемых образцах.

Исследование влияния композиций реагентов-модификаторов на флотацию II медно-цинковой руды

В соответствии со схемой флотации можно утверждать, что хвосты флотации I используются в качестве питания для флотации II. Для оценки влияния композиций реагентов-модификаторов на флотацию медно-цинковой руды дозирование медного, цинкового купоросов и сернистого натрия во флотацию II проводилось по симплекс-

методу. Общий расход композиций реагентов-модификаторов во всех опытах был постоянным – 100 г/т. Несмотря на время флотации II до 8 минут, накопленное извлечение всех металлов было рассчитано до одной минуты для сравнения результатов. Результаты экспериментальных исследований флотации II с использованием смесей двух модификаторов представлены на рис. 4.

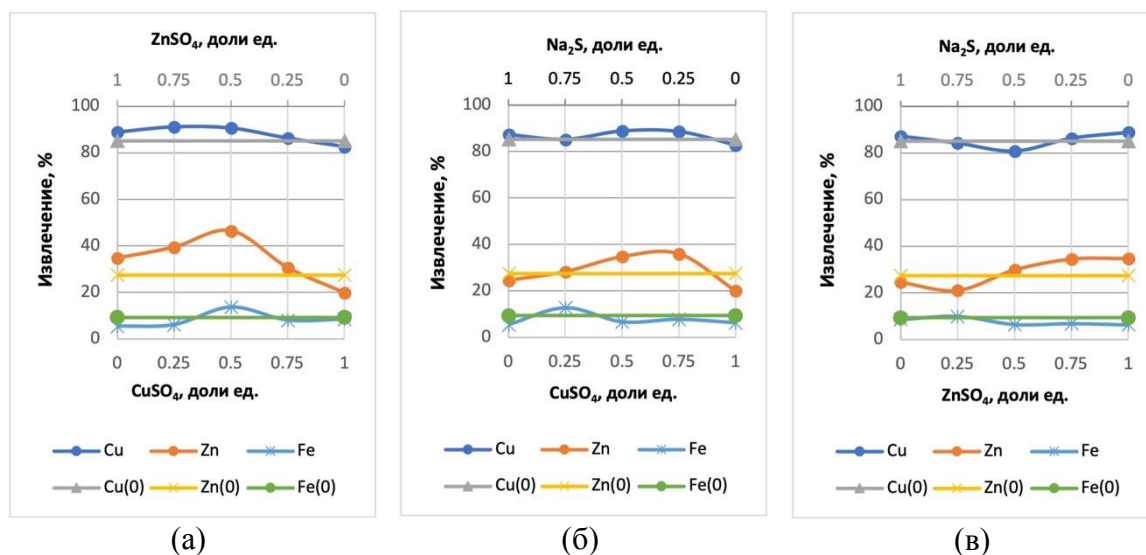


Рис. 4. Результаты влияния композиций двухкомпонентных реагентов-модификаторов на флотацию II медно-цинковой руды

Полученные результаты показывают, что из представленных композиций двух модификаторов $\text{CuSO}_4 + \text{ZnSO}_4$ (а), $\text{CuSO}_4 + \text{Na}_2\text{S}$ (б) и $\text{ZnSO}_4 + \text{Na}_2\text{S}$ (в) значимое влияние на флотиремость минералов меди и цинка оказывает сочетание медного купороса с цинковым купоросом. Наилучшее извлечение минералов меди 91,19 % с применением состава указанных выше модификаторов достигается при пропорциях 0,25 первого и 0,75 второго реагентов. В большей степени повышение флотиремости минералов цинка происходит при расходе указанных реагентов в равных пропорциях 0,5 и 0,5. В сравнении с нулевым режимом отмечается повышение извлечения цинка в концентрат с 27,47 до 46,52 %.

Несмотря на это, удалось получить концентрат с максимальным извлечением меди и цинка при одновременной минимизации извлечения пирита с использованием предложенного первым состава модификаторов. Введение цинкового купороса с сернистым натрием либо не оказывает влияния на флотацию меди, либо частично приводит к ее депрессии. При сочетании 0,25 первого и 0,75 второго реагентов отмечается частичное снижение извлечения цинка в концентрат до 21,1 %.

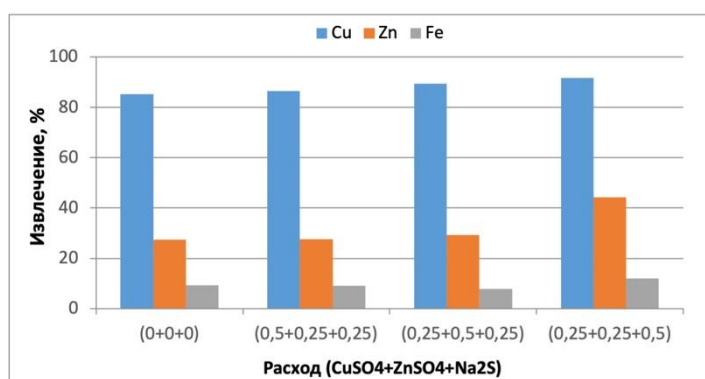


Рис. 5. Результаты флотации II медно-цинковой руды с применением композиций трех реагентов-модификаторов

На рис. 5 представлены результаты флотации II с применением композиций трех реагентов-модификаторов – медного, цинкового купоросов и сернистого натрия. При этом с расходом тройной смеси, содержащей 0,25 доли первого, 0,25 доли второго и 0,5 доли третьего компонентов, извлечение меди в концентрат составляет 91,66 %, а цинка и железа – 44,21 и 12,07 %, соответственно. Этот результат приводит к общему увеличению извлечения обоих металлов на 23,16 % по сравнению с нулевым режимом.

Таким образом, экспериментальными исследованиями флотации II установлено, что введение реагентов во флотацию II как двойной смеси $\text{CuSO}_4 + \text{ZnSO}_4 - [0,25; 0,75]$, так и тройной смеси $\text{CuSO}_4 + \text{ZnSO}_4 + \text{Na}_2\text{S} - [0,25; 0,25; 0,5]$ приводит не только к увеличению извлечения меди и цинка, но также одновременно снижает извлечение пирита в концентрат.

Расчет коэффициентов уравнений и описание математических моделей

Для установления взаимосвязи между тремя факторами CuSO_4 (x_1), ZnSO_4 (x_2) и Na_2S (x_3) и функцией отклика (извлечение) и построения модели была использована модель четвертого порядка Шеффе [19, 20]. Математическая модель данного плана между функцией отклика и факторами имеет вид полиномиальной функции (1):

$$Y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \\ + \gamma_{12} x_1 x_2 (x_1 - x_2) + \gamma_{13} x_1 x_3 (x_1 - x_3) + \gamma_{23} x_2 x_3 (x_2 - x_3) + \\ + \delta_{12} x_1 x_2 (x_1 - x_2)^2 + \delta_{13} x_1 x_3 (x_1 - x_3)^2 + \delta_{23} x_2 x_3 (x_2 - x_3)^2 + \\ + \beta_{1123} x_1^2 x_2 x_3 + \beta_{1223} x_1 x_2^2 x_3 + \beta_{1233} x_1 x_2 x_3^2. \quad (1)$$

На основе экспериментальных данных флотации II, процедуры расчета матриц коэффициентов уравнений проводились с использованием значений функции отклика в каждой точке симплекса по формулам [21]. Рассчитанные коэффициенты уравнения для расчета извлечения меди, железа и цинка представлены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты уравнения для расчета извлечения меди, цинка и железа

Коэффициенты уравнения для расчета извлечения меди (ε_{Cu})							
β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{13}	β_{23}	γ_{12}	γ_{13}
82,69	88,92	87,31	19,54	15,6	-29,02	-9,25	30,83
γ_{23}	δ_{12}	δ_{13}	δ_{23}	β_{1123}	β_{1223}	β_{1233}	
6,8	-15,01	-21,76	57,31	-439,01	22,56	621,47	
Коэффициенты уравнения для расчета извлечения цинка (ε_{Zn})							
β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{13}	β_{23}	γ_{12}	γ_{13}
19,98	34,77	24,58	76,58	49,92	0,82	-7,17	53,33
γ_{23}	δ_{12}	δ_{13}	δ_{23}	β_{1123}	β_{1223}	β_{1233}	
44,35	-141,73	10,67	-43,17	-1238,53	-1077,97	1824,51	
Коэффициенты уравнения для расчета извлечения железа (ε_{Fe})							
β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{13}	β_{23}	γ_{12}	γ_{13}
5,47	8,51	6,3	27,16	3,26	-3,78	-2,35	28,72
γ_{23}	δ_{12}	δ_{13}	δ_{23}	β_{1123}	β_{1223}	β_{1233}	
10,53	-105,44	80,61	35,28	-212,4	-305,09	522,03	

Таким образом, подставляя значение коэффициентов в уравнение (1), можно получить математические модели (2) – (4), предназначенные для расчета извлечения меди, цинка и железа в концентрат флотации II:

$$\begin{aligned} Y_{Cu} = & 82,69x_1 + 88,92x_2 + 87,31x_3 + 19,54x_1x_2 + 15,6x_1x_3 - 29,02x_2x_3 \\ & - 9,25x_1x_2(x_1 - x_2) + 30,83x_1x_3(x_1 - x_3) + 6,8x_2x_3(x_2 - x_3) \\ & - 15,01x_1x_2(x_1 - x_2)^2 - 21,76x_1x_3(x_1 - x_3)^2 + 57,31x_2x_3(x_2 - x_3)^2 \\ & - 439,01x_1^2x_2x_3 + 22,56x_1x_2^2x_3 + 621,47x_1x_2x_3^2; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Y_{Zn} = & 19,98x_1 + 34,77x_2 + 24,58x_3 + 76,58x_1x_2 + 49,92x_1x_3 + 0,82x_2x_3 \\ & - 7,17x_1x_2(x_1 - x_2) + 53,33x_1x_3(x_1 - x_3) + 44,35x_2x_3(x_2 - x_3) \\ & - 141,73x_1x_2(x_1 - x_2)^2 + 10,67x_1x_3(x_1 - x_3)^2 - 43,17x_2x_3(x_2 - x_3)^2 \\ & - 1238,53x_1^2x_2x_3 - 1077,97x_1x_2^2x_3 + 1824,51x_1x_2x_3^2; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Y_{Fe} = & 5,47x_1 + 8,51x_2 + 6,3x_3 + 27,16x_1x_2 + 3,26x_1x_3 - 3,78x_2x_3 \\ & - 2,35x_1x_2(x_1 - x_2) + 28,72x_1x_3(x_1 - x_3) + 10,53x_2x_3(x_2 - x_3) \\ & - 105,44x_1x_2(x_1 - x_2)^2 + 80,61x_1x_3(x_1 - x_3)^2 + 35,28x_2x_3(x_2 - x_3)^2 \\ & - 212,4x_1^2x_2x_3 - 305,09x_1x_2^2x_3 + 522,03x_1x_2x_3^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Поверхности отклика для каждой переменной отклика были предсказаны путем моделирования долей компонентов в смесях реагентов на основе экспериментальных данных. По разработанным моделям произведен расчет извлечения меди, железа и цинка в концентрат флотации II с шагом 5 % массовой доли каждого компонента в рассматриваемых смесях. Результаты зависимости расчетных извлечений меди, цинка и железа от относительных долей компонентов в смесях реагентов-модификаторов представлены на рис. 6, который построен при помощи компьютерной программы Design Expert® [<https://www.statease.com/>].

По полученным результатам разработанных моделей можно отметить, что наиболее эффективным влиянием оказывается сочетание реагентов-модификаторов как двойная смесь $CuSO_4 + ZnSO_4$ (AB), так и тройная смесь $CuSO_4 + ZnSO_4 + Na_2S$ (ABC). При сочетании относительных долей 0,4 медного купороса и 0,6 медного купороса модель прогнозирует извлечение меди и цинка в концентрат на уровне 91,42 и 46,22 %, в то время как извлечение железа составляет 12,9 %. Однако максимальное извлечение цинка прогнозируется при другом соотношении смеси реагентов: 0,45 первого и 0,55 второго. В этом случае модель предсказывает достижение значений извлечения меди, цинка и железа в концентрате – 91,14, 46,89 и 13,66 %, соответственно (что близко к упомянутым ранее значениям).

В результате анализа модели с учетом всех трех факторов (x_1 , x_2 , x_3) предполагается, что модель прогнозирует оптимальный состав смеси реагентов $CuSO_4 + ZnSO_4 + Na_2S$ в долях [0,25;0,2;0,55]. Этот состав предназначен для достижения наилучших результатов извлечения меди и цинка с одновременным минимизированием извлечения железа в концентрат, что приводит к следующим показателям: 91,86 % меди, 45,01 % цинка и 12,55 % железа.

Таким образом, сопоставляя расчетные извлечения металлов в двух- и трехкомпонентных смесях модификаторов, установлено, что в симплексных точках модели предсказываются оптимальные составы с тремя реагентами. Согласно разработанным моделям, оптимальными составами смесей, используемых в работе модификаторов, являются $CuSO_4 + ZnSO_4$ - [0,4;0,6] и $CuSO_4 + ZnSO_4 + Na_2S$ - [0,25;0,2;0,55].

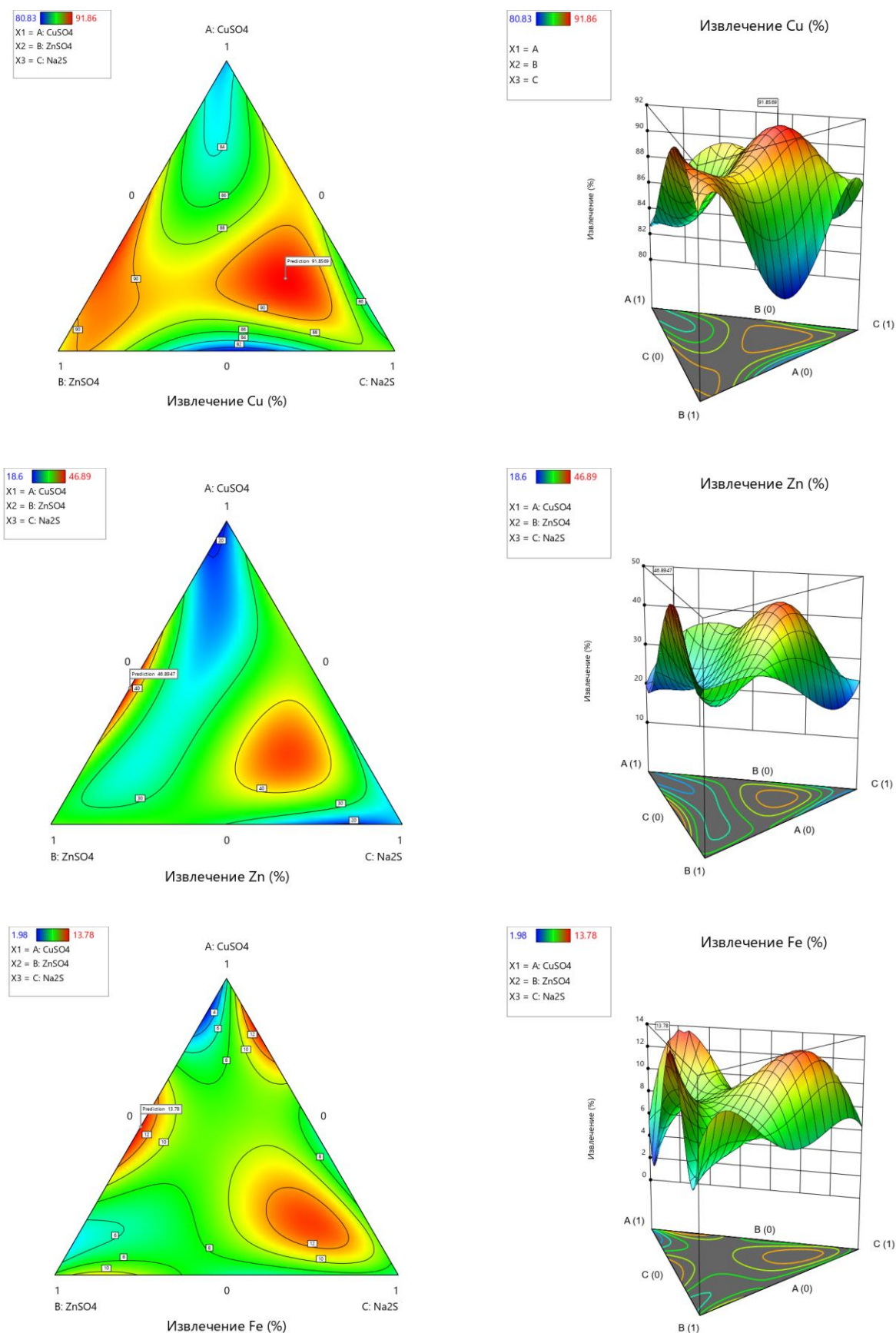


Рис. 6. Зависимость расчетных извлечений меди, цинка и железа в концентрат флотации II от долей медного, цинкового купоросов и сернистого натрия в их смесях

Выводы

- Экспериментальными исследованиями флотации II установлено, что оптимальными составами смесей модификаторов являются $\text{CuSO}_4 + \text{ZnSO}_4$ - [0,25:0,75], $\text{CuSO}_4 + \text{ZnSO}_4 + \text{Na}_2\text{S}$ - [0,25:0,25:0,5] при общем расходе данных смесей – 100 г/т. При этом извлечения меди, цинка и железа в концентрат достигнуты при первом составе смеси – 91,19, 39,46 и 6,16 %, при втором – 91,66, 44,21 и 12,07 %, соответственно.
- На основе экспериментальных данных флотации II были вычислены коэффициенты уравнения и разработаны математические модели в виде зависимостей извлечения меди, цинка и железа от относительных долей каждого из компонентов в смеси.
- По разработанным моделям были найдены два возможных оптимальных состава смесей модификаторов $\text{CuSO}_4 + \text{ZnSO}_4$ – [0,4:0,6] и $\text{CuSO}_4 + \text{ZnSO}_4 + \text{Na}_2\text{S}$ – [0,25:0,2:0,55]. При этом могут быть спрогнозированы извлечения меди, цинка и железа в концентрат на уровне 91,42, 46,22 и 12,9 % при первом составе, а также на уровне 91,86, 45,01 и 12,55 % при втором составе.
- Применение симплексного планирования эксперимента в данном исследовании имеет значительное преимущество, заключающееся в том, что для разработки приемлемой модели трехкомпонентных смесей модификаторов требуется всего 15 флотационных опытов. Разработанные модели предоставляют возможность оптимизации технологических параметров флотации медно-цинковой руды с использованием предложенных в работе композиций реагентов-модификаторов.

Список литературы

1. Мамонов С.В., Дресвянкина Т.П., Зиятдинов С.В., Ершов А.А., 2020. Технологические решения переработки медных и медно-цинковых руд колчеданного месторождения Урала. *Глобус: геология и бизнес*, № 3 (62), С. 140–144.
2. Бочаров В.А., Рыскин М.Я., Поспелов Н.Д., 1979. Развитие технологии переработки медно-цинковых руд Урала. *Цветные металлы*, № 10, С. 105–107.
3. Заварухина Е.А., Орехова Н.Н., 2017. Влияние дополнительного собирателя на селективность флотационного разделения сульфидов меди и цинка. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3, С. 305–311.
4. Чантурия В.А., 2015. Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья природного и техногенного происхождения. *Горный журнал*, № 7, С. 29–37. DOI: <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2015.07.05>.
5. Зимин А.В., Немчинова Л.А., 2014. Интенсификация селективной флотации медно-цинковых руд термомеханическим модифицированием поверхности цинковых минералов. *Горный журнал*, № 11, С. 56–60.
6. Чантурия В.А., 2009. Инновационные процессы в технологиях переработки минерального сырья сложного вещественного состава. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 15, С. 9–25.
7. Васильева А.А., Бодуэн А.Я., 2023. Минералогические особенности и способы переработки медных цинксодержащих концентратов. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, Т. 334, № 3, С. 61–72. DOI: 10.18799/24131830/2023/3/3956.
8. Зай Яа Чжо, Чжо Чжо Пье, Копылов А.Б., Ковалев Р.А., 2021. Совершенствование реагентных режимов флотации сфалерита и пирита из месторождений колчеданных медно-цинковых и полиметаллических руд. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*, № 2, С. 374–388. DOI 10.46689/2218-5194-2021-4-1-374-388
9. Чжо Зай Яа, Хтет Зо У, Шехирев Д.В., Горячев Б. Е., 2023. Влияние сульфата железа, сернистого натрия и их смеси на флотацию сфалерита в щелочной среде. *Устойчивое развитие горных территорий*, Т. 15, № 1, С. 122–133. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-122-133.

10. Карасов Ю.К., Ягудина Ю.Р., 2021. Совершенствование технологии флотации медно-цинковых руд, перерабатываемых на обогатительной фабрике Актюбинской медной компании. *Горная промышленность*, № 5 (2), С. 29–32.
11. Горбатова Е.А., Емельяненко Е.А., Ожогина Е.Г., 2019. Целесообразность прогнозной оценки обогатимости колчеданных руд. *Журнал «Разведка и охрана недр»*, № 3, С. 63–66.
12. Афонин Ю.С., Дубровин В.И., 2004. Моделирование составов смесей методом симплексных решеток. *Радиоэлектроника. Информатика. Управление*, № 2, С. 60–63.
13. Duangjit S., Mehr L.M., Kumpugdee-Vollrath M., Ngawhirunpat T., 2014. Role of simplex lattice statistical design in the formulation and optimization of microemulsions for transdermal delivery. *Biological & Pharmaceutical Bulletin*, Vol. 37, No. 12, pp. 1948–1957.
14. Хтет Зо У, Чжо Зай Яа, Горячев Б.Е., 2023. Действие композиций из железного, цинкового купоросов и сернистого натрия на флотацию медно-цинковых колчеданных руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 12, С. 139–151. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_139.
15. Новик Ф.С., 1985. *Планирование эксперимента на симплексе при изучении металлических систем*. Москва: Металлургия, 256 с.
16. Oguaghamba O.A., Mama B.O., 2018. Generalized Scheffe's second degree mathematical methods approach in engineering mixture design. *Conference paper: 16th International Conference and Annual General Meeting, Nigerian Institute of Civil Engineers*, No. 6, pp. 32–44.
17. K. C. Nwachukwu, D. A. Okodugha, I. S. Akosubo, F.K. Atulomah., 2022. Optimization of Compressive Strength of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) Using Scheffe's Third-Degree Regression Model. *Iconic Research and Engineering Journals*, Vol. 5, No. 11, pp. 168–183.
18. Пье Чжо Чжо, Чжо Зай Яа, Горячев Б. Е., 2023. Действие композиций металлосодержащих модификаторов поверхности сульфидных минералов цветных тяжелых металлов при флотации медно-цинковых руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11, С. 128–142. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_128.
19. Okafor F.O., Oguaghamba O.A., 2009. Procedure for optimization using Scheffe's models. *Journal of Engineering Science and Application (JESA)*, Vol. 7, No. 1, pp. 36–47.
20. Obam S.O., 2006. The accuracy of Scheffe's third degree over second-degree, optimization regression polynomials. *Nigerian Journal of Technology*, Vol. 25, No. 2, pp. 1–10.
21. Зедгинидзе И.Г., 1976. *Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем*. Москва: Наука, 390 с.

References

1. Mamonov S.V., Dresvyankina T.P., Ziyatdinov S.V., Ershov A.A., 2020. Tekhnologicheskiye resheniya pererabotki mednykh i medno-tsinkovykh rud kolchedannogo mestorozhdeniya Urala [Technological solutions for processing copper and copper-zinc ores of the pyrite deposit of the Urals]. *Globus: geologiya i biznes*, № 3 (62), P. 140–144.
2. Bocharov V.A., Ryskin M. Ya., Pospelov N. D., 1979. Razvitiye tekhnologii pererabotki medno-tsinkovykh rud Urala [Development of technology for processing copper-zinc ores of the Urals]. *Tsvetnye Metally*, № 10, P. 105–107.
3. Zavarukhina E.A., Orekhova N.N., 2017. Vliyaniye dopolnitel'nogo sobiratelya na selektivnost' flotatsionnogo razdeleniya sul'fidov medi i tsinka [Effects of additional col-

lecting agent on selectivity of flotation of copper and zinc sulfides]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten, № 3, P. 305—311.

4. Chanturiya V.A., 2015. Innovatsionnyye protsessy kompleksnoy i glubokoy pererabotki mineral'nogo syr'ya prirodnogo i tekhnogenno proiskhozhdeniya [Innovation-based processes of integrated and high-level processing of natural and technogenic minerals]. Gornyy zhurnal, № 7, P. 29–37. DOI: <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2015.07.05>.

5. Zimin A.V., Nemchinova L.A., 2014. Intensifikatsiya selektivnoy flotatsii medno-tsinkovykh rud termomekhanicheskim modifitsirovaniyem poverkhnosti tsinkovykh mineralov [Intensification of selective flotation of copper-zinc ores by thermomechanical modification of zinc minerals' surface]. Gornyy zhurnal, № 11, P. 56–60.

6. Chanturiya V.A., 2009. Innovatsionnyye protsessy v tekhnologiyakh pererabotki mineral'nogo syr'ya slozhnogo veshchestvennogo sostava [Innovative processes in technologies for processing mineral raw materials of complex material composition]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten, № 15, P. 9–25.

7. Vasilyeva A.A., Baudouin A.Ya., 2023. Mineralogicheskiye osobennosti i sposoby pererabotki mednykh tsinksoderzhashchikh kontsentratsiy [Mineralogical features and methods of processing copper zinc-containing concentrates]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov, T. 334, № 3, P. 61–72. DOI: 10.18799/24131830/2023/3/3956.

8. Zay Ya Kyaw, Kyaw Kyaw Phy, A. B. Kopylov, R. A. Kovalev, 2021. Sovershenstvovaniye reagentnykh rezhimov flotatsii sfalerita i pirita iz mestorozhdeniy kolchedannykh medno-tsinkovykh i polimetallicheskikh rud [Improving reagent modes for flotation of sphalerite and pyrite from deposits of pyrite copper-zinc and polymetallic ores]. Izvestiya Telugu. Nauki o Zemle, № 2, P. 374–388. DOI 10.46689/2218-5194-2021-4-1-374-388

9. Kyaw Zay Ya, Htet Zaw Oo, Shekhirev D. V., Goryachev B. E., 2023. Vliyaniye sul'fata zheleza, sernistogo natriya i ikh smesi na flotatsiyu sfalerita v shchelochnoy srede [The effect of ferrous sulfate, sodium sulfide and their mixtures on the flotation of sphalerite in the alkaline medium]. Ustoychivoye razvitiye gornyykh territoriy, Vol. 15, № 1, P. 122–133. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-122-133.

10. Yu. K. Karasov, Yu.R. Yagudina., 2021. Sovershenstvovaniye tekhnologii flotatsii medno-tsinkovykh rud, pererabatyvayemykh na obogatitel'noy fabrike Aktyubinskoy mednoy kompanii [Improving the flotation technology of copper-zinc ores processed at the concentrating plant of the Aktobe Copper Company]. Gornaya promyshlennost', № 5 (2), P. 29–32.

11. Gorbatova E.A., Emelianenko E.A., Ozhogina E.G., 2019. Tselesoobraznost' prognoznoy otsenki obogatimosti kolchedannykh rud [The expediency of predictive assessment of the enrichment of pyrite ores]. Zhurnal «Razvedka i okhrana nedr», № 3, P. 63–66.

12. Afonin Yu. S., Dubrovin V. I., 2004. Modelirovaniye sostavov smesey metodom simpleksnykh reshetok [Modeling of mixtures by the simplex lattice method]. Radioelektronika. Informatika. Upravleniye, № 2, P. 60–63.

13. Duangjit S., Mehr L.M., Kumpugdee-Vollrath M., Ngawhirunpat T., 2014. Role of simplex lattice statistical design in the formulation and optimization of microemulsions for transdermal delivery. *Biological & Pharmaceutical Bulletin*, Vol. 37, No. 12, pp. 1948–1957.

14. Htet Zaw Oo, Kyaw Zay Ya, Goryachev B. E., 2023. Deystviye kompozitsiy iz zheleznogo, tsinkovogo kuporosov i sernistogo natriya na flotatsiyu medno-tsinkovykh kolchedannykh rud [Effect of iron/zinc vitriol–sodium sulphide blends on copper–zinc sulphide ore flotation]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten, № 12, P. 139–151. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_139.

15. Novik F. S., 1985. Planirovaniye eksperimenta na simplekse pri izuchenii metallicheskh sistem [Planning an experiment on a simplex in the study of metal systems]. Moscow: Metallurgiya, 256 p.

16. Oguaghamba O. A., Mama B. O., 2018. Generalized Scheffe's second degree mathematical methods approach in engineering mixture design. *Conference paper: 16th International Conference and Annual General Meeting, Nigerian Institute of Civil Engineers*, No. 6, pp. 32–44.
17. K.C. Nwachukwu, D.A. Okodugha, I.S. Akosubo, F.K. Atulomah., 2022. Optimization of Compressive Strength of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) Using Scheffe's Third-Degree Regression Model. *Iconic Research and Engineering Journals*, Vol. 5, No. 11, pp. 168–183.
18. Phyoe Kyaw Kyaw, Kyaw Zaya Ya, Goryachev B.E., 2023. Deystviye kompozitsiy metallosoderzhashchikh modifikatorov poverkhnosti sul'fidnykh mineralov tsvetnykh tyazhelykh metallov pri flotatsii medno-tsinkovykh rud [Effect of composition of metal-bearing surface modifiers for sulfide minerals of base heavy metals in copper–zinc ore flotation]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten*, № 11, P. 128-142. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_128.
19. Okafor F.O., Oguaghamba O.A., 2009. Procedure for optimization using Scheffe's models. *Journal of Engineering Science and Application (JESA)*, Vol. 7, No. 1, pp. 36–47.
20. Obam S.O., 2006. The accuracy of Scheffe's third degree over second-degree, optimization regression polynomials. *Nigerian Journal of Technology*, Vol. 25, No. 2, pp. 1-10.
21. Zedginidze I.G., 1976. *Planirovaniye eksperimenta dlya issledovaniya mnog-okomponentnykh sistem* [Experiment planning for the study of multicomponent systems]. Moscow: Nauka, 390 p.



МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 622:528.88

Смирнов Александр Юрьевич

научный сотрудник,
лаборатория геоинформационных
и цифровых технологий в недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН,
620219, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: alexsm94@gmail.com

**ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ
ИСТОЧНИКОВ ДАННЫХ
ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОЙ
МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА
СОКОЛОВСКО-САРБАЙСКОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ***

Аннотация:

На современном этапе развития горного дела при разработке месторождений широко используются цифровые технологии. Для целей прогнозирования и анализа гидрогеологического режима месторождений применяются численные геофильтрационные модели. В свою очередь, в геофильтрационных моделях широко используются цифровые модели рельефа (ЦМР) в качестве кровли верхнего модельного пласта. Необходимость подготовки цифровых моделей рельефа достаточной точности и требуемого качества является одной из важных проблем геоинформационного моделирования.

В качестве объекта исследования рассмотрено Соколовское железорудное месторождение – территория шахтного поля ш. «Соколовская» и хвостохранилища. Данная территория характеризуется сложными горно-геологическими условиями, развитием воронок обрушения. Мониторинг динамики развития воронок обрушения является важным вопросом безопасности ведения работ. В свою очередь, актуализация цифровой модели рельефа вследствие динамических изменений микрорельефа является важной геоинформационной проблемой.

В данной статье рассмотрен вопрос выбора оптимального источника данных по результатам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и определения методики дополнительной постобработки таких данных. Разработана методика оценки исходных данных, их корректировки и повышения точности результирующих цифровых моделей рельефа. Отмечено, что использование интерполяции методом кригинга (по сравнению с линейными интерполяторами) позволяет корректно объединить разнородные по количеству и качеству данные. При этом наиболее важным этапом данной методики является вариограммный анализ – подбор статистической функции, описывающей закономерность распределения интерполируемого параметра.

DOI:

Smirnov Alexander Yu.

Researcher,
Laboratory of geoinformation
and digital technologies in subsoil use,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: alexsm94@gmail.com

**APPLICATION OF COMBINED
DATA SOURCES TO CREATE
A DIGITAL TERRAIN MODEL
OF THE SOKOLOVO-SARBAYSKOYE
MINING FIELD**

Abstract.

At the present stage of development of mining, digital technologies are widely used in the development of deposits. For the purposes of forecasting and analyzing the hydrogeological regime of deposits, numerical geofiltration models are used. In turn, digital elevation models (DEMs) are widely used in geofiltration models. The need to quickly prepare a DEM of sufficient accuracy and quality for a given purpose is one of the important problems of geographic information modeling.

The Sokolovskoye iron ore deposit as the object of the study is the territory of the mine field of the Sokolovskaya mine and the tailings dump. This territory is characterized by complex mining and geological conditions, the development of collapse craters. Monitoring the dynamics of the development of collapse craters is an important issue of work safety. In turn, updating the digital terrain model due to dynamic changes in the microrelief is an important geoinformation problem.

This article discusses the issue of choosing the optimal data source based on the results of Earth remote sensing (ERS) and determining the methodology for additional processing of such data. A method for assessing the initial data, adjusting them and increasing the accuracy of the resulting digital relief models has been developed. It is noted that the use of interpolation by the kriging method makes it possible to correctly combine data of heterogeneous quantity and quality. At the same time, the most important stage of this technique is variogram analysis, selection of a statistical function describing the distribution pattern of the interpolated parameter.

* Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГД УрО РАН №075-00412-22 ПР тема 2. Разработка геоинформационных технологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процессов в недропользовании (FUWE-2022-0002), рег. № 123012300006-0.

Ключевые слова: Соколовско-Сарбайское месторождение, дистанционное зондирование Земли, цифровые модели рельефа, геоинформатика, кригинг, вариограммный анализ.

Key words: Sokolovo-Sarbayskoye mining field, Earth remote sensing, digital elevation models, geoinformatics, kriging, variogram analysis.

Введение

Работы по эксплуатации и разработке проектных решений для объектов горнодобывающей промышленности на современном этапе не обходятся без широкого применения цифровых технологий. При этом основными задачами инженерного обеспечения горных работ являются геологическая доразведка (эксплуатационная), проектирование, планирование горных работ и маркшейдерское сопровождение [1]. Каждый из этапов требует обработки и использования различных пространственно-распределенных данных. В свою очередь, для работы с такими данными используются специализированные программные продукты начиная от классических геоинформационных систем (ГИС) до различных горно-геологических геоинформационных систем (ГГИС), сред компьютерного моделирования и оперативного управления процессами.

Одной из составляющей частей, влияющих на безопасность при работе по добыче полезных ископаемых, является знание гидрогеологического режима месторождения, фильтрационных параметров вмещающих пород и балансовых составляющих. Для целей прогнозирования и анализа режима применяются численные геофильтрационные модели. В свою очередь, в геофильтрационных моделях в качестве кровли первого модельного пласта зачастую используют цифровые модели рельефа (ЦМР). Качество ЦМР может значительно повлиять на балансовые составляющие по водопритокам, расходам на инфильтрацию и т.д. [2]. Только при корректно откалиброванной модели могут быть получены качественные и количественные оценки, позволяющие разработать последующие инженерные решения.

Целью данного исследования являлось создание методики предварительной подготовки цифровых моделей рельефа для целей дальнейшего геофильтрационного моделирования, одновременно удовлетворяющей требованиям по точности и низким трудозатратам на обработку исходных данных.

Методы исследования

Помимо имевшихся карт, планов и материалов исполнительных съемок в качестве основы ЦМР для проведения исследования использовались данные дистанционного зондирования (ДЗЗ). В качестве основы ЦМР рассматривались следующие источники данных:

- данные SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) – ЦМР, полученная по результатам радиолокационной топографической миссии шаттла, проведенной с 11 по 22 февраля 2000 г., наиболее широко применяемая в исследованиях научного сообщества;
- данные AW3D (ALOS World 3D) – ЦМР, полученная по результатам ДЗЗ в 2014 г. в рамках программы PRISM со спутника ALOS Японского Агентства Аэрокосмических Исследований (JAXA);
- данные Copernicus GLO-30 DEM – ЦМР, полученная по результатам ДЗЗ с 2011 по 2015 г. с немецкого спутника TanDEM-X в рамках программы Европейского Космического Агентства (ESA).

Для сравнения качества ЦМР между собой были выбраны створы в пределах хвостохранилища и шахтного поля ш. «Соколовская» – объектов Соколовского железорудного месторождения, характеризующегося сложными гидрогеологическими условиями. Для шахтного поля характерно развитие воронок обрушения, вызванных

усадкой закладочного материала, самообрушения вмещающих пород и последующего выхода песчано-глинистой смеси в горные выработки (прорывов) [3]. Сотрудниками Института горного дела УрО РАН ранее выполнялись работы по наблюдению за вертикальными сдвигами и развитию воронок обрушения методами спутниковой интерферометрии, что, в свою очередь, свидетельствует о возможности широкого применения данных дистанционного зондирования для исследуемой области [4].

При выборе пространственного положения анализируемых профилей необходимо руководствоваться следующими правилами: такой профиль должен, во-первых, проходить через представляющие интерес для дальнейшего исследования объекты, во-вторых – пересекать участки с быстро меняющимся рельефом (откосы хвостохранилищ и отвалов, уступы карьеров и т.д.). На рис. 1 приведено плановое расположение профиля по линии 1-2.



Рис. 1. Плановое положение профиля 1-2

Для анализа качества данных ДЗЗ в створе 1-2 были построены продольные профили (рис. 2), которые, в свою очередь, сопоставлялись с топографическими данными последних лет: планами, исполнительными съемками, данными натурных измерений по результатам мониторинга. Уточнялось, насколько высотные отметки по данным ДЗЗ для контрольных участков отличаются от реально существующих.

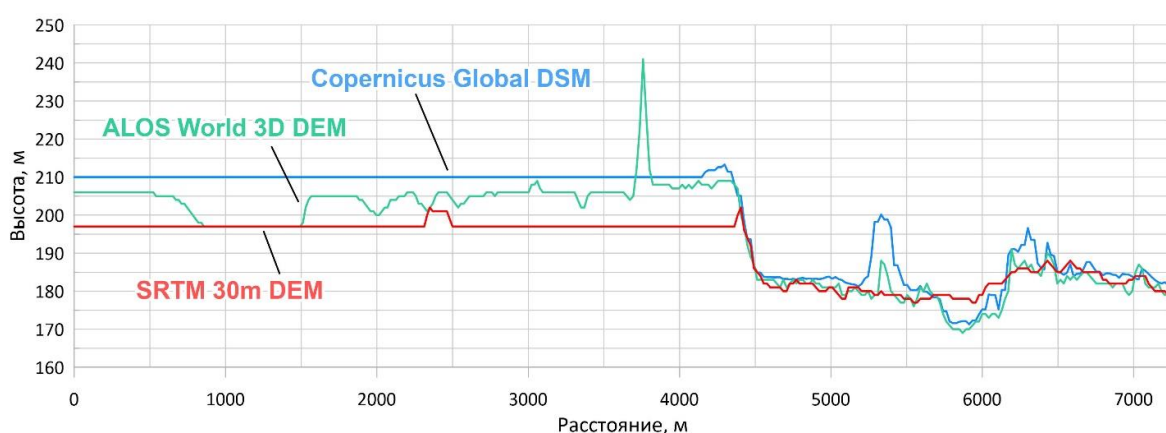


Рис. 2. Сравнение ЦМР различных источников ДЗЗ по профилю 1-2

По результатам анализа было установлено, что наиболее репрезентативной ЦМР является модель на базе съемки спутника TanDEM-X – космической программы Copernicus. Для актуализации цифровой основы Copernicus Global DSM была дополнена топографическими данными последних лет. Так, на примере рассматриваемого участка хвостохранилища и зоны обрушения были использованы данные исполнительной

съемки по результатам мониторинга за 2022 г. На основе векторных данных топографического плана масштаба 1:5 000 было сформировано облако точек (рис. 3) с высотными отметками из соответствующих тематических слоев: рельефные отметки, пикеты, изолинии рельефа, бровки уступов и т.д. Полилинии, в свою очередь, разбивались по узловым точкам.



Рис. 3. Импорт векторных данных цифрового плана хвостохранилища

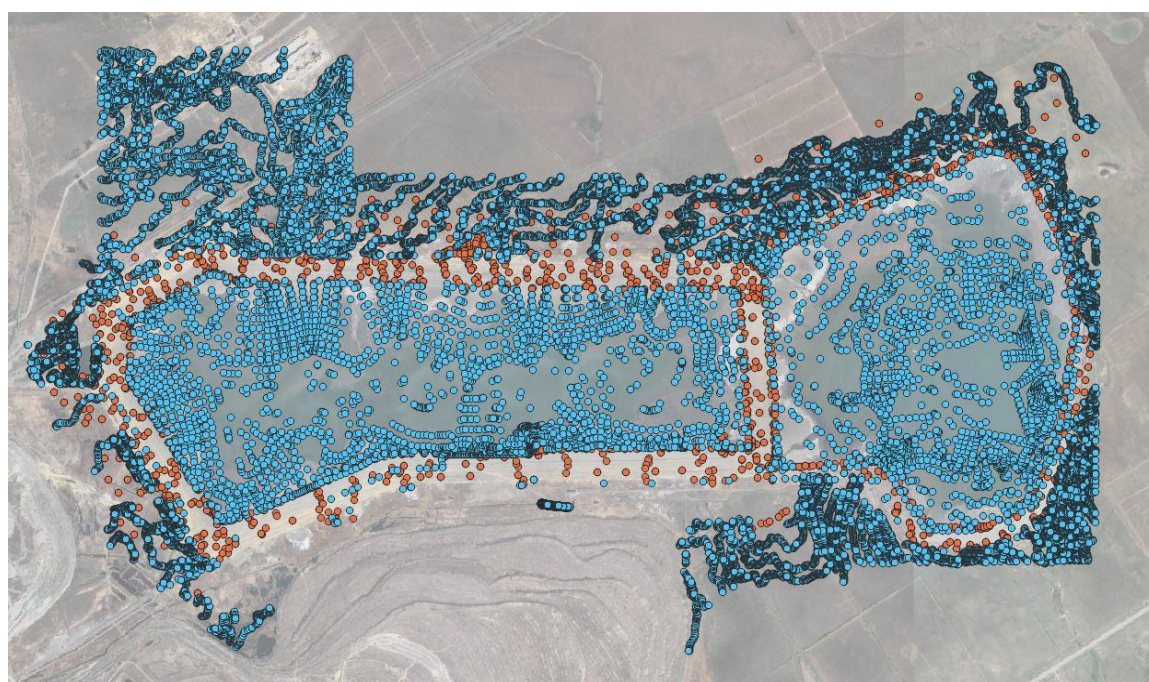


Рис. 4. Результирующее облако точек цифрового плана хвостохранилища. Коричневыми точками показаны данные мониторинга откосов хвостохранилища, синими – данные исполнительной съемки 2022 г.

В результате обработки данных на территорию хвостохранилища (рис. 4) было получено облако точек (около 29 тыс.), сохраненных для дальнейшей работы в формате файла с разделителем CSV (Comma-separated values). Аналогичным образом были актуализированы данные о поверхности рельефа на других участках района

исследования: зоны обрушения, карьеров и отвалов Соколовско-Сарбайского железорудного месторождения.

Объединение базовой ЦМР Copernicus Global DSM с данными актуальных съемок было выполнено методом кригинга – геостатистическим методом интерполяции, основывающимся на геостатистических моделях, включающих анализ автокорреляции (статистических отношений между измеренными точками) [5 – 8]. Данный метод использовался по той причине, что позволяет корректно сличить разнородные данные (данные разной плотности, различного шага сетки, градиента изменения рельефной отметки и т.д.) в отличие от классических методов интерполяции, применяемых, например, в TIN-моделях [9].

Прежде чем приступить к объединению двух источников данных, был выполнен анализ Copernicus Global DSM на предмет наличия и (или) отсутствия данных с нулевыми и отрицательными отметками (обычно характерными для участков с отсутствующими данными, содержащими ошибки). Для этого в ГИС была выполнена поинтервальная классификация высотных отметок (рис. 5). Красным цветом были выделены участки с нулевыми отметками. По результатам анализа можно сделать вывод, что ЦМР является целостной – участки в центральной части принадлежат к уступам Соколовского и Сарбайского карьеров, соответственно. Участки по периметру ЦМР являются типичным следствием появления артефактов при перепроецировании (в нашем случае общегеографической в прямоугольную систему координат) и трансформации. Данные участки были обрезаны и исключены из последующей обработки.

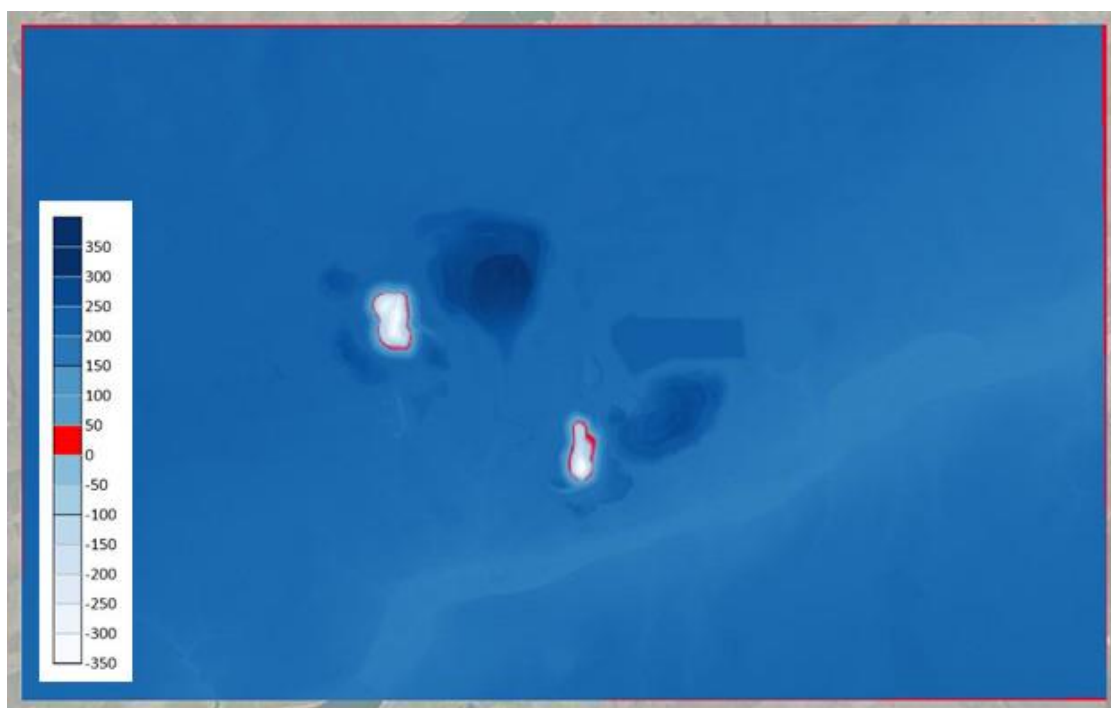


Рис. 5. Поверхность рельефа на основе Copernicus Global DSM.
Красным цветом показаны участки с нулевой высотной отметкой

На следующем этапе была выполнена интерполяция методом кригинга. Поскольку, как было упомянуто выше, исходные данные различаются по плотности, особое внимание уделялось вариационному анализу – подбору статистической функции, наиболее релевантно описывающей взаимосвязь близлежащих узловых точек (в том числе учитывающей эффекты резко изменяющихся высотных отметок

окружающих точек – Nugget Effect, что является крайне важным для карьеров, отвалов, откосов дамб и т.д.).

По результатам вариограммного анализа в GIS Surfer была подобрана вариограмма, представленная на рис. 6. Удаление тренда и пространственной анизотропии не выполнялось. Ключевые параметры вариограммы представлены в табл. 1.

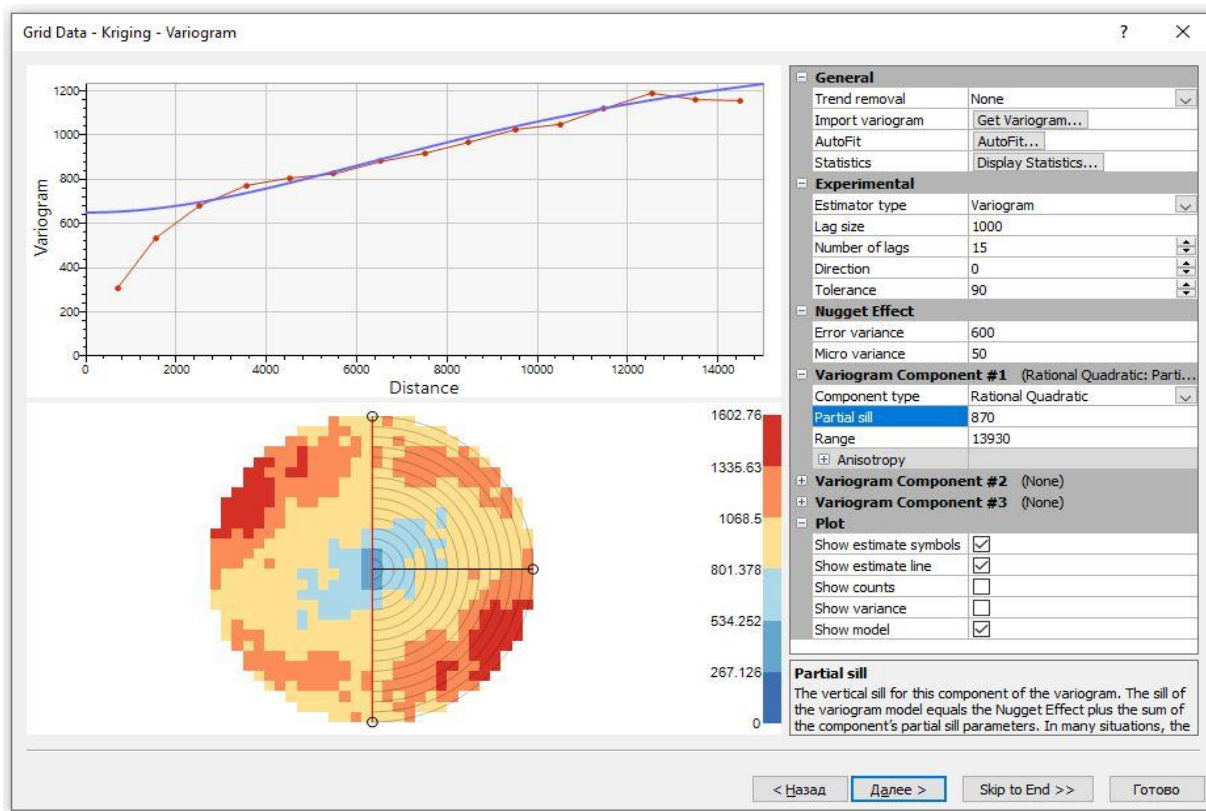


Рис. 6. Вариограммный анализ интерполируемых данных в GIS Surfer

Таблица 1

Параметры вариограммы

Параметр вариограммы	Значение
Вид математической функции	Рациональная квадратичная функция (Rational Quadratic)
Частичный порог (Partial sill)	870
Диапазон (Range)	13930
Размер лага	1000
Число лагов	15
Эффект самородка (Nugget Effect) ошибка вариации / микровариация	учитывается 600 / 50

Результаты исследования

Для оценки качества подобранной вариограммы была выполнена перекрестная проверка интерполируемых данных (рис. 7). Средняя ошибка составила единицы и первые десятки сантиметров, что для ЦМР площадью порядка 420 км² является

совершенно незначительной погрешностью. Таким образом, можно сделать вывод, что вариограммный анализ был выполнен корректно.

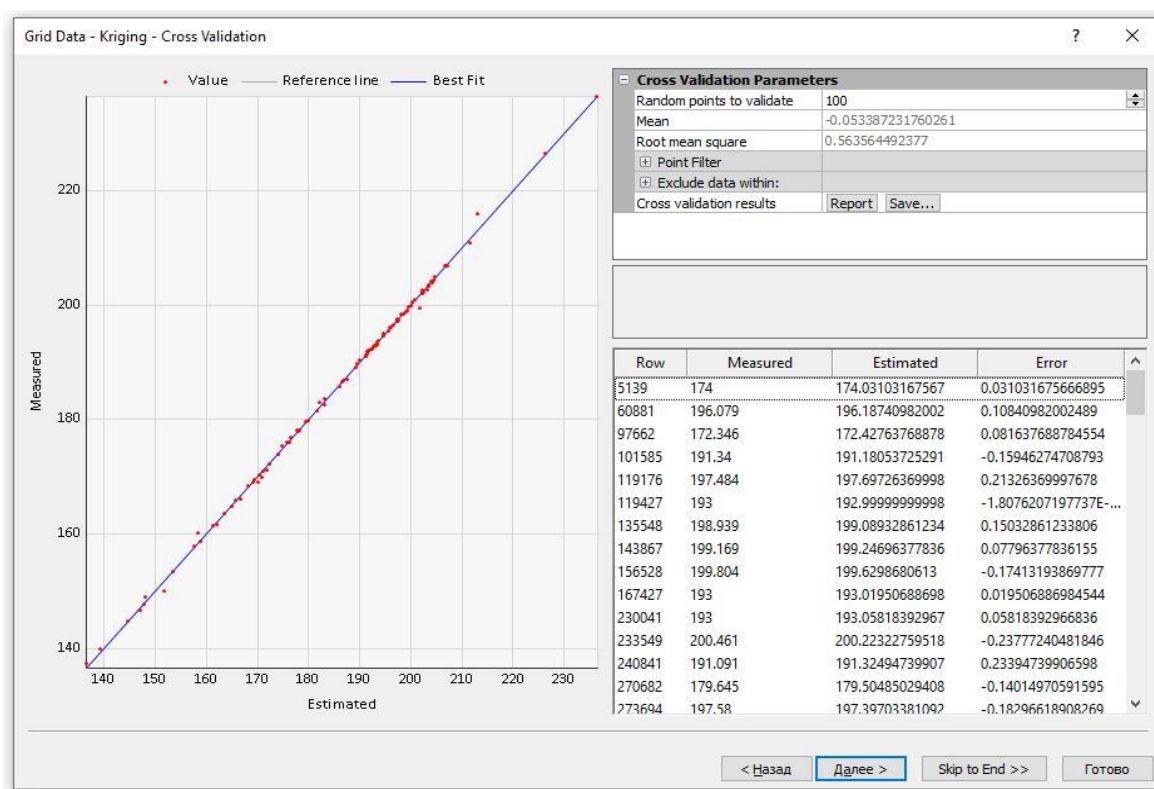


Рис. 7. Перекрестная проверка интерполируемых данных в GIS Surfer

Результирующая ЦМР была также сопоставлена с исходными поверхностями по профилю 1-2 (рис. 8). Как можно заметить, широко применяемая ЦМР по результатам съемки SRTM является устаревшей и недостаточно точно отображает поверхность земли. В то же время использование «сырых» данных ДЗЗ без дополнительной обработки нежелательно, поскольку хорошо заметна микровариация близлежащих высотных отметок – появления «зубьев», что вызвано спецификой радиолокационных съемок [10 – 12]. Трехмерное представление созданной ЦМР представлено на рис. 9.

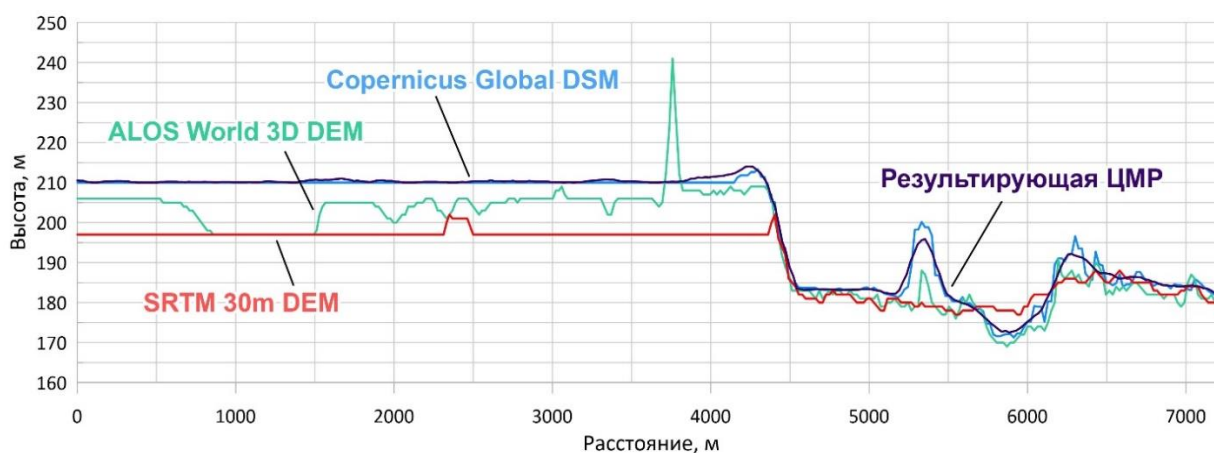


Рис. 8. Сравнение результирующей ЦМР с исходными моделями рельефа по данным ДЗЗ по профилю 1-2

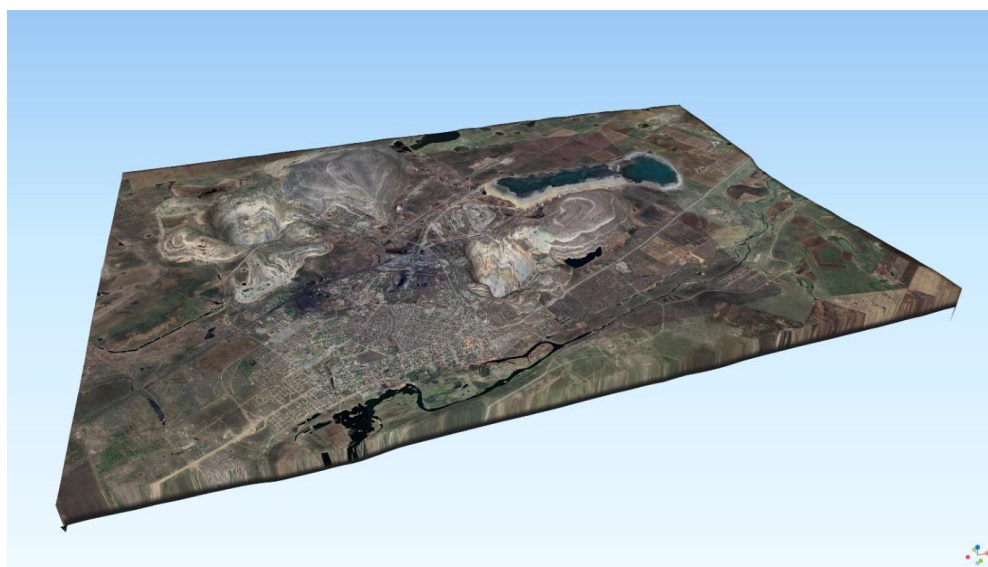


Рис. 9. Объемное представление цифровой модели рельефа Соколовско-Сарбайского месторождения

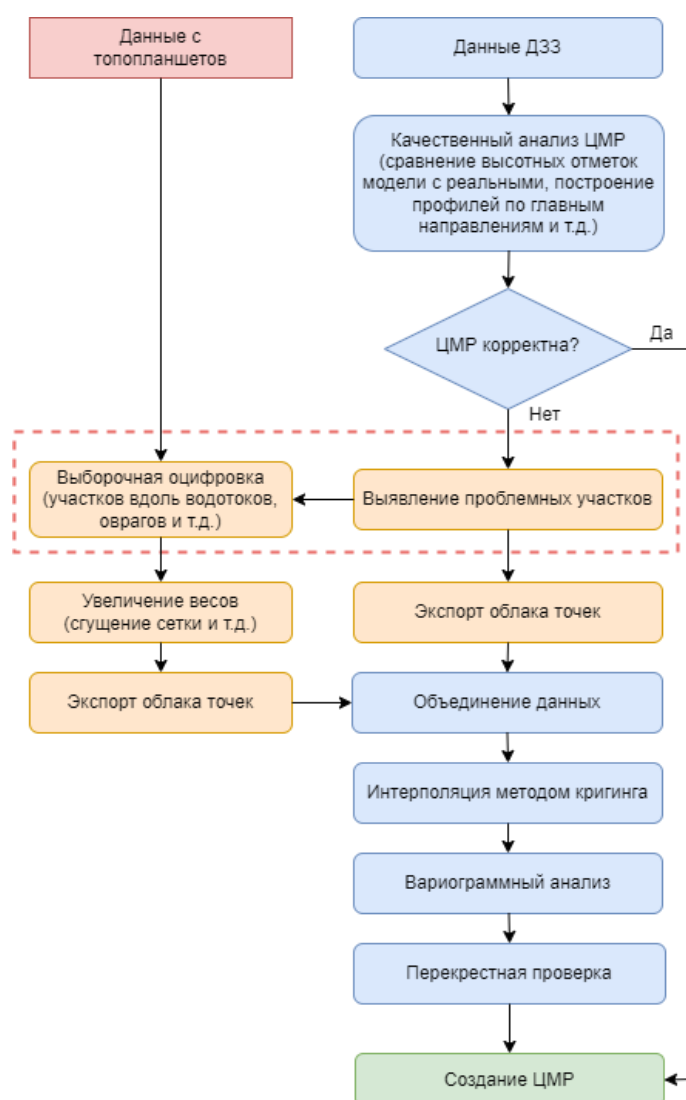


Рис. 10. Методика повышения точности данных ДЗЗ для создания ЦМР

Заключение

В практическом отношении результирующая уточненная ЦМР послужила основой для последующего решения фильтрационных задач, не являвшихся предметом исследования данной статьи: оценки водного баланса территории и влияния хвостохранилища на обводненность шахтного поля. Корректная ЦМР является основой достоверного решения как геофильтрационных, так и геомиграционных задач, позволяет точнее определить балансовые составляющие гидрологического режима.

В ходе подготовки исходных данных геоинформационной системы удалось установить, что не все источники данных ДЗЗ удовлетворяют качеству, необходимому для решения научно-прикладных и инженерных задач в области рудничной гидрогеологии. Для повышения точности ЦМР предлагается использование методики, описанной в данной статье и представленной на рис. 10.

По результатам сравнительного анализа источников ЦМР по данным ДЗЗ в качестве базовой цифровой основы для создания ЦМР была выбрана Copernicus Global DSM как наиболее актуальная и соответствующая требованиям точности. Применение геостатистических методов обработки разнородных исходных данных, представленных в изложенной методике, позволило получить точную модель рельефа территории хвостохранилища и шахтного поля ш. «Соколовская».

Откорректированная ЦМР послужила основой для последующего формирования карт изученности различных типов, позволила установить пространственно-временные зависимости переноса и распределения химических компонентов в грунтовых водах.

Список литературы

1. Лукичев С.В., Наговицын О.В., 2009. Инженерное обеспечение горных работ на основе моделирования объектов и процессов горной технологии. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S2, С. 196-209.
2. Рыбников П.А., Смирнов А.Ю., 2021. Анализ качества цифровых моделей рельефа на основе данных дистанционного зондирования Земли для рельефа овражно-балочного типа. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5-1, С. 235-247. DOI 10.25018/0236_1493_2021_51_0_235
3. Усанов С.В., Крутиков А.В., Мельник Д.Е., 2018. Обеспечение промышленной безопасности при разработке Соколовского железорудного месторождения подземным способом в условиях обводненной налегающей толщи. *Проблемы недропользования*, № 4(19), С. 82-89. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.04.082
4. Усанова А.В., Усанов С.В., 2018. Мониторинг сдвижения земной поверхности при разработке Соколовско-Сарбайского месторождения методом радарной интерферометрии. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 4, С. 28-33. DOI 10.15372/FTPRPI20180404. – EDN XZBLPV.
5. Давид М., 1980. *Геостатистические методы при оценке запасов руд*. Ленинград: Недра, 215 с.
6. Демьянов В.В., Савельева Е.А., 2010. *Геостатистика: теория и практика*. Под ред. Р.В. Арутюняна; Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. Москва: Наука, 327 с.
7. Li Y., Wang X., Chen Y. et al., 2023. Application of predictor variables to support regression kriging for the spatial distribution of soil organic carbon stocks in native temperate grasslands. *Journal of Soils and Sediments*, No. 23, С. 700–717. DOI: 10.1007/s11368-022-03370-1
8. Bouhout S., Haboubi K., Zian A. et al., 2022. Evaluation of two linear kriging methods for piezometric levels interpolation and a framework for upgrading groundwater level monitoring network in Ghiss-Nekor plain, north-eastern Morocco. *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 15, No. 1016. DOI: 10.1007/s12517-022-10283-3

9. Margaret A., Oliver, Richard W., 2015. *Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging*. Switzerland, Cham: Springer International Publishing, 106 с.
10. Agathe N.K.J., Jules T.K., Martial F.E. [et al.], 2024. Combine Landsat 8OLI/TIRS sensors/SRTM image processing and field observations for geological mapping of the Nlonako ring complex (South West of Cameroon Line) under dense forest vegetation and humid climate. *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 17, No. 14. DOI: 10.1007/s12517-023-11789-0
11. Trevisani S., Skrypitsyna T.N., Florinsky I.V., 2023. Global digital elevation models for terrain morphology analysis in mountain environments: insights on Copernicus GLO-30 and ALOS AW3D30 for a large Alpine area. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 82, No. 198. DOI: 10.1007/s12665-023-10882-7
12. Jamal S.A., Ali A., 2023. A comparative study of automatic drainage network extraction using ASTER GDEM, SRTM DEM and Cartosat-1 DEM in parts of Kosi basin, Bihar, India. *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*, No. 14, P. 45–56. DOI: 10.1007/s43995-023-00014-4.

References

1. Lukichev S.V., Nagovitsyn O.V., 2009. Inzhenernoe obespechenie gornyykh rabot na osnove modelirovaniya ob'ektov i protsessov gornoj tekhnologii [Engineering support of mining operations based on modeling of objects and processes of mining technology]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № S2, P. 196-209.
2. Rybnikov P.A., Smirnov A.Yu., 2021. Analiz kachestva tsifrovyykh modelei rel'efa na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya rel'efa ovrazhno-balochnogo tipa [Analysis of the quality of digital terrain models based on Earth remote sensing data for gully type terrain]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 5-1, P. 235-247. DOI 10.25018/0236_1493_2021_51_0_235
3. Usanov S.V., Krutikov A.V., Mel'nik D.E., 2018. Obespechenie promyshlennoi bezopasnosti pri razrabotke Sokolovskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya podzemnym sposobom v usloviyakh obvodnennoi nalegayushchei tolshchi [Ensuring industrial safety during the development of the Sokolovskoye iron ore deposit by the underground method in conditions of a watered-down stratum]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4(19), P. 82-89. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.04.082
4. Usanova A.V., Usanov S.V., 2018. Monitoring sdvizheniya zemnoi poverkhnosti pri razrabotke Sokolovsko-Sarbaiskogo mestorozhdeniya metodom radarnoi interferometrii [Monitoring of the movement of the Earth's surface during the development of the Sokolovsko-Sarbaiskoye field using radar interferometry]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 4, P. 28-33. DOI 10.15372/FTPRI20180404. – EDN XZBLPV.
5. David M., 1980. Geostaticheskie metody pri otsenke zapasov rud [Geostatic methods for estimating ore reserves]. Leningrad: Nedra, 215 p.
6. Dem'yanov V.V., Savel'eva E.A., 2010. Geostatistika: teoriya i praktika [Geostatistics: theory and practice]. Pod red. R.V. Arutyunyana; Institut problem bezopasnogo razvitiya atomnoi energetiki RAN. Moscow: Nauka, 327 p.
7. Li Y., Wang X., Chen Y. et al., 2023. Application of predictor variables to support regression kriging for the spatial distribution of soil organic carbon stocks in native temperate grasslands. *Journal of Soils and Sediments*, No. 23, P. 700–717. DOI: 10.1007/s11368-022-03370-1
8. Bouhout S., Haboubi K., Zian A. et al., 2022. Evaluation of two linear kriging methods for piezometric levels interpolation and a framework for upgrading groundwater level monitoring network in Ghiss-Nekor plain, north-eastern Morocco. *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 15, No. 1016. DOI: 10.1007/s12517-022-10283-3

9. Margaret A., Oliver, Richard W., 2015. *Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging*. Switzerland, Cham: Springer International Publishing, 106 p.
10. Agathe N.K.J., Jules T.K., Martial F.E. [et al.], 2024. Combine Landsat 8OLI/TIRS sensors/SRTM image processing and field observations for geological mapping of the Nlonako ring complex (South West of Cameroon Line) under dense forest vegetation and humid climate. *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 17, No. 14. DOI: 10.1007/s12517-023-11789-0
11. Trevisani S., Skrypitsyna T.N., Florinsky I.V., 2023. Global digital elevation models for terrain morphology analysis in mountain environments: insights on Copernicus GLO-30 and ALOS AW3D30 for a large Alpine area. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 82, No. 198. DOI: 10.1007/s12665-023-10882-7
12. Jamal S.A., Ali A., 2023. A comparative study of automatic drainage network extraction using ASTER GDEM, SRTM DEM and Cartosat-1 DEM in parts of Kosi basin, Bihar, India. *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*, No. 14, P. 45–56. DOI: 10.1007/s43995-023-00014-4.



ПРАВОВЫЕ ОСНОВЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 622.882:622.2

Славиковская Юлия Олеговна

кандидат экономических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория экологии горного
производства,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: slavikov1977@mail.ru

ИНДИКАТИВНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗЕМЕЛЬ ПРИ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИИ НА ПРИМЕРЕ СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ*

Аннотация:

В статье рассмотрены вопросы диагностики состояния и использования земельных ресурсов, а также эффективности проводимых природоохранных мероприятий как одного из важнейших критериев оценки состояния окружающей среды на урбанизированных территориях с развитым горнопромышленным комплексом. В современных условиях при сборе и анализе статистических данных применительно к земельным ресурсам существует ряд общепринятых статистических показателей как натуральных, так и стоимостных (площади нарушенных и деградированных земель, химическое загрязнение, инвестиции в охрану и восстановление земель). Традиционные экономические показатели зачастую не отражают экологическую составляющую, и их рост может не приводить к желаемому снижению негативного воздействия. В связи с этим складывается насущная необходимость экологически ориентированной корректировки и доработки статистических традиционных экономических показателей с учетом интенсивности негативного воздействия и охраны земель. Поэтому на сегодня вопросы разработки комплексных эколого-экономических индикаторов, позволяющих учесть экологический фактор в системе экономических показателей, крайне актуальны. В работе предложен методический подход к оценке уровня интенсивности негативного воздействия и эффективности природоохранной деятельности на основе комплексных эколого-экономических индикаторов применительно к земельным ресурсам при недропользовании. Применение данного подхода позволит производить своевременную диагностику эффективности землепользования территории и выявление негативных тенденций с целью выработки

DOI:

Slavikovskaya Yuliia O.

Candidate of Economic Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of mining ecology,
Institute of Mining,
Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiriaka Str.,
e-mail: slavikov1977@mail.ru

INDICATIVE APPROACH TO ASSESSING THE EXPLOITATION OF LAND IN SUBSOIL USE ON THE EXAMPLE OF THE SVERDLOVSK REGION

Abstract:

The article considers the issues of diagnostics of the state and exploitation of land resources, as well as the effectiveness of environmental protection measures as one of the most important criteria for assessing the state of the environment in urbanized territories with a developed mining complex. In modern conditions, when collecting and analyzing statistical data in relation to land resources, there are a number of generally accepted statistical indicators of both natural and cost (areas of disturbed and degraded lands, chemical pollution, investments in land protection and restoration). Traditional economic indicators often do not reflect the environmental component and their growth may not lead to the desired reduction of negative impact. Therefore, there is an urgent need for environmentally oriented adjustment and refinement of statistical traditional economic indicators, taking into account the intensity of the negative impact and land protection. Therefore, today the issues of developing comprehensive environmental and economic indicators that allow taking into account the environmental factor in the system of economic indicators are extremely relevant.

The paper proposes a methodological approach to assessing the level of intensity of negative impact and the efficiency of environmental activities on the basis of integrated environmental and economic indicators in relation to land resources in subsoil use. The use of this approach will make it possible to timely diagnose the effectiveness of land use in the territory and identify negative trends in order to develop timely compensation measures. The direct assessment of the proposed indicators, carried out on the basis of official statistics for the conditions of the Sverdlovsk region, as an example of the mining region, made it possible to identify negative trends in land use, indicating that the measures taken to minimize and compensate for the negative load on land resources are insufficient.

* Статья подготовлена в рамках Госзадания № 075-00412-22 ПП. Тема 2 (2022-2024). Разработка геоинформационных технологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процессов в недропользовании (FUWE-2022-0002), пер. №1021062010532-7-1.5.1

своевременных компенсационных мер. Непосредственная оценка предложенных индикаторов, выполненная на основе данных официальной статистики для условий Свердловской области как примера горнопромышленного региона, позволила выявить негативные тенденции в землепользовании, свидетельствующие о недостаточности принимаемых мер по минимизации и компенсации негативной нагрузки на земельные ресурсы.

Ключевые слова: горнопромышленный комплекс, земельные ресурсы, негативное воздействие на земельные ресурсы, природоохранная деятельность, эколого-экономические индикаторы, устойчивое развитие, рекультивация земель.

Key words: mining complex, land resources, negative impact on land resources, environmental activities, ecological and economic indicators, sustainable development, land reclamation.

Введение

Вопросам разработки и оценки эколого-экономических индикаторов, характеризующих изменение состояния окружающей среды в целом и по природным ресурсам в отдельности посвящен ряд работ как отечественных, так и зарубежных авторов [1 – 13]. В числе приоритетных базовых эколого-экономических индикаторов, согласно, например, Бобылеву С.Н. и др. [3], предлагается использовать натуральные показатели негативного воздействия на окружающую среду, например площадь нарушенных и рекультивированных земель, затраты на природоохранные мероприятия, а также рассматривать данные показатели в динамике относительно объемов выпуска продукции.

Применительно к земельным ресурсам за основу принимаются, как правило, натуральные и стоимостные показатели негативного воздействия.

Целью работы является разработка индикативного методического подхода к оценке эффективности использования земель и их восстановления на основе рекультивационных работ в условиях недропользования.

Задачами исследования являются разработка комплексных эколого-экономических индикаторов землепользования и их оценка с целью выявления динамики для условий предприятий горнопромышленного комплекса Свердловской области. Применение данного подхода позволит определить уровень негативного воздействия и эффективность природоохранной деятельности, а также экологическую устойчивость территории и тенденции ее развития.

Методический подход к оценке эколого-экономических индикаторов использования и охраны земельных ресурсов при недропользовании

На сегодняшний день Свердловская область занимает одно из последних мест в экологических рейтингах регионов России – 83 место среди 85 [14], так как на сравнительно небольшой территории расположены практически все отрасли промышленного производства и сконцентрировано достаточно много крупных промышленных и горнодобывающих предприятий.

Земли предприятий горной промышленности составляют 58,5 тыс. га, или 13,1 % от общей площади земель промышленности на территории области [15], при этом необходимо отметить, что, как правило, горные предприятия являются градообразующими, и, следовательно, территории, на которых они располагаются, являются высокоурбанизированными.

Согласно данным Федеральной службы государственной статистики [16] численность городского населения в области составляет 3,65 млн чл., или 86,3 % от всего насе-

ления, проживающего в области, при этом численность предприятий горно-металлургического профиля 60, и они являются основой промышленности [17, 18]. Также необходимо отметить и приуроченность мест проживания городского населения к центрам промышленности, в связи с чем наблюдается существенный рост негативного воздействия на здоровье населения на данных территориях. Так, по данным Роспотребнадзора, экологическими рисками, связанными с неблагоприятием окружающей среды, обусловлено почти 40 % заболеваемости населения промышленных регионов [19].

Таким образом, все вышеперечисленное предопределяет необходимость предъявления более высоких экологических требований при осуществлении деятельности в том числе и горных предприятий, а также своевременной диагностики и корректировки природоохранной деятельности.

Для решения поставленной задачи разработан методический подход к диагностике негативного воздействия и охране земель на основе комплексных эколого-экономических индикаторов, позволяющих определить уровень негативного воздействия, результативность природоохранной деятельности, степень экологической устойчивости оцениваемой территории, а также динамики ее экологичности.

С этой целью были разработаны эколого-экономические индикаторы в части земельных ресурсов, позволяющие оценить как тенденции и факторы землепользования с учетом интенсивности промышленного производства за определенный период времени, так и эффективность природоохранной деятельности.

Основной информационной базой при оценке разработанных индикаторов в рамках методического подхода послужили данные официальной статистики, а также данные предприятий. Необходимо отметить, что в РФ ведется учет эколого-экономических показателей в статистической отчетности начиная с 1991 г. [20, 21, 24, 25].

В рамках предлагаемого подхода за основу предлагается принимать следующие показатели:

- площадь нарушенных земель при осуществлении хозяйственной деятельности;
- площади деградированных земель негативного воздействия;
- химическое загрязнение земель;
- восстановление земель за счет проведения рекультивационных работ;
- инвестиции в охрану и восстановление земель.

На основе вышеперечисленных показателей были разработаны эколого-экономические индикаторы, структура которых представлена на рис. 1.



Рис. 1. Эколого-экономические индикаторы эффективности использования и охраны земель при недропользовании

Эколого-экономические индикаторы включают следующие составляющие:

1. Индекс негативного воздействия на земельные ресурсы (I_{1i}), который определяется на основе показателей нарушенных земель:

$$I_{1i} = J_{н.з.i} / J_{ппi}, \quad (1)$$

где $J_{н.з.i}$ – индекс нарушенных земель, определяется как отношение площади нарушенных земель в результате негативного воздействия в текущем году к площади нарушенных земель в предыдущем или базисном году; $J_{ппi}$ – индекс промышленного производства (применительно к горнодобывающему производству в качестве данного показателя будет выступать объем добычи полезного ископаемого) определяется как отношение объема производства в текущем году к данному показателю в предыдущем периоде, $i=1,2$ (1 – базовый год; 2 – анализируемый год).

2. Индекс деградированных земель (I_{2i}) вследствие развития негативных процессов:

$$I_{2i} = J_{д.з.i} / J_{ппi}, \quad (2)$$

где $J_{д.з.i}$ – индекс деградации земель, определяется как отношение площади деградированных земель в текущем году к аналогичному показателю в базисном году.

3. Индекс удельного химического загрязнения почв (I_{3i}) в результате негативного воздействия:

$$I_{3i} = J_{з.з.i} / J_{ппi}, \quad (3)$$

где $J_{з.з.i}$ – индекс загрязненности почв химическими веществами, определяется как отношение суммарного индекса загрязнения в текущем году к аналогичному показателю базисного периода [22, 23].

4. Индекс восстановления земель (I_{4i}) на основе проведения рекультивационных работ:

$$I_{4i} = S_{р.з.2} / S_{р.з.1}, \quad (4)$$

где $S_{р.з.1,2}$ – площадь рекультивированных земель в текущем и базовом году.

5. Удельный вес инвестиций на охрану и восстановление земель (I_{5i}) в общем объеме инвестиций в основной капитал:

$$I_{5i} = I_{о.з.i} / I_{о.к.i}, \quad (5)$$

где $I_{о.з.i}$ – объем инвестиций в охрану и восстановление земель, $I_{о.к.i}$ – инвестиции в основной капитал.

В целях выявления соответствующих тенденций в части нарушения и загрязнения земель и компенсации негативного воздействия за счет природоохранной деятельности предлагается использовать два индикатора: ИИ_{э-э.э.} – (интегральный индикатор эколого-экономической эффективности использования и охраны земель) и КИ_{э-э.э.} – (комплексный индикатор эколого-экономической эффективности использования и охраны земель).

Данные показатели являются комплексными и включают все вышеперечисленные показатели воздействия на земельные ресурсы, проведение работ по рекультивации и уровень инвестиций природоохранного характера.

Интегральный индикатор эколого-экономической эффективности предлагается оценивать с использованием частных вышеперечисленных индексов. Так, три первых показателя характеризуют конечный результат негативного воздействия, а два последующих – эффективность природоохранной деятельности, способствующих снижению

первых трех показателей. Показатели 4, 5 дают положительную динамику, при росте значения данных показателей наблюдается снижение негативного воздействия на земельные ресурсы, а 1 – 3, наоборот, – при снижении значения наблюдается рост эффективности природоохранной деятельности.

Интегральный индикатор $ИИ_{э-э.э}$ предлагается рассчитывать как среднеарифметическое значение по сумме вышеперечисленных пяти частных индексов:

$$ИИ_{э-э.э} = \frac{1}{5} \left(\sum_{n=1.2.3} \frac{I_{1n}}{I_{2n}} + \sum_{n=4.5} \frac{I_{2n}}{I_{1n}} \right), \quad (6)$$

где n – порядковый номер показателя, $n=1,..., 5$; I_{1n} – соответствующий показатель в базовом году (I_{1n} – индекс негативного воздействия (нарушенные земли); I_{2n} – индекс деградированных земель вследствие развития негативных процессов; I_{3n} – индекс удельного химического загрязнения земель; I_{4n} – индекс восстановления земель на основе проведения рекультивационных работ; I_{5n} – удельный вес инвестиций на охрану и восстановление земель в общем объеме инвестиций в основной капитал; I_{2n} – соответствующий показатель в анализируемом году.

Снижение данного показателя объясняется ростом негативного воздействия на земельные ресурсы и снижением эффективности природоохранной деятельности и, наоборот, рост данного показателя положительно характеризует деятельность в сфере охраны и восстановления земель.

В целях оценки эффективности эколого-экономического развития территории для условий земельных ресурсов необходимо сопоставить данные показатели с аналогичными показателями более высокого порядка, в этих целях рекомендуется использовать комплексный индикатор эколого-экономической эффективности – $КИ_{э-э.э}$, определяемый как отношение суммы пяти вышеперечисленных индексов по анализируемой территории с аналогичными показателями по России:

$$КИ_{э-э.э} = U_2 / U_1, \quad (7)$$

где U_1 – суммарный индекс по земельным ресурсам в базовом году; U_2 – суммарный индекс по земельным ресурсам в анализируемом году, определяются следующим образом:

$$U_i = \frac{I_{1i}^n}{I_{1i}^T} + \frac{I_{2i}^n}{I_{2i}^T} + \frac{I_{3i}^n}{I_{3i}^T} + \frac{I_{4i}^T}{I_{4i}^n} + \frac{I_{5i}^T}{I_{5i}^n}, \quad (8)$$

где i – период оценки (1 – базовый год; 2 – анализируемый год); I_{1i}^n – индекс негативного воздействия на земельные ресурсы для условий горнодобывающего предприятия; I_{2i}^n – индекс деградированных земель вследствие развития негативных процессов для условий горнодобывающего предприятия; I_{3i}^n – индекс удельного химического загрязнения земель в результате негативного воздействия для условий горнодобывающего предприятия; I_{4i}^n – индекс восстановления земель на основе проведения рекультивационных работ для условий горнодобывающего предприятия; I_{5i}^n – удельный вес инвестиций на охрану и восстановление земель в общем объеме инвестиций в основной капитал, I_{1i}^T , I_{2i}^T , I_{3i}^T , I_{4i}^T , I_{5i}^T – аналогичные индексы, определяемые для условий территории расположения горнодобывающего предприятия в аналогичный период.

В качестве примера была выполнена оценка предложенных комплексных индикаторов для условий Свердловской области с использованием данных официальной статистики за последние восемь лет [20, 21, 24, 25].

На основе анализа статистических данных, характеризующих негативное воздействие на земельные ресурсы и природоохранную деятельность, были выявлены соответствующие тенденции и получены следующие расчетные показатели, представленные в табл.1 и на рис. 2, 3.

Таблица 1

Расчетные значения показателей $ИИ_{э-э.э.}$, $КИ_{э-э.э.}$

Наименование показателя	Годы							
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
интегральный индикатор эколого-экономической эффективности использования и охраны земель, $ИИ_{э-э.э.}$	1	1,22	1,08	0,99	0,85	0,81	0,84	0,86
комплексный индикатор эколого-экономической эффективности использования и охраны земель, $КИ_{э-э.э.}$	1	1,14	0,62	0,99	0,66	0,64	0,60	0,56

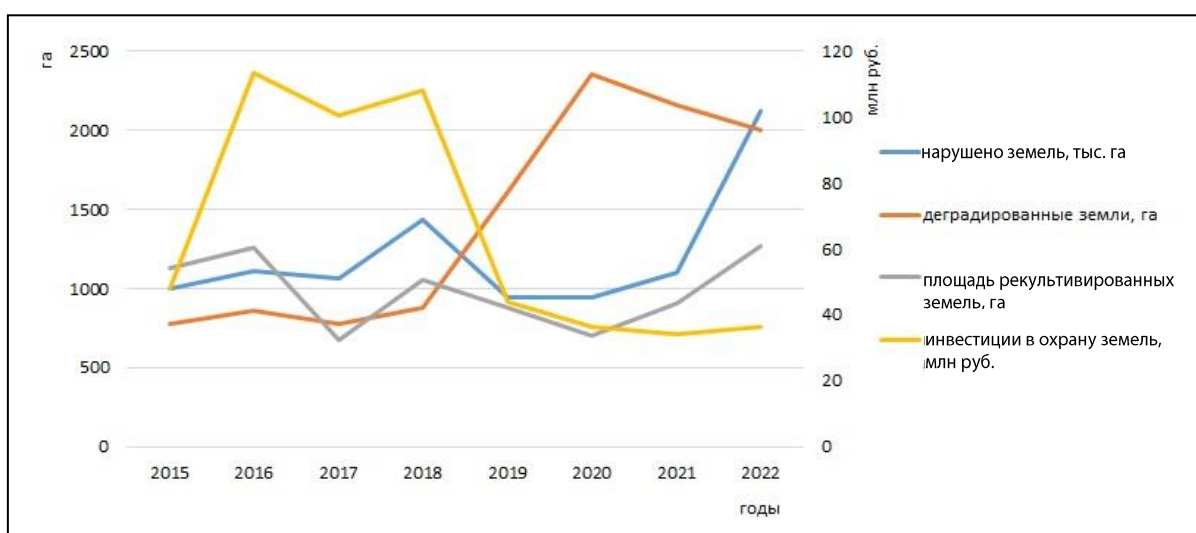


Рис. 2. Динамика показателей антропогенного воздействия на земельные ресурсы, а также затрат на их охрану и восстановление по Свердловской области

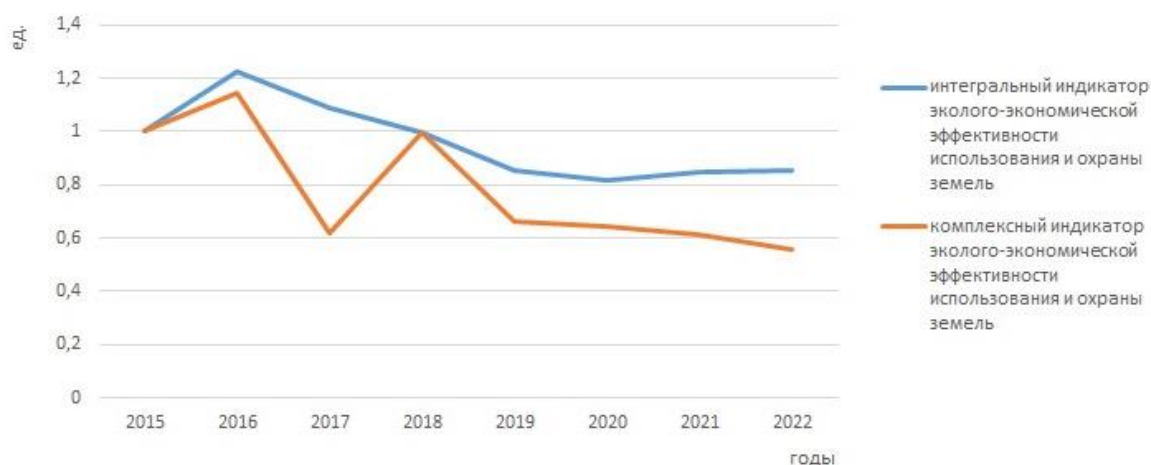


Рис.3. Динамика эколого-экономических индикаторов негативного воздействия на земельные ресурсы по Свердловской области

Заключение

Таким образом, на основе анализа статистических данных выполнена оценка эколого-экономических индикаторов негативного воздействия на земельные ресурсы и эффективности природоохранных мероприятий по Свердловской области за период с 2015 по 2022 г. Полученные эмпирические зависимости характеризуют негативные тенденции изменения как интегрального, так и комплексного эколого-экономического индикатора, с течением времени заключающиеся в снижении значения данных индикаторов. Так, интегральный показатель состояния экологического развития ИИ_{э-э.э.} снизился на 16 % по отношению к 2015 г., комплексный индекс уровня экологического развития КИ_{э-э.э.} за тот же период снизился на 39 %. Данные негативные тенденции объясняются увеличением площади нарушенных земель в 1,1 раза, площадь деградированных земель увеличилась в 2,77 раза, загрязненность земель увеличилась в 1,5 раза, снижение темпов рекультивации земель произошло в 1,25 раза, и уровень инвестиций снизился в 1,38 раза на территории области.

Список литературы

1. Бобылев С.Н., 2001. *Индикаторы устойчивого развития России (эколого-экономические аспекты)*. Москва: ЦПРП, 220 с.
2. Богданов Н.А., Чуйков Ю.С., Рыбкин В.С., 2013. Метод оценки состояния земель по индексу загрязнения почв. *Астраханский вестник экологического образования*, № 1 (23), С. 102-112.
3. Бобылев С.Н., 2007. *Индикаторы устойчивого развития: региональное измерение. Пособие по региональной экологической политике*. Москва: Акрополь, 60 с.
4. Старицына И.А., Беличев А.А., 2018. Анализ использования нарушенных земель Свердловской области. *Аграрный вестник Урала*, № 04 (171), С. 31-36.
5. Иваньо Я.М., Чернигова Д.Р., 2012. Факторы эффективного использования земельных ресурсов для различных категорий предприятий. *Вестник Тюменского государственного университета*, № 7, С.153-160.
6. Лазарева О.С., 2019. Оценка эффективности управления земельными ресурсами региона. *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Экономика и управление*, № 2, С. 220-227.
7. Кислицин Д.П., 2007. Эколого-экономические индикаторы оценки эффективности жизнедеятельности муниципального образования. *Экономический вестник Ростовского государственного университета*, Том 5, № 4., Часть 3, С. 195 - 200.
8. Богатова И.Б., 2017. Оценка индикаторов устойчивого развития на территории Самарской области. *Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева*, Т. 1, № 1, С. 180-185.
9. Тарасова Н.П., Кручина Е.Б., 2006. *Индексы и индикаторы устойчивого развития. Устойчивое развитие: природа-общество-человек*. Москва: Издательский центр РХТУ им. Д.И. Менделеева, Том II, С. 127–144.
10. Juan F. Velasco-Muñoz, José A. Aznar-Sánchez, Belén López-Felices, Daniel García-Arca, 2021. Sustainable land use and management. *Sustainable Resource Management: Modern Approaches and Contexts*, P. 179-197. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128243428000158> (дата обращения 22.12.2023).
11. Mohammadhadi Hajian, Somayeh Jangchi Kashani, 2021. Evolution of the concept of sustainability. From Brundtland Report to sustainable development goals. *Sustainable Resource Management: Modern Approaches and Contexts*. P. 1-24. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128243428000183> (дата обращения 15.11.2023).
12. Segnestam Lisa, 2003. *Indicators of Environment and Sustainable Development: Theories and Practical Experience*. Environment Department papers: Environmental economics series. World Bank, 53 p. URL: <http://books.google.ru/books?id=Zbm3AAAAIAAJ&hl>

=ru&source=gbs_navlinks_s_ (дата обращения 17.12.2023).

13. *OECD Environmental Indicators. Towards sustainable development organization*, 2001. URL: <http://cdn2.hubspot.net/hubfs/2642721/Recursos/Guias%20y%20Estandares/OCDE/OCDE%20-%20environmental%20indicators.pdf> (дата обращения 11.11.2023).

14. *Национальный экологический рейтинг*. URL: <https://greenpatrol.ru/ru/regiony/sverdlovskaya-oblast> (дата обращения 25.10.2023).

15. *Государственный доклад «О состоянии окружающей среды на территории Свердловской области в 2022 году»*. Екатеринбург, 2023, 365 с. URL: <https://mprso.midural.ru/uploads/2023/09/Государственный+доклад+ 2022. pdf>. (дата обращения 15.10.2023)

16. *Свердловская область в цифрах 2023. Статистический сборник. Управление Федеральной службы государственной статистики по Свердловской области и Курганской области*. Екатеринбург, 2023, 80 с.

17. *Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году*. URL: <https://www.rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/202104/8cb09d4c5ef96b69de56b70811dd1d5a.pdf?ysclid=loh1jy52va851868313> (дата обращения 15.10.2023)

18. *Стратегия развития горно-металлургического комплекса Свердловской области на плановый период до 2020 года и на перспективу до 2030 года*. URL: <http://economy.midural.ru/content/strategiya-razvitiya-gorno-metallurgicheskogo-kompleksa-sverdlovskoy-oblasti-na-period-do> (дата обращения 15.10.2023)

19. *Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Свердловской области в 2020 г.»* URL: <https://www.66.rosпотреbnadzor.ru/303> (дата обращения 25.10.2023).

20. *О состоянии и об охране окружающей среды в Российской Федерации в 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 гг. Государственный доклад*. URL: [GD-2018.pdf](http://mnr.gov.ru/GD-2018.pdf) (mn.gov.ru) (дата обращения 26.10.2022).

21. *О состоянии окружающей среды на территории Свердловской области в 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 гг. Государственный доклад*. URL: <https://mprso.midural.ru>. (дата обращения 24.10.2022).

22. *МУ 2.1.7.730-99. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. Методические указания (утв. Минздравом РФ 07.02.1999)*. URL: <http://base.garant.ru/4176143/?ysclid=lqgewaews460535224218>. (дата обращения 24.12.2023).

23. *СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания*. URL: <http://docs.cntd.ru/document/573500115?ysclid=lr93bp9q8o301734333> (дата обращения 24.12.2023).

24. *О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году. Государственный доклад*. Москва: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2023, 686 с.

25. *О состоянии окружающей среды на территории Свердловской области в 2022 году. Государственный доклад [Электронный ресурс]* URL: <https://mprso.midural.ru>. (дата обращения 09.01.2024).

Reference

1. Bobylev S.N., 2001. *Indikatory ustoichivogo razvitiya Rossii (ekologo-ekonomicheskie aspekty)* [Indicators of Russia's sustainable development (ecological and economic aspects)]. Moscow: TsPRP, 220 p.

2. Bogdanov N.A., Chuikov Yu.S., Rybkin V.S., 2013. *Metod otsenki sostoyaniya zemel' po indeksu zagryazneniya pochv* [A method for assessing the state of land according to the soil pollution index]. *Astrakhanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*, № 1 (23), P. 102-112.

3. Bobylev S.N., 2007. Indikatory ustoichivogo razvitiya: regional'noe izmerenie. Posobie po regional'noi ekologicheskoi politike [Indicators of sustainable development: a regional dimension. Handbook on regional environmental policy]. Moscow: Akropol', 60 p.
4. Staritsyna I.A., Belichev A.A., 2018. Analiz ispol'zovaniya narushennykh zemel' sverdlovskoi oblasti [Analysis of the use of disturbed lands in the Sverdlovsk region]. Agrarnyi vestnik Urala, № 04 (171), P. 31-36.
5. Ivan'o Ya.M., Chernigova D.R., 2012. Faktory effektivnogo ispol'zovaniya zemel'nykh resursov dlya razlichnykh kategorii predpriyatii [Factors of effective use of land resources for various categories of enterprises]. Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta, № 7, P.153-160.
6. Lazareva O.S., 2019. Otsenka effektivnosti upravleniya zemel'nymi resursami regiona. Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. [Assessment of the effectiveness of land management in the region]. Seriya: Ekonomika i upravlenie, № 2, P. 220-227.
7. Kislitsin D.P., 2007. Ekologo-ekonomicheskie indikatory otsenki effektivnosti zhiznedeyatel'nosti munitsipal'nogo obrazovaniya. [Ecological and economic indicators for assessing the efficiency of municipal activity]. Ekonomicheskii vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta, Vol. 5, № 4., Chast' 3, P. 195 - 200.
8. Bogatova I.B., 2017. Otsenka indikatorov ustoichivogo razvitiya na territorii Samarskoi oblasti. [Assessment of indicators of sustainable development in the Samara region]. Vestnik Volzhskogo universiteta im. V.N. Tatishcheva, Vol. 1, № 1, P. 180-185.
9. Tarasova N.P., Kruchina E.B., 2006. Indeksy i indikatory ustoichivogo razvitiya. Ustoichivoe razvitie: priroda-obshchestvo-chelovek [Indices and indicators of sustainable development. Sustainable development: nature-society-human]. Moscow: Izdatel'skii tsentr RKhTU im. D.I. Mendeleeva, Vol. II, P. 127–144.
10. Juan F. Velasco-Muñoz, José A. Aznar-Sánchez, Belén López-Felices, Daniel García-Arca, 2021. Sustainable land use and management. *Sustainable Resource Management: Modern Approaches and Contexts*, P. 179-197. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128243428000158> (data obrashcheniya 22.12.2023).
11. Mohammadhadi Hajian, Somayeh Jangchi Kashani, 2021. Evolution of the concept of sustainability. From Brundtland Report to sustainable development goals. *Sustainable Resource Management: Modern Approaches and Contexts*. P. 1-24. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128243428000183> (data obrashcheniya 15.11.2023).
12. Segnestam Lisa, 2003. *Indicators of Environment and Sustainable Development: Theories and Practical Experience*. Environment Department papers: Environmental economics series. World Bank, 53 p. URL: http://books.google.ru/books?id=Zbm3AAAAIAAJ&hl=ru&source=gbg_navlinks_s (data obrashcheniya 17.12.2023).
13. OECD Environmental Indicators. Towards sustainable development organization, 2001. URL: <http://cdn2.hubspot.net/hubfs/2642721/Recursos/Guias%20y%20Estandares/OCDE/OCDE%20-%20environmental%20indicators.pdf> (data obrashcheniya 11.11.2023).
14. Natsional'nyi ekologicheskii reiting [National environmental rating]. URL: <https://greenpatrol.ru/ru/regiony/sverdlovskaya-oblast> (data obrashcheniya 25.10.2023).
15. Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii okruzhayushchei sredy na territorii Sverdlovskoi oblasti v 2022 godu" [State report "On the state of the environment in the Sverdlovsk region in 2022"]. Ekaterinburg, 2023, 365 p. URL: https://mprso.midural.ru/uploads/2023/09/Gosudarstvennyi_doklad_2022.pdf (data obrashcheniya 15.10.2023).
16. Sverdlovskaya oblast' v tsifrakh 2023. Statisticheskii sbornik. Upravlenie Federal'noi sluzhby gosudarstvennoi statistiki po Sverdlovskoi oblasti i Kurganskoi oblasti [Sverdlovsk region in figures 2023. Statistical collection. Department of the Federal State Statistics Service for the Sverdlovsk region and the Kurgan region]. Ekaterinburg, 2023, 80 p.
17. Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'evykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2021 godu [State report on the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2021]. URL: <https://www.rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/>

202104/8cb09d4c5ef96b69de56b70811dd1d5a.pdf?ysclid=loh1jy52va851868313(data obrashcheniya 15.10.2023)

18. Strategiya razvitiya gorno-metallurgicheskogo kompleksa Sverdlovskoi oblasti na planovyi period do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda [Strategy for the development of the mining and metallurgical complex of the Sverdlovsk region for the planning period up to 2020 and for the future up to 2030]. URL: <http://economy.midural.ru/content/strategiya-razvitiya-gorno-metallurgicheskogo-kompleksasverdlovskoy-oblasti-na-period-do> (data obrashcheniya 15.10.2023)

19. Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii sanitarno-epidemiologicheskogo blagopoluchiya naseleniya v Sverdlovskoi oblasti v 2020 g." [State report "On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Sverdlovsk region in 2020"] URL: <https://www.66.rospos-trebnadzor.ru/303> (data obrashcheniya 25.10.2023).

20. O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy v Rossiiskoi Federatsii v 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 gg. [On the state and protection of the environment in the Russian Federation in 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, and 2021] Gosudarstvennyi doklad . URL: [GD 2018.pdf \(mnr.gov.ru\)](http://gd2018.pdf(mnr.gov.ru)) (data obrashcheniya 26.10.2022).

21. O sostoyanii okruzhayushchei sredy na territorii Sverdlovskoi oblasti v 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 gg. [On the state of the environment in the Russian Federation in 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, and 2021] Gosudarstvennyi doklad. URL: <https://mprso.midural.ru>. (data obrashcheniya 24.10.2022).

22. MU 2.1.7.730-99. Gigienicheskaya otsenka kachestva pochvy naselennykh mest. Metodicheskie ukazaniya (utv. Minzdravom RF 07.02.1999) [MU 2.1.7.730-99. Hygienic assessment of the soil quality of populated areas. Methodological guidelines (approved by the Ministry of Health of the Russian Federation 07.02.1999)]. URL: <http://base.garant.ru/4176143/?ysclid=lqgewaews460535224218>. (data obrashcheniya 24.12.2023).

23. SanPiN 1.2.3685-21 Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya [SanPiN 1.2.3685-21 Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors to the human]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/573500115?ysclid=lr93bp9q8o301734333> (data obrashcheniya 24.12.2023).

24. O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2022 godu. Gosudarstvennyi doklad [On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2022. State report]. Moscow: Minprirody Rossii; MGU imeni M.V. Lomonosova, 2023, 686 p.

25. O sostoyanii okruzhayushchei sredy na territorii Sverdlovskoi oblasti v 2022 godu. Gosudarstvennyi doklad [On the state of the environment in the Sverdlovsk region in 2022. State report] [Elektronnyi resurs] URL: <https://mprso.midural.ru>. (data obrashcheniya 09.01.2024).