



# ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

КОНФЕРЕНЦИЯ

## ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

VI ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ С УЧАСТИЕМ  
ИНОСТРАННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ

АПАТИТЫ • 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ

# **ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ГОРНОМ ДЕЛЕ**

(02-06 июня 2025 г.)

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

Апатиты  
Издательство ФИЦ КНЦ РАН  
2025

УДК 622.2:004.9

Т 29

Т29 Тезисы докладов VI Всероссийской научно-технической конференции с участием иностранных специалистов «Цифровые технологии в горном деле», 02-06 июня 2025 г. — Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2025. — 103 с.

В сборнике представлены материалы, содержащие анализ и аннотацию современного состояния применения цифровых технологий и компьютерного моделирования объектов и процессов горного производства для решения задач рациональной и безопасной отработки месторождений полезных ископаемых, геомеханического обеспечения горных работ, комплексной переработки минерального сырья, экономических и экологических проблем горного производства.

Материалы сборника могут представлять интерес для широкого круга исследователей и инженеров, аспирантов и студентов высших учебных заведений, занимающихся научными и практическими проблемами разработки месторождений полезных ископаемых.

ISBN 978-5-91137-538-6

Редакционная коллегия: Лукичев С.В. (отв. редактор), Наговицын О.В., Гилярова А.А., Никитин Р.М., Калинина О.В.

УДК 622.2:004.9

Конференция проведена при поддержке



ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



ЗАПИСКИ  
ГОРНОГО ИНСТИТУТА  
Издание Горного университета



«Руда и Металлы»  
Издательский дом

научно-технический и производственный  
ГОРНЫЙ  
ЖУРНАЛ КАЗАХСТАНА  
Қазақстанның кен журналы



СЕВЕР  
И РЫНОК  
Нормирование экономического порядка

ЗОЛОТО  
и технологии

ЖУРНАЛ  
Горная 30 ЛЕТ  
ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

ГЛОБУС  
ГЕОЛОГИЯ И БИЗНЕС



АРКТИКА  
ЭКОЛОГИЯ И ЭКОНОМИКА  
НАУЧНЫЙ И ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научно-технический и методический журнал  
РАЦИОНАЛЬНОЕ  
ОСВОЕНИЕ НЕДР

Научное издание

Технический редактор В. Ю. Жиганов

Подписано в печать 24.05.2025. Формат бумаги 60×84 1/8.

Усл. печ. л. 12. Заказ № 43. Тираж 300 экз.

ISBN 978-5-91137-538-6

doi: 10.37614/978.5.91137.538.6

© Горный институт ФИЦ КНЦ РАН, 2025

© ФИЦ «Кольский научный центр РАН», 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                                                                                                          | Стр.  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Аветисян И.М., Дмитриев С.В., Назарчук О.В.</b> Численная модель напряженно-деформированного состояния перспективного участка месторождения Хибинского массива как основа прогноза удароопасности . . . . .                                                           | 7     |
| <b>Амосов П.В.</b> К вопросу классификации схем естественного проветривания карьеров . . . . .                                                                                                                                                                           | 8-9   |
| <b>Амосов П.В., Светлов М.М.</b> Оценка загрязнения воздуха лабораторного дробильного помещения (по пыли) на базе метода численного моделирования . . .                                                                                                                  | 10-11 |
| <b>Анистратов К.Ю., Кузнецов С.А., Худин М.Ю., Седунов А.А.</b> Обоснование параметров экскаваторно автомобильных комплексов с использованием технологии цифровых двойников для условий рудника Железный АО КГОК . . . . .                                               | 12-13 |
| <b>Артемьев В.Б., Анистратов К.Ю., Худин М.Ю.</b> Принципы построения цифровой системой управления горным производством на горных предприятиях с открытым и подземным способом разработки . . . . .                                                                      | 13-15 |
| <b>Билин А.Л.</b> Развитие инструментов и методов стратегического планирования открытых горных работ . . . . .                                                                                                                                                           | 15-16 |
| <b>Бильдюк Е.В., Павловский А.И., Нарыжнова Е.Ю.</b> Применение нейросетевых технологий для анализа размера среднего куска взорванной горной массы . . . . .                                                                                                             | 16-18 |
| <b>Воронин Р.П., Шибаева Д.Н., Чернявский А.В.</b> Программное обеспечение для определения количественного и процентного содержания минеральных видов на поверхности горных пород с использованием технологий компьютерного зрения и искусственного интеллекта . . . . . | 18-19 |
| <b>Гилярова А.А.</b> Развитие методических основ оценки эффективности цифровизации горнодобывающих предприятий . . . . .                                                                                                                                                 | 19-20 |
| <b>Грунин А.П.</b> Классификация источников акустической активности на удароопасных месторождениях на основе определения расширенного набора параметров регистрируемых сигналов . . . . .                                                                                | 20-21 |
| <b>Данченков В.И.</b> Горная логистика и искусственный интеллект. Новая эра карьерных грузоперевозок . . . . .                                                                                                                                                           | 22-23 |
| <b>Дектерёв А.Ю.</b> Пример построения многовариантной блочной геомеханической модели . . . . .                                                                                                                                                                          | 24-25 |
| <b>Еценков И.А., Ильясов Б.Т.</b> Численное моделирование для прогнозирования сдвижения горных пород: примеры и результаты . . . . .                                                                                                                                     | 26-27 |
| <b>Жукова С.А., Онуприенко В.С., Стрешнев А.А.</b> Классификация источников сейсмических сигналов на КФ АО «Апатит» . . . . .                                                                                                                                            | 28    |
| <b>Журкина Д.С., Лавриков С.В., Лукичев С.В., Ревуженко А.Ф.</b> Применение стохастических методов клеточных автоматов для моделирования технологических схем добычи полезных ископаемых с выпуском . . . . .                                                            | 29-30 |
| <b>Журкина Д.С., Лавриков С.В., Ревуженко А.Ф.</b> Об одной модели расчета концентрации напряжений в породном массиве вблизи выработок . . . . .                                                                                                                         | 31-32 |
| <b>Зуенко А.А., Олейник Ю.А.</b> Методы удовлетворения ограничений в задаче среднесрочного планирования горных работ . . . . .                                                                                                                                           | 33-34 |
| <b>Зуенко А.А., Таран П.В.</b> Решение задачи проектирования дорог в карьере в рамках парадигмы программирования в ограничениях . . . . .                                                                                                                                | 35-36 |
| <b>Иванов А.С., Розанов И.В.</b> Проблематика применения беспилотных воздушных судов (БВС) при мониторинге открытых горных работ . . . . .                                                                                                                               | 37    |
| <b>Ильясов Б.Т.</b> Однородность массива горных пород как фактор удароопасности . . . . .                                                                                                                                                                                | 38-39 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                        |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Каймонов М.В.</b> 3D моделирование процесса формирования рудного штабеля и динамики продвижения фронта работ при кучном выщелачивании золота в холодном климате . . . . .                                                                                                           | 40-41 |
| <b>Каймонов М.В.</b> Компьютерное моделирование предохранительного льдопородного водоупорного барьера с целью предотвращения поступления рассолов водоносного комплекса в горные выработки . . . . .                                                                                   | 41-43 |
| <b>Калюжный А.С., Кузнецов Н.Н.</b> Применение специализированного ПО для оценки устойчивости карьерных откосов с учетом сдвиговых характеристик в образцах горных пород . . . . .                                                                                                     | 43    |
| <b>Кара С.В., Ибнеев Р.Д.</b> Методика проектирования отработки нагорной части Коашвинского месторождения посредством горно-геологической информационной системы DATAMINE STUDIO OP с использованием инструментов планирования . . . . .                                               | 44-46 |
| <b>Каравасев А.В.</b> Мониторинг гидрогеодинамической обстановки Коробковского железорудного месторождения КМА . . . . .                                                                                                                                                               | 46-48 |
| <b>Кисель И.В., Лаптев И.В.</b> Цифровые инструменты планирования ППР . . . .                                                                                                                                                                                                          | 48-49 |
| <b>Клюев А.Ю., Феоктистов А.Ю., Юсупов Г.А.</b> Моделирование флотации методом вычислительной гидрогазодинамики . . . . .                                                                                                                                                              | 49-50 |
| <b>Ковалев В.С., Малодушев К.А., Шамшура Д.А., Фигуркин Д., Шibaева Д.Н., Наговицын Г.О., Быстров В.В., Ковальчук М.А.</b> Разработка информационной системы формирования технологических схем стабилизации качества полезного ископаемого при ведении открытых горных работ . . . . . | 50-52 |
| <b>Константинов А.В., Рассказов И.Ю.</b> Локализация акустически активных зон в массиве горных пород с применением методов кластерного анализа . . . . .                                                                                                                               | 52-54 |
| <b>Константинов К.Н., Кулькова М.С., Орлов А.О.</b> Комплексный методический подход к обоснованию параметров крепления подземных горных выработок в сложных горно-геологических условиях . . . . .                                                                                     | 54    |
| <b>Котенков А.В., Русских И.Л., Кульминский А.А.</b> Автоматическое построение выемочных единиц и определение конструктивных потерь и разубоживания при проектировании подземной добычи руд . . . . .                                                                                  | 55-56 |
| <b>Криницын Р.В., Аленичев В.М.</b> Способ оценки достоверности определения напряжений в горном массиве методом щелевой разгрузки . . . . .                                                                                                                                            | 56-58 |
| <b>Кузнецов М.А., Достовалов Р.Н.</b> Опыт применения программного пакета GAMIT/GLOBK для оценки величины современных движений земной коры на локальных полигонах . . . . .                                                                                                            | 58    |
| <b>Кузнецов Н.Н.</b> Автоматизация и цифровизация процессов испытаний образцов горных пород . . . . .                                                                                                                                                                                  | 59    |
| <b>Лаптев В.В.</b> Опыт взаимодействия с АК Алроса, достижения, уроки, выводы . . . . .                                                                                                                                                                                                | 59-60 |
| <b>Лукичев С.В.</b> Цифровые технологии для горнодобывающей отрасли: импортозамещение и технологическая независимость . . . . .                                                                                                                                                        | 61-62 |
| <b>Малинникова О.Н., Одинцев В.Н., Ульянова Е.В., Пашичев Б.Н.</b> Цифровой анализ изображений микроструктуры угля с целью прогноза газодинамических явлений в угольных шахтах . . . . .                                                                                               | 62-64 |
| <b>Мелихов М.В. Калашник А.И., Остапенко С.П., Лебедик Е.Ю.</b> Комплексирование методов компьютерного моделирования и космического мониторинга хвостохранилищ в Арктике . . . . .                                                                                                     | 64-65 |
| <b>Мельников Н.Я.</b> Выявление особенностей развития деформаций бортов карьеров с использованием физического моделирования . . . . .                                                                                                                                                  | 65    |
| <b>Миков Л.С., Жукова И.А., Федоров С.О.</b> Мониторинг нарушенных земель в Кузбассе на основе данных дистанционного зондирования . . . . .                                                                                                                                            | 66-67 |

|                                                                                                                                                                                                                       |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Мороз Н.Е.</b> Опыт применения ПО «PRESS 3D URAL» для геодинамического районирования блочного массива горных пород . . . . .                                                                                       | 67-68 |
| <b>Моторин А.Ю., Баранов С.В.</b> Оценка опасности повторных толчков в информационной системе «AFTERSHOCK» . . . . .                                                                                                  | 68-69 |
| <b>Моторин А.Ю., Корчак П.А., Баранов С.В.</b> Аномальное распределение афтершоков сейсмического события с $M=3$ на Кировском руднике . . . . .                                                                       | 70-71 |
| <b>Наговицын О.В.</b> Направления развития ГГИС MINEFRAME . . . . .                                                                                                                                                   | 71-72 |
| <b>Неверов С.А., Неверов А.А.</b> Обоснование безопасных параметров подземных и открытых геотехнологий в рамках реализации цифровой модели месторождения . . . . .                                                    | 73-74 |
| <b>Ногин С.А.</b> Применение программной обработки данных для исследования особенностей сдвижения поверхности при отработке полезных ископаемых . . . . .                                                             | 75    |
| <b>Ожиганов И.А.</b> Локальный прогноз удароопасности и оценка напряженного состояния массива горных пород на рудных месторождениях с использованием метода акустической эмиссии . . . . .                            | 75-77 |
| <b>Остапенко С.П., Месяц С.П.</b> Методический подход к использованию спутниковых данных для оценки восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, с учетом абиотических факторов . . . . . | 77-78 |
| <b>Остапенко С.П., Опалев А.С.</b> Изучение структурно-механических свойств концентрированной водной суспензии тонкодисперсных частиц магнетита . . . . .                                                             | 78-79 |
| <b>Петров А.А., Месяц С.П.</b> Информационное обеспечение при экоинвестиционном подходе к восстановлению природных экосистем, нарушенных в ходе освоения георесурсов . . . . .                                        | 79-80 |
| <b>Потапов В.П., Попов С.Е.</b> Горная эндоскопия – интеллектуальные методы обработки видеопотоков . . . . .                                                                                                          | 80-82 |
| <b>Рассказов И.Ю.</b> Совершенствование методов и средств геомеханического мониторинга для раннего предупреждения горных ударов и снижения геодинамического риска . . . . .                                           | 82    |
| <b>Розанов И.Ю.</b> Анализ изменения кинематических параметров различных видов обрушений массивов прочных скальных пород . . . . .                                                                                    | 83    |
| <b>Романевич К.В., Мулев С.Н.</b> Примеры применения алгоритма машинного обучения для прогноза удароопасности по электромагнитному излучению горных пород . . . . .                                                   | 84-85 |
| <b>Рудов М.С.</b> Особенности системы экологического мониторинга для угледобывающих предприятий . . . . .                                                                                                             | 86    |
| <b>Рыбин В.В.</b> Определение рациональных конструкций бортов карьеров в скальных породах и мониторинг их устойчивости с использованием цифровых технологий . . . . .                                                 | 86-87 |
| <b>Семенова И.Э.</b> Геомеханическое моделирование на горном предприятии. Запросы и решения . . . . .                                                                                                                 | 87-88 |
| <b>Сидоров Д.В.</b> Опыт применения ПО «PRESS 3D URAL» для кратко-, средне- и долгосрочного прогноза удароопасности участков массива горных пород и руд . . . . .                                                     | 89    |
| <b>Солуянов Н.О.</b> Повышение рентабельности отработки карьеров с использованием ПО DIGGER SLOPE . . . . .                                                                                                           | 90-91 |
| <b>Степанов Г.Д.</b> Применение компьютерных моделей нарушенности и напряженно-деформируемого состояния массива для оценки устойчивости горных выработок . . . . .                                                    | 92    |
| <b>Счастливцев Е.Л., Юкина Н.И., Быков А.А.</b> О влиянии времени суток на загрязнение атмосферы мелкодисперсной пылью в районе угольного разреза . . . .                                                             | 93-94 |

|                                                                                                                                                                                                                  |         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| <b>Федоров А.Ю.</b> Организация подземного пункта наблюдений в пределах шахтного поля Коробковского месторождения КМА .....                                                                                      | 95-96   |
| <b>Федюков А.А., Будник Д.Р., Запрудин В.А., Топко Д.Л., Митькиных П.В.</b> Программный продукт «Горизонт» для взаимодействия служб подземного рудника и формирования паспортов крепления горных выработок ..... | 97      |
| <b>Хисматуллин Д.И.</b> Применение специализированного ПО RS-2 и RS-3 для прогнозирования отслоений и деформации массива при камерной добыче с дальнейшей оценкой вторичного засорения .....                     | 98      |
| <b>Хмелинин А.П.</b> Диагностика и контроль состояния массива горных пород и инженерных сооружений при разработке месторождений стратегического минерального сырья на больших глубинах .....                     | 98-99   |
| <b>Целовальникова О.Н., Кулькова М.С., Иванов А.С.</b> Выявление систем трещин с использованием БПЛА и программных средств .....                                                                                 | 99-100  |
| <b>Шестаков А.В., Зуенко А.А., Олейник А.Г., Федоров А.М., Датьев И.О.</b> Применение больших языковых моделей в системах информационного сопровождения горного производства .....                               | 101-102 |
| <b>Шибаета Д.Н., Асанович Д.А., Малодушев К.А., Шамшура Д.А.</b> Разработка программного продукта, обеспечивающего поддержку принятия решений при выборе режимов и условий сухой магнитной сепарации .....       | 102-103 |

## **ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО УЧАСТКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ ХИБИНСКОГО МАССИВА КАК ОСНОВА ПРОГНОЗА УДАРООПАСНОСТИ**

В настоящее время безопасная и эффективная отработка месторождений полезных ископаемых практически невозможна без должного уровня геомеханического обоснования всех основных технологических процессов. Данная задача особенно актуальна в начале отработки новых месторождений или их участков.

Юкспорское месторождение является частью апатит-нефелиновой залежи Хибинского массива. Исходя из геологического строения, морфологических характеристик рудной залежи и качества руд, месторождение делится на два основных участка: Юкспор (северо-западная часть) и Гакман (юго-восточная часть). Перспективный участок Гакман в настоящее время подготавливают к началу очистной выемки, ведется проходка горных выработок.

Одним из эффективных методов прогноза удароопасности на месторождениях является численное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов горных пород. С использованием программного комплекса Sigma GT разработана численная геомеханическая модель НДС в окрестности участка Гакман. При постановке граничных условий учтены все имеющиеся на сегодняшний день данные об измерениях напряжений на Юкспорском месторождении, в том числе непосредственно на участке Гакман, свидетельствующие о действии в массиве тектонических напряжений.

Сформирован расчетный вариант НДС массива с учетом фактического состояния горных работ на Юкспорском месторождении. Результаты расчетов показали, что фоновый уровень максимальных сжимающих напряжений в районе горизонтов +170 м – +320 м составляет 30 – 40 МПа с диагональным направлением  $\sigma_{\max}$  по отношению к простиранию рудного тела. В районе отметки +0 м значения  $\sigma_{\max}$  составляют 45 МПа, увеличиваясь до 50-55 МПа к дну модели на отметке -400 м. В зонах опорного давления под консолью налегающих пород Юкспора значения  $\sigma_{\max}$  достигают 70-80 МПа. Значения промежуточной компоненты главных напряжений  $\sigma_{\text{пр}}$  составляет 20-30 МПа. Минимальная компонента  $\sigma_{\min}$  соответствует собственному весу пород  $\gamma_H$ . В консоли нависающих пород над очистной выемкой формируется значительная зона растягивающих напряжений со значениями  $\sigma_{\min}$  2-3 МПа, что будет способствовать развитию обрушения при продвижении горных работ на участке Гакман.

Также проведено локальное моделирование двух одиночных выработок штрекового и ортового направлений на отметке +337 м участка Гакман: отрезной штрек 13 и МБО 1/26 (ВТО). Распределение  $\sigma_{\max}$  на контурах выработок как ортового, так и штрекового направления показывает формирование зон концентрации сжимающих напряжений на сопряжении одной из стенок выработки с кровлей вследствие того, что вектора  $\sigma_{\max}$  направлены под углом к обоим направлениям.

Разработанная численная модель НДС массива в окрестности участка Гакман Юкспорского месторождения позволяет оперативно оценивать изменение геомеханической ситуации при развитии горных работ, что повышает эффективность прогноза удароопасности на месторождении.

Разработанная модель НДС массива внедрена на производстве в Службе прогноза и предотвращения горных ударов КФ АО «Апатит».

## К ВОПРОСУ КЛАССИФИКАЦИИ СХЕМ ЕСТЕСТВЕННОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ КАРЬЕРОВ

По результатам выполненных исследований был сделан вывод о необходимости обсуждения со специалистами в области рудничной аэрологии, в частности аэрологии карьеров, вопроса, касающегося уточнения классификации схем естественного проветривания карьеров. Используя платформу международной конференции «Цифровые технологии в горном деле», автор в дополнение к публикациям 2024 г. еще раз предлагает обсудить обозначенную тему на представительном научном форуме.

В соответствие с классической работой Никитина В.С. и Битколова Н.З. «Проектирование вентиляции в карьерах» различают 4 схемы естественного проветривания карьеров, которые классифицируются через геометрические параметры карьеров (рисунок 1). Отдельное рассмотрение требуется для прямоточно-рециркуляционной схемы проветривания, поскольку указанная схема связана с разными углами откосов для групп верхних и нижних уступов. Остальные схемы проветривания определяются через три параметра, указанные в легенде рисунка 1:  $L$ ,  $H$  и  $\beta$ :

- при  $L/H < 5 \div 6$  и  $\beta > 15^\circ$  имеем рециркуляционную схему. Такая схема характеризуется наличием двух зон с разнонаправленными потоками воздуха: 1) по направлению ветра и 2) зона обратного потока;

- при  $L/H > 8 \div 10$  и  $\beta > 15^\circ$  имеем рециркуляционно-прямоточную схему. В этом случае часть карьера (левая при указанном на рисунке направлении ветра) проветривается по рециркуляционной схеме, а правая часть по прямоточной схеме;

- при любых  $L$  и  $H$ , но  $\beta \leq 15^\circ$  и равномерной отработке уступов подветренного борта имеем прямоточную схему, при которой не образуются застойные зоны.

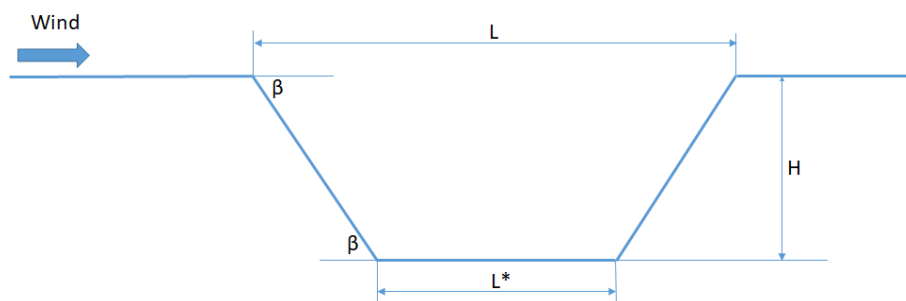


Рисунок 1 – Схематичное изображение карьера  
( $L$  – длина карьера в направлении движения ветра;  $H$  – глубина карьера;  $\beta$  – угол откоса борта карьера;  $L^*$  – размер подошвы (дна) карьера)

Если проварьировать указанные на рисунке параметры ( $L^*$  от 100 м до 500 м;  $\beta$  от  $10^\circ$  до  $80^\circ$ ;  $H$  от 100 м до 700 м), то, используя простейшие тригонометрические соотношения, несложно показать: чтобы исследовать все три режима проветривания, необходимо рассматривать неглубокие карьеры (100-200 м) с размерами подошвы 400-500 м.

Чтобы упростить построение в двухмерной геометрии модели карьера в программе COMSOL (пространственный шаг сетки построения (не расчетной!) по осям  $X$  и  $Y$  – 25 м) для дальнейших расчетов выбраны параметры, приведенные в таблице 1. Высота уступов принята равной 25 м, ширина бермы соответствует выбранному углу откоса.

На базе разработанных компьютерных моделей при указанных геометрических параметрах были, в первую очередь, подтверждены приведенные в таблице 1 схемы

естественного проветривания в условиях нейтральной стратификации атмосферы при разных значениях скорости ветра.

Таблица 1 – Варьируемые параметры модели при фиксированных  $H=150$  м и  $L^*=500$  м

| № | $\beta^0$ | L, м | L/H | Схема проветривания по «классикам» |
|---|-----------|------|-----|------------------------------------|
| 1 | ~10,6     | 2100 | 14  | прямоточная (П)                    |
| 2 | ~20,6     | 1300 | 8,7 | рециркуляционно-прямоточная (РП)   |
| 3 | ~31,0     | 1000 | 6,7 | практически рециркуляционная (РП)  |
| 4 | 45,0      | 800  | 5,3 | рециркуляционная (Р)               |
| 5 | ~56,3     | 700  | 4,7 | рециркуляционная (Р)               |
| 6 | ~63,4     | 650  | 4,3 | рециркуляционная (Р)               |

На примере карьера, который характеризуется рециркуляционно-прямоточной схемой проветривания (см. № 2 таблицы 1), исследовано влияние механизмов плавучести и фоновой стратификации  $S$  на схему проветривания карьера при варьировании скорости ветра на верхнем борту карьера от 1 до 5 м/с.

Рассмотрены ситуации состояния атмосферы от нейтрального ( $0,0$  °С/м) до инверсионного ( $0,025$  °С/м) с шагом  $0,005$  °С/м. Результаты анализа структуры потоков показали, что имеет место перестройка схем естественного проветривания. Для большей наглядности указанных переходов схем проветривания от рециркуляционно-прямоточной к рециркуляционной при вариации скорости ветра и параметра фоновой стратификации  $S$  в таблице 2 обобщены результаты моделирования и выполненного анализа.

Таблица 2 – Схемы проветривания карьера при вариации скорости ветра и параметра стратификации

| $S$ , °С/м | Скорость ветра, м/с |    |    |    |            |
|------------|---------------------|----|----|----|------------|
|            | 1                   | 2  | 3  | 4  | 5          |
| 0,000      | РП                  | РП | РП | РП | РП         |
| 0,005      | Р                   | Р  | РП | РП | РП         |
| 0,010      | Р                   | Р  | Р  | РП | РП         |
| 0,015      | Р                   | Р  | Р  | Р  | РП         |
| 0,020      | Р                   | Р  | Р  | Р  | ближе к РП |
| 0,025      | Р                   | Р  | Р  | Р  | Р          |

Основываясь на результатах выполненных исследований, высказано предложение для дальнейшего обсуждения среди специалистов в рудничной аэрологии:

**при классификации схем естественного проветривания карьеров помимо учета геометрических параметров необходимо учитывать, как минимум, термический фактор, например, через параметр фоновой стратификации.**

При этом классификация схем проветривания, предложенная классиками аэрологии карьеров Никитиным В.С. и Битколовым Н.З., безусловно, справедлива, но только для условий нейтральной стратификации атмосферы.

## **ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА ЛАБОРАТОРНОГО ДРОБИЛЬНОГО ПОМЕЩЕНИЯ (ПО ПЫЛИ) НА БАЗЕ МЕТОДА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

На базе метода численного моделирования выполнена оценка загрязнения воздуха лабораторного дробильного помещения (по пыли) в условиях одновременного функционирования трех единиц лабораторного оборудования (щековая и валковая дробилки, делитель руды ротационный). Для выполнения численных экспериментов в трехмерной постановке использована построенная в программном коде COMSOL компьютерная модель. Помимо указанного оборудования, модель помещения в форме прямоугольного параллелепипеда включала в себя пять приточных каналов вентиляции, расположенных в верхней части помещения, и три вытяжных канала вентиляции, размещенных в непосредственной близости от лабораторного оборудования.

Фиксированные параметры модели: размеры и расположение лабораторного оборудования и приточно-вытяжных каналов вентиляции; проектный массовый расход пыли, поступающей в рабочую зону помещения, равен  $1.3194 \cdot 10^{-6}$  кг/с.

Параметр варьирования: расход воздуха, удаляемый из помещения, в соответствии с диаграммой аэродинамических характеристик радиального вентилятора ВР 300-45-4 (от 0.833 до 3.333 м<sup>3</sup>/с).

Последовательность выполнения расчетов является двухэтапной с использованием необходимых для вычислений начальных и граничных условий:

на 1-м этапе получаем стационарное поле скорости и распределение коэффициентов турбулентной вязкости в приближении несжимаемой жидкости с использованием  $(k - \varepsilon)$ -модели турбулентности;

на 2-м этапе с учетом сложившегося к концу первого этапа поля скорости и коэффициентов турбулентного переноса загрязнений выполняется нестационарный расчет распространения пыли размером 35 мкм (в диаметре) в течение 1 часа работы оборудования.

Анализировались несколько выходных параметров: максимальная  $C_{max}$  и средняя  $C_{mean}$  концентрации пыли в помещении в зависимости от расхода  $Q$  удаляемого воздуха (см. таблицу и рисунок 1 для  $C_{mean}$ ); пространственное распределение пыли в лабораторном дробильном помещении при вариации расхода воздуха.

Графическая зависимость, представленная на рисунке 1 (там же отображена горизонтальная линия с уровнем ПДК) хорошо описывается степенной функцией вида  $C_{mean} = A Q^B$ . Для графика имеем  $A = 9.6137 \cdot 10^{-7}$ ,  $B = -1.1119$  и  $R^2 \approx 0.999$ .

Если ориентироваться на значение ПДК равное  $3 \cdot 10^{-7}$  кг/м<sup>3</sup>, то несложно показать: для обеспечения средней концентрации пыли в атмосфере помещения на уровне ПДК требуется обеспечить расход воздуха не менее 2.85 м<sup>3</sup>/с. При этом в помещении остаются области с загрязнением воздуха (по пыли) выше ПДК (см. таблицу).

Примеры пространственного распределения загрязнения по объему помещения для двух значений расходов воздуха (1.00 м<sup>3</sup>/с и 3.25 м<sup>3</sup>/с) представлены на рисунке 2а и 2б.

Представленные результаты можно рассматривать как наброски к методическому подходу по исследованию и анализу результатов численных экспериментов в задачах проветривания производственных помещений. В подходе используется принцип вариации, как обозначенного параметра (расход воздуха), так и других не менее важных технологических факторов. Авторы рассматривают возможность применения локальных отсосов с целью снижения поступления пыли в помещение, выбора мест размещения и размеров приточно-вытяжных каналов вентиляции, обоснования и использования

дифференцированных значений интенсивности пыления оборудования, в т.ч. с вариацией размеров областей пылевыделения, учета гранулометрического состава пыли и др.

Максимальная  $C_{max}$  и средняя  $C_{mean}$  концентрация пыли в помещении  
в зависимости от расхода  $Q$  воздуха

| $Q, \text{ м}^3/\text{с}$ | $C_{max}, \text{ кг/м}^3$ | $C_{mean}, \text{ кг/м}^3$ | $Q, \text{ м}^3/\text{с}$ | $C_{max}, \text{ кг/м}^3$ | $C_{mean}, \text{ кг/м}^3$ |
|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 0.25                      | $1.98 \cdot 10^{-5}$      | $4.79 \cdot 10^{-6}$       | 2.00                      | $1.23 \cdot 10^{-6}$      | $4.42 \cdot 10^{-7}$       |
| 0.50                      | $7.16 \cdot 10^{-6}$      | $2.06 \cdot 10^{-6}$       | 2.25                      | $1.09 \cdot 10^{-6}$      | $3.91 \cdot 10^{-7}$       |
| 0.75                      | $3.96 \cdot 10^{-6}$      | $1.28 \cdot 10^{-6}$       | 2.50                      | $9.80 \cdot 10^{-7}$      | $3.51 \cdot 10^{-7}$       |
| 1.00                      | $2.63 \cdot 10^{-6}$      | $9.27 \cdot 10^{-7}$       | 2.75                      | $8.88 \cdot 10^{-7}$      | $3.18 \cdot 10^{-7}$       |
| 1.25                      | $2.01 \cdot 10^{-6}$      | $7.27 \cdot 10^{-7}$       | 3.00                      | $8.13 \cdot 10^{-7}$      | $2.91 \cdot 10^{-7}$       |
| 1.50                      | $1.66 \cdot 10^{-6}$      | $5.98 \cdot 10^{-7}$       | 3.25                      | $7.49 \cdot 10^{-7}$      | $2.68 \cdot 10^{-7}$       |
| 1.75                      | $1.42 \cdot 10^{-6}$      | $5.08 \cdot 10^{-7}$       |                           |                           |                            |

Примечание. Затененные клеточки соответствуют гипотетическим значениям расхода воздуха не обеспечиваемые вентилятором ВР 300-45-4.

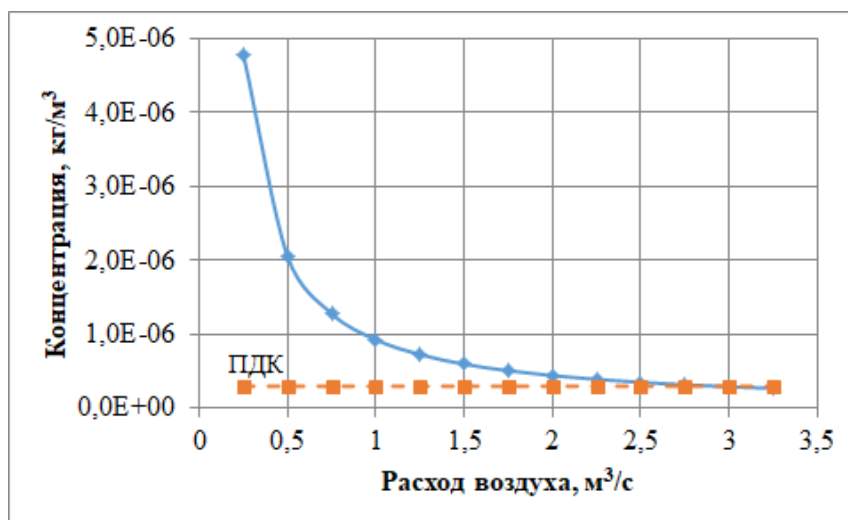


Рисунок 1 – Графическая зависимость средней  $C_{mean}$  концентрации пыли в помещении от расхода  $Q$  воздуха

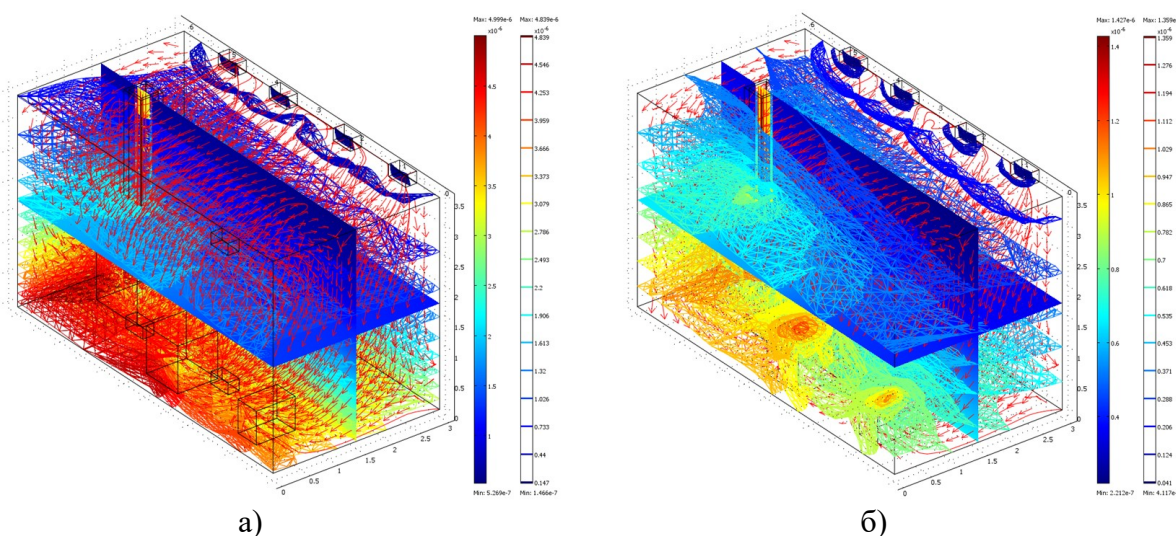


Рисунок 2 – Примеры пространственного распределения загрязнения по объему помещения при расходе воздуха: а)  $1.00 \text{ м}^3/\text{с}$  и б)  $3.25 \text{ м}^3/\text{с}$

## **ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭКСКАВАТОРНО АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ РУДНИКА «ЖЕЛЕЗНЫЙ» АО «КОВДОРСКИЙ ГОК»**

Разработан метод оптимизации геометрических и конструктивных параметров ковшей экскаваторов и кузовов самосвалов для повышения полезной нагрузки в ковше и полезной грузоподъемности самосвалов с целью повышения производительности работы экскаваторно-автомобильных комплексов за счет снижения количества циклов погрузки.

Метод предусматривает применение технологии цифровых двойников при создании модели развалов взорванной горной массы, имитационной модели процесса выемки и погрузки породы экскаваторами самосвалов с ковшами различной вместимости, формы и конструкции в кузова карьерных самосвалов различной вместимости и формы, а также прочностных расчётов ковша и кузовов самосвалов.

В качестве инструмента построения модели копания взорванного массива пород для обоснования оптимальных геометрических и конструктивных параметров ковша ЭКГ-20 выбрана программа Rocky DEM моделирования поведения сыпучих сред, использующая в качестве математического аппарата метод дискретных элементов (МДЭ, Discrete element method (DEM)), предназначенный для расчета результата взаимодействия большого количества твердых частиц.

ПО Rocky DEM обеспечивает определение следующих параметров:

- массы породы различной насыпной плотности и гранулометрического состава в ковшах и кузовах различных конструкций и параметров;
- времени набора и разгрузки ковша;
- сопротивление породы копанию в процессе черпания;
- скорость заполнения емкости ковша при заданном времени копания;
- время загрузки самосвала.

Результатом использования инструмента Rocky DEM является сравнительный анализ параметров экскавации ковшами различных геометрических и конструктивных параметров из развала взорванной горной массы.

В результате моделирования для условий рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» определены:

- оптимальная форма ковша канатного экскаватора ЭКГ18;
- угол наклона передней стенки к продольной оси рукояти;
- угол наклона козырька и зубьев ковша;
- ширина и глубина ковша;
- оптимальный гранулометрический состав взорванной горной массы забоя при среднем размера куска-  $D_{ср}=250$  мм;
- увеличенная вместимость ковша –  $23,5 \text{ м}^3$  (при штатной вместимости 18-20  $\text{м}^3$ ), что обеспечивает массу породы в ковше при насыпной плотности 2,3-2,4 т/ $\text{м}^3$  52,3-55 т и соответственно четыре цикла погрузки в Белаз-71530 номинальной грузоподъемностью самосвалов 220 т.

Проведенные прочностные расчеты корпуса ковша при ограничениях суммарной нагрузки на рабочее оборудование экскаватора ЭКГ-18 (20) в 85 т с использованием методом конечных элементов показали на устойчивость разработанной конструкции ковша конструкции КСМ 030. 600.000 (рисунок 1) при усилии подъема 170 т. При этом расчетная масса ковша с системой защиты и подвесом составляет 35 т. Соотношение массы ковша к его

к объему составила 1,49 т/м<sup>3</sup>, что соответствует этому параметру ковшей мировых производителей.

По результатам проведенных расчетов разработан комплект проектно-конструкторской документации ковша увеличенной вместимости 23,5 м<sup>3</sup>.

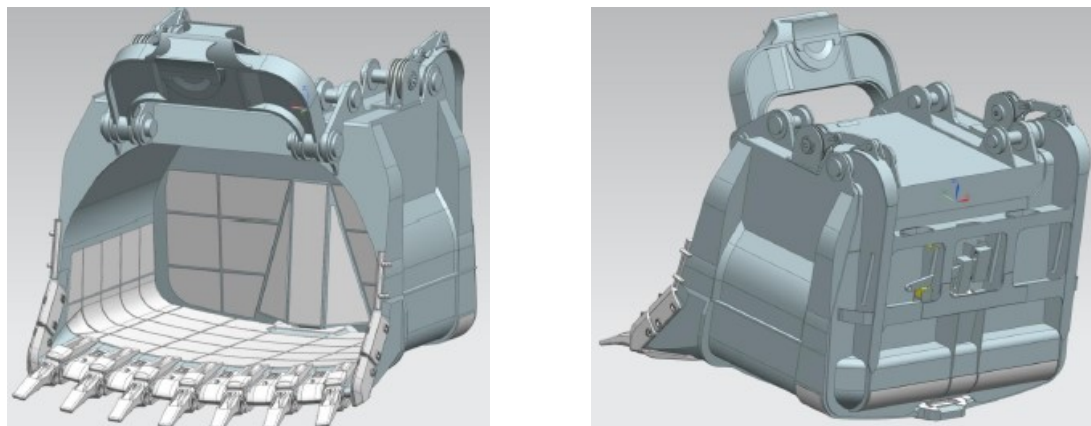


Рисунок 1 – Проект ковша повышенной вместимости 23,5-24 м<sup>3</sup>  
для экскаватора ЭКГ-18(20) КСМ 030.600.000

*Артемов В.Б.<sup>1</sup>, Анистратов К.Ю.<sup>2</sup>, Худин М.Ю.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>ООО «ГРК «ЕВРОХИМ», г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

e-mail: k.anistratov@ksc.ru

<sup>3</sup>ООО «Система максимум», г. Москва, Россия

## **ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ГОРНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ С ОТКРЫТЫМ И ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ РАЗРАБОТКИ**

Целью цифровой системы управления горным производством на горных предприятиях с открытым и подземным способом разработки является обеспечение максимальной производительности каждой единицы горного оборудования путем внедрения цифровых инструментов управления горно-геологическими и производственно-техническими данными, данными о техническом состоянии горно-шахтного оборудования, системой планирования ТОиР и управления производственными активами, интегрируемыми между собой в единое информационное пространство.

Комплекс цифровых инструментов, интегрированных в единую систему, обеспечивает автоматизацию взаимодействия между структурными подразделениями Предприятия, передачу, конвертацию, хранение, обновление данных в режиме реального времени, администрирование и визуализацию результатов обработки данных при внедрении оптимальных решений оперативного управления, планировании текущей деятельности на основе непрерывного мониторинга фактических данных производственной деятельности и расчете целевых значений ключевых показателей эффективности производственных активов на период времени: смена, сутки, месяц, год, - в соответствии с изменениями природно-технологических условий разработки, планов горных работ и динамики структуры комплексной механизации с учетом планируемого изменения показателей надежности каждой единицы техники в составе парков в соответствии с жизненными циклами в течение срока их службы и в целом парков основного и вспомогательного технологического оборудования (рисунок 1, 2).

Особенность методического подхода к управлению активами заключается во внедрении цифровой системы управления техническим состоянием парков горного оборудования (ЦСУ ТСП), предусматривающей интеграцию с действующими на предприятии цифровыми инструментами планирования и управления производством: ГГИС, ERP, АСД и др. и следующих программных модулей:

- модуля персонифицированного учета, мониторинга и прогноза технико-экономических показателей работы каждой единицы парков основного технологического и вспомогательного оборудования «Жизнь машин», в результате накопления и обработки потока данных, поступающих в базовый модуль «Жизнь машины» ERP систем (SAP, 1С и др.);
- модуля определения оптимальных сроков службы горно-шахтного оборудования по критерию минимума удельных накопленных затрат на владение в течение срока эксплуатации каждой единицы техники;
- модуля интеграции ПО «Жизнь машин» с SAP ТРО (1С ТООР) и другими реализованными на предприятии цифровыми инструментами;
- модуля управления динамикой структуры парков основного и вспомогательного парков карьерной техники или ГШО рудника.

В свою очередь, система управления техническим состоянием парков техники интегрируется с ГГИС МАЙНФРЭЙМ для имитационного моделирования работы технологических комплектов оборудования и планирования развития горных работ с учетом динамики структуры парков, времени в работе каждой единицы техники в рабочей зоне карьера (или рудника) и их часовой эксплуатационной производительности в прогнозируемых изменениях природно-технологических и организационных условий ведения горных работ.



Рисунок 1 – Схема цифровых инструментов управления горным производством АО «Ковдорский ГОК», интегрированная в единую информационную систему



Рисунок 2 – Схема цифровых инструментов управления горным производством ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий», интегрированная в единую информационную систему

**Билин А.Л.**

Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

e-mail: a.bilin@ksc.ru

## РАЗВИТИЕ ИНСТРУМЕНТОВ И МЕТОДОВ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Долгосрочное планирование является одной из важных задач проектирования карьеров и подземных рудников. Решение задачи обоснования режима горных работ при проектировании карьеров осуществляется довольно грубо, да к тому же часто присутствует фактическое отставание по вскрышным работам от проектных календарей режимов горных работ. Из-за этого устойчивость перспектив доработки МПИ на горнодобывающих предприятиях (ГДП) является недостаточно обоснованной.

Задача создания гибкого, учитывающего ряд входных параметров, но в то же самое время более «строгого» алгоритма обоснования режима горных работ, включающего в себя одновременно и оптимизацию направления углубки, является чрезвычайно сложной и остро актуальной. Программное приложение, реализующие математически корректный алгоритм долгосрочного планирования, может быть востребовано практически на каждом ГДП.

В Горном институте КНЦ РАН разработан и развивается автоматизированный методологический подход, основанный на сочетании математических, аналитических расчетных и эвристических методов, позволяющий оптимизировать направление углубки, обосновывать режим горных работ и отстраивать технологически корректные промежуточные рабочие положения карьера.

Теоретические основы и общие принципы управления развитием карьерных пространств в плоской и объемной постановке вопроса были разработаны профессором А.И. Арсентьевым еще в 3 четверти 20 века.

В качестве ограничивающих технологических параметров выступает скорость понижений горных (добычных) работ в карьере, которая ограничивается двумя уступами в год, и темп понижения вскрышных работ, который ограничивается двумя уступами в год.

Отстраивается «система этапных контуров», которая аналогична, но несколько отличается от «системы этапных контуров», применяемой при определении границ карьеров.

Опираясь на запасы в этапных контурах и на аналитический расчет параметров углубочной системы разработки рассчитываются и отстраиваются в модели промежуточные рабочие положения карьера с учетом системы коммуникаций на конечном контуре карьера. Рабочие состояния карьера включают в себя «этапные» участки временно-нерабочих бортов и зоны переноса бортов в новые «этапные» нерабочие положения. При этом активные площади концентрируются на встречной (относительно системы магистральных автосъездов) системе активных площадок, на которой располагается вспомогательная система коммуникаций. Вывозка горной массы осуществляется первоначально по вспомогательной системе автосъездов, а затем по основной.

При этом можно отметить, что довольно сложная и утомительная задача годового планирования по поиску готовых к выемке запасов и определению направлений развития горных работ в рамках годового планирования, фактически, отменяется, становясь простой и очевидной.

**Бильдюк Е.В., Павловский А.И., Нарыжнова Е.Ю.**

*БНТУ, г. Минск, Беларусь*

*e-mail: bil007bil@gmail.com*

## **ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА РАЗМЕРА СРЕДНЕГО КУСКА ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ**

Контроль гранулометрического состава взорванной горной массы является важной задачей в горном деле, напрямую влияющей на эффективность последующих процессов дробления, транспортировки и переработки. Традиционные методы, такие как ручной замер и ситовой анализ, обладают высокой трудоёмкостью и субъективностью данных. В условиях карьера «Гралёва» (ОАО «Доломит»), где добыча доломита ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) ведётся буровзрывным способом с применением скважинных зарядов и эмульсионных взрывчатых веществ (нитронит Э-70), эти проблемы усугубляются неоднородностью развала. Взорванная горная масса складировается в виде конусов, где на поверхности преобладают крупные фракции, а внутри — мелкие, что требует дифференцированного подхода к анализу.

Для решения задачи автоматизации контроля гранулометрического состава взорванной горной массы применялась свёрточная нейронная сеть на основе архитектуры, аналогичной моделям ChatGPT от OpenAI, адаптированная под задачи анализа изображений. Исследование проводилось на материалах карьера «Гралёва», где подготовка полезного ископаемого осуществляется в процессе буровзрывных работ с последующим складированием для просушки, а погрузка взорванной массы — экскаваторами ЭКГ-5А. Данные для анализа включали фотографии поверхности и внутренних слоёв конусов, сделанные с использованием квадратной вешки  $1.8 \times 1.8$  м (шаг разметки — 20 см). Для минимизации погрешности, вызванной неоднородностью материала, использовались два типа снимков: поверхность конуса (рисунок 1) и его внутренняя часть (рисунок 2).



Рисунок 1 – Взорванная масса на поверхности конуса

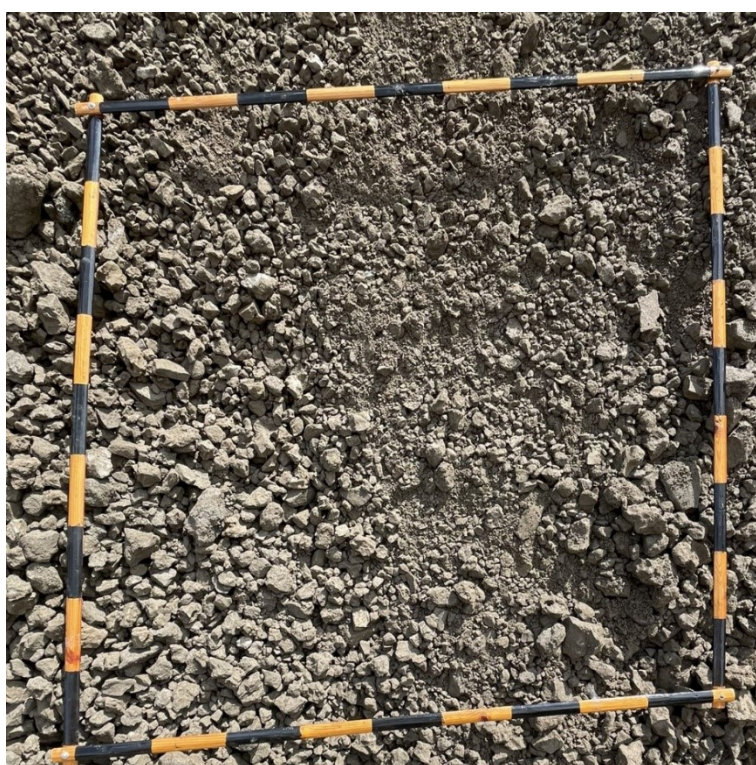


Рисунок 2 – Взорванная масса внутри конуса

Валидация модели проводилась путём сравнения с ручными замерах и ситовым анализом, что подтвердило её точность. Погрешность определения размеров не превысила 5%, а скорость обработки изображений составила 0.1–0.5 сек, что в 100 раз быстрее традиционных методов. Система смогла оценить размер взорванных кусков, сопоставив их с масштабом, заданным рейкой на изображении.

Результаты анализа выявили корреляцию между параметрами взрывных работ (тип ВВ — нитронит Э-70, количество скважин — 13) и показали, что на первом изображении средний размер кусков горной породы составляет ~6.9 см (медиана ~4.4 см), а количество обнаруженных фрагментов — 158. Во втором изображении порода более раздроблена: средний размер ~5.7 см (медиана ~3.7 см), а количество кусков увеличилось до 346. Визуально казалось, что фрагменты крупнее, но статистика выявила преобладание мелких частиц, особенно во втором случае. Качество дробления соответствовало требованиям дробильно-сортировочного оборудования, что подтвердило эффективность выбранных параметров буровзрывных работ. Нейросетевой подход также позволил снизить трудозатраты и минимизировать человеческий фактор.

Одним из ключевых ограничений метода стало влияние внешних факторов — освещения и ракурса съёмки — на точность сегментации. Кроме того, исследование было ограничено анализом доломита, тогда как адаптация алгоритма для других пород (известняк, гранит и др.) потребует дополнительных исследований. Несмотря на это, интеграция современных ИИ-решений, подобных ChatGPT, в процессы контроля качества взорванной горной массы открывает новые возможности для оптимизации горнодобывающих операций.

**Воронин Р.П.<sup>1</sup>, Шibaева Д.Н.<sup>1</sup>, Чернявский А.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Филиал МАУ в г. Апатиты, Россия

e-mail: shibaeva\_goi@mail.ru, Rom.voron@bk.ru

<sup>2</sup>Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

e-mail: alcher83@gmail.com

## **ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО И ПРОЦЕНТНОГО СОДЕРЖАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ВИДОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

В работе представлены первые результаты разработки и применения программно-аппаратного комплекса для анализа керновых образцов различных текстурно-структурных разновидностей апатитовых руд и вмещающих пород Хибинского массива, создания базы данных HSV-характеристик основных порообразующих минералов, на этой основе выявления критериев для идентификации Хибинского апатита в минеральной смеси и применения их в процессе опробования стенок взрывных скважин.

Аппаратная часть обеспечивает проведение многопараметрической оценки оптических характеристик образцов и минералов (окраски минерала и цвета люминесценции), расположенных на их поверхности за счет использования комплекса источников первичного излучения: видимой области спектра, источника белого света - светодиодной ленты с цветовой температурой 4000- 4200k, источников излучения дальней УФ области спектра (280 нм), УФ /фиолетовой области спектра (404 нм), а также возможности юстировки расположения устройства регистрации - камеры относительного исследуемой поверхности. Программная часть ArcticGeoVision обеспечивает сопровождение процесса измерения (взаимодействие пользователя с аппаратной частью), реализацию первичной обработки, способствующей повышению качества регистрации, анализа изображений (минералогическое картирование) и хранения, сформированных в результате этого, данных.

Программное решение, направленное на изучение поверхности кернового материала представлено следующими модулями: «Описание кернового образца» и «Минералогическое картирование». Программный модуль «Описание кернового образца», обеспечивает формирование первичной информации о керновом образце (принадлежность к типу руды

и/или породы, текстурная и структурная характеристика слагающих минералов, форма нахождения апатита и т.п.), с учетом принятых стандартов документирования кернов разведочных скважин апатит-нефелиновых руд Хибинского массива. В результате описания керновому образцу присваивается индивидуальный идентификатор, позволяющий при последующем анализе данных реализовать сравнительную оценку HSV-цветовых характеристик минералов на поверхности образцов с одинаковыми текстурно-структурными характеристиками, учитывать вариативность цветовой палитры апатита в зависимости от его рудной принадлежности и зернистости. С целью проверки эффективности предлагаемого экспресс-метода (разрабатываемого признака и программно-аппаратного комплекса, точности определения) модуль «Описание керна образца» дополнен возможностью реализации описания шлифов, сравнительной оценки результатов их картирования и областей расположения на поверхности керна образцов. На основании анализа базы данных результатов минералогического картирования шлифов и областей их расположения на поверхности керна образцов введение поправочных коэффициентов для случаев постоянства не идентификации минерала при сканировании неподготовленной поверхности керна (плоской стороны половинки керна).

Обработка изображений поверхности керна материала, выполняемая в программном модуле «Минералогическое картирование», направлена на формирование карты распределения минеральных включений, в основе которой экспертная разметка, учитывающая оценку физических свойств минералов таких как окраска, блеск, спайность, твердость. Повышение эффективности определения границ минералов обеспечивает анализа двух оптических характеристик минерала: окраски минерала и цвета люминесценции, возбуждаемой источником излучения видимой части спектрального диапазона (синеволетовой области, граничащей с ультрафиолетовым диапазоном), возможность их сравнения и выбора наилучшей для хранения.

**Гилярова А.А.**

*Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия*

*e-mail: a.gilyarova@ksc.ru*

## **РАЗВИТИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИФРОВИЗАЦИИ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

В современных условиях горнодобывающие предприятия проходят активный период цифровизации, что ведет к существенным изменениям технико-экономических показателей деятельности предприятий. Вместе с тем, единая методология оценки эффектов цифровизации недостаточно проработана, что затрудняет принятие обоснованных управленческих решений и разработку стратегий устойчивого развития.

Целью исследования является развитие и адаптация методических подходов к комплексной оценке экономических и экологических эффектов от внедрения цифровых технологий в горнодобывающей отрасли. Достижение цели позволит объективно оценивать как прямые, так и косвенные последствия цифровизации и принимать оптимальные управленческие решения.

Научная новизна исследования заключается в формировании комплексного подхода к оценке эффектов цифровизации, включающего пять основных методов: экспертный - привлечение экспертов для анализа экономических и экологических эффектов; метод учета затрат - количественная оценка экономии ресурсов и снижения издержек; метод сравнительного анализа доходов и прибыли - сопоставление экономических и экологических показателей до и после цифровизации; метод бенчмаркинга - сравнение результатов

внедрения цифровых технологий с лучшими практиками; метод расчета результирующих финансовых потоков - оценка совокупных финансовых результатов с учетом времени и экологических обязательств горнодобывающего предприятия.

Выполнение исследования позволило получить следующие результаты: разработан комплексный подход, объединяющий предлагаемые пять методов, что позволяет достаточно объективно оценить как экономические, так и экологические эффекты цифровизации; сформулированы методические рекомендации по применению, как автономно, так и в комплексе, предложенных методов; разработанные подходы дают возможность предприятиям объективно оценивать экономическую и экологическую эффективность цифровизации и принимать обоснованные управленческие решения.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенные методические подходы позволят горнодобывающим предприятиям объективно оценивать экономические и экологические эффекты цифровизации, принимать обоснованные управленческие решения по вопросам цифровизации, а также организовывать эффективный мониторинг влияния цифровизации на производственные процессы и экологическую обстановку.

Перспективы исследования связаны с продолжением разработки предложенных методических подходов, расширением их применения, а также проведением пилотных проектов и тестов на горнодобывающих предприятиях. Кроме того, предстоит дальнейшее совершенствование методов оценки, в том числе включение анализа прямых и косвенных экономических и экологических эффектов цифровизации.

**Грунин А.П.**

*Институт горного дела ДВО РАН – обособленное подразделение Хабаровского  
Федерального исследовательского центра, г. Хабаровск, Россия  
e-mail: lex188@mail.ru*

## **КЛАССИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА УДАРООПАСНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСШИРЕННОГО НАБОРА ПАРАМЕТРОВ РЕГИСТРИРУЕМЫХ СИГНАЛОВ**

Автоматизированная классификация источников акустической эмиссии (АЭ) на удароопасных месторождениях необходима для выделения из общего потока акустических данных информации, характеризующей процессы естественного трещинообразования в породном массиве и фильтрации сигналов техногенного происхождения. Для надежной классификации необходимо тщательное формирование признакового пространства сигналов. Параметры, регистрируемые системами мониторинга (например, «Prognoz-ADS»), часто недостаточны для точной идентификации типа источника сигналов. В работе предложен расширенный набор параметров, включающий четыре категории: базовые, спектральные, временные и скрытые признаки, извлеченные с помощью нейросетевой модели автоэнкодера. Комбинация этих параметров позволяет улучшить качество классификации.

**Первая** группа параметров включает в себя базовые характеристики сигналов, которые рассчитываются в реальном времени регистрирующим оборудованием:

Амплитуда – максимальное значение сигнала;

Длительность – общее время регистрации импульса;

Длительность фронта – время до достижения максимума амплитуды;

Порог регистрации – адаптивный порог STA/LTA;

Площадь сигнала – сумма модулей амплитуд;

MARSE – сумма квадратов амплитуд.

**Вторая** группа параметров представляет собой спектральные характеристики, рассчитываемые при обработке зарегистрированных сигналограмм импульсов:

Средняя частота – характеризует центральную точку в спектре, где сконцентрирована энергия сигнала;

Максимальная частота – пиковая частота спектра;

Частотный диапазон – диапазон частот, в пределах которого энергия спектра выше определенного порога;

Спектральная энтропия – мера хаотичности распределения энергии;

Асимметрия спектра – смещение энергии в высоко- или низкочастотную область.

Спектральные параметры отражают частотные особенности источников.

**Третья** группа параметров формируется на основе анализа времени регистрации сигналов и отражает временные закономерности и пространственно-временные характеристики регистрации импульсов:

Взрывное время – близость времени регистрации к стандартным интервалам проведения взрывных работ;

Время до ближайшего сигнала – помогает выделить сигналы источником которых являются буровые работы;

Глобальная плотность импульсов – число импульсов, зарегистрированных всеми доступными датчиками в течение короткого временного окна вокруг каждого импульса;

Локальная плотность импульсов – число импульсов, зарегистрированных конкретным датчиком в течение короткого временного окна вокруг каждого импульса.

**Четвёртая** группа представляет собой скрытые параметры, полученные с помощью нейросетевой модели автоэнкодера. Вариационный автоэнкодер сжимает спектрограммы в 7 скрытых признаков, сохраняя ключевые паттерны. Полученные скрытые признаки показывают внутреннюю структуру сигналов, недоступную традиционным аналитическим методам.

При подготовке расширенного набора из 22 параметров был проведен статистический анализ их распределения по различным типам источников (естественная эмиссия, буровые и взрывные работы). Этот анализ помог выявить закономерности и взаимосвязи между параметрами, а также обосновать необходимость применения дополнительных процедур масштабирования и нормализации.

Разработанный расширенный набор параметров сигналов акустической эмиссии был проверен на размеченных данных с использованием нескольких подходов машинного обучения, среди которых были искусственные нейронные сети и модель случайного леса. Для формирования выборки была использована база данных системы «Prognoz-ADS» Николаевского рудника за 2022 год. Совокупная точность классификации по всем типам импульсов составила 96,46 %.

Таким образом, проведённая работа подтвердила гипотезу о том, что увеличение признакового пространства за счёт предложенных новых групп параметров является эффективным способом улучшения работы интеллектуальных моделей классификации. Эти результаты обосновывают необходимость и полезность предложенного подхода к разработке расширенного набора параметров.

*Расчеты и анализ были выполнены на базе ЦКП «ЦИМС» ХФИЦ ДВО РАН.*

**Данченков В.И.**

*Кыргызский горно-металлургический институт имени У.Асаналиева Кыргызского государственного технического университета имени И.Раззакова, г. Бишкек, Кыргызская Республика*  
*e-mail: pravo.bravo.8@gmail.com*

## **ГОРНАЯ ЛОГИСТИКА И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ. НОВАЯ ЭРА КАРЬЕРНЫХ ГРУЗОПЕРЕВОЗОК**

### **Вводная часть**

Актуальность темы исследования: горнодобывающая отрасль стремится повысить эффективность производственных процессов при одновременном снижении затрат и негативного воздействия на окружающую среду. Карьерные самосвалы, будучи ключевым элементом технологической цепочки открытой добычи полезных ископаемых, представляют собой перспективный объект для внедрения автоматизации и систем искусственного интеллекта.

Личные мотивы выбора темы: исследование продиктовано стремлением найти оптимальные решения для повышения эффективности горнодобывающей отрасли через внедрение инновационных технологий автономного управления карьерной техникой и создание интегрированных интеллектуальных систем, способных существенно изменить организацию производственных процессов.

### **Основная часть**

Объект исследования: автономные карьерные самосвалы и системы их интеллектуального управления.

Предмет исследования: методы, алгоритмы и технологии автоматизации и оптимизации работы карьерных самосвалов посредством внедрения искусственного интеллекта.

Гипотеза: внедрение автономных интеллектуальных систем управления карьерными самосвалами может значительно повысить эффективность горнодобывающих работ, снизить эксплуатационные расходы и повысить безопасность.

Цели исследования: разработка комплексных технологических решений для создания полностью автономных карьерных самосвалов и формирование научной основы для перехода к автономным карьерам.

### **Задачи исследования:**

- разработка адаптивных алгоритмов ИИ для управления самосвалами;
- создание инновационных методов восприятия окружения;
- разработка методов принятия решений в неопределенных условиях;
- проектирование систем мультиагентной координации самосвалов;
- создание систем предиктивного обслуживания и оптимизации энергопотребления.

Методы исследования: применялся комплексный подход, включающий математическое моделирование, компьютерные симуляции, нейросетевые технологии и методы машинного обучения для анализа транспортных процессов в карьере.

Практическая значимость работы: результаты исследования могут быть полезны для горнодобывающих компаний, производителей карьерного транспорта, разработчиков систем автоматизации и искусственного интеллекта, а также образовательных учреждений, готовящих специалистов по эксплуатации автономных систем.

Основное содержание работы: исследование рассматривает существующие решения в области автономных карьерных самосвалов (Caterpillar, Komatsu, КАМАЗ), анализирует ключевые технологические инновации в этой сфере и предлагает новые подходы к оптимизации работы карьерного транспорта. Проводится компьютерное моделирование

систем автономной навигации, предиктивного обслуживания и мультиагентной координации самосвалов.

#### **Заключение**

Основные выводы. Разработанные алгоритмы ИИ позволяют адаптироваться к меняющимся условиям карьера без предварительного программирования:

- разработанная система позиционирования на основе нейросетей обеспечивает высокую точность локализации карьерного транспорта даже в условиях ограниченной видимости, что позволяет снизить время простоя самосвалов на 18%;

- созданная модель прогнозирования технического состояния автономного самосвала имеет точность предсказания неисправностей 92%, что сокращает количество внеплановых ремонтов на 34%;

- алгоритмы динамического управления скоростью и режимами движения автономных самосвалов демонстрируют снижение расхода топлива на 15-22% и увеличение срока службы основных узлов на 25%;

- система коллективного (мультиагентного) принятия решений для группы из 7 самосвалов обеспечивает увеличение общей производительности на 23% и сокращение простоев на точках погрузки на 31%.

Результаты и личная значимость проделанной работы: создана новая модель оптимизации логистики карьерного транспорта с учетом множества динамических факторов. Предложенные системы значительно улучшают работу автономных самосвалов, что подтверждает правильность выдвинутой гипотезы и демонстрирует практическую ценность исследования.

Перспективы продолжения работы: дальнейшее развитие направлено на полную автоматизацию карьеров, создание коллективного интеллекта для самосвалов, интеграцию с беспилотными летательными аппаратами, разработку специализированных образовательных программ и формирование экосистемы сервисов вокруг автономных самосвалов. Результаты исследования создают научную основу для развития интеллектуальных систем управления горным транспортом с акцентом на эффективность, безопасность и экологичность.

#### **Список использованных источников:**

1. Бигель Н. В. Преимущества и возможности роботизированного карьерного самосвала грузоподъемностью 130 тонн // ГИАБ. - 2017. - № S38. - С. 53–57.
2. Клебанов Д.А., Маликов М.А., Сидемов Д.Н. Применение автономной и дистанционной управляемой техники на открытых горных работах //Горная промышленность. - 2020. - №6. - С. 14-20.
3. Хазин М. Л., Тарасов П. И., Фурзиков В. В., Тарасов А. П. Эколого-экономическая оценка использования карьерных самосвалов // Изв. вузов. Горный журнал. - 2018. - № 7. - С. 85–94.
4. Хазин М.Л. Роботизированные карьерные самосвалы //Известия Уральского государственного горного университета. - 2020. - Вып.3(59). - С. 123-130.

## **ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ МНГОВАРИАНТНОЙ БЛОЧНОЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

Построение блочных (интерполяционных) геомеханических моделей позволяет контролировать пространственное распространение основных геомеханических характеристик во всём объёме рассматриваемого горного массива. По своему смыслу такая модель представляет собой пространственно привязанный массив имеющихся оценок геомеханических характеристик и результат их пространственной интерполяции, воспроизводящей исходные данные и имеющиеся в них закономерности. Подобные модели существенно проще в построении, чем симуляционные, однако позволяют решать многие задачи обеспечения безопасности горных работ. По этой причине построение блочных геомеханических моделей в настоящее время является повсеместно распространённой практикой. Тем не менее у традиционного подхода имеется ряд проблем:

- Традиционный рабочий процесс построения блочной геомеханической модели предполагает ручное выполнение всех операций, что делает его достаточно трудоёмким. При построении каждой новой модели все операции приходится заново выполнять вручную.

- Из-за того, что все операции моделирования выполняются вручную, при появлении новых данных возникает дилемма: слишком частое обновление модели отнимает слишком много времени, но если обновление происходит слишком редко, модель постоянно находится в не совсем актуальном состоянии.

- Ручное выполнение процедур моделирования привносит субъективность в модель. При этом ответственность за корректность модели в значительной степени ложится на автора.

- Ручное выполнение ключевых процедур моделирования делает невозможным полноценное применение техник многовариантного моделирования и анализа неопределённости модели, успешно применяемого в задачах геологического моделирования с 90-х годов XX века, и к настоящему времени нашедших признание не только в зарубежной, но и отечественной практике. В нефтегазовой отрасли подобные техники в настоящее время получили настолько широкое распространение, что были зафиксированы в современной международной системе классификации ресурсов углеводородного сырья PRMS [1].

Ключевой идеей, позволяющей перейти от ручного моделирования к автоматизированному, является переход от моделирования на основе ручных операций к моделированию на основе Workflow (графа моделирования), когда модель представляет собой не столько набор объектов, сколько набор инструкций, позволяющих получить из исходных данных этот набор объектов. Помимо возможности автоматического документирования процесса моделирования и автоматизации рутинных операций, технология моделирования на основе Workflow является основой, позволяющей перейти от детерминированного моделирования к многовариантному (стохастическому). Основной проблемой, сдерживающей использование многовариантного подхода при моделировании в горнодобывающей отрасли, в том числе при создании блочных геомеханических моделей, долгое время являлась необходимость ручного выполнения ключевых операций моделирования. Для моделируемой геологической среды характерно наличие как плавных градиаций свойств, так и резких скачкообразных переходов значений. До недавнего времени ни один из алгоритмов интерполяции не позволял одновременно воспроизводить и плавные градиации, и резкие переходы значений, поэтому моделирование выполнялось в два этапа. На первом этапе с помощью ручного оконтуривания или условного моделирования выделялись

пространственные домены, то есть области с относительно однородными свойствами, а затем для каждого из таких доменов выполнялась интерполяция интересующих параметров. В 2019 году был впервые предложен алгоритм интерполяции Amazonas, позволяющий одновременно воспроизводить как плавные градации значений, так и резкие скачкообразные переходы, основываясь только на исходных данных [2]. Метод автоматически воспроизводит исходные данные и имеющиеся в данных закономерности, и при этом не опирается на теорию стационарных случайных процессов, что позволяет ему корректно работать как в статистически стационарном, так и в нестационарном случае, когда геостатистический подход неприменим [3]. Метод корректно работает с существенно асимметричными и многомодальными распределениями значений, а также обладает выраженными свойствами робастности, что делает его устойчивым к ошибочным и аномальным значениям в исходных данных. Возможность работы напрямую с исходными данными, без необходимости их ручного препроцессинга или статистических проверок, в сочетании с возможностью одновременной интерполяции и плавных градаций и резких границ, открывает возможность существенной автоматизации процесса моделирования.

В работе на примере реального месторождения рассмотрено построение многовариантной блочной геомеханической модели в отечественном программном комплексе тНавигатор. Продемонстрирована возможность автоматизированного построения реалистичной модели в условиях статистической нестационарности, когда геостатистический подход неприменим, без необходимости выделения доменов и других ручных манипуляций с данными. Показана возможность согласованного автоматизированного прогнозирования нескольких параметров. Приведён пример построения литологической модели, а также возможность реалистичного прогнозирования геомеханических характеристик напрямую, без литологического моделирования. Продемонстрированы средства анализа исходных данных и контроля качества результатов моделирования, позволяющие обосновать корректность построенной модели. Принципиальными моментами является то, что данная модель может быть без дополнительных трудозатрат автоматически обновлена при появлении новых данных, а также то, что она является многовариантной, что позволяет решать задачи оценки устойчивости прогноза любого параметра для любого блока модели [4].

#### **Список использованных источников:**

1. Дегтерёв А. Ю. Перспективы использования многовариантного моделирования для подсчёта запасов и оптимизации геологоразведочных работ // Геология и недропользование. – 2023. – № 2(12). – С. 55-68
2. Degterev A.Y. Amazonas – Stochastic Method of Modeling Geological Systems with Arbitrary Distribution of Properties, Including Statistically Unsteady Ones, Based on Non-Parametric Statistics // EAGE Geomodel 2019. – 2019. – Conference Proceedings. – p. 1-5. DOI:10.3997/2214-4609.201950029
3. Degterev A.Y. The Hypothesis of Stationarity in Geostatistics and Its Influence on The Reliability of The Created Models // EAGE Geomodel 2021. – Conference Proceedings. –p. 1-6. DOI:10.3997/2214-4609.202157092
4. Дегтерёв А.Ю., Кузьмин С.В. Пример построения многовариантной блочной геомеханической модели в программном комплексе тНавигатор // Горный журнал. – 2024. – №1 (2318). – С. 100-108.

**Еценков И.А.<sup>1</sup>, Ильясов Б.Т.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Уральский филиал АО «ВНИИМИ», г. Екатеринбург, Россия  
e-mail: info@ufvniimi.ru

<sup>2</sup>ООО «Скиентия», г. Екатеринбург, Россия  
e-mail: info@scientia.ru

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СДВИЖЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД: ПРИМЕРЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

Прогнозирование процессов сдвижения в подрабатываемой подземными горными работами толще пород является сложной задачей, не имеющей на сегодняшний день окончательного решения. Существующие эмпирико-аналитические подходы к прогнозу сдвижения породного массива зачастую учитывают лишь крепость горных пород и геометрию выработанного пространства, в то время как трещиноватость, тектоническая нарушенность, природное поле напряжений, литологическое строение массива учитываются косвенно, либо вообще остаются без внимания.

Растущее применение систем разработки с закладкой выработанного пространства вносит дополнительную неопределенность в прогнозирование процесса сдвижения. Методические документы, разрабатывавшиеся в 60-70-ых гг., основаны на фактическом материале, собранном на рудниках, отрабатываемых системами с обрушением. Кроме того, данная технология вносит дополнительные факторы, сильно влияющие на процесс сдвижения: прочность и деформируемость закладочного материала, степень закладки выработанного пространства и пр. С годами увеличивается и средняя глубина ведения горных работ.

При этом от точности прогноза процесса сдвижения зависит расположение выработок, объёмы горных работ и, соответственно, эффективность и безопасность горного производства.

Для повышения точности и обоснованности прогнозирования может применяться численное моделирование. При этом особенно перспективным подходом выглядят численные методы механики дискретной среды и гибридные методы, такие как метод конечно-дискретных элементов. Главной особенностью данных методов является моделирование потери сплошности материала и анализ дальнейшего взаимодействия отдельных блоков. Указанная особенность позволяет моделировать образование трещин и обрушения пород в явном виде, что ранее не представлялось возможным сделать другими методами. Потеря сплошности (образование трещин) является существенным аспектом при анализе последствий подработки того или иного объекта, наряду с определением расчетных деформаций и сравнении их с допустимыми.

Метод конечно-дискретных элементов реализован в отечественном ПО Prorock, разрабатываемом компанией Scientia. С применением Prorock в последние годы решались несколько задач прогноза сдвижения горных пород на различных объектах ведения горных работ.

Для двух крупных медноколчеданных месторождений выполнялось моделирование отработки балансовых запасов с целью обосновать положение границ различных областей сдвижения в массиве: обрушений, трещинообразования, опасных сдвижений и плавных сдвижений. Горные работы на добывающих предприятиях ведутся вариациями камерных систем разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями.

Моделирование проводилось с учетом результатов инструментальных наблюдений за проявлениями процесса сдвижения на земной поверхности и в массиве пород, а также факторов, указанных выше (трещиноватость, поле напряжений и пр.). Пример оценки результатов моделирования показан на рисунке 1.

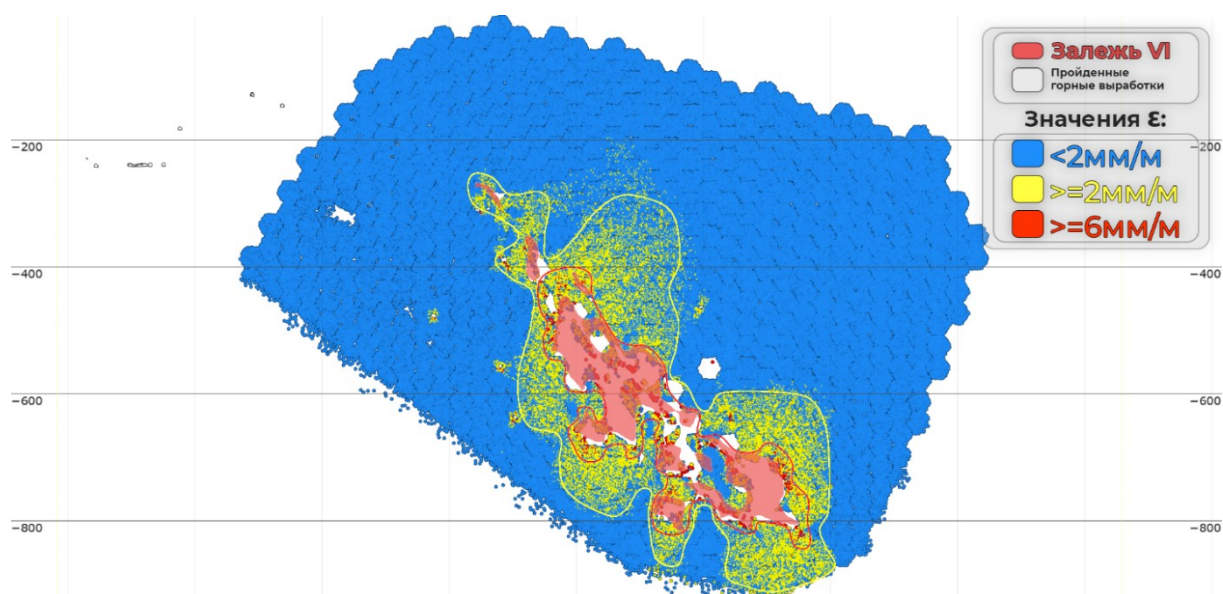


Рисунок 1 – Пример оценки деформаций по результатам моделирования

Ниже приведён неполный ряд выводов, полученный по результатам моделирования:

- на обоих рудниках при планируемых глубинах отработки (600 м и более) процесс сдвижения достигает земной поверхности, но без формирования зоны опасного влияния, то есть деформации достигают величин менее допустимых для наиболее ответственных зданий и сооружений;
- расположение подготовительных и капитальных выработок может быть скорректировано с уменьшением объема их проходки;
- подтверждена существенная роль в проявлении процесса сдвижения неоднородности литологического состава – форма той или иной области зависит от распределения на рассматриваемом участке крепких пород и пород, ослабленных метаморфизмом;
- сравнение с результатами эмпирических расчётов по формулам из действующих «Временных правил охраны...» (1986, 1993), подтвердило их применимость с некоторыми корректировками для обоснования положения областей сдвижения при применении твердеющей закладки.

По третьему месторождению в 2024 году выполнено моделирование для оценки нарушенности подработанного массива из-за горных работ. На данном руднике был накоплен некоторый объём пустот, который планировалось заложить в будущем.

С помощью моделирования выполнен прогноз развития процесса вывалообразования и сдвижения горных пород. Оценена устойчивость подработанного массива и целиков. Произведена оценка размеров зон трещинообразования и обрушения.

По итогам работы принято решение о возможности оставить незаложенными около 50% камер.

Численное моделирование является инструментом, который при должном обосновании параметров и условий позволяет принимать обоснованные решения актуальных вопросов, которые не находят отражения в действующей нормативной документации: оценка влияния закладки выработанного пространства при отработке рудной залежи на состояние толщи и земной поверхности, подработка объектов подземного комплекса выработок и пр. В этой связи возникает необходимость в более детальной проработке критериев подработки подземных горных выработок (допустимые деформации), а также других вопросов сдвижения горных пород, недостаточно отраженных в нормативной документации.

**Жукова С.А.<sup>1,2</sup>, Онуприенко В.С.<sup>3</sup>, Стрешнев А.А.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

e-mail: svetlana.zhukowa@yandex.ru

<sup>2</sup>Филиал МАУ в г. Апатиты, Россия

e-mail: svetlana.zhukowa@yandex.ru

<sup>3</sup>АО «Апатит», г. Кировск, Россия

e-mail: VOnuprienko@phosagro.ru, astreshnev@phosagro.ru

## **КЛАССИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА КФ АО «АПАТИТ»**

При отработке апатит-нефелиновых месторождений Хибин существует проблема возникновения опасных геодинамических явлений. В основе процессов подготовки и реализации таких явлений лежит изменение напряженно-деформированного состояния массива горных пород. При ведении горных работ на больших территориях существенно растет скорость деформирования пород и происходит перераспределение напряжений по сравнению с естественными процессами в нетронутом массиве при тектонической и гравитационной нагрузках. Эти процессы приводят к росту сейсмичности на отработываемых месторождениях, в связи с этим на подземных рудниках ведется сейсмический мониторинг с помощью автоматизированных систем контроля состояния массива (АСКСМ). Целью наблюдения является своевременное выявление удароопасных зон на участках ведения горных работ. Региональный прогноз удароопасности на подземных рудниках КФ АО «Апатит» основан на непрерывной регистрации сейсмических данных, которые проходят экспертную идентификацию по определенным параметрам. Составлена классификация источников сейсмических сигналов по действующей идентификации файлов волновых форм. Выделено четыре основных категории источников сейсмических колебаний: динамические проявления горного давления; взрывные работы; работающие машины и механизмы; сейсмичность за зоной контроля. Установлено, что для корректной классификации источников сигналов иногда требуются сведения о наличии геологических нарушений, о маркшейдерской съемке кромки обрушения, о технологических и массовых взрывах и др.

Проведен статистический анализ всех зарегистрированных АСКСМ сейсмособытий. За весь период мониторинга на Кировском руднике с июня 1987 г. было зарегистрировано более 1,5 млн. сейсмособытий от различных источников, на Расвумчоррском руднике с апреля 2001г. – около 900 тыс. событий. Доля источников от динамического проявления горного давления на Кировском руднике составляет 22% всех сейсмособытий, на Расвумчоррском руднике – 26%.

В целом, все составляющие информационного потока носят стохастический, гауссовский характер и могут обрабатываться только в определенном вероятностном приближении. Поэтому при анализе сейсмоактивности существенными являются статистические характеристики как всего потока, так и его составляющих (фон, полезный сигнал). Как показала многолетняя практика, некоторые сейсмические события по статистическим параметрам являются трудноотличимыми для их идентификации и классификации без определенной, дополнительной информации.

**Журкина Д.С.<sup>1</sup>, Лавриков С.В.<sup>1</sup>, Лукичев С.В.<sup>2</sup>, Ревуженко А.Ф.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт горного дела имени Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия

e-mail: daria.zhurk@gmail.com, lvk64@mail.ru, revuzhenko@yandex.ru

<sup>2</sup>Горный институт КНЦ РАН, г. Анапты, Россия

e-mail: s.lukichev@ksc.ru

## **ПРИМЕНЕНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ С ВЫПУСКОМ**

В настоящее время для автоматизации процессов инженерного обеспечения горных работ на ряде горнорудных предприятий страны активно внедряется отечественное программное обеспечение (ПО). Одним из лидеров на рынке отечественного ПО в данной области является горно-геологическая информационная система (ГГИС) MainFrame [1,2]. При использовании ГГИС MainFrame с целью геомеханического обоснования эффективности применяемых технологических схем добычи, востребованным является программный инструмент для получения сравнительно быстрой оценки отработки очередного блока на основе заданных геометрии и физико-механических свойств слагающих его пород. Иными словами, существует потребность в экспресс-методе анализа потерь и разубоживания.

Одним из широко распространенных методов моделирования движения раздробленной горной массы является численный метод дискретных элементов (МДЭ) [3,4]. В МДЭ рассматривается реальный механизм движения и взаимодействия отдельных частиц. В различных модификациях МДЭ учитывает упругое и вязкое взаимодействие, трение скольжения и трение качения, адгезионные и капиллярные силы, теплоперенос и др. К недостаткам МДЭ следует отнести высокие временные затраты на проведение вычислений. Во избежание ошибок используется большое число дискретных частиц (сотни тысяч), применяются сравнительно точные алгоритмы расчета сил между ними, осуществляется интегрирование уравнений движения частиц с малым временным шагом, обеспечивающим корректность расчетов с точки зрения выполнения фундаментальных законов сохранения.

В настоящей работе предлагается иной подход к моделированию кинематических параметров выпуска, основанный на применении стохастических моделей клеточных автоматов (МКА). В механике горных пород и сыпучих сред стохастические методы начали развиваться в работах Кандаурова, Литвинишина и сотрудников [5,6]. В [7] данный метод был независимо предложен для исследования смещения сыпучих материалов. В [8,9] стохастические модели применялись для анализа кинематики сыпучих сред, в том числе, локализации сдвигов в плоской постановке.

В МКА среда представлена набором ячеек (клеток), каждая из которых обладает определенным правилом деформирования: если материал из одной ячейки перемещается, то на его место с определенной вероятностью поступает материал из соседней ячейки. Построение МКА-модели сводится к заданию ячеистой структуры тела и определению вероятностей для перемещения материала из одной ячейки в другую. Основным преимуществом МКА является возможность учета различных факторов: форма и размеры частиц, плотность, влажность, слеживаемость и способность к разрыхлению, внешнее давление, разрушение и измельчение частиц, локализация деформаций, формирование завес и свободной поверхности с заданным углом откоса. К недостаткам МКА можно отнести тот факт, что данные модели являются имитационными, т.к. в них не рассматриваются поля напряжений и деформаций.

В настоящей работе предложена трехмерная модель клеточных автоматов и при задании вероятностей даны правила учета следующих физико-механических свойств среды: плотность различных компонентов руд и вмещающих пород, коэффициент разрыхления, крупность фракций, влажность, способность к заклиниванию и формированию арочных завесаний, внешнее горное давление. На рисунке 1 показаны примеры типичных картин выпуска, рассчитанные с помощью МКА-модели.

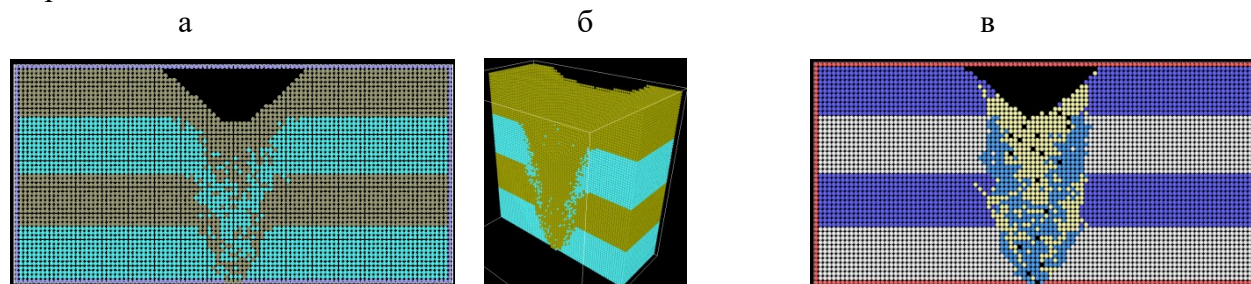


Рисунок 1 – Типичные картины выпуска: а) 2D постановка; б) 3D постановка; в) формирование эллипсоида разрыхления и арочных завесаний в процессе выпуска

Сравнительный анализ кинематики выпуска на основе МКА с результатами моделирования с помощью модели МДЭ показал, что МКА-модель адекватно описывает гравитационное движение раздробленных пород при различных условиях нагружения. Установлено, что временные затраты на вычисления с использованием МКА на два порядка ниже аналогичных затрат с использованием МДЭ. Можно заключить, что стохастические модели клеточных автоматов являются перспективными для встраивания в Горно-геологические информационные системы с целью проведения моделирования и обоснования технологических схем добычи полезных ископаемых с использованием выпуска горной массы.

#### Список использованных источников:

1. Лукичев С.В., Наговицын О.В. Автоматизированная система MineFrame 3.0 // Горная промышленность. – 2005. – № 6. – С. 32-35.
2. Наговицын О.В., Лукичев С.В., Алисов А.Ю. Объектная структура данных системы автоматизированного проектирования, планирования и сопровождения работ Mineframe // ГИАБ. – 2013. – № 7. – С. 179-183.
3. Klishin S.V., Lavrikov S.V., Mikenina O.A., Revuzhenko A.F. Discrete element method modification for the transitions to a linearly elastic body model // IOP Conf. Series: Journal of Physics 973 (2018) 012008
4. Журкина Д.С., Клишин С.В., Лавриков С.В., Леонов М.Г. Моделирование локализации сдвигов и перехода геосреды к неустойчивым режимам деформирования на основе метода дискретных элементов // ФТПРПИ. – 2022. – № 3. – С. 13-22.
5. Кандауров И.И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. - Л., М.: Изд-во литературы по строительству, 1966. - 320с.
6. Будрык В., Литвинишин Е., Кнотте С., Салустович А. Вопросы расчета сдвижений поверхности под влиянием горных разработок. М.: Углетехиздат, 1956. - 65с.
7. Ревузенко А.Ф. Принципы создания идеальных смесителей порошковых материалов // Порошковая металлургия. - 1989. - № 4.
8. Осин В.А. Модель дискретной стохастической среды в задачах деформирования и течения сыпучих материалов // ФТПРПИ. – 1992. – № 5. – С. 44-53.
9. Лавриков С.В., Ревузенко А.Ф. Стохастические модели в задачах локализованного деформирования сыпучих сред в радиальных каналах // ФТПРПИ. – 2000. – № 1. – С. 12-20.

**Журкина Д.С., Лавриков С.В., Ревуженко А.Ф.**

*Институт горного дела имени Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

*e-mail: daria.zhurk@gmail.com, lvk64@mail.ru, revuzhenko@yandex.ru*

## **ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОРОДНОМ МАССИВЕ ВБЛИЗИ ВЫРАБОТОК**

В настоящее время одним из приоритетных направлений развития геомеханики является направление, связанное с детальным учетом внутренней структуры массива [1-3]. Структура массива определяет все его основные свойства – дилатансию, внутреннее трение, сцепление, анизотропию, объясняет механизмы накопления и последующего высвобождения упругой энергии.

В механике горных пород рассматриваются несколько различных подходов к описанию внутренней структуры массива. Строятся модели с внутренними переменными [4], модели, основанные на применении методов неархимедова анализа [5], модели, учитывающие дискретный характер среды, применяемые в методе дискретных элементов [6]. Еще одно направление связано с использованием механики обобщенных сред, где строятся модели с микроструктурой [7]. В рамках последнего направления выполнено настоящее исследование.

В работе используется замкнутая математическая модель [8]. Среда представлена в форме регулярной структуры упругих частиц (зерен). На контактах между зернами учитываются проскальзывания, развивающиеся по нелинейному упругопластическому закону. Деформация частиц не является однородной. Для ее описания вводятся два (в плоском случае) независимых поля смещений – по одному для каждой из пар противоположных граней частицы. Как следствие в модели появляется структурный параметр  $\xi$ , содержащий размерность длины и отвечающий за изгибы частиц. Показано, что при  $\xi \rightarrow 0$  и отсутствии проскальзываний между частицами определяющие уравнения переходят в классическую изотропную линейно упругую модель. Условие  $\xi \neq 0$  описывает локальную неоднородность среды – локальные изгибы.

На основе замкнутой модели [8] разработана оригинальная компьютерная программа и даны расчеты ряда краевых задач о перераспределении напряжений в приконтурной зоне массива при прохождении в нем выработок различной конфигурации. На рисунке 1 показаны результаты расчета максимальных касательных напряжений  $\tau_{\max}$  при прохождении пары параллельных горизонтальных подземных выработок. Видно, что при начальном напряженном состоянии массива преимущественно тектонического характера (коэффициент бокового отпора  $\lambda = 1.5$ ) и учет упругопластического скольжения между зернами без возможности локальных изгибов самих зерен ( $\xi = 0$ ) проходка выработок приводит к образованию зон высокой концентрации напряжений вблизи кровли и почвы (рисунок 1а). Учет локальных изгибов зерен ( $\xi \neq 0$ ) приводит к тому, что абсолютные значения напряжений несколько снижаются, при этом сами зоны высокой концентрации значительно расширяются и простираются далеко вглубь массива от контуров выработанного пространства. При достижении величиной  $\xi$  определенного значения  $\xi = \xi_{\text{eff}}$  указанный эффект становится наиболее выраженным (рисунок 1б). Дальнейшее увеличение структурного параметра не приводит к значительному изменению напряженного состояния. Снижение абсолютных напряжений в расчетах составило 22%. Установлено, что увеличение параметра  $\xi$  приводит к формированию в структуре массива длинных силовых цепочек и, как следствие, к глубокому проникновению вглубь массива зон высокой концентрации

напряжений. Последнее может стать причиной высвобождения энергии самоуравновешенных напряжений и спровоцировать динамические проявления горного давления [9].

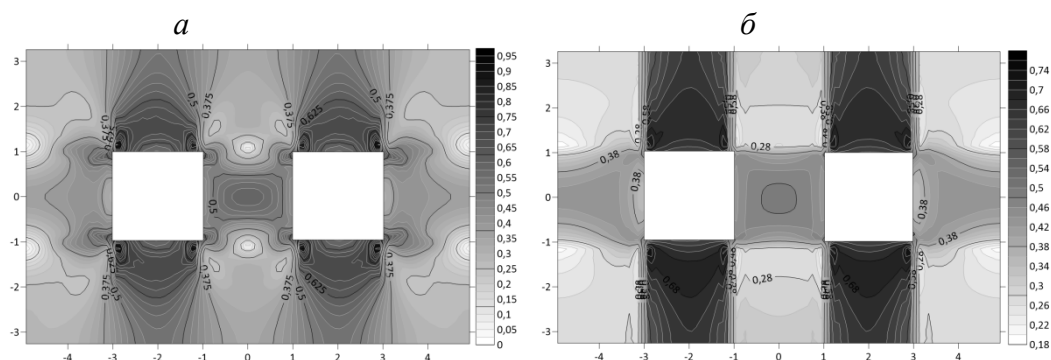


Рисунок 1 – Изолинии  $\tau_{\max}$  в зависимости от значения параметра

$\xi$  : а)  $\xi = 0$  ; б)  $\xi = \xi_{\text{eff}}$

*Работа выполнена в рамках проекта ФНИ, № гос. рег. 121052500138-4.*

#### Список использованных источников:

1. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. О свойстве дискретности горных пород // Физика Земли. – 1982. – № 12. – С. 3-18.
2. Викулин А.В., Иванчин А.Г. О современной концепции блочно-иерархического строения геосреды и некоторых ее следствиях в области наук о Земле // ФТПРПИ. – 2013. – № 3. – С. 67-84.
3. Лавриков С.В., Ревуженко А.Ф. О деформировании блочной среды вокруг выработки // ФТПРПИ. – 1990. – № 6. – С. 7-15.
4. Kolymbas D., Herle I., and von Wolffersdorff P. A. Hypoplastic constitutive equation with internal variables // Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech. – 1995. - Vol. 19. — P. 415 – 436.
5. Лавриков С.В., Микенина О.А., Ревуженко А.Ф. Моделирование процессов деформирования горных пород с использованием методов неархимедового анализа // ФТПРПИ. – 2008. – № 1. – С. 3-16.
6. Журкина Д.С., Клишин С.В., Лавриков С.В., Леонов М.Г. Моделирование локализации сдвигов и перехода геосреды к неустойчивым режимам деформирования на основе метода дискретных элементов // ФТПРПИ. – 2022. – № 3. – С. 13-22.
7. Смолин И.Ю. Использование микрополярных моделей для описания пластического деформирования на мезоуровне // Математическое моделирование систем и процессов. – 2006. – № 14. – С. 189-205.
8. Ревуженко А.Ф., Микенина О.А. Уругопластическая модель горной породы с линейным структурным параметром // ПМТФ. – 2018. – № 2. – С. 167-176.
9. Еременко А.А., Еременко В.А., Гайдин А.П. Совершенствование геотехнологии освоения железорудных удароопасных месторождений в условиях действия природных и техногенных факторов. Новосибирск: Наука, 2008. – 312 с.

## МЕТОДЫ УДОВЛЕТВОРЕНИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ В ЗАДАЧЕ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ<sup>1</sup>

В докладе описывается опыт применения методов удовлетворения ограничений в задачах среднесрочного планирования горных работ. Представленные исследования являются результатом продолжительного сотрудничества ИИММ КНЦ РАН с Горным институтом КНЦ РАН и коммерческим предприятием *MineFrame*.

Среднесрочное планирование горных работ – комплексная задача, сочетающая в себе черты таких классических задач как «Планирование движения транспортных средств» (*Vehicle Scheduling*), «Составление графиков дежурств» (*Time Tabling*), а также «Планирование работы цеха» (*Job Shop Scheduling*). Рассматриваемая в работе постановка задачи была сформулирована специалистами компании *MineFrame*.

Помимо ограничений на производительность техники, норм добычи материала за период и др., которые типичны для таких задач, в предложенной постановке задачи можно выделить следующие особенности:

- неоднородность временной шкалы планирования: горизонт планирования задачи разбивается на временные периоды, а периоды на шаги одинаковой продолжительности, однако длительность шага от периода к периоду может отличаться, как и размер самих периодов между собой;
- произвольная форма и расположение блоков блочной модели горной выработки;
- наличие нескольких материалов внутри каждого блока с приоритетом добычи как каждого материала из блоков, так и самих блоков между собой;
- ограничение на время начала работ единиц техники на блоке;
- возможность обрабатывать один блок несколькими единицами техники;
- временные задержки перед началом работ на блоке и после них;
- особый вид технологических ограничений на порядок добычи блоков – связи между блоками.

Качество получаемых решений оценивается с помощью целевой функции, значение которой рассчитывается как суммарное отклонение объемов добываемых согласно решению материалов от заданных норм добычи.

Таким образом, решение рассматриваемой задачи подразумевает гибкий учет и анализ множества разнородных ограничений предметной области. Для задач практически значимой размерности может быть необходимо привлечение больших вычислительных ресурсов. Перечисленные особенности задачи затрудняют применение традиционных методов исследования операций, в частности методов целочисленного линейного программирования, в качестве альтернативы которым было предложено использовать методы удовлетворения ограничений. Предлагаемый подход ранее положительно зарекомендовал себя на предыдущем этапе сотрудничества при решении задач планирования открытых горных работ, позволив в десятки раз увеличить размерность решаемых задач.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках текущей темы НИР «Методы и информационные технологии мониторинга и управления региональными критическими инфраструктурами Арктической зоны Российской Федерации» (FMEZ-2025-0054).

Для использования методов удовлетворения ограничений задача должна быть формализована в рамках парадигмы программирования в ограничениях, т.е. должны быть описаны переменные с известными конечными доменами, а также определен набор ограничений – правил описывающих допустимые или недопустимые сочетания значений этих переменных. Каждому ограничению должен соответствовать специальный алгоритм-распространитель, позволяющий сокращать домены участвующих в нем переменных.

Авторами было предложено представлять рассматриваемую задачу с использованием временной таблицы, указывающей каждой единице техники, чем она будет заниматься на каждом шаге работ. Каждая ячейка такой таблицы представляет собой отдельную переменную. Кроме того, вводится ряд дополнительных переменных, помогающих учитывать различные зависимости задачи. Обработку всех зависимостей задачи было предложено реализовывать с помощью единственного разработанного алгоритма-распространителя, что позволяет более гибко управлять сокращением доменов переменных и не тратить дополнительные вычислительные ресурсы на организацию взаимодействия множества небольших ограничений.

Решение задачи в рамках предлагаемого подхода можно разбить на 3 основных этапа: предварительная подготовка данных, ветвление и распространение.

На этапе предварительной подготовки из доменов переменных удаляются заведомо некорректные значения. Например, в рассматриваемой задаче на этапе предварительной обработки можно заполнить фиктивными значениями соответствующие ячейки таблицы для техники, которая вводится в эксплуатацию не с самого начала работ, либо выводится из эксплуатации до их окончания. После предварительной обработки начинается поиск решений задачи, состоящий из чередования этапов распространения и ветвления.

Распространение заключается в сокращении доменов переменных, согласно алгоритмам-распространителям ограничений. Оно продолжается до тех пор, пока не будет найдено решение, противоречие или не достигнута неподвижная точка – ситуация, когда домены переменных больше сократить нельзя. При достижении неподвижной точки используется разработанная процедура ветвления – искусственного разбиения задачи на подзадачи путем дробления домена какой-либо переменной на части с применением определенной эвристики выбора наиболее перспективной альтернативы.

Выбор правильной эвристики может существенно повлиять на скорость нахождения решений и их качество. Для рассматриваемой задачи в качестве эвристики был реализован выбор ячейки таблицы с еще неустановленным значением, соответствующей наиболее раннему шагу работ и наиболее производительной единице техники. В качестве принципа дробления домена ячейки предлагается выбирать либо блок, на котором техника уже работает, либо наиболее приоритетный из доступных. В результате, получаются подзадачи, где значение выбранной ячейки равно выбранному блоку, и где оно ему не равно.

Применение предложенного подхода позволило достаточно быстро находить решения задачи с приемлемыми значениями целевой функции, а также, в случае необходимости, улучшать их в дальнейшем.

Предложенные методики были программно реализованы и проверены на наборе тестовых данных, а также внедрены в программную систему сопровождения горных работ *MineFrame*.

## **РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДОРОГ В КАРЬЕРЕ В РАМКАХ ПАРАДИГМЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ В ОГРАНИЧЕНИЯХ<sup>2</sup>**

В литературе, посвященной оптимизации горных работ, можно выделить следующие направления исследований:

1. Проектирование конечных контуров карьера для открытых горных работ (Mine Design Planning – MDP, Ultimate Pit Limit – UPIT, Open Pit Design – OPD). Рудное тело разбивается на блоки и характеристики каждого блока оцениваются с помощью геостатистических методов. Задача заключается в создании точной двухмерной или трехмерной исходной блочной модели месторождений полезных ископаемых, а затем в определении окончательного контура карьера для подготовки технико-экономического обоснования на этапе разведки.

К работам по планированию конечного контура карьера можно также отнести ряд работ, связанных с проектированием эстакады внутри карьера.

2. Планирование добычи полезных ископаемых открытым способом (Open Pit Mine Production Scheduling – OPMPS, Mine Block Sequencing – MBS). После определения конечного контура карьера каждому блоку должен быть приписан номер дискретного периода (фиксированной продолжительности), в который данный блок планируется изъять, с целью максимизации чистого текущего дохода или минимизации общих затрат с учетом коэффициентов дисконтирования за отдельные периоды времени (измеряемые годами, месяцами или неделями).

3. Планирование и составление графиков работы горного оборудования (Mine Equipment Planning - MEP and MET).

В работе рассматривается задача проектирования дорог в карьере. Карьер представлен в виде блочной модели, а в качестве технологических требований выступают максимальный уклон дороги (8%), ширина дороги и шаблон выемки блоков, а также набор блоков, с которых может начинаться дорога. Целью работы является спроектировать дорогу, начиная со дна карьера, так, чтобы выполнялись технологические требования, минимизировав при этом суммарное количество изъятых блоков.

В ходе исследований задачу проектирования дорог в карьере было решено представлять и решать, как задачу удовлетворения ограничений. Для каждого технологического требования был разработан и программно реализован алгоритм удовлетворения данного ограничения. Также был программно реализован метод поиска решений, удовлетворяющих технологическим требованиям с дальнейшим улучшением полученных решений с учетом целевой функции.

Задача удовлетворения ограничений формализуется в виде 3 множеств:

- Множество переменных (в работе основными переменными являются уровни карьера, а вспомогательными блоки).
- Множество доменов (для уровня карьера доменом будет список всех блоков уровня, а для блоков список возможных состояний (изъят; не изъят; дорога; граница карьера)).
- Множество ограничений (технологические требования и целевая функция).

Блочная модель разбивается на уровни, и задача сводится к подзадачам, по построению участков дороги между двумя соседними уровнями, соединенными между

---

<sup>2</sup> Работа выполнена в рамках текущей темы НИР «Методы и информационные технологии мониторинга и управления региональными критическими инфраструктурами Арктической зоны Российской Федерации» (FMEZ-2025-0054).

собой. На каждом уровне выбирается ключевой блок. Ключевой блок считается конечным блоком участка предыдущего уровня и начальным блоком текущего уровня.

Частичная выемка одного блока позволяет поднять дорогу на 8% от высоты блока. Соответственно, чтобы поднять дорогу на высоту одного блока необходимо 12.5 блоков. Полученное число округляется до целого числа в большую сторону и является параметром «минимальной дистанции», которая измеряется в количестве блоков.

Для построения участка пути используется модификация алгоритма обхода графа в ширину, где в качестве начальной вершины берется стартовый блок пути, а в качестве конечной – блок, который находится под последним блоком пути. В каждой вершине хранится информация о предке с наименьшей стоимостью, стоимость самой вершины и всего пути до нее от стартовой вершины. Стоимостью вершины является расстояние соответствующего блока до «края» карьера. В конечной вершине хранится общая стоимость всего пути от стартовой вершины до конечной. Вершины, стоимость пути до которых от стартовой больше общей стоимости пути, удаляются из рассмотрения. Полученный путь является каркасом участка дороги, который затем наращивается с учетом ограничений на заданную ширину дороги. Для соблюдения уклона дороги полученный каркас участка дороги должен быть не меньше параметра «минимальная дистанция».

После выбора одного блока уровня в качестве ключевого, необходимо выявить «кандидатов» в ключевые блоки для следующего уровня. На данном этапе разработки, поиск «кандидатов» происходит не на всем уровне, а только в заданной области. Для каждого блока в области проверяется, можно ли построить до него участок дороги с соблюдением заданной ширины и уклона. Блоки, до которых можно построить участок пути являются «кандидатами в ключевые блоки» для соответствующего уровня.

Общий алгоритм поиска решений можно описать в виде последовательности шагов:

1. Выбор одного из возможных путей между уровнями  $k-1$  и  $k$ .
  2. Построение выбранного участка пути с учетом его ширины (отмечаются как изъятые блоки дороги и блоки, которые необходимо извлечь с учетом шаблона выемки).
  3. Формирование списка блоков уровня,  $k+1$  до которых может идти дорога.
- Переход к п.1

Сначала выбирается один из заданных стартовых блоков, затем для вышележащего уровня формируется список блоков, которые могут быть ключевыми. Среди полученных кандидатов, согласно предложенной эвристике, первым выбирается тот блок, для которого изымается минимальное количество блоков, зависящих от него согласно шаблону добычи. После выбора кандидата, «строится» участок дороги с предыдущего ключевого блока до текущего (т.е. отмечаются блоки дороги и вынимаются блоки по шаблону добычи), а затем формируется список «кандидатов» для следующего уровня.

Полученная программа была протестирована на блочной модели размерностью 35500 блоков, ширина дороги была задана 2 блока, а уклон 8%. Первое решение было получено за 24 секунды.

**Иванов А.С., Розанов И.В.**

*Горный институт КНЦ РАН, г. Анапты, Россия*

*e-mail: as.ivanov@ksc.ru, i.rozanov@ksc.ru*

## **ПРОБЛЕМАТИКА ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ (БВС) ПРИ МОНИТОРИНГЕ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ**

Беспилотные воздушные судна (БВС) получили большое распространение в маркшейдерских и геомеханических исследованиях, благодаря своей простоте управления, маневренности и финансовой доступности. Оснащенные камерами высокого разрешения, лазерными сканерами (лидарами), приемниками глобальной навигационной спутниковой системы (GNSS) и другими датчиками, они позволяют проводить удаленное изучение массива. Применение БВС смогло значительно расширить возможности лазерного и фотограмметрического методов мониторинга деформационных процессов на месторождениях, обрабатываемых открытым способом.

В то же время, одним из сдерживающих факторов использования данных методов является невозможность однозначного сопоставления определенной отдельной точки с ее конкретным пространственным расположением на местности.

Классические инструментальные методы, основанные на определении отклонения координат рабочих реперов от их начального положения, позволяют определять сдвигения в вертикальной и горизонтальной плоскости. Решение этих задач достигается благодаря конструкции репера, позволяющей отождествлять определяемую в пространстве точку при каждой серии наблюдений. Обеспечение высокой точности измерений, значимый накопленный опыт применения результатов для определения допустимых и критических величин являются преимуществом инструментальных методов. К существенным недостаткам данных методов относятся: ограничение возможности распространения полученных результатов по площади исследуемого объекта, в особенности для скальных массивов горных пород, а также сложностью оборудования наблюдательных станций.

Фотограмметрический и лазерный мониторинг с применением БВС позволяют получать информацию о пространственном положении множества точек, соответствующих исследуемой поверхности объекта. За счет высокой плотности, а также периодичности серии наблюдений, эти методы также позволяют определять величины вертикальных и горизонтальных смещений. Но используемые при этом подходы не способны с высокой степенью вероятности отождествлять отдельную точку при каждом цикле измерений. Наиболее известными методами определения величин смещения точек являются: метод кратчайшего расстояния между парой точек и метод регистрации трёхмерных фигур на основе алгоритма ICP (Iterative Closest Point).

В данной работе описаны результаты исследований по установлению взаимосвязей между величинами смещений, полученными различными инструментальными методами. В качестве объекта наблюдений выбран участок отвала скальных вскрышных пород, расположенного на территории промышленной площадки горнодобывающего предприятия Мурманской области. Представлены данные нескольких серий инструментальных, фотограмметрических и лазерных наблюдений, которые выполнены в промежутке с 2018 г. по 2024 г., что позволило сравнить результаты измерений за практически 6-ти летний период. Применённые методики продемонстрировали свои сильные и слабые стороны при изучении данного объекта. Сформулированы подходы к решению проблемы неопределенности при анализе конкретных данных и возможные этапы дальнейших исследований.

## **ОДНОРОДНОСТЬ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД КАК ФАКТОР УДАРООПАСНОСТИ**

Существующие критерии удароопасности месторождений полезных ископаемых основаны только на лабораторных испытаниях и не учитывают большого количества факторов, присущих массиву горных пород. Факт отнесения месторождения к удароопасным не всегда сопровождается проявлениями горных ударов, что также указывает на необходимость уточнения используемых подходов.

В связи с этим предложено учитывать пространственную однородность прочностных характеристик пород как дополнительный фактор, влияющий на удароопасность. Влияние однородности горных пород на их удароопасность и хрупкость отмечается многими специалистами [1-2] на основе наблюдений, лабораторных испытаний и численного моделирования [3-4].

На основе вышесказанного выдвинута гипотеза, которая заключается в том, что степень однородности массива, выраженная через коэффициент вариации прочностных свойств в локальной области, определяет способность массива к динамическому разрушению. Однородные по прочности массивы накапливают больше упругой энергии, что может привести к более резким и динамичным разрушениям. Неоднородные массивы теряют несущую способность постепенно, по мере последовательного разрушения слабых участков, что сопровождается меньшими энергетическими выбросами.

Для проверки гипотезы проведён анализ данных по 44 разновидностям пород с 18 месторождений, включающих как удароопасные, так и не опасные объекты [5]. Рассматривались коэффициенты вариации прочности на одноосное сжатие (UCS) и растяжение (UTS) в пределах локальных областей массивов. Расстояние между точками отбора проб составляло от 1 м до 100 м. Необходимость ограничения размеров области массива, для которого оценивается коэффициент вариации, объясняется ограниченностью размеров очага горного удара. На рисунке 1 представлен график, на котором отмечено большое количество данных с различных объектов.

Установлена корреляция: при  $k_v_{UCS} \leq 20\%$  на месторождениях наблюдаются горно-тектонические удары, в диапазоне 20–32% — горные удары и проявления меньшей интенсивности, при  $k_v_{UCS} > 32\%$  — динамические разрушения, как правило, отсутствуют. Данные величины  $k_v$  отмечены на графике на рисунке 1. Для прочности на растяжение наблюдается аналогичная, но менее выраженная зависимость. Отдельные примеры (Октябрьское месторождение) показывают, что удары, по-видимому, могут происходить даже при высокой общей неоднородности, если при этом в массиве присутствуют отдельные однородные зоны с низким коэффициентом вариации.

Таким образом, предлагается использовать коэффициент вариации прочности на сжатие как дополнительный количественный критерий удароопасности массива. Данный подход может быть полезен при районировании месторождений по удароопасности и для оперативного прогноза опасности ударов в отдельных выработках.

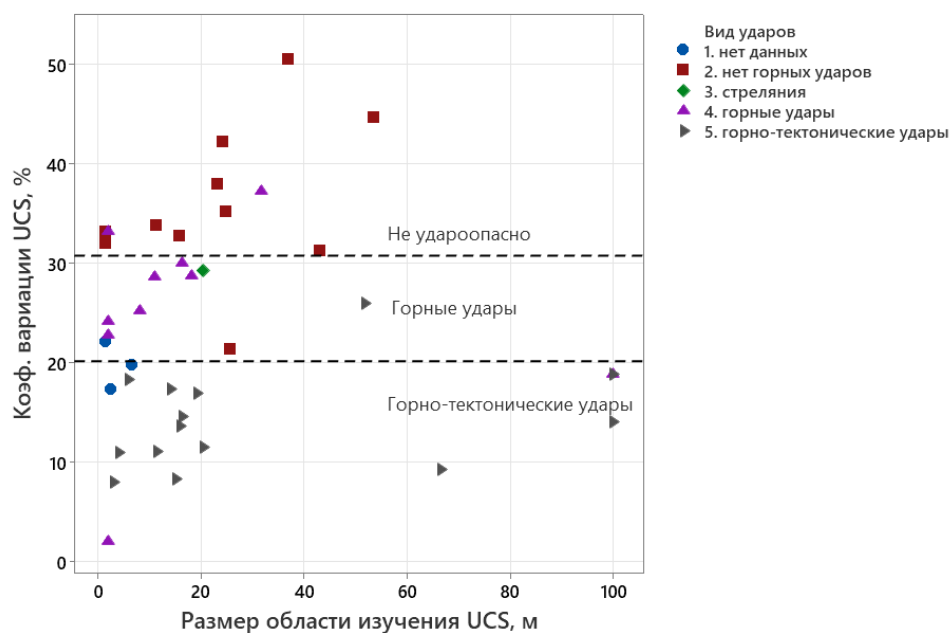


Рисунок 1 – Динамические проявления на различных объектах в зависимости от коэффициента вариации прочности на одноосное сжатие

Представленные данные и зависимости требуют дальнейшей верификации и дополнения, включая создание баз данных прочностных характеристик с координатами проб и последующим накоплением информации по месторождениям с различными условиями проявления динамических явлений.

#### Список использованных источников:

1. Wawersik, W. R. and Fairhurst, C. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* - Vol 7(5). - 1970. - P. 561-575.
2. Brady, B.H. and Brown, E.T. *Rock mechanics: for underground mining*. Springer science & business media, 2006. - 628 p.
3. Tang, C. A., and P. K. Kaiser. Numerical simulation of cumulative damage and seismic energy release during brittle rock failure—part I: fundamentals // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. - Vol. 35 (2). - 1998. - P. 113-121.
4. Manouchehrian, A., & Cai, M. Influence of material heterogeneity on failure intensity in unstable rock failure // *Computers and Geotechnics*. - 71. - 2016. - P. 237-246. doi:10.1016/j.compgeo. 2015.10.004
5. Ильясов Б.Т., Ожиганов И.А., Трофимов А.В. О влиянии пространственной изменчивости прочности пород на удароопасность породных массивов // *Горная промышленность*. - 2024;(6):74–82. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-74-82>

### **3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ РУДНОГО ШТАБЕЛЯ И ДИНАМИКИ ПРОДВИЖЕНИЯ ФРОНТА РАБОТ ПРИ КУЧНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ ЗОЛОТА В ХОЛОДНОМ КЛИМАТЕ**

За последние три десятилетия в России введены десятки промышленных объектов для кучного выщелачивания (КВ) золотосодержащих руд, отличающегося экономической эффективностью. Однако технология КВ в суровых климатических условиях имеет ряд недостатков, включая сложности с контролем теплообмена внутри рудного штабеля (РШ) и снижением скорости растворения металлов. Это требует разработки новых технических решений, которые бы позволили продлить сезон работы КВ вплоть до круглогодичного.

Обобщённый алгоритм формирования 3D-модели РШ и расчёт его теплового режима с учётом процесса его поэтапного формирования и динамики продвижения фронта работ (орошения рабочими растворами) можно представить следующим образом:

1. **Ввод данных:** включая климатические условия, свойства материалов, параметры блоков и этапов строительства.
2. **Инициализация:** задаются начальные условия (температура грунта, сооружения, шаг времени).
3. **Цикл по этапам:** для каждого этапа добавляется новый блок, корректируется геометрия модели.
4. **Расчёт теплового режима:** решаются уравнения теплопередачи и фильтрации с учётом:
  - Контакта нового блока с существующей структурой.
  - Граничных условий (атмосфера, грунт).
  - Временных изменений (сезонность, суточные колебания).
5. **Проверка сходимости:** если решение не сошлось, возврат к расчёту с меньшим шагом  $\Delta t$ .
6. **Сохранение данных:** запись температурных полей и тепловых потоков для анализа.
7. **Визуализация:** построение графиков, оценка критических зон, проверка соответствия нормам.

#### **Дополнительные элементы:**

- Для сложных моделей может добавляться вложенный цикл по временным шагам.
- Учёт нелинейных эффектов (зависимость свойств материалов от температуры).
- Автоматическая корректировка шага  $\Delta t$  для ускорения расчётов.

Для оценки теплового режима РШ в процессе его формирования и орошения рабочими растворами были проведены численные расчёты в программном комплексе Frost 3D. Построена 3D модель рудного штабеля (рисунок 1). В одном из вариантов модель состоит из двух больших модулей. Модуль А – орошения нет, модуль В – орошение есть. Начало расчётов 01 марта, конец расчётов 01 декабря. Направление горизонтальной фильтрации по оси ОХ от модуля В в сторону модуля А  $v_x = 0,1$  м/сут в зимний период и  $v_x = 0,25$  м/сут в летний период; по направлению ОУ  $v_y = 0,1$  м/сут и  $v_y = 0,25$  м/сут соответственно; скорость вертикальной фильтрации по направлению ОZ  $v_z = 0,25$  м/сут и  $v_z = 1,0$  м/сут соответственно. Граничные условия на поверхности РШ задаются согласно погодным условиям Алданского района Якутии.

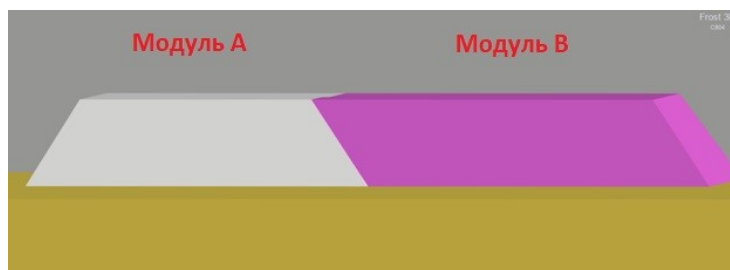


Рисунок 1 – 3D модель РШ, включающего в себя два модуля с различными режимами орошения рабочими растворами

На рисунке 2 представлена температурная диаграмма поперечного среза штабеля на 15 октября 2024 г. Как видно из температурной диаграммы РШ (рисунок 2), в теле РШ на границе моделей А и В формируется определённая зона переохлаждённых пород, связанная с историей формирования модуля В по границе модуля А (смыкание моделей происходило в конце зимнего периода). Данная зона показывает высокую устойчивость в течение всего летнего периода и может оказать влияние на тепловой режим РШ при формировании на следующем этапе его второго яруса.

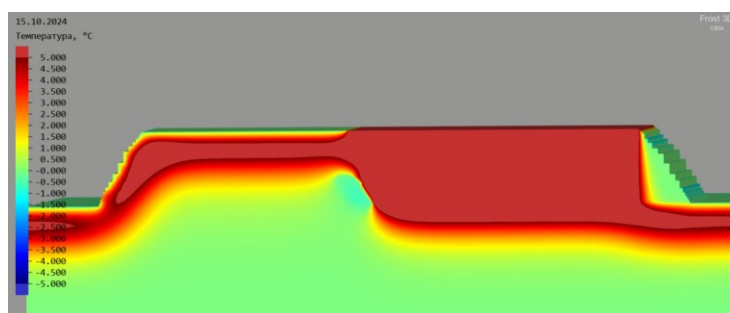


Рисунок 2 – Температурная диаграмма поперечного среза РШ на 15.10.2024 г.

Таким образом, представленные расчёты показывают, что предложенный обобщённый алгоритм создания 3D-модели РШ и расчёт его теплового режима с учётом процесса его поэтапного формирования и динамики продвижения фронта работ (орошения рабочими растворами) в программном комплексе Frost 3D позволяет детально и очень близко к натурным данным моделировать неоднородность строения, этапы формирования РШ и режим его эксплуатации.

**Каймонов М.В.**

ФИЦ ЯНЦ СО РАН, ИГДС СО РАН, г. Якутск, Россия

e-mail: kaimihvas@mail.ru

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОГО ЛЬДОПОРОДНОГО ВОДОУПОРНОГО БАРЬЕРА С ЦЕЛЬЮ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПОСТУПЛЕНИЯ РАССОЛОВ ВОДОНОСНОГО КОМПЛЕКСА В ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ**

Создание искусственного водоупора вокруг горных выработок необходимо для предотвращения повышенной фильтрации в подземные помещения и выработки. Для этих целей существует ряд способов и мероприятий: инъекция цементных, глинистых, глиноцементных или смоляных растворов; химическое и электрохимическое закрепление нескальных грунтов; криогенный (ледопородный) барраж. Последний способ предполагает защиту от подземных вод путём полного или частичного ограждения горных выработок с помощью искусственного понижения температуры горных пород и замораживание содержащейся в них воды. Используемые для этой цели замораживающие устройства, должны иметь запас мощности, позволяющий при необходимости заморозить засоленные

породы, которые в зависимости от степени засоления могут иметь температуру фазового перехода вода-лёд-вода значительно ниже 0°C.

Разработка различных инженерно-технических решений и мер противодействия оттаиванию и потери водоупорной способности замороженных пород требуют разработки новых и усовершенствования существующих методик расчета температурных полей с учетом конкретных реалий процесса теплового взаимодействия грунтов и сооружений. В связи с этим исследование закономерностей теплопереноса в системе «массив горных пород – инженерные сооружения» на засоленных породах с учётом фильтрации рассолов приобретает первостепенное значение для оценки их надежности и долговечности. Для оценки теплового режима горных пород в процессе формирования ледопородной завесы в водоносном горизонте, представленном рассолами, были проведены численные расчёты в программном комплексе Frost 3D. Были проведены расчёты по режиму работы, как одиночной замораживающей колонки, так и их различных комплексов.

На рисунке 1 представлены температурные диаграммы поперечного среза МММГ и замораживающей колонки: а) одиночная колонка; б) комплекс из трёх колонок при различных режимах работы замораживающего устройства.

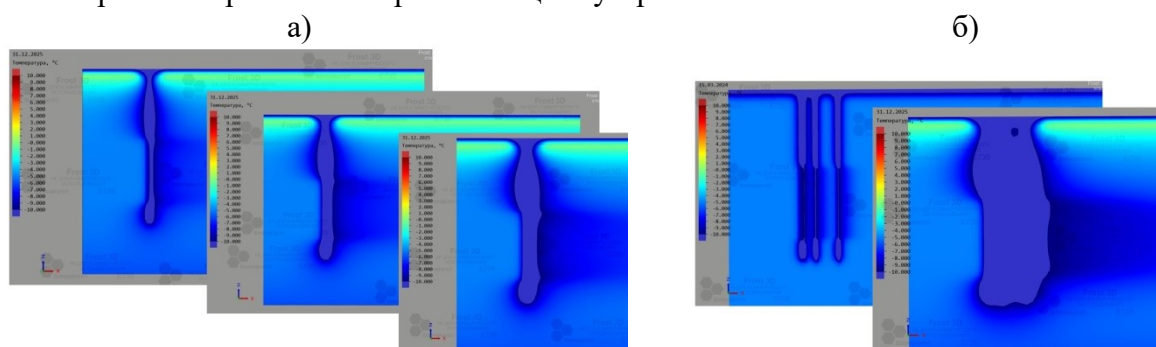


Рисунок 1 – Температурная диаграмма поперечного среза МММГ и замораживающей колонки: а) одиночная колонка; б) комплекс из трёх колонок

На рисунке 2 представлена температурная диаграмма комплекса замораживающих устройств, расположенных вокруг открытой горной выработки.

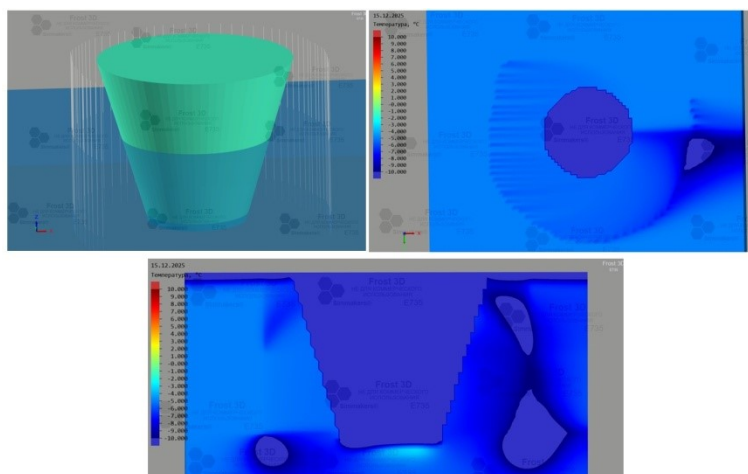


Рисунок 2 – Температурная диаграмма комплекса замораживающих устройств, расположенных вокруг открытой горной выработки

Таким образом, как показывают проведённые численные расчёты на компьютерных моделях в программном комплексе Frost 3D, учёт фильтрации рассолов, оказывает существенное влияние на режим эксплуатации замораживающих устройств, работающих в

системе «ММП – инженерные сооружения». Учёт этих факторов, а также пространственная ориентация замораживающих устройств вокруг горной выработки с учётом направления фильтрации рассолов, позволят минимизировать риски техногенных аварий на производственных объектах, работающих в сложных геокриологических условиях.

**Калюжный А.С., Кузнецов Н.Н.**

*Горный институт КНЦ РАН, г. Анапты, Россия*

*e-mail: a.kalyuzhny@ksc.ru*

## **ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПО ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ КАРЬЕРНЫХ ОТКОСОВ С УЧЕТОМ СДВИГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД**

Для любого предприятия, отрабатывающего запасы полезных ископаемых открытым способом, безопасность ведения работ в карьере является основополагающим фактором, обеспечение которого требует периодической оценки устойчивости откосов. При такой оценке используют совокупность исходных данных как о массиве горных пород, так и о геометрических параметрах карьерной выемки. В скальных и полускальных массивах наиболее значимым фактором, влияющим на устойчивость уступов и участков борта, является структурная нарушенность массива. Большинство случаев потери устойчивости в таких массивах происходит именно по естественным и техногенным плоскостям ослабления (трещинам), разломам, зонам дробления. Именно поэтому изучению параметров структурных нарушений следует уделять особое внимание при исследовании геомеханического состояния массива пород.

Основными сдвиговыми характеристиками трещин являются сцепление и угол внутреннего трения по контакту. Для определения этих характеристик проводятся испытания на образцах горных пород, содержащих естественную открытую трещину, в соответствии с требованиями стандарта ASTM D5607-16. Идея метода заключается в приложении постоянной нормальной (вертикальной) нагрузки к номинальной плоскости сдвига образца и увеличении сдвигающей нагрузки вдоль этой плоскости до заданного значения сдвиговой деформации. Испытания проводят в несколько этапов с увеличением нормальной нагрузки и по их результатам строят диаграммы зависимости касательного (сдвигающего) напряжения от вертикального напряжения по линии наилучшего соответствия (паспорта прочности при сдвиге), по которой определяются величины сцепления и угла внутреннего трения породы.

В настоящее время оценка устойчивости выполняется в специализированных программных продуктах. В Горном институте КНЦ РАН для этого применяется программный комплекс SVOOffice, модуль SVSlope (ныне PLAXIS LE 2D). Данный программный комплекс позволяет рассчитывать коэффициенты запаса устойчивости методом предельного равновесия в различных его вариантах по методикам Бишоп, Спенсера, Ямбу, Моргенштерна-Прайса. В соответствии с действующими в РФ нормативными требованиями наиболее приемлемой является методика Моргенштерна-Прайса, т.к. она удовлетворяет трем уравнениям равновесия (вертикальных и горизонтальных сил и моментов).

В результате выполненных исследований установлены значения сдвиговых характеристик (сцепление и угол внутреннего трения) образцов пород по контакту. Показано, что полученные данные могут использоваться как для ретроспективного анализа обрушения участка, так и для перспективных оценок устойчивости уступов и участков борта по структурным нарушениям.

## МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОТРАБОТКИ НАГОРНОЙ ЧАСТИ КОАШВИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ ГОРНО- ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ DATAMINE STUDIO ОР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНСТРУМЕНТОВ ПЛАНИРОВАНИЯ

Нагорный участок Коашвинского карьера является сложным объектом с точки зрения проектирования и отработки по ряду причин. Ведение работ на косогоре подразумевает ограниченное карьерное поле, что ведет к стеснению рабочего пространства, а небольшая ширина рабочих площадок, в свою очередь, ограничивает объем одновременно взрываваемой горной массы, увеличивает взаимозависимость выемочно-погрузочного оборудования и другой техники, создавая ограничения при их совместной работе. Также является затруднительным проведение транспортных коммуникаций.

Цель работы - составление оптимального календарного плана отработки нагорной части Коашвинского карьера в годовом горизонте планирования с учетом всех ограничивающих параметров участка и производственных процессов. Для этого были использованы инструменты для планирования горно-геологической информационной системы Datamine Studio ОР. Данный инструмент позволяет задавать порядок отработки блоков, отслеживая перемещение всей техники во времени и пространстве, а также совершать точный подсчет объемов работ.

Исходными данными для начала работ с «планировщиком» являются: блочная модель; фактическое положение карьера на начало отрабатываемого периода; положения по фазам отработки (это могут быть положения по годам, кварталам или месяцам, в зависимости от того, с разделением на какие периоды необходимо составить план); положение карьера на конец отрабатываемого периода; тип, количество и производительность применяемого оборудования; транспортная сеть; координаты точек выезда с уступов и карьера; координаты пунктов назначения (отвалы, фабрики, склады).

Первый этап – настройка проекта и подготовка базы данных, это включило в себя загрузку топографии, блочной модели, положений по фазам; определение и задание параметров уступов.

На основании вышеперечисленных данных с помощью набора команд и форм были созданы солиды фаз и солиды уступов (рисунок 1). Далее построена сетка добычных блоков и их солиды (рисунок 2), установлены зависимости и задана последовательность отработки. Для корректной оценки объемов работ и вывода данных в нужных единицах измерения, в нашем случае - бурения, был присвоен дополнительный атрибут по полю DRILL. Используя блочно-рудную модель месторождения, произведена оценка солидов добычных блоков и создана база данных, которая в дальнейшем используется для оперативного планирования.

Рисунок 1 – Солиды уступов

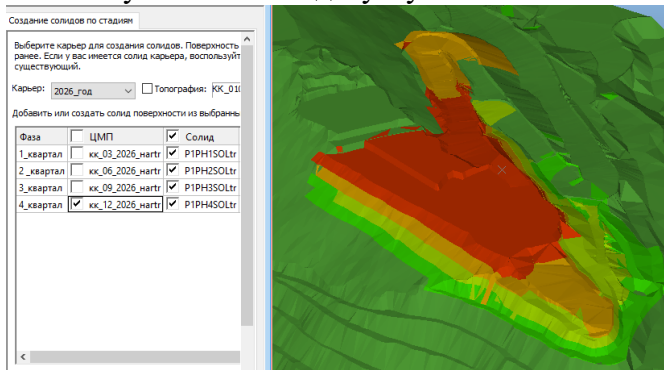
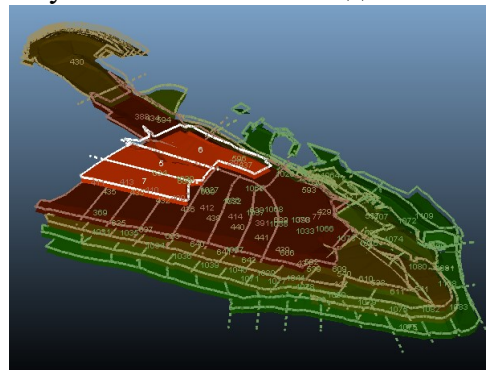


Рисунок 2 – Сетка и солиды блоков



Следующим этапом является настройка модуля «планирование», для чего была подгружена база данных, сохраненная на первом этапе, установлены периоды, указаны пункты назначения и заданы ограничения по категориям пород. Для используемой техники (буровой станок, экскаватор, самосвал) указано количество, производительность, КТГ, КТИ, заданы ограничения в зависимости от категории пород. Для создания маршрутов перевозки в «планировщик» были подгружены координаты точек выездов, пунктов назначения и транспортная сеть в виде линий. Далее установлены виды работ и их последовательность. Для каждого обрабатываемого блока (рисунок 3) задается вид работ, тип техники, точка выезда с уступа, пункт назначения (рисунок 4).

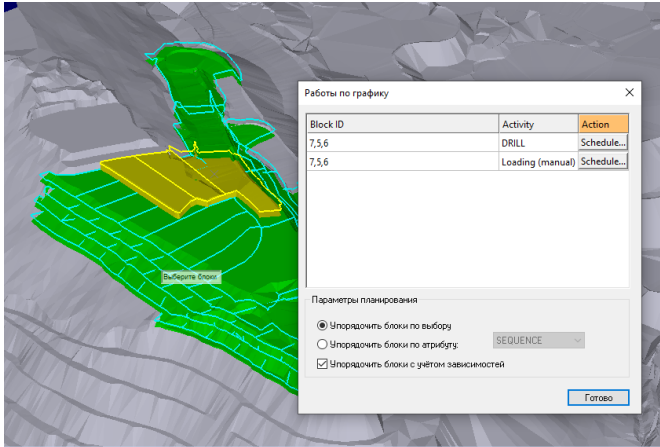


Рисунок 3 – Выбор обрабатываемых блоков

Движение материала

Material Routes

Период:

Period 001 - 01/01/26

Режим:

Тонны

Объем

☐ Выборочная добыча

☒ Скрыть пустые значения

| Category | Tonnes  | Available Tonnes | Percent | Destination | Loader  | P205 | VOLDIFF   | RAWMODSQ | BLKCNTRX  | BLK  |
|----------|---------|------------------|---------|-------------|---------|------|-----------|----------|-----------|------|
| Unknown  | 52,187  | 52,187           | 100.00  | OTVAL_3     | CAT6040 | 0.00 | 24,045.44 | 0.00     | 50,507.61 | 28,4 |
| [PP]     | 1       | 1                | 100.00  | OTVAL_3     | CAT6040 | 0.00 | 22,533.69 | 0.00     | 50,502.80 | 28,4 |
| [Q]      | 176,189 | 176,189          | 100.00  | OTVAL_3     | CAT6040 | 0.00 | 9,205.98  | 0.00     | 50,512.37 | 28,4 |
| TOTAL    | 228,377 | 228,377          | 100.00  | -           | Set All | 0.00 | 12,597.04 | 0.00     | 50,511.28 | 28,4 |

Движение материала

Material Routes

Период:

Period 001 - 01/01/26

Коэффициент доставки на уступе:

1

☐ Автоматически устанавливать маршруты

Использовать предыдущий маршрут

| Category | Destination | Haul Truck | Bench Exit | Ramp Sector  | Surface Sector  | Dump Sector | Route Distance | Cycle Time | Truck Hours | Bench |
|----------|-------------|------------|------------|--------------|-----------------|-------------|----------------|------------|-------------|-------|
| Unknown  | OTVAL_3     | -          | BE_2       | BE_2 to PE_1 | PE_1 to OTVAL_3 |             | 1,017.82       | 0.00       | 0.00        |       |
| [PP]     | OTVAL_3     | -          | BE_2       | BE_2 to PE_1 | PE_1 to OTVAL_3 |             | 1,017.82       | 0.14       | 0.14        |       |
| [Q]      | OTVAL_3     | -          | BE_2       | BE_2 to PE_1 | PE_1 to OTVAL_3 |             | 66.58          | 0.00       | 0.00        |       |
| TOTAL    | -           | Set All    | Set All    | Set All      | Set All         |             | 2301.96        | 0.14       | 0.14        |       |

Рисунок 4 – Отработка выбранных блоков

При необходимости, инструмент позволяет получить ожидаемые положения на выбранный период в виде каркасов, что позволяет контролировать направление ведения горных работ. Также функционал инструмента планирования позволяет вносить правки в последовательность созданных процессов.

Заключительным этапом является формирование календарного плана, представляющего собой сводку всех данных созданных во время виртуальной отработки, в них входит: номер каждого блока; дата и время начала, окончания и длительность по каждому виду работ по блоку и вид применяемой техники; объемы по категориям обрабатываемых пород в блоке. Все значения можно представлять в виде разбивки по периодам и горизонтам и т.д., что позволяет провести анализ на оптимальность ведения горных работ.

Таким образом, функционал данного программного обеспечения дает возможность многовариантного планирования горных работ, позволяет в кратчайшие сроки пересмотреть результаты формирования календарного плана с целью определения оптимального варианта ведения горных работ.

**Караваяев А.В.<sup>1, 2</sup>**

<sup>1</sup>АО «Комбинат КМАруда», г. Губкин, Россия

<sup>2</sup>Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН (ИДГ РАН),

г. Москва, Россия

e-mail: karavaev\_av@metholding.ru

## **МОНИТОРИНГ ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ КОРОБКОВСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КМА**

Эксплуатация месторождений твердых полезных ископаемых сопровождается проведением большого объема дренажных мероприятий – осушением горных выработок и формированием техногенно-нарушенного режима подземных вод. Нарушение гидрогеодинамической обстановки может приводить к изменению устойчивости отдельных участков массива горных пород, приуроченных к тектонически ослабленным зонам, активизации природно-техногенных процессов и аварийным ситуациям. Возможное развитие негативных последствий обуславливает необходимость и актуальность работ по организации и проведению мониторинга уровня подземных вод и микросейсмического фона в зонах горного отвода недр месторождений, разрабатываемых с использованием взрывных технологий [1].

В пределах шахтного поля Коробковского железорудного месторождения КМА два пункта наблюдений оборудованы аппаратурно-измерительными комплексами (рисунок 1). Дистанционная передача данных обеспечивает оперативный контроль сейсмических, гидрогеологических и барометрических параметров [2].



Рисунок 1 – Общий вид наземного пункта наблюдений

(1 – скважина, оборудованная датчиком уровня PR-36XW и гидрофоном Bruel&Kjaer 8103;

2 – сейсмометр СПВ-3К; 3 - регистратор Centaur CTR4-6S;

4 – усилитель сигнала Bruel&Kjaer; 5 – преобразователь Sirius DC8512-15; 6 – АКБ)

В качестве примера на рисунке 2 приведены результаты текущей обработки данных, поступающих с пункта наблюдений, расположенного на расстоянии от 1 км от участков проведения промышленных взрывов в шахте Коробковского месторождения и Лебединском

карьере. Изменения уровня подземных вод в наблюдательной скважине, вскрывающей архей-протерозойский водоносный комплекс, асинхронны вариациям атмосферного давления. В течение выбранного периода измерений (март 2025 г.) режим подземных вод квазистационарный, так как среднемесячная амплитуда уровня подземных вод не превышает 25 см и соответствует изменению атмосферного давления в пределах 2,5 кПа. В вариациях уровня подземных вод отчетливо проявляются отклики на влияние суточных и полусуточных приливных волн с амплитудами до 10-15 мм (рисунок 2а), свидетельствующие о пороупругой реакции водонасыщенного коллектора на земные приливы. Микросейсмический фон на участке режимной сети АО «Комбинат КМАруда» относительно стабильный, не превышает  $1 \cdot 10^{-3}$  мм/с.

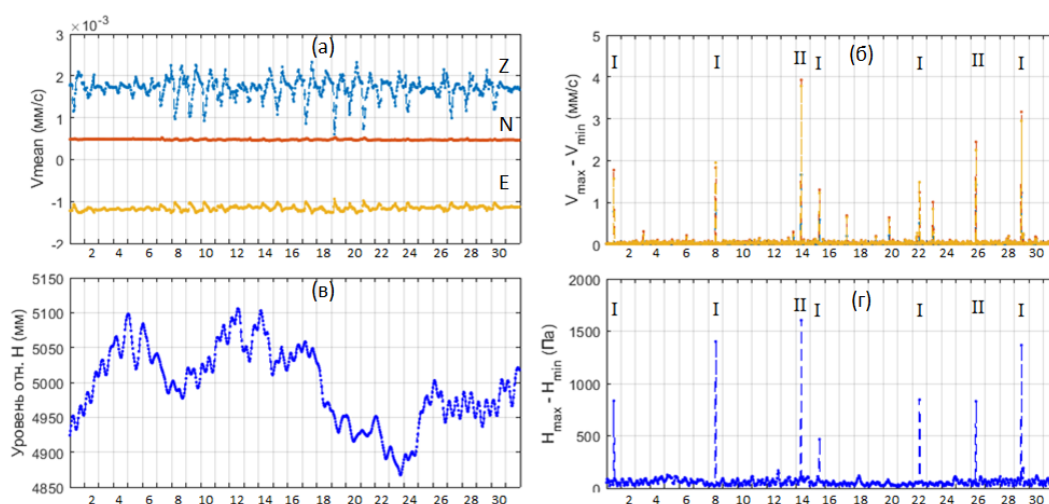


Рисунок 2 – Диаграммы регистрации (скорость смещения грунта по трем компонентам (а) и ее изменения (б), уровень подземных вод (относительное значение над датчиком) (в) и вариации порового давления в системе «пласт-скважина» (г) при проведении промышленных взрывов в шахте (I) и карьере (II)

На диаграммах справа, представленных на рисунке 2, приведены данные по регистрации промышленных взрывов, проводимых в шахте и карьере. В опорном пункте наблюдений амплитуда скорости смещения грунта изменяется от 1,3 до 3,8 мм/с, амплитуда вариаций порового давления в системе «пласт-скважина» варьирует от 0,6 до 1,4 кПа. Постсейсмического снижения уровня подземных вод связанного с сейсмическим воздействием, в марте 2025 г. не прослеживается.

Таким образом, внедрение и использование современных аппаратурно-измерительных комплексов позволяет осуществлять наблюдения в режиме реального времени за гидрогеологическими, сейсмическими и барометрическими параметрами и реакцией железорудного массива на разработку месторождений открытым и подземным способами. В дальнейшем сформированная база данных может быть использована для прогнозной оценки изменений гидрогеодинамической обстановки при увеличении объемов добычи железной руды.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН (тема № 125012200570-5).*

#### Список использованных источников:

1. Беседина А.Н., Горбунова Э.М., Остапчук А.А., Павлов Д.В. Отклик водонасыщенного коллектора на прохождение сейсмических волн в ближней зоне массового взрыва в шахте

// Динамические процессы в геосферах. 2019;(11):70–78.  
<https://doi.org/10.26006/IDG.2019.11.44377>

2. Горбунова Э.М., Иванов А.Г., Караваев А.В., Петухова С.М., Федоров А.Ю. Информативность прецизионного гидрогеологического мониторинга в техногенно-нарушенных условиях // Подземная гидросфера: материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России. Екатеринбург: Институт горного дела ИГД УрО РАН. - 2024. - С. 492–496.

**Кисель И.В.<sup>1</sup>, Лаптев В.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ООО «Лаборатория Майнфрэйм», г. Апатиты, Россия

e-mail: Ivan\_Kisel\_1996@mail.ru

<sup>2</sup>Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

e-mail: v.laptev@ksc.ru

## ЦИФРОВЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ПГР

Цифровизация горного производства — один из ключевых трендов современной промышленности, в рамках которого ведется разработка современной системы среднесрочного планирования горных работ, реализация MVP версии которой планируется в сентябре 2025 года. Эта система позволит максимально эффективно использовать единое геоинформационное пространство горно-геологической информационной системой (ГГИС) «Майнфрэйм», в котором объединены все технологические и геолого-маршейдерские данные, необходимые для комплексного учета при среднесрочном планировании подземных горных работ.

Разработка Системы среднесрочного планирования (ССП) горных работ ведется в тесном сотрудничестве с управлением планирования производством ПАО «АК Алроса». При разработке СПП используются актуальные данные о передовых способах планирования, параметрах горного оборудования, учета особенностей развития горных работ для различных систем разработки:

- система разработки подэтажного обрушения с торцевым выпуском руды;
- камерная система разработки с «шахматным» расположением ромбовидных камер и закладкой выработанного пространства;
- сплошная слоевая система разработки с нисходящим порядком выемки и закладкой выработанного пространства.

Одним из главных преимуществ разрабатываемой системы среднесрочного планирования «Майнфрэйм» является возможность комплексного автоматизированного учета горно-геологической и горно-технологической обстановки вокруг горных выработок. При подготовке и расчёте сценария планирования система использует алгоритмы, которые учитывают десятки параметров, таких как компоненты блочной модели, геометрия выработок их категоричность, особенности соседних объектов и наличие оборудования в них. Это позволяет формировать технологически обоснованные решения, например, при выборе способов проходки горных выработок и отработке выемочных единиц, определении маршрутов доставки горной массы и планировании вспомогательных работ. Все расчеты выполняются автоматически с учетом заданных условий, нормативов и ограничений.

Реализуемая интеграция СПП с ГГИС «Майнфрэйм» и с системами диспетчеризации производства, позволит оперативно отслеживать изменения горно-геологической обстановки, получать информацию о приближении работ к потенциально опасным участкам, а также своевременно реагировать на возникающие риски. Это обеспечит более высокий уровень безопасности и информированности для всех участников производственного процесса.

**Клюев А.Ю., Феоктистов А.Ю., Юсупов Г.А.**  
АО «Моделирование и цифровые двойники», г. Москва, Россия  
e-mail: [Andrey.Feoktistov@digitaltwin.ru](mailto:Andrey.Feoktistov@digitaltwin.ru), [alexey.klyuev@digitaltwin.ru](mailto:alexey.klyuev@digitaltwin.ru),  
[Grigorii.Iusupov@digitaltwin.ru](mailto:Grigorii.Iusupov@digitaltwin.ru)

**Ключевые слова:** флотация, математическая модель, численное моделирование, пользовательская функция, элементарный акт, кинетика, турбулентность, флотационные машины.

Одним из перспективных методов исследования влияния конструктивных особенностей флотомашин на гидрогазодинамические характеристики потоков и является моделирование на основе вычислительной гидрогазодинамики – *Computational Fluid Dynamics (CFD)*. Такой подход позволяет значительно снизить временные и финансовые затраты на проведение испытаний.



Для определения эффективности работы установки, также важно учитывать кинетику процесса флотации, которой зачастую пренебрегают при численном анализе. В исследовании математическая модель элементарного акта флотации, основанная на работах *Pyke et.al*, *Dai et.al* [1,2], интегрирована в программный продукт вычислительной гидродинамики с целью повышения точности моделирования процессов, протекающих в флотационных машинах. Подход, используемый в математической модели, основан на определении вероятности флотирруемости частиц пузырьками в контрольном объеме модели. Посредством применения источников межфазного обмена масса флотируемых частиц и пузырьков, динамика которых описывается соответствующими фазами, переходит в фазу флотокомплекса. На основании значений массового расхода каждой фазы на выходе определяется доля полезного продукта флотации и оценивается его извлечение.

Применение систем инженерного анализа позволит выполнить доводку изначально подобранного оборудования с целью повышения эффективности извлечения «полезных» минералов. Таким образом «традиционный» подход к проектированию расширяется этапами трехмерного моделирования процессов, протекающих в объеме флотомшины, и одномерного моделирования технологического процесса обогащения, что представлено на рисунке 1.

#### **Список использованных источников:**

1. Pyke, B. Bubble particle heterocoagulation under turbulent conditions // B. Pyke, D. Fornasiero, J. Ralston. - Journal of Colloid and Interface Science, 265, 2003, pp. 141–151.
2. Dai, Z. Particle–bubble attachment in mineral flotation // Z. Dai, D. Fornasiero, J. Ralston. – Journal of Colloid Interface Sci., 217(1), 1999, pp. 70–76.

**Ковалев В.С.<sup>1</sup>, Малодушев К.А.<sup>1</sup>, Шамиура Д.А.<sup>1</sup>, Фигуркин Д.С.<sup>1</sup>, Шибеева Д.Н.<sup>2</sup>,  
Наговицын Г.О.<sup>2</sup>, Быстров В.В.<sup>1</sup>, Ковальчук М.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Филиал МАУ в городе Анапты, Россия

e-mail: tumbamba@gmail.com

<sup>2</sup>Горный институт КНЦ РАН, г. Анапты, Россия

e-mail: nagovitsyn\_go@bk.ru, Shibaeva\_goi@mail.ru

#### **РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ КАЧЕСТВА ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО ПРИ ВЕДЕНИИ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ**

Колебания качества руды, обусловленные неравномерностью распределения полезного компонента в массиве, ухудшающимися горно-геологическими условиями отработки запасов, включением в добываемую рудную массу вмещающих пород, создают значительные трудности в переработке руды, снижая показатели обогащения. Поэтому получение рудопотока на входе обогатительного комплекса с требуемыми параметрами является важной актуальной задачей. Использование современных информационных технологий для стабилизации качества полезного ископаемого позволит сократить временные и человеческие ресурсы при планировании и оперативном управлении технологическими процессами переработки руды. В работе представлены результаты разработки программного модуля стабилизации качества полезного ископаемого для рудо-перегрузочного склада с послойным формированием штабеля. Исходными данными являются результаты реализации процесса планирования горных работ в горно-геологической информационной системе Mineframe, разработанной специалистами Горного института ФИЦ КНЦ РАН, а именно последовательность отработки единичных блоков в

каждом забое. На основе этой информации формируется расписание прибытия самосвалов на перегрузочный склад.

Стабилизация качества руды основана на математической модели штабеля, учитывающей объем кузова самосвала, качество транспортируемой руды, фигуру формируемой разгрузки, ее местоположение на складе в зависимости от выбранной пользователем системы формирования склада, процесс бульдозерного разравнивания слоя штабеля, а также выемку рудной массы со склада (местоположение экскаватора на складе, фигуру копания применяемой модели экскаватора). Стандартизация системы выгрузки разработана с целью оптимизации процесса просчета вариантов наилучшего места разгрузки рудной массы, определяющихся из условий достижения минимального отклонения от регламентируемого обогажительной фабрикой содержания полезного компонента в ковше экскаватора, минимального расстояния транспортирования автосамосвала, исключения формирования «мертвых» зон слоя штабеля. На рисунке 1 представлено окно программного модуля, иллюстрирующего предлагаемые пользователю варианты реализации процесса формирования склада.

Разрабатываемый программный модуль предполагает возможность визуализации процесса формирования склада, обеспечивающей представление результатов расчета информационной системы в виде блочной модели рудо-перегрузочного склада. Блочная модель позволяет отобразить содержание полезного компонента, проанализировать качество усреднения материала (рисунок 2а), реализовать анимацию отсыпки склада с последовательным отображением разгрузки самосвалов в виде конус-подобных фигур, имитацию разравнивания слоев и процесса выемки – экскавации (рисунок 2б).

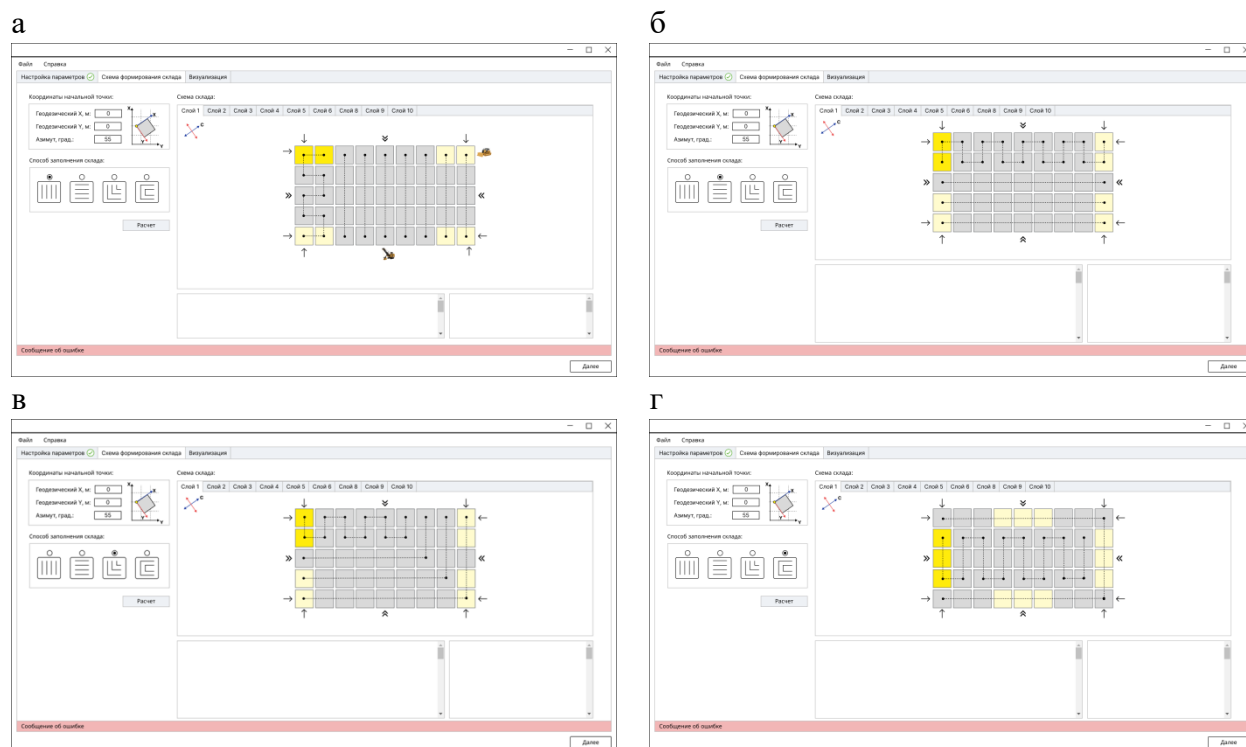


Рисунок 1 – Схемы заполнения склада: а) линейная поперечная, б) линейная продольная, в) угловая, г) П-образная

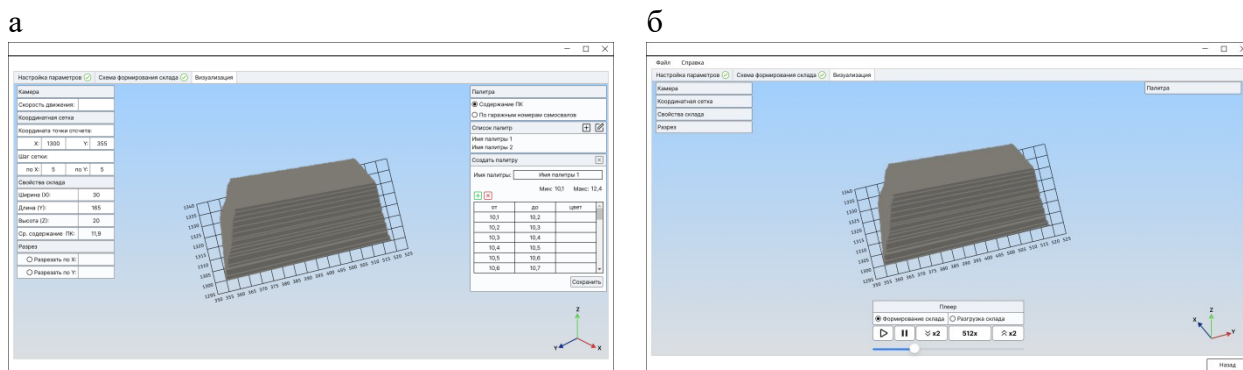


Рисунок 2 – Визуализация процесса формирования склада

**Константинов А.В.<sup>1</sup>, Рассказов И.Ю.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ИГД ДВО РАН – обособленное подразделение Хабаровского Федерального исследовательского центра, г. Хабаровск, Россия  
e-mail: alex-sdt@yandex.ru

<sup>2</sup>Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия  
e-mail: rasskazov@igd.khv.ru

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ЗОН В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

В условиях разработки удароопасных месторождений особую значимость приобретает задача своевременного выявления зон, подверженных активным геомеханическим процессам. Одним из наиболее информативных подходов к решению данной задачи является анализ сейсмоакустических данных, регистрируемых в режиме реального времени. Однако высокая плотность событий, ошибки их локации, а также сложная форма очагов разрушения создают затруднения при прямой интерпретации получаемых данных. В этих условиях становится актуальным использование методов интеллектуального анализа данных, в частности – кластерного анализа, для автоматизированного выделения акустически активных зон (ААЗ) в породном массиве.

В настоящей работе рассматривается применение алгоритма DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) для кластеризации сейсмоакустических событий, зарегистрированных системой мониторинга «Prognoz-ADS» на удароопасном месторождении Южное. DBSCAN отличается способностью эффективно обрабатывать данные с произвольной формой кластеров, устойчивостью к шуму и отсутствием необходимости заранее задавать количество кластеров, что делает его особенно подходящим для задач, связанных с выделением акустически активных зон.

Для повышения качества кластеризации был применён индекс Дэвиса-Болдина – метрика, позволяющая оценить качество результата кластеризации, с учётом внутрикластерных и межкластерных расстояний. На основании анализа тепловых карт значений индекса в зависимости от параметров DBSCAN (максимального расстояния между точками  $\varepsilon$  и минимального числа точек  $n_p$ ) и пространственного расположения кластеров были выбраны оптимальные значения:  $\varepsilon = 7$  м,  $n_p = 13$ . При установлении таких параметров удаётся избежать слияния событий в слишком крупные размытые кластеры, а также чрезмерного деления на слишком мелкие группы, не несущие полезной информации. Среднее значение индекса Дэвиса-Болдина при этом составило 0,5, что соответствует хорошему качеству кластеризации.

В результате анализа удалось выделить 20 акустически активных зон, представленных на рисунке 1, отличающихся повышенной плотностью сейсмоакустических событий. Пространственное распределение ААЗ соответствует участкам, подверженным развитию очагов разрушения, что позволяет интерпретировать кластеры как зоны концентрации горного давления. Для уточнения временных характеристик каждой зоны был проведён анализ динамики регистрации событий в пределах кластеров. Это дало возможность определить продолжительность активного периода развития каждой зоны и исключить из анализа события, связанные с техногенными помехами, регистрационными ошибками и остаточными разгрузочными процессами.

Особое внимание в работе было уделено методике подбора параметров DBSCAN, подчёркивается важность графического анализа кривой зависимости расстояний до ближайших соседей и применения автоматизированных оценочных критериев качества кластеризации. Такой подход обеспечивает объективность при формировании исходных параметров кластеризации и может быть повторно применён на других наборах данных. Также продемонстрирована важность дополнительной фильтрации по времени – исключения событий, выходящих за временные рамки основного периода активности, что позволяет получить более точную картину развития очага.

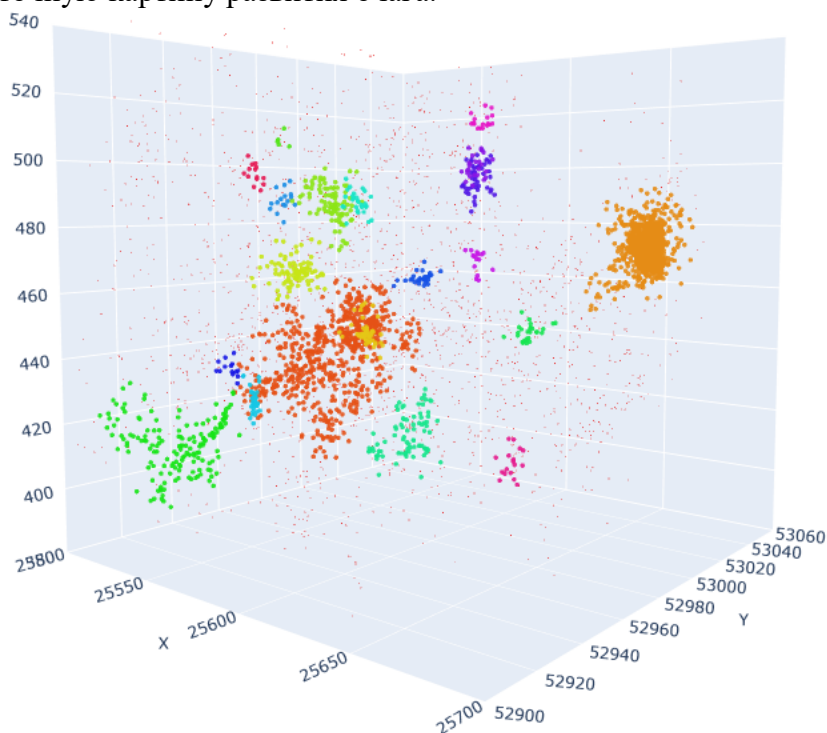


Рисунок 1 – Результат кластеризации акустически активных зон по данным сейсмоакустического мониторинга на месторождении Южное

Анализ пространственно-временной структуры выявленных акустически активных зон позволил установить характерные закономерности, включая постепенное расширение зоны активности, смещение её центра и изменение динамики процессов разрушения для отдельных кластеров. Полученные результаты создают основу для дальнейшего, более детального изучения механизмов формирования и развития очагов разрушения, а также выявления условий, предшествующих возникновению опасных динамических проявлений горного давления.

Разработанный программно-методический комплекс, основанный на использовании DBSCAN с автоматическим подбором параметров и визуальной верификацией результатов, позволяет оперативно обрабатывать большие массивы сейсмоакустических данных. Внедрение данного подхода в системы сейсмоакустического мониторинга способствует

минимизации риска аварийных ситуаций за счёт своевременного выявления акустически активных зон.

Таким образом, данное исследование демонстрирует эффективность применения алгоритмов кластеризации для выделения очагов разрушения в горных породах на основе данных акустической эмиссии. Комплексное использование DBSCAN и индекса Дэвиса-Болдина обеспечивает как точность идентификации, так и гибкость анализа в условиях высокой неопределённости и изменчивости данных. Полученные результаты обладают практической значимостью для задач промышленной безопасности, оценки геомеханического состояния и принятия решений в рамках мониторинга месторождений с повышенным горным давлением.

*Расчеты и анализ были выполнены на базе ЦКП «ЦИМС» ХФИЦ ДВО РАН.*

**Константинов К.Н., Кулькова М.С., Орлов А.О.**

*Горный институт КНЦ РАН, г. Анапты, Россия*

*e-mail: k.konstantinov@ksc.ru, m.kulkova@ksc.ru, a.orlov@ksc.ru*

## **КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ КРЕПЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

В общемировой практике ведения горных работ в последние десятилетия закрепились тенденции к необходимости отработки эксплуатируемых рудных месторождений на глубоких горизонтах. При этом отработка месторождений сульфидных руд Талнахского рудного узла начиналась с глубин 600-700 м и достигла к настоящему времени глубин более 1600 м от дневной поверхности. В сложных горно-геологических условиях, обусловленных особенностями геомеханических характеристик, гидрогеологического и теплового режимов, буровзрывными работами и другими неблагоприятными факторами, важным представляется в вопросах обеспечения устойчивости подземных горных выработок на таких глубинах опираться на знания о параметрах напряженно-деформированного состояния массива горных пород. С целью обоснования выбора эффективных способов крепления в процессе проходки сверхглубоких разведочных выработок РВ-1 (гор. -1750 м) и РВ-2 (гор. -1850 м) на шахте «Глубокая» рудника «Скалистый», отрабатывающего Талнахское месторождение медно-никелевых руд, выполнены исследования комплексом натурных и численных методов.

В результате ультразвуковым и реометрическим методом получены данные о нарушенности массива пород в окрестности горных выработок. Методом сейсмического профилирования исследованы упругие характеристики приконтурной зоны в стенках выработок. Выполнен прогноз напряженного состояния с применением метода численного моделирования. По результатам визуального осмотра выработок и анализа кернового материала проведена рейтинговая оценка качественных характеристик массива пород, слагающего выработки.

Комплексом локальных методов установлена глубина нарушенной зоны, которая в среднем составляет 1 м от контура выработок. В результате численного моделирования установлено, что наиболее предпочтительной является гипотеза о действии тектонических напряжений в данной области массива, при этом их величины сопоставимы со значениями гравитационной составляющей, а в некоторых условиях превышают их. Данные результатов визуальных обследований и анализа геолого-маркшейдерской документации указывают на удовлетворительное геомеханическое состояние массива пород, слагающего РВ-1 и РВ-2. Совокупность полученных результатов натурных и численных исследований позволили разработать рекомендации по использованию эффективных с точки зрения устойчивости приконтурного массива пород параметров крепления сверхглубоких выработок.

**Котенков А.В., Русских И.Л., Кульминский А.А.**

*АО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, Россия*

*e-mail: gpgr@umbr.ru, russkih\_il@umbr.ru, kulminskiy\_AA@umbr.ru*

## **АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОСТРОЕНИЕ ВЫЕМОЧНЫХ ЕДИНИЦ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПОТЕРЬ И РАЗУБОЖИВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧИ РУД**

Неотъемлемой частью разработки различной проектной документации является определение параметров оптимальной выемочной единицы, а также показателей потерь и разубоживания руды, от точности определения которых зависит качество извлекаемого полезного ископаемого и количество добываемой руды.

В качестве основной методики расчёта используется отраслевая инструкция по определению, нормированию и учёту потерь и разубоживания руды и песков на рудниках и приисках министерства цветной металлургии СССР, изданная в 1977 году. Конечно, на ряде предприятий используют свои собственные инструкции, однако, как показывает практика, за основу принимается всё та же методика. В данной инструкции нормативы потерь и разубоживания, образующиеся в процессе оконтуривания выемочных единиц, определяются по коэффициенту, характеризующему оптимальное соотношение между потерями и разубоживанием на границе выемки в зависимости от ценности руды и бортового содержания полезного компонента, ниже которого добыча нецелесообразна. При этом показатели потерь и разубоживания не учитываются в полном объеме за счет упрощенного представления рудо-породного контакта.

Проектирование и планирование подземной добычи руд требует точной оптимизации использования минеральных ресурсов. Ключевым фактором экономической эффективности является минимизация потерь полезного ископаемого при оптимальном разубоживании.

В настоящее время, с учётом большого количества рассматриваемых в проектах элементарных выемочных единиц (от нескольких до десятков тысяч) всё большую роль в процессе проектирования подземных горных работ играют современные программные комплексы. Они позволяют существенно повысить точность определения конструктивных показателей потерь и разубоживания при определении границ выемочных единиц.

Для решения данных вопросов специалисты отдела горной науки АО «Уралмеханобр» используют программный продукт Deswik содержащий модуль Deswik.SO.

Deswik.SO – это специализированный программный модуль для стратегического планирования горных работ, позволяющий оптимизировать контуры добычи, минимизировать потери и разубоживание за счет математического моделирования и алгоритмов оптимизации.

Понимание и правильный учёт влияющих факторов в программном модуле Deswik.SO позволяет отстроить в автоматическом режиме большой массив элементарных выемочных единицы с учетом:

- технологии и параметров выемки (системы разработки);
- граничного бортового содержания полезного компонента;
- технологических ограничений (минимальная мощность рудного тела, углы залегания, применяемое технологическое оборудование и т.д.);
- максимально допустимого разубоживания;
- экономических параметров (стоимость руды, затраты на добычу и переработку и т.д.).

При построении выемочных единиц автоматически определяются конструктивные потери и разубоживания руды, которые возникают из-за:

- невозможности извлечения руды из-за требований безопасности (необходимость оставления целиков различного назначения).

- геометрии рудного тела;
- применяемой системы разработки;
- параметров и технологических возможностей применяемого горного оборудования.

Моделирование в программном модуле Deswik.SO, позволяет:

- определить контакт «руда- порода» по граничному бортовому содержанию.
- произвести расчет потерь и разубоживания с применением различных сценариев и геометрических параметров элементарных выемочных единиц по высоте, ширине и длине.
- оптимизировать запасы (нахождение баланса между извлечением и качеством).
- повысить точность оценки конструктивных потерь и разубоживания руды;
- оптимизировать контуры добычи с учетом экономических и технологических факторов;

Таким образом, правильный ввод параметров и применение современных программных комплексов позволяет значительно повысить эффективность планирования освоения месторождений за счёт увеличения точности определения конструктивных показателей потерь и разубоживания, а также оптимизировать качество добываемой руды.

**Криницын Р.В., Аленичев В.М.**

ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

e-mail: krin@igduran.ru

## **СПОСОБ ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ГОРНОМ МАССИВЕ МЕТОДОМ ЩЕЛЕВОЙ РАЗГРУЗКИ**

Неопределенность горно-геологических условий и непрерывное изменение свойств породного массива по мере отработки месторождения обуславливают необходимость перехода от детерминированных оценок параметров техногенных объектов к вероятностным. Это диктуется постоянно возрастающими требованиями к объективности принимаемых решений при недропользовании. Основопологающим фундаментом успешного решения этой задачи является использование геомеханической модели, учитывающей напряженно-деформированное состояние горных пород, геологические, структурные и другие особенности горного массива. Для изучения деформационных процессов непрерывно ведутся экспериментальные работы и исследования по измерению напряженно-деформированного состояния массива горных пород в процессе отработки месторождений. В настоящее время используются различные методы определения физико-механических свойств горных пород: деформационные, структурные и геофизические. Деформационные методы основаны на частичной или полной разгрузке массива горных пород в зоне техногенных полостей различного объема (щели, скважины, шпуры, подготовительные выработки), по деформациям которых ведется пересчет напряженного состояния. Структурные и геофизические методы позволяют выявить только качественную картину соотношения напряжений в массиве горных пород.

Достаточно широко используемый на рудниках Урала метод щелевой разгрузки массива, основанный на измерении деформаций, обусловленных образованием на стенке выработки щели в виде полудиска. База разгрузки пород на обнажении в сторону щели равна зоне ее влияния на изменение напряжений.

Величину напряжений, действующих перпендикулярно к плоскости щели, определяют по формуле:

$$\sigma_{\perp} = \frac{\pi \cdot U_{AB} \cdot E_{\pi}}{8R_{\text{щ}} - \pi \cdot l \cdot (1 - K_{\perp(l)cp} + \mu_0 K_{\parallel(l)cp})}, \quad (1)$$

где  $U_{AB}$  - деформация массива на базе АВ после образования щели, м;

$E_{\pi}$  - модуль упругости породы в образце, МПа;

$R$  - радиус щели, м;

$l$  - расстояние между точками А и В, м;

$K_{\perp(\perp)cp}$ ,  $K_{\parallel(\parallel)cp}$  - средние значения коэффициенты концентрации напряжений на участках ОА и ОВ длиной  $l/2$ .

Для вычисления дисперсии (среднеквадратического отклонения) величины напряжений, рассчитываемой по многофакторной статистической нелинейной зависимости, включающей независимые случайные величины учитываемых аргументов, меняющихся в небольшом интервале, и отсутствии между ними **корреляционной связи** ( $r_{ij} = 0$  при  $i \neq j$ ) **правомерно** использование первых производных при разложении функции (1) в ряд Тейлора.

Для вычисления дисперсии отклонения величины напряжения, действующего перпендикулярно к плоскости щели, от ошибок определения значений аргументов, учитываемых в формуле (1), воспользуемся математическим выражением, характеризующим в многомерном исчислении измерений функции, вызванное одновременными варьированием учитываемых переменных (аргументов) и вычисляемый как сумма частных производных функции по каждой переменной, умноженной на соответствующие ошибки определения этих аргументов. В процессе вычисления частных производных по учитываемым аргументам использованы формулы приведения тригонометрических функций (сложения, вычитания, двойных, тройных и половинных углов), позволяющими упрощать их вид.

$D\sigma_{\perp} =$

$$\begin{aligned}
 &= \left( \frac{\pi \cdot E_{\pi}}{8R_{щ} - \pi \cdot l \cdot (1 - K_{\perp(\perp)cp} + \mu_0 K_{\parallel(\parallel)cp})} \right)^2 \times (\sigma_{U_{AB}})^2 + \\
 &+ \left( \frac{\pi \cdot E_{\pi}}{8R_{щ} - \pi \cdot l \cdot (1 - K_{\perp(\perp)cp} + \mu_0 K_{\parallel(\parallel)cp})} \right)^2 \times (\sigma_{E_{\pi}})^2 + \\
 &+ \left( \frac{8\pi \cdot U_{AB} \cdot E_{\pi}}{[8R_{щ} - \pi \cdot l \cdot (1 - K_{\perp(\perp)cp} + \mu_0 K_{\parallel(\parallel)cp})]^2} \right)^2 \times (\sigma_{R_{щ}})^2 + \\
 &+ \left( \frac{\pi^2 \cdot U_{AB} \cdot E_{\pi} (1 - K_{\perp(\perp)cp} + \mu_0 K_{\parallel(\parallel)cp} - 1)}{[8R_{щ} - \pi \cdot l \cdot (1 - K_{\perp(\perp)cp} + \mu_0 K_{\parallel(\parallel)cp})]^2} \right)^2 \times (\sigma_l)^2 + \\
 &+ \left( \frac{\pi^2 \cdot U_{AB} \cdot E_{\pi} \cdot l \cdot K_{\parallel(\parallel)cp}}{[8R_{щ} - \pi \cdot l \cdot (1 - K_{\perp(\perp)cp} + \mu_0 K_{\parallel(\parallel)cp})]^2} \right)^2 \times (\sigma_{\mu_0})^2 + \\
 &+ \left( \frac{\pi^2 \cdot U_{AB} \cdot E_{\pi} \cdot l}{[8R_{щ} - \pi \cdot l \cdot (1 - K_{\perp(\perp)cp} + \mu_0 K_{\parallel(\parallel)cp})]^2} \right)^2 \times (\sigma_{K_{\perp(\perp)cp}})^2 + \\
 &+ \left( \frac{-\pi^2 \cdot U_{AB} \cdot E_{\pi} \cdot l \cdot \mu_0}{[8R_{щ} - \pi \cdot l \cdot (1 - K_{\perp(\perp)cp} + \mu_0 K_{\parallel(\parallel)cp})]^2} \right)^2 \times (\sigma_{K_{\parallel(\parallel)cp}})^2. \quad (2)
 \end{aligned}$$

Вероятностно-статистическая величина напряжений, рассчитанная по многофакторной статистической функции (1) с учетом вероятностных характеристик учитываемых аргументов, зависит от доверительной вероятности  $p_t$ , задаваемой числом стандартных отклонений  $t$  (числом сигм):

$$\sigma_{\uparrow p_t} = \sigma_{cp} \pm t \cdot \sqrt{D\sigma_m}, \quad (3)$$

где  $t$  – число стандартных отклонений (число сигм),  $t = 1, 2, 3$ ;  $\sigma_{cp}$  – напряжение, вычисленное при средних значениях аргументов;  $\sigma_m$  – стандартное отклонение напряжения;  $p_t$  – вероятность оценки параметра.

Выражение (3) позволяет оценить достоверности определения напряжений в горных породах по данным экспериментальных измерений.

**Кузнецов М.А., Достовалов Р.Н.**

*Горный институт КНЦ РАН, г. Анапты, Россия*

*e-mail: misha.kuznetsov@gmail.com, r.dostovalov@ksc.ru*

## **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА GAMIT/GLOBK ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ЛОКАЛЬНЫХ ПОЛИГОНАХ**

Изучение современных движений земной коры спутниковыми методами в условиях природных и техногенных сред производится уже достаточно продолжительное время.

Для обработки спутниковых измерений перемещений наблюдательных станций на геодинамических полигонах глобального и регионального масштаба создан ряд прикладных научных программных комплексов, с помощью которых не только успешно решаются задачи нахождения относительных скоростей наблюдаемых пунктов, но и реализуются современные глобальные отсчетные основы, такие как Международная земная отсчётная основа (ITRF).

При этом соблюдается последовательная связь полигонов разных масштабов для установления надёжных опорных пунктов, что позволяет рассматривать результаты измерений, снижая влияние возможных искажений и избегая ошибочных интерпретаций в оценке направления и скоростей взаимного перемещения наблюдаемых пунктов.

Вместе с тем из отечественных публикаций известно, что на локальных полигонах при изучении современных движений земной коры спутниковые измерения зачастую проводятся без использования опорных пунктов региональных и глобальных международных и отечественных геодинамических полигонов. А обработка спутниковых измерений в большинстве случаев производится в стандартных коммерческих программах плохо подходящих для задач изучения изменений пространственных положений наблюдаемых пунктов во времени.

Учитывая это, выполнена попытка организации спутниковых измерений на локальном геодинамическом полигоне с опорой на пункты международной сети ITRF и обработкой полученных данных в научном программном комплексе GAMIT/GLOBK.

Доклад посвящён рассмотрению подходов к решению ряда вопросов, возникающих как со стратегией обработки получаемых данных при переходе от глобального масштаба к локальному, так и с использованием инструмента «большой» геодинамики для решения задач в условиях микрополигона.

**Кузнецов Н.Н.**

*Горный институт КНЦ РАН, г. Анапты, Россия*

*e-mail: n.kuznecov@ksc.ru*

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД**

В настоящее время в сфере лабораторных исследований образцов горных пород происходят непрерывные процессы автоматизации способов получения экспериментальных данных. С одной стороны, совершенствуются способы управления подвижными частями прессов при помощи компьютерного интерфейса и программного обеспечения. С другой стороны, развиваются подходы к непрерывной регистрации и контролю параметров испытаний образцов пород, таких как задаваемая нагрузка, продольная и поперечная деформации образцов, скорость их деформирования и нагружения и т. д. Такие усовершенствования позволяют исследователям задавать программы нагружения образцов и проводить испытания в автоматизированном режиме с минимальной долей участия в самом процессе. При этом сокращается время на проведение лабораторных исследований, увеличивается качество и достоверность получаемых данных, повышается безопасность выполняемых на экспериментальном оборудовании работ.

Еще одним важным направлением в области испытаний образцов горных пород является их цифровизация. Она заключается в построении моделей образцов с учетом их реальных размеров и внутренней структуры (поровое пространство, распределение минералов в объеме образца), а также моделировании процессов их нагружения (одноосное сжатие и растяжение, трехосное сжатие, сдвиг и т. д.). То есть происходит трансформация физических испытаний в цифровые, выполняемые с использованием программных продуктов. Подобная трансформация нацелена на то, чтобы в какой-то мере заместить лабораторные исследования горных пород и ускорить процесс получения экспериментальных данных, что отчасти достигается применением систем искусственного интеллекта. Тем не менее, физический эксперимент остается необходимым для заверки получаемых в ходе моделирования результатов. Также присутствует проблема получения детальных трехмерных моделей образцов. В некоторой степени она решается за счет использования средств компьютерной томографии.

В целом, автоматизация и цифровизация процессов экспериментальных исследований образцов горных пород приводят к переходу этих процессов на качественно более высокий уровень, увеличивают степень достоверности получаемых данных, сокращают время проведения исследований и позволяют устанавливать новые закономерности изменения физических свойств пород.

**Лантев В.В.**

*Горный институт КНЦ РАН, г. Анапты, Россия*

*e-mail: v.laptev@ksc.ru*

## **ОПЫТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С АК «АЛРОСА» (ПАО), ДОСТИЖЕНИЯ, УРОКИ, ВЫВОДЫ**

Сотрудничество с АК «Алроса» (ПАО) стало важным этапом в развитии отечественной геоинформационной системы (ГИС) «Майнфрэйм», ориентированной на цифровизацию процессов горного производства. До начала сотрудничества разработки велись в рамках ограниченных по масштабу проектов, что не позволяло в полной мере реализовать потенциал платформы в условиях крупных промышленных внедрений.

Ключевым стимулом к пересмотру архитектурных и функциональных решений послужило требование импортозамещения программного обеспечения к 2025 году, заявленное Правительством РФ в 2022 году для организаций с государственным участием. В этом контексте АК «Алроса» (ПАО) выбрала ГГИС «Майнфрэйм» в качестве приоритетного решения для замещения иностранного программного обеспечения. Для соответствия современным требованиям был запущен проект «Развитие ГГИС Майнфрэйм», подразумевающий модернизацию архитектурной и функциональной части системы и пользовательского интерфейса. Среди решённых задач замена графического ядра, смена СУБД, разработка новых интеграционных взаимодействий, доработка системы информационной безопасности, обновление интерфейса и механизмов взаимодействия с системой, существенное развитие функциональности модулей проектирования, и геолого-маркшейдерского сопровождения горных работ.

Реализация проекта сопровождалась значительным ростом команды — за полтора года численность специалистов увеличилась в 4,5 раза. Такое расширение повлекло необходимость реинжиниринга бизнес-процессов, развития инфраструктуры, переподготовки кадров и изменения распределения ответственности. Особую нагрузку понесли опытные члены коллектива, совмещающие выполнение технических задач с ролью наставников, руководителей мини-команд и участников найма новых специалистов.

Проектная деятельность осложнялась необходимостью одновременного управления несколькими крупными направлениями, включая разработку модулей среднесрочного и оперативного планирования открытых и подземных горных работ, развитие функционала условного геологического моделирования. Изменение объёма исходных требований и ротация ключевых специалистов со стороны заказчика, недооценка трудозатрат и недостаточный опыт ведения крупных проектов со стороны исполнителя привели к возникновению задержек на критических этапах.

Вместе с тем, тесное взаимодействие с АК «Алроса» (ПАО), основанное на регулярном согласовании технических решений, проведении демонстраций, двустороннем анализе результатов, и открытости заказчика к конструктивному диалогу, позволило сохранить продуктивность, обеспечить поэтапную реализацию задач и успешно завершить проект. На сегодняшний день ГГИС Майнфрэйм проходит этап промышленную эксплуатацию на открытых и подземных рудниках АК «Алроса» (ПАО).

Работа по дальнейшему развитию ГГИС продолжается. Приоритетными направлениями являются вывод на рынок версии «Майнфрэйм 10», завершение разработки минимально жизнеспособной версии (MVP) продуктов среднесрочного планирования горных работ и условного геологического моделирования, начало разработки модулей оперативного планирования.

Полученный опыт позволяет сделать вывод о том, что успешная реализация масштабных проектов в сфере цифровизации горного производства требует не только технологической зрелости, но и гибкого управления изменениями, эффективного взаимодействия с заказчиком и постоянного совершенствования организационных процессов.

**Лукичев С.В.**

*Горный институт КНЦ РАН, г. Анапты, Россия*

*e-mail: s.lukichev@ksc.ru*

## **ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ: ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ НЕЗАВИСИМОСТЬ**

На сегодня цифровые технологии лежат в основе современных методов инженерного обеспечения горных работ, на базе цифровых решений строятся системы обеспечения безопасности горных работ, средства дистанционного и роботизированного управления технологическим оборудованием и транспортом. Цифровизация в горной промышленности, начинавшаяся с разработки отдельных компьютерных программ, решающих ограниченный круг задач, на сегодня представляет из себя набор цифровых систем, специализирующихся на решении комплекса задач в определённой области горной науки и производства. Применительно к добыче твёрдых полезных ископаемых это: горно-геологические информационные системы (ГГИС); системы обеспечения геомеханической безопасности горных работ; системы диспетчеризации персонала и транспорта; системы автоматизированного управления горнотранспортным оборудованием; системы управления ремонтом и техническим обслуживанием оборудования; системы обеспечения комфортных/безопасных условий работы. Все эти системы, как правило, построены на решении узкоспециализированных задач в своем цифровом пространстве со своим форматом хранения и обмена данными, что соответствует нынешнему этапу развития горных цифровых технологий, но является препятствием при создании сквозной технологии управления горными работами.

Перспектива развития цифровых методов комплексного решения задач горного производства связана с созданием цифрового двойника горнодобывающего предприятия. При этом основным условием функционирования цифрового двойника является создание единого цифрового пространства моделей объектов горной технологии, используемых для формирования методов оценки состояния массива горных пород, проектирования, планирования и управления горными работами. Из перечисленных выше систем для формирования единого цифрового пространства в наибольшей степени подходят ГГИС, в виртуальном пространстве которых формируются модели массива горных пород и запасов полезного ископаемого, проектные и фактические модели горных выработок, реализуется режим многопользовательского доступа к базам данных. На программных продуктах класса ГГИС горнодобывающие компании строят цифровые технологии проектирования, планирования и управления горными работами. При этом следует отметить, что на импортные программные продукты до недавнего времени приходилось 90-95% от объёма продаж ГГИС на российском рынке. Таким образом, заложенные в импортные ГГИС решения формировали и до сих пор формируют идеологию работы с цифровыми моделями и условия доступа к ним. Тенденция к созданию на базе цифрового двойника сквозной технологии управления безопасной добычей и транспортированием горной массы предполагает наличие встроенных инструментов решения целого комплекса взаимосвязанных задач, ограничивая возможности отечественных разработчиков по интеграции своих инструментов в систему и оставляя им роль специалистов по адаптации зарубежного ПО к конкретным условиям эксплуатации.

Одной из немногих российских ГГИС является разработка Горного института КНЦ РАН и ООО «Лаборатория МАЙНФРЭЙМ», являющаяся полнофункциональным аналогом импортных систем данного класса. Вместе с тем импортные ГГИС по ряду направлений имеют более развитый функционал. Для того чтобы ликвидировать разрыв и ускорить процесс разработки нового функционала, было принято решение о создании на базе ГГИС MINEFRAME горной цифровой платформы, дающей через API-функции возможность

прямого доступа к моделям и инструментам системы, что существенно упрощает процесс разработки новых инструментов и интеграции в ГГИС сторонних разработок. Применительно к идее функционирования в едином виртуальном цифровом пространстве это означает использование для моделирования единой цифровой среды, единых унифицированных моделей объектов, единой БД коллективного контролируемого доступа.

Существенное ускорение работы по развитию ГГИС MINEFRAME получили после заключения стратегического соглашения команды разработчиков с АК «Алроса», которая выступила в роли индустриального партнёра, обеспечивающего финансовую и организационную поддержку работ. Ближайшая цель этого партнёрства – создание ГГИС мирового уровня не только для нужд АК «Алроса», но и для всей отрасли.

В заключении следует отметить, что важным вопросом цифровой трансформации горной промышленности является обеспечение технологической независимости отрасли, которая невозможна без развития российского программного обеспечения. В связи с этим разработка цифровых решений, в том числе на основе создания горной цифровой платформы, позволяет не только решать задачу импортозамещения, но и развивать научные школы в области горных цифровых технологий.

***Малинникова О.Н., Одинцев В.Н., Ульянова Е.В., Пашичев Б.Н.***

*ИПКОН РАН, г. Москва, Россия*

*e-mail: olga\_malinnikova@mail.ru*

## **ЦИФРОВОЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОСТРУКТУРЫ УГЛЯ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ**

При разработке полезных ископаемых прогноз опасных геомеханических явлений имеет большое значение. В настоящее время различные виды аналитического, численного и инструментального прогнозов в той или иной степени включают детерминированную составляющую, связывающую причину и следствие и являющуюся физической основой прогноза. Однако по мере освоения месторождения формируется большой набор данных о свойствах пород и геомеханических факторах, которые изначально трудно связать какой-либо логической схемой. Эти данные кажутся на первый взгляд несвязанными и хаотичными, поэтому часто остаются невостребованными в прогнозах.

Вместе с тем, вследствие развития информационных технологий и, в частности, вследствие разработки программ компьютерного анализа больших массивов данных, появляется возможность использования полного объема данных в прогнозных исследованиях. Работы в этом направлении, особенно по геомеханической тематике, представляются перспективными, поскольку для земных недр характерны неоднородность свойств пород и природное многообразие горно-геологических условий.

Неоднородность угля проявляется на различных масштабных уровнях, и в масштабе угольного пласта, и в микромасштабе с характерным размером среды менее миллиметра. Многочисленные наблюдения и данные о неоднородности угля отражены в отечественных и зарубежных работах, из которых можно заключить о многообразии прочностной и деформационной структуры неоднородностей, отсутствии явной упорядоченности в структуре и о большой сложности, часто невозможности, учета неоднородностей в геомеханических прогнозных оценках.

В представленной работе показано, что современная компьютерная обработка черно-белых снимков поверхности угля, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа и выявляющих на первый взгляд хаотичную микроструктуру неоднородности угля, позволяет сделать шаг в учете неоднородностей в прогнозных оценках, в частности, сделать заключение о предрасположенности угля к газодинамическим явлениям.

Проведенное исследование основано на компьютерном анализе распределения и интенсивности черно-серо-белых тонов различных неоднородностей, проявляющихся на снимках.

Первое направление исследований было связано с обработкой изображений на основе фрактальных методов. В задачу исследований входило следующее. (1) Получение цифровых изображений поверхности кусочков углей, взятых из опасных и неопасных по внезапным выбросам угольных пластов. (2) Анализ изображений по методу «box counting» для определения фрактальной размерности структуры нарушенности угля, которая рассматривается как наличие неоднородностей различной природы (микротрещин, пор, микрослоев, включений и т.п.). (3) Использование в анализе изображений формализма мультифракталов с помощью разработанного отечественного программного пакета «Фрактал-ПК». Цель мультифрактального анализа состояла в построении скейлинг-спектра, т.е. спектра сингулярностей неоднородности изображения.

Впервые была установлена связь фрактальных свойств структуры оптически регистрируемой нарушенности поверхности угля и его предрасположенности к газодинамическому разрушению. Фрактальная размерность  $D$  неоднородности микроструктуры выбросоопасных углей соответствует условию  $D > 1,5$ . Установлено также, что спектры сингулярностей у выбросоопасных углей гораздо шире спектров невыбросоопасных углей, поэтому ширина спектра сингулярностей может служить показателем предрасположенности углей к газодинамическим явлениям. Угли не опасны по газодинамическим явлениям, если ширина спектра  $\Delta < 1,5$ , и опасны, если  $\Delta > 1,5$ .

Второе направление исследований связано с обработкой информации на основе анализа информационной энтропии и информационной сложности структуры неоднородности углей. В этом исследовании использовался метод оценки сложности неоднородности, основанный на пермутационной энтропии и величине статистической сложности, определяемой как произведение энтропии на расхождение Йенсена–Шеннона между наблюдаемым и равновероятным распределением шярлет-признаков. Расчеты проводились с использованием стандартных библиотек языка Python для расчетов и визуализации (SciPy, Matplotlib), а также шярлет-разложения PyShearlets.

Исследовались цифровые изображения поверхности угольных образцов естественной формы, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа.

Рассчитанные статистические значения величин энтропии и сложности позволяют сравнить неоднородности структуры образцов углей, отобранных из зон пластов опасных и неопасных по внезапным выбросам. Установлено, что угли, не склонные к опасным газопроявлениям, обладают более упорядоченной микроструктурой, с диапазоном разброса значений энтропии 0,2 в относительных единицах. Микроструктура углей, склонных к опасным проявлениям, более хаотична, диапазон разброса соответствующих значений энтропии составляет 0,4 в относительных единицах. Используя цифровые фотографии образцов углей и предложенный метод построения диаграмм «энтропия – сложность», можно более точно определить местоположение выбросоопасных зон в шахте и, более того, уточнить при возможной аварии тип произошедшего газодинамического явления, т. е. установить, правомерно ли считать явление внезапным выбросом или обрушением.

Таким образом, цифровой анализ двумерных изображений поверхности микроструктуры угля без привлечения каких-либо физических предпосылок о геопроцессах позволяет делать заключение о склонности его структуры к выбросоопасности, в той части пласта, откуда был извлечен образец угля. Использование геометрической информации, на первый взгляд хаотичного содержания, позволяет продвинуться вперед в решении проблемы безопасности.

При наличии сканирующего микроскопа и соответствующих компьютерных программ цифровой анализ изображений может быть проведен достаточно быстро и поэтому использован не только при долгосрочном и среднесрочном прогнозах, но и при оперативном

прогнозе. Образцы угля могут быть извлечены из различных участков шахтного поля, следовательно, можно оперативно выявлять и контролировать выбросоопасные ситуации по мере разработки угольного пласта. В перспективе на основе множества получаемых изображений угля несложно построить самообучаемую нейронную сеть и, используя технологии искусственного интеллекта в отношении распознавания образов, организовать более адекватный и глубокий прогноз выбросоопасности угля с учетом данных о содержании метана в угле и прочности угля.

**Мелихов М.В., Калашиник А.И., Остапенко С.П., Лебедик Е.Ю.**

*Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия*

*E-mail: m.melikhov@ksc.ru*

## **КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ХВОСТОХРАНИЛИЩ В АРКТИКЕ<sup>3</sup>**

В настоящее время на территории Мурманской области размещено 11 хвостохранилищ минерального сырья площадью от 0,57 до 20 км<sup>2</sup>. Большая часть из них относится к категории действующих, другая часть - законсервированных или закрытых в результате ликвидации горных предприятий. Основными особенностями их эксплуатации являются сложные геологические, гидрогеологические и климатические арктические условия. Хвостохранилища расположены рядом с населенными пунктами и охраняемыми природными территориями и могут оказывать негативное влияние на человека и окружающую среду. В соответствии с отраслевыми нормами и правилами необходимо обеспечивать регулярный контроль и мониторинг хвостохранилищ, при этом средства и методы наблюдений выбираются и обосновываются в зависимости от класса опасности и сложности гидротехнических сооружений. В достижении этой цели существует многообразие инструментов и технологий (GPS-геодезия, наземная геодезия, геофизика, лазерные сканеры, БПЛА, спутниковые системы и т.д.) для оценки их реального/прогнозного состояния и антропогенного воздействия. В Горном институте КНЦ РАН применяется комплексный подход к мониторингу хвостохранилищ на основе многоуровневых и мультимасштабных наблюдений и исследований. На относительно небольших участках хвостохранилищ, как правило, достаточно использование традиционных методов и технологий, однако в целом на хвостохранилищах, занимающих огромные площади территории и расположенных вблизи других промышленных объектов и природных ресурсов в условиях сложного рельефа местности, – экономически целесообразно использование автоматизированных и дистанционных методов и технологий в составе комплексной системы наблюдений. В развитии данного направления был разработан новый комплексный методический подход к дистанционному обследованию и мониторингу в режиме близко к реальному времени сопряженных горно-гидротехнических сооружений и особо охраняемых природных территорий на основе современных космических и цифровых технологий. Прогноз и управление техногенными рисками проводится путем создания виртуальных двойников хвостохранилищ и информационных карт потенциальных рисков с ранжированием исследуемых объектов по степени опасного воздействия на основе обобщения пространственных данных, и данных, полученных при построении геофильтрационной 3D модели массива и гидрогеомеханическом моделировании формирующихся опасных фильтрационно-деформационных процессов, а также дешифрования и анализа мультиспектральных оптико-электронных космоснимков районов

---

<sup>3</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-27-20013)

промышленного загрязнения территориальных вод и приземного слоя атмосферы. По результатам исследований построена геофильтрационная 3D модель хвостохранилища, приведены эффективные способы дистанционной площадной оценки и контроля за состоянием хвостохранилищ и прилегающей водной акватории, а также рассмотрен пример воздействия хвостохранилища на национальный природный заповедник.

**Мельников Н.Я.**

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,*

*г. Санкт-Петербург, Россия*

*e-mail: melnikyar@yandex.ru*

## **ВЫЯВЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИЙ БОРТОВ КАРЬЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

В настоящее время геомеханическое обоснование предельно допустимых параметров бортов карьеров основано на оценке несущей способности. Результатом такой оценки является коэффициент запаса устойчивости и сравнение его расчетного значения с нормативным.

Согласно нормативным подходам, коэффициент запаса устойчивости является единственным критерием обеспечения устойчивости откосов. При этом считается, что прибортовой массив при коэффициентах запаса более 1,3 испытывает преимущественно упругие деформации, которые не превышают  $10^{-3}$ . Однако, фактические условия отработки прибортовых массивов показывают, что на всех месторождениях, в особенности на крупных, наблюдались деформации различных масштабов. Имеются примеры, когда смещения приводят к ограничениям при ведении горных работ, как например, при обратном падении слоев.

Соответственно, данный подход к оценке смещений является весьма обобщенным и не учитывает в полной мере разнообразие условий разрабатываемых месторождений, деформационные свойства массива горных пород, а также изменение напряженно-деформированного состояния прибортового массива по мере отработки карьера. Также стоит отметить, что такой подход основан на результатах исследований месторождений, когда высота откосов составляла порядка 200-300 метров, в то время как на текущий момент в эксплуатацию запускаются проекты, где высота прибортового массива может достигать 800 и более метров.

Массив горных пород представляет собой блочную трещиноватую среду и характеризуется нелинейным поведением. Поэтому с увеличением глубины карьера повышается риск возникновения деформаций даже на промежуточных этапах отработки месторождения, так как напряжённое состояние становится более сложным, в связи с чем нелинейные процессы могут приобретать более явный характер. Поэтому вопросы о прогнозе смещений в прибортовом массиве становятся все более актуальными.

Из этого следует, что оценку устойчивости откосов следует осуществлять не только по коэффициенту запаса, но и по деформациям. Для изучения данного вопроса были проведены исследования влияния изменения напряжённого состояния откосов на характер развития деформаций массива горных пород. Исследования осуществились с помощью физического моделирования на эквивалентных материалах. По результатам физического моделирования установлены особенности развития деформаций по мере снижения коэффициента запаса устойчивости откоса вплоть до его разрушения.

**Миков Л.С., Жукова И.А., Федоров С.О.**

*ФИЦ информационных и вычислительных технологий (Кузбасский государственный технический университет), г. Кемерово, Россия*

*e-mail: kembict@gmail.com*

## **МОНИТОРИНГ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ В КУЗБАССЕ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Работа посвящена вопросам мониторинга нарушенных земель в Кемеровской области с использованием радарных и мультиспектральных изображений. Продемонстрировано применение данных с группировки космических аппаратов Sentinel-1/2, для определения границ нарушенных и рекультивированных земель. Представлена динамика изменения их площадей за период с 2019 по 2023 годы.

Традиционные методы оценки состояния земель, основанные на наземных исследованиях, зачастую оказываются трудоёмкими, затратными и не обеспечивают оперативного охвата больших территорий. В этой связи технологии дистанционного зондирования Земли открывают новые возможности для мониторинга. Спутниковые снимки, дополненные геоинформационными системами, позволяют не только фиксировать динамику нарушенных площадей, но и анализировать их пространственную структуру, оценивать степень деградации и прогнозировать экологические риски.

В качестве исходных данных использовались мультиспектральные изображения с космического аппарата Sentinel-2 за летние периоды с 2019 по 2023 годы с разрешением 10 м/пиксель, а также спутниковые радарные изображения Sentinel-1 с разрешением 25 м/пиксель за тот же временной промежуток на территорию Кемеровской области.

В ходе обработки исходных радарных изображений с помощью алгоритма REACTIV [1] были определены изменения на поверхности Земли за каждый год. Из всего массива участков с изменениями были выделены территории нарушенных земель горнодобывающих предприятий Кузбасса. На основе мультиспектральных данных в программном комплексе QGIS производилась ручная корректировка границ таких территорий для повышения точности. Границы представляют собой векторные файлы в формате SHP. В таблице атрибутов таких файлов автоматически рассчитываются площади нарушенных земель и участков рекультивации и самозарастания за каждый год.

Результаты исследования подчёркивают необходимость усиления контроля за рекультивацией. Несмотря на увеличение площадей восстановленных земель (с 148,8 км<sup>2</sup> в 2019 г. до 210,2 км<sup>2</sup> в 2023 г.), темпы рекультивации отстают от масштабов нарушений (рост с 965,0 км<sup>2</sup> до 1103,4 км<sup>2</sup>). Это указывает на важность проведения восстановительных работы параллельно с добычей полезных ископаемых.

Проведённый мониторинг нарушенных земель Кузбасса на основе данных дистанционного зондирования подтвердил высокую эффективность использования данных Sentinel-1/2 в задачах экологического контроля. Комбинация радарных и мультиспектральных данных позволила не только точно определить границы нарушенных территорий, но и выделить зоны рекультивации и естественного самозарастания.

Анализ динамики за 2019–2023 гг. выявил устойчивую тенденцию к увеличению площадей нарушенных земель, обусловленную интенсивной угледобычей. Однако рост восстановленных участков демонстрирует потенциал системного подхода к рекультивации.

Перспективы дальнейших исследований связаны с интеграцией данных космической съёмки и машинного обучения для детальной классификации типов нарушений. Полученные результаты могут стать основой для разработки региональных программ устойчивого землепользования, обеспечивающих баланс между промышленным развитием и экологической безопасностью.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.*

#### **Список использованных источников:**

1. Elise Colin Koeniguer, Jean-Marie Nicolas, Beatrice Pinel-Puysssegur, J.-M. Lagrange and Fabrice Janez. Visualisation des changements sur s'eries temporelles radar: m'ethode REACTIV 'evalu'ee `a l'echelle mondiale sous Google Earth Engine // Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection. - 2018. - P. 99-108

**Мороз Н.Е.**

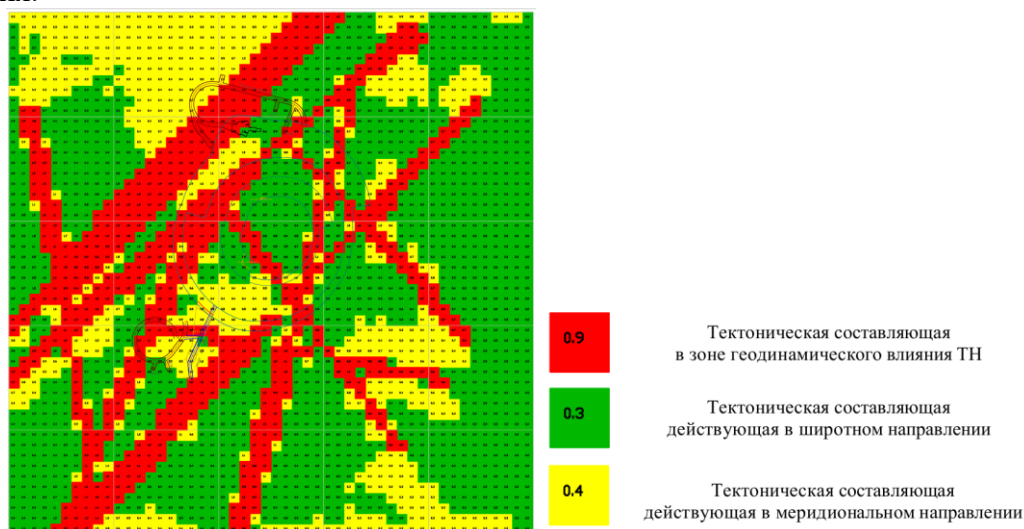
ООО «Полигор», г. Санкт-Петербург, Россия

e-mail: Nikita.Moroz@polygor.com

### **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПО «PRESS 3D URAL» ДЛЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ БЛОЧНОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД**

Обеспечение безопасных условий ведения горных работ подземным, открытым и комбинированным способом требует уменьшения негативного воздействия горного давления природного и техногенного характера на различных участках и стадиях ведения горных работ. Для решения задачи прогноза природного поля напряжений в настоящее время развивается метод геодинамического районирования, который применяется для заблаговременного (до разработки месторождения) определения участков с повышенным и пониженным естественным напряженным состоянием и разделения данных участков по степени геодинамической опасности.

Реализованная в программном обеспечении «PRESS 3D URAL» (разработчик ООО «Полигор») технология проведения гранично-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород позволяет получить ранжированную по площади картину изменения горизонтальных напряжений (тектонической составляющей), что в полной мере отвечает современным требованиям, предъявляемым к результатам геодинамического районирования, которые необходимо предоставлять с детальным ранжированием в пространстве для применения в дальнейших многовариантных геомеханических расчетах параметров горных крепей, очистных камер и целиков различного назначения.



Результаты моделирования горизонтальных напряжений (тектонической составляющей) с отображением контуров горных выработок и уступов карьера

Информация о величине и направлении тектонической составляющей используется при определении главных напряжений. С учетом данных природного поля напряжений и результатов моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород в программном обеспечении «PRESS 3D URAL» производится оценка параметров крепления, а также конструктивных элементов разработки.

**Моторин А.Ю., Баранов С.В.**

*Кольской филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Апатиты, Россия*

*e-mail: MotorinAYu@krsc.ru, bars.vl@gmail.com*

## **ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ПОВТОРНЫХ ТОЛЧКОВ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ «AFTERSHOCK»**

Многолетний сейсмический мониторинг, проводимый Кировским филиалом АО «Апатит» на месторождениях Хибинского массива с середины 1990-х годов [1], позволил выявить закономерности в постсейсмической активности [2-4]. Исследования показали, что число повторных толчков (продуктивность) следует экспоненциальному распределению, известному как закон продуктивности землетрясений [5]. Также было получено, что расстояния от землетрясений-триггеров до инициированных ими толчков в среднем подчиняется степенному распределению [3], распределение магнитуд сильнейших афтершоков подчиняется динамическому закону Бота, а количество афтершоков в среднем убывает со временем согласно закону Омори-Утсу [6]. При этом параметры этих распределений не зависят от магнитуды события-триггера.

На основе этих закономерностей были разработаны прогнозные модели для оценки области, где ожидаются повторные толчки, магнитуды сильнейшего афтершока и длительности опасного периода. Для уточненной оценки области повторных толчков по данным о первых афтершоках с помощью машинного обучения была разработана отдельная модель [4]. Эти модели были заложены в информационную систему «Aftershock», разработка которой велась с 2021 года для Кировского филиала АО «Апатит».

«Aftershock» в режиме реального времени получает данные о сейсмичности из базы данных КФ АО «Апатит». Все сейсмические события с  $E \geq 10^7$  Дж ( $K \geq 7$ ) считаются триггерами, для которых возможно выполнить прогноз постсейсмической опасности. Для каждого триггера поиск афтершоков выполняется методом «ближайшего соседа» [7]. Прогноз возможно выполнить по двум вариантам: усредненный прогноз по данным об основном толчке и уточненный прогноз с привлечением информации об афтершоках за первые часы после основного толчка. Первый вариант прогноза доступен сразу после регистрации события-триггера, второй возможен спустя некоторое время, если данных о первых афтершоках достаточно.

Для управления сейсмическими рисками в системе «Aftershock» реализованы три различные стратегии прогноза будущих афтершоков: мягкая стратегия, позволяющая минимизировать затраты на поддержание тревоги, жесткая стратегия, позволяющая не допустить пропусков повторных толчков и нейтральную стратегию прогноза в остальных случаях.

Оценки пространственной области по основному толчку представляют собой цилиндр с центром в гипоцентре основного толчка; радиус и высота цилиндра определяются с учетом степени важности прогноза. Оценка пространственной области по первым афтершокам представляет из себя «стадион» (геометрическое место точек, расположенных на расстоянии не больше заданного от отрезка прямой), размер которого определяется с учетом степени важности прогноза.

Прогноз класса сильнейшего афтершока возможен как по основному толчку, так и по данным о первых афтершоках. Каждый тип прогноза реализует расчет и визуализацию оценок магнитуд сильнейшего афтершока по времени. Для каждой из этих оценок рассчитываются три варианта прогноза класса К1, которые соответствуют трем стратегиям: мягкой, нейтральной и жесткой.

Прогноз длительности опасного периода афтершоковой активности возможен как на основе усреднённой совместной оценке длительности всех серий сильных сейсмических событий, произошедших ранее, так и с учетом фактического распределения афтершоков, произошедших в интервале времени от 3 до 7 часов. Для каждого из типов прогноза в системе «Aftershock» приводятся вероятности того, что серия продлится не дольше указанного времени.

Разработанные алгоритмы и их программная реализация имеют прямое практическое применение в службе прогноза и предупреждения горных ударов КФ АО «Апатит» в области обеспечения безопасности при ведении горных работ в условиях высоких тектонических напряжений и, как следствие, природно-техногенной сейсмичности, представляющей опасность для горных выработок [8].

### **Список использованных источников:**

1. Корчак П.А., Жукова С.А., Меньшиков П.Ю. Становление и развитие системы мониторинга сейсмических процессов в зоне производственной деятельности АО «Апатит» // Горный журнал. - 2014. - № 10. - С. 42–46.
2. Баранов С.В., Жукова С.А., Корчак П.А., Шебалин П.Н. Продуктивность техногенной сейсмичности // Физика Земли. - № 3. - 2020. - С. 40-51.  
DOI: 10.31857/S0002333720030011
3. Baranov S. V., Motorin A. Yu., Shebalin P. N. Spatial Distribution of Triggered Earthquakes in the Conditions of Mining-Induced Seismicity // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. - 2021. - № 4 (57). - С. 520–528.
4. Моторин А.Ю., Баранов С.В. Оценка области повторных толчков по первым афтершокам на месторождениях Хибин // Физика Земли. - 2024. - № 6. - С. 164-177. – DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724060115>.
5. Баранов С.В., Моторин А.Ю., Шебалин П.Н. О пространственном распределении постсейсмической активности в Хибинском массиве. - 2021. - С. 12.
6. Motorin A., Baranov S. Distribution of Strongest Aftershock Magnitudes in Mining-Induced Seismicity // Front. Earth Sci., <https://doi.org/10.3389/feart.2022.902812>
7. Zaliapin I., Ben-Zion, Y. A global classification and characterization of earthquake clusters // Geophys. J. Int. 2016. V. 207. P. 608–634.
8. Козырев А.А. [и др.]. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения) / А.А.Козырев, И. Э. Семенова, В. В. Рыбин, В. И. Панин, Ю. В. Федотова, [и др.], Апатиты: ООО «Апатит-Медиа», 2016. - 112 с.

**Моторин А.Ю.<sup>1</sup>, Корчак П.А.<sup>2</sup>, Баранов С.В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Кольской филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Апатиты, Россия  
e-mail: MotorinAYu@krsc.ru, bars.vl@gmail.com

<sup>2</sup>Кировский филиал АО «Апатит», г. Кировск, Россия  
e-mail: pkorchak@phosagro.ru

## **АНОМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АФТЕРШОКОВ СЕЙСМИЧЕСКОГО СОБЫТИЯ С $M=3$ НА КИРОВСКОМ РУДНИКЕ**

Приводится детальный анализ приуроченности к разломам афтершочков сейсмического события 04.03.2025 09:53:29 UTC с магнитудой  $M = 3$  (энергия  $E=2 \times 10^9$  Дж). Эпицентр этого события расположен на Кировском руднике Кировского филиала (КФ) АО «Апатит». Это событие инициировало афтершочковый процесс – за 3 суток произошло 92 афтершока с магнитудой  $M \geq 0$  ( $E=10^4$  Дж). Два афтершока имели магнитуду  $M = 2$  ( $E = 3.98 \times 10^7$  Дж), первый произошёл через 23 сек, а второй – через 649.98 сек (10.8 мин) после основного толчка (ОТ).

Определение координат гипоцентра и времени в очаге ОТ и его афтершочков осуществлялась по данным сети сейсмических датчиков КФ АО «Апатит». Представительная магнитуда сети  $M_s = 0$  ( $E_s = 10^4$  Дж), точность определения гипоцентров – 20 м [1]. Обнаружение афтершочков в сейсмических записях осуществлялось в ручном режиме. Определение координат гипоцентра ОТ и его афтершочков выполнялась опытным сейсмологом. Также были определены фокальные механизмы ОТ (Node1: strike: 10.11, dip: 86.47, rake: -176.46; Node2: strike: 279.89, dip: 86.47, rake: -3.54) и первого сильнейшего афтершока (Node1: strike: 319.89, dip: 86.47, rake: -3.54; Node2: strike: 50.11, dip: 86.47, rake: -176.46). Определить фокальный механизм второго афтершока с  $M=2$  не удалось из-за зашумленности знаков первых вступлений волн кодой более раннего толчка.

Сопоставление координат гипоцентров и ОТ и его представительных афтершочков с моделью тектонических нарушений месторождений Кукисвумчорр и Юкспор показало следующее. ОТ приурочен к тектоническому нарушению 5-го ранга, заполненному интрузивным магматическим телом (дайка) вертикального падения и юго-восточного простирания, что соответствует простиранию 2-й нодальной плоскости очага ОТ. Ранее это нарушение считалось тектонически не активным.

Первый сильнейший афтершок с  $M = 2$  расположен на расстоянии 129 м до ОТ и приурочен к Саамскому радиальному разлому 3-го ранга северо-восточного простирания и падения на юго-восток под углом приблизительно  $82^\circ$  (простирание 2-й нодальной плоскости соответствует простиранию разлома). Второй афтершок с  $M = 2$  (расстояние до ОТ 172 м) приурочен к одной из субпараллельно двух сходящихся даек юго-восточного простирания (фокальный механизм этого события определить не удалось).

Остальные афтершочки пророчены к различным разломам 5-го, 4-го и 3-го рангов в окрестности основного толчка. Примечательным является тот факт, что на разломе, к которому приурочен основной толчок, афтершочков не обнаружено. Это входит в противоречие со стандартными представлениями о пространственном распределении афтершочковой активности. Отметим, что афтершочки другого события с  $M=3.2$ , произошедшего на том же месторождении в 2010 г., не демонстрируют такого поведения.

Пространственное распределение афтершочков относительно разлома основного толчка является одним из ключевых аспектов для понимания процессов, происходящих после землетрясения. В большинстве случаев афтершочки имеют тенденцию располагаться вдоль плоскости разрыва основного толчка или в непосредственной близости от нее. Однако в рассматриваемом случае наблюдается иная картина: афтершочки произошли на соседних разломах 5-го, 4-го и 3-го рангов, в пределах трех длин трещины основного толчка, но при

этом на самом разломе 5-го ранга, где произошел основной толчок, афтершоки отсутствовали (даже первый афтершок с  $M=0.9$  приурочен к другому разлому 4 ранга).

Такое пространственное разделение между основным толчком и его афтершоками может свидетельствовать о сложном характере перераспределения напряжений в горном массиве после основного сейсмического события. Возможно, разрыв на разломе 5-го ранга привел к увеличению напряжений на определенных участках соседних разломов 4-го и 3-го рангов, что и спровоцировало их активизацию в виде афтершоков. При этом сам разлом 5-го ранга мог испытать значительное снижение напряжений, что препятствовало возникновению повторных разрывов.

#### **Список использованных источников:**

1. Корчак П.А., Жукова С.А., Меньшиков П.Ю. Становление и развитие системы мониторинга сейсмических процессов в зоне производственной деятельности АО «Апатит» // Горный журнал. - 2014. - № 10. - С. 42–46.

**Наговицын О.В.**

*Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия*

*e-mail: o.nagovitsyn@ksc.ru*

#### **НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ГГИС MINEFRAME**

Значительный объем работ по развитию функционала геолого-геоинформационной системы (ГГИС) MINEFRAME и переходу на новый технологический стек стал ключевым этапом в сотрудничестве ООО «Лаборатория МАЙНФРЭЙМ» с АК «АЛРОСА». Научную поддержку этой разработки осуществляет Горный институт КНЦ РАН. Основной задачей стало создание единого цифрового пространства для реализации бизнес-процессов инженерного обеспечения горных работ, что потребовало увеличения численности команды разработки и тесного взаимодействия с заказчиком. Особое внимание уделялось соблюдению требований информационной безопасности, внедрению ролевой модели доступа к данным и возможности перехода на отечественные операционные системы.

Перед началом работ был проведен анализ уровня внедрения цифровых технологий в подразделениях АК «АЛРОСА», что позволило сформировать план адаптации ПО. В рамках этого плана были выделены два основных направления:

1. Технологические улучшения: переход на СУБД PostgreSQL и интеграция с Active Directory; расширение возможностей импорта данных; перевод системы управления геологическими данными на Web-платформу; миграция графики на технологию Vulkan для обеспечения кроссплатформенности.

2. Функциональное развитие: совершенствование и разработка инструментов геологического моделирования, маркшейдерии, проектирования и планирования горных работ.

В области геологического моделирования разработаны инструменты статистического анализа данных опробования и блочных моделей, выделять зоны с высокими содержаниями полезных компонентов и анализировать угаданные содержания с использованием различных методов. Для анализа взаимосвязей между данными доступны диаграммы рассеяния, график «ящик с усами» и Swath-график. Также строятся графики зависимости тоннажа от среднего содержания по вариантам бортовых содержаний. Реализованы инструменты сопоставления данных соседних скважин, выделения одновозрастных горизонтов и пластов. Методы геостатистики, такие как вариография и кригинг, используются для оценки пространственной неоднородности данных и их интерполяции.

Важной задачей развития инструментов маркшейдерского обеспечения стало создание моделей подземных выработок на основе данных съёмки. Основным методом остаётся тахеометрическая съёмка, которая формирует список 3D-координат точек, задающих границы выработки. Для повышения точности был разработан алгоритм, автоматически вписывающий проектные сечения в контуры съёмки с привязкой к отснятым точкам. Это улучшило оценку объёмов проходки и позволило формировать ось выработки даже при наличии сложных участков (ниши, вывалы, сужения, расширения).

Также были усовершенствованы инструменты для работы с облаками точек, полученных при лазерном сканировании выработок. Новый алгоритм преобразует облако точек в набор сечений, что снизило размер векторных и каркасных моделей, сделав их более информативными для инженерной графики.

Реализованы инструменты для автоматизации проектирования подземных выработок, включая параметрическое моделирование сечений и их сопряжений. Форма выработок задается шириной и высотой, а сечения привязываются к оси через параметры моделей. Разработан алгоритм автоматического подбора паспорта крепления на основе анализа горно-геологических условий.

Для открытых горных работ создан алгоритм автоматизации проектирования карьеров: по линии бровки уступа и контуру съезда формируются площадки торможения с учетом стыковки элементов разной ширины. Это сокращает время проектирования.

Обновлены инструменты подсчета тоннажа по блочным моделям, позволяющие учитывать плотность и другие свойства массива для более точного расчета запасов по горизонтам, блокам или выемочным единицам.

Разработка модулей планирования горных работ стала важным направлением для автоматизации создания технологически обоснованных планов сроком от двух лет до недельно-суточных периодов. Был создан единый модуль оптимизации для открытых и подземных работ, основанный на программировании в ограничениях и имитационном моделировании.

Обеспечивается бесшовная интеграция с горно-геологическими моделями, автоматическое формирование выемочных единиц и создание календарных планов с разбивкой по временным интервалам (год, квартал, месяц, неделя, день). Реализуется технология планирования, объединяющая среднесрочные и оперативные горизонты с перспективой включения стратегического уровня. Пользователи могут рассчитывать, визуализировать и анализировать сценарии планов с учетом ограничений, таких как последовательность отработки, производительность оборудования и простои, а также формировать документацию, включая графики работы техники.

Для подземных работ учтены длительность циклов технологических процессов, объемы подготовительных и нарезных работ, последовательность выемки согласно регламенту, условия проходки выработок в сложных зонах и параметры транспортной сети. Оценка производительности оборудования помогает определить его оптимальное количество. Для открытых работ учитываются особенности вскрышных и добычных процессов, безопасность, последовательность отработки уступов, структура транспортных коммуникаций и производительность техники с учетом условий движения.

Таким образом, адаптация ГГИС MINEFRAME под требования АК «АЛРОСА» стала важным шагом в цифровизации горной отрасли, обеспечивая высокий уровень автоматизации и точности при решении инженерных задач.

## **ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОДЗЕМНЫХ И ОТКРЫТЫХ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ В РАМКАХ РЕАЛИЗАЦИИ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

В отечественной практике проектирования подземных и открытых горных работ при разработке месторождений полезных ископаемых, в большинстве случаев, используется в установленном порядке различная нормативная документация (регламенты, технологические нормы, инструкции, методические указания и т.д.). Вместе с этим, данный комплекс документов (требований) не всегда учитывает экстремальные условия выемки рудных залежей на больших глубинах, геолого-структурные и геомеханические аспекты геологической среды, что приводит к принятию аналогий при освоении систем разработки и оборудования с действующих горных предприятий или сравнений экспертных оценок реализации технологических решений, основанных на методе последовательных исключений. Зачастую, руководствуясь такими подходами, при обосновании способов добычи минерального сырья принимаются ошибочные решения особенно в части выбора параметров подготовки запасов полезных ископаемых и геотехнологий, которые влекут за собой рост рисков, как с позиции безопасности, так и экономической деятельности рудников, накладывая определенные ограничения на эксплуатацию месторождений. В этой связи комплексный подход в реализации модельного представления геосреды и процессов разработки руд на основе принципов параметризации, геолого-структурного и геомеханического моделирования является актуальным вопросом и представляет научно-практический интерес, дополняя детерминированность существующих критериев приемлемости и устанавливая предельные технологические возможности горного предприятия. Значимость проблемы обуславливается еще и тем, что уже сегодня действующие рудники нередко несут большие убытки, связанные с непредвиденными работами в «аномальных» условиях отработки из-за недооценки и неточностей геолого-структурной и геомеханической обстановки на месторождениях.

Параметрическая модель по существенным признакам представляет собой геометрические построения, имеющие формализованное описание с использованием геолого-структурных и техногенных элементов и параметров, и взаимосвязей между этими параметрами и элементами. Такой многомерный прием при формализации горнотехнических объектов включает построение геометрической и геомеханической моделей, таблицу размеров (параметров) и информацию о взаимосвязях размеров (параметров). Взаимосвязи могут иметь линейный, нелинейный и многофакторный характер. Основное преимущество параметризации в горном деле – эффективное решение разнообразных задач по выбору и обоснованию параметров геотехнологий, а также возможность использования её в качестве одного из критериальных признаков для реализации рейтинговой классификации систем подземной разработки.

На рисунке 1 представлена блок схема основных принципов параметрического моделирования горнотехнической ситуации на действующем или вводимым в эксплуатацию руднике/карьере. Цифровая модель месторождения с технологической точки зрения включает в себя геолого-структурную, рудо-породную, геомеханическую и техногенную модели.

Геолого-структурная модель месторождения включает в себя геологические и структурные элементы залегания горных пород, анализируется геолого-маркшейдерская информация, графоаналитический материал и данные геодинамического районирования. На

данном этапе моделирования предоставляются сведения о месторождении (тектонотип, разломы, нарушения, складки и др.), блочность и трещиноватость.

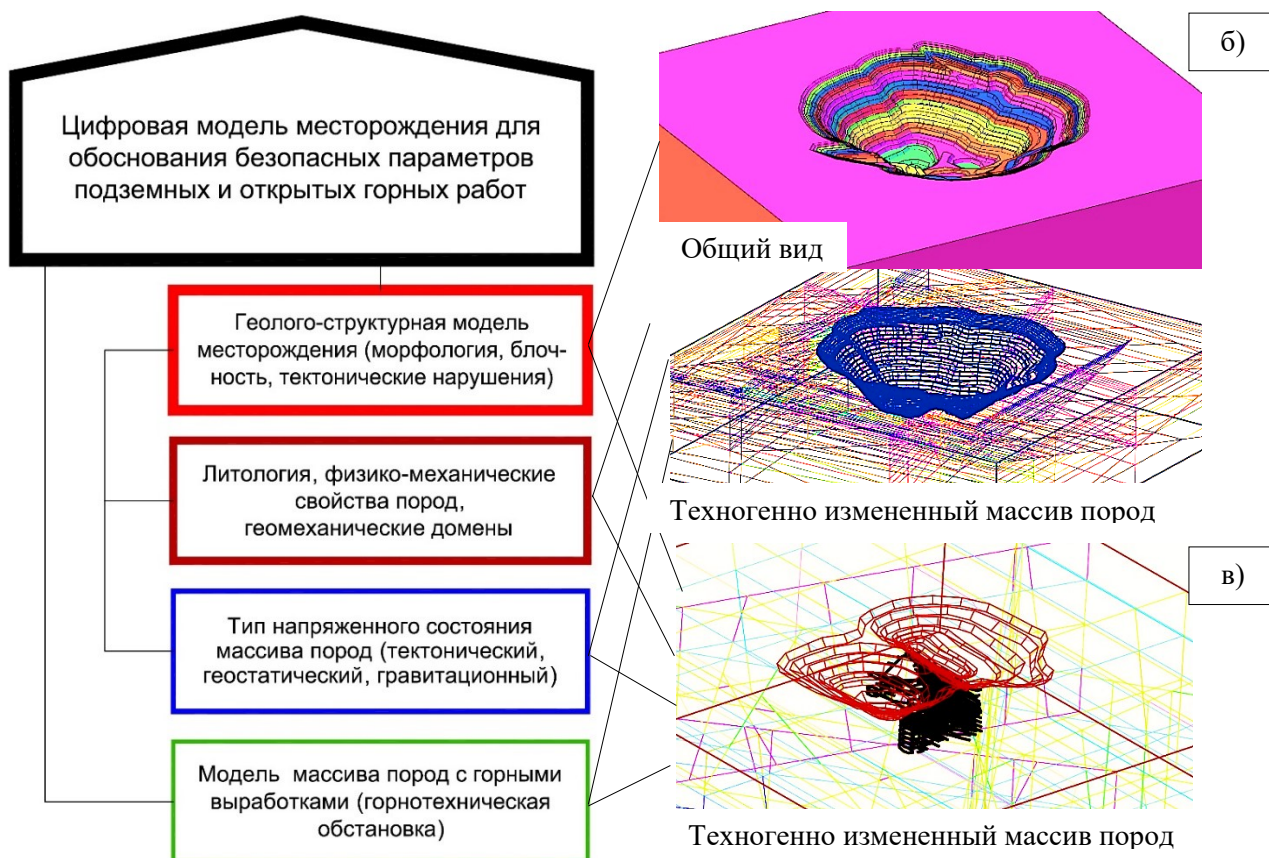


Рисунок 1 – Концепция (а) параметрического моделирования горнотехнической обстановки;  
 б) – геомеханическое обоснование устойчивости бортов карьера;  
 в) – обоснование безопасности отработки месторождения при переходе  
 с открытых работ на подземную выемку

Рудо-породная модель месторождения включает в себя литологические разности, объединение в объекты-домены слоев пород близких по своему строению и свойствам, сбор и анализ данных о деформационных и прочностных характеристиках геологической среды (плотностные, упругие, пластические, прочностные и реологические свойства), возможность их изменения с глубиной залегания и с течением времени, а также категории устойчивости массива пород по различным критериям, в том числе международных рейтинговых оценок.

Модель типа напряженного состояния массива горных пород устанавливается характером распределения действующих напряжений в границах обрабатываемого или вводимого в эксплуатацию месторождения.

Построение горнотехнической – техногенной – модели рудника включает в себя конструктивные элементы схем вскрытия, способов подготовки и систем разработки с учетом геологической, структурной и породной моделей месторождения.

На основе выполненных исследований предложен методический подход формирования цифровой модели месторождения, позволяющий с единых позиций и критериев исследовать особенности проявления горного давления при выемке полезных ископаемых в различных геолого-геомеханических условиях залегания рудных тел. Представленные концептуальные проработки позволяют начать обсуждения о возможности принятия дополнений в категориях развития методов и принципов проектирования отечественных рудников в соответствии с международными нормами и стандартами, доказавшими свою эффективность.

**Ногин С.А.**

*ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

*e-mail: nsa@igduran.ru*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ СДВИЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОТРАБОТКЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

В целях исследования особенностей и закономерностей развития процесса сдвижения, вызванного отработкой полезных ископаемых и сопутствующей геодинамической активностью, полезно производить кластеризацию территории месторождения по параметрам этого сдвижения на основе данных многолетних наблюдений. Это помогает находить участки повышенной активности, лучше понимать взаимосвязь отработки полезного ископаемого и вызванного ею деформирования земной поверхности, на которой находятся охраняемые объекты.

Исследование проводилось для рудного месторождения, по которому был накоплен представительный набор данных за ~45 лет ежегодных наблюдений. Для анализа использовались данные маркшейдерских измерений (нивелирования и дальномерных измерений), прошедшие этап камеральной обработки и сведенные в общий датасет по авторской методике.

В работе применен вейвлет-анализ, а именно построение вейвлет-спектрограммы деформаций, для выявления временной эволюции деформаций на поверхности. В качестве данных для преобразования из пространственно-временной матрицы для выбранного параметра берется временной ряд данных по реперу, входящему в состав наблюдательной станции. Полученные для реперов спектрограммы сравнивались между собой, с целью выявить наиболее характерные черты развития сдвижения. Для реперов с короткими рядами наблюдений их включение в кластер производилось на основе сопоставления данных матриц параметров сдвижения и тепловых карт.

По итогам работы на территории, приуроченной к месторождению, было выделено 14 кластеров, которые сводятся в кластеры более высокого ранга, соответствующие принятому при разработке месторождения делению на участки. Установлено, что долгопериодические (10-12 лет в рамках работы) циклы проявляются на территории, в меньшей степени затронутой отработкой полезного ископаемого. В целом преобладают циклы продолжительностью до 6-8 лет, которые на данном этапе работы можно считать вызванными техногенными факторами.

**Ожиганов И.А.**

*Уральский филиал АО «ВНИМИ», г. Екатеринбург, Россия*

*e-mail: info@ufvnnimi.ru*

## **ЛОКАЛЬНЫЙ ПРОГНОЗ УДАРООПАСНОСТИ И ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НА РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

Прогноз удароопасности при подземной разработке рудных месторождений осуществляют с использованием комплекса геомеханических и геофизических методов, из которых базовым является метод дискования керна при бурении скважин.

Прогноз удароопасности принято разделять на региональный и локальный. Региональным прогнозом выделяют участки повышенной напряженности, в которых следует проводить прогноз локальными методами. Одним из локальных методов прогноза является

определение относительной напряженности краевой части массива по показателям акустической эмиссии.

Акустической эмиссией (АЭ) называют процесс испускания упругих импульсов, возникающий вследствие образования и развития разрушений при запредельном деформировании пород.

Первые попытки применения импульсных колебаний, возникающих в горных породах при изучении проявлений горного давления, предпринимались в СССР ещё в 1930-е годы, но широкого распространения не получили ввиду несовершенства аппаратуры и методики наблюдений.

Следующим этапом развития методов прогноза горных ударов являются исследования, проводимые ВНИМИ в 1950-х годах в Кизеловском угольном бассейне. Составной частью исследований было изучение сейсмоакустической активности, сопровождающей бурение скважин, взрывание зарядов ВВ и других производственных процессов. По результатам исследований был разработан сейсмоакустический метод прогноза удароопасности, который впоследствии стал составной частью комплексного метода прогноза ВНИМИ. Удароопасность в данном методе устанавливалась по величине амплитуды импульсов, возникающих при бурении скважины.

Применение в условиях рудников сейсмоакустического способа с параметрами, используемыми в угольных шахтах, дали неудовлетворительные результаты. В подземных условиях СУБРа наблюдения показали, что мощность акустической эмиссии в диапазоне звуковых частот невелика. Регистрировались крайне редкие одиночные сигналы, работающие механизмы создавали большие помехи.

До разработки применимого на рудных месторождениях локального геофизического способа прогноза, основным методом становится оценка дискования при керновом бурении. Однако данный способ трудоемок, имеет малые базы измерений и при большом объеме прогнозирования требует значительных материальных затрат.

На основе полученных результатов в подземных условиях СУБРа был сделан вывод, что необходимо осуществлять регистрацию импульсов в более высокой части спектра – если на угольных шахтах верхний предел частот составлял несколько килогерц, то для регистрации упругих колебаний в породах и рудах рудников следовало ориентироваться на верхний предел частот в десятки килогерц.

Регистрация явлений со слабой энергией (то есть с более высокой частотой) позволила:

- повысить информативность прогноза – появилась возможность выявлять условия удароопасности в местах с отсутствием явлений в слуховом диапазоне (треска, щелчков и пр.);

- выявлять формирование условий удароопасности на этапах подготовки горного удара;

- снизить влияние помех, большая часть которых находится ниже порога в 10 кГц.

В текущем виде методика проведения прогноза удароопасности участков массива горных пород предполагает использование двух основных параметров процесса (АЭ): интенсивность – количество импульсов в единицу времени, и показатель амплитудного распределения импульсов в высокочастотном диапазоне спектра.

Категорию удароопасности участков массива устанавливают по результатам замеров интенсивности акустической эмиссии и определения показателя распределения для амплитудных уровней по формуле

$$v = Na_1/Na_2, \quad (1),$$

где  $Na_1$  и  $Na_2$  – интенсивность АЭ при амплитудных уровнях  $a_1$  и  $a_2$ .

По амплитудному уровню (каналу)  $a_2$  проходят импульсы с большей амплитудой (энергией), чем по  $a_1$ . Поэтому чем меньше  $v$ , тем больше доля сильных импульсов, а следовательно опаснее. Замер проводят в течение 20 мин чистого времени с исключением

импульсов от технологических помех. Для снижения искажений и потерь при прохождении помех среднюю активность рассчитывают за 15-секундные интервалы ( $N_{15\text{сек}}$ ).

Показатель средней активности  $N_{15\text{сек}}$  позволяет судить о достижении предельных нагрузок в горных породах краевой части массива, а показатель амплитудного распределения  $\sigma'$  характеризует неустойчивость процесса деформирования, нарастание количества импульсов высокой энергии.

Высокую оперативность метода и низкую трудоемкость можно увидеть при сравнении количества замеров базовым методом (бурение керновых скважин) и методом акустической эмиссии: по данным службы прогноза и предотвращения горных ударов на шахтах СУБРа за год методом АЭ проведено 7500 прогнозов, из них отнесено к категории «Опасно» - 108; методом дискования керна в скважинах - 247, из них «Опасно» - 11. Прогнозы методом АЭ составили 92% общего числа, по керну -3 %, прибором МГД - 5%.

К недостаткам метода можно отнести необходимость проведения прогноза в течение временного интервала от 1 до 5 ч после взрывных работ, так как в течение этого времени на участке замера напряженное состояние находится на квазистационарном уровне. При этом двадцатиминутного замера достаточно, чтобы оценить категорию удароопасности.

Для практических работ на рудниках используется прибор СБ-32М («Сапфир»). Прибор не вызывает трудностей при эксплуатации, обслуживается оператором с минимальными навыками.

**Остапенко С.П., Месяц С.П.**

*Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия*

*e-mail: s.mesyats@ksc.ru*

## **МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ, НАРУШЕННЫХ ПРИ ОСВОЕНИИ ГЕОРЕСУРСОВ, С УЧЕТОМ АБИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ**

Возрастание продуктивности лесных биоценозов, способствует восстановлению природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов. Вместе с тем, техногенная нагрузка оказывает негативное влияние на реабилитацию, что определяет актуальность разработки методических подходов к ее мониторингу с учетом абиотических факторов.

Бесструктурность и мелкодисперсность складированных отходов обогащения руд обуславливают их подверженность ветровой эрозии, что сопровождается изменением состояния природных экосистем на прилегающей территории. С учетом дальности ветрового переноса разработка методического подхода к идентификации аэротехногенного воздействия и изучения его влияния на восстановление природных экосистем основывалась на данных спутниковых наблюдений среднего пространственного разрешения, использованных для расчета спектрального индекса по разности яркостной температуры земной поверхности. При выявлении аэротехногенного воздействия исследовалось загрязнение атмосферы и поверхностного слоя водного объекта (озеро Колозеро), связанное с распространением и осаждением частиц аэрозоля, на примере складированных отходов обогащения магнетитовых руд месторождений Заимандровского железорудного района. Установлены закономерное уменьшение аэротехногенного загрязнения с удалением от источника и изменение дисперсного состава аэрозоля в результате осаждения более крупных частиц, что является, наряду со спектральным индексом, признаком воздействия на природные экосистемы.

Показана возможность применения данных спутниковых наблюдений для оценки дальности ветрового переноса аэротехногенного загрязнения в условиях облачности, характерной для Атлантико-Арктической зоны умеренного климата. С этой целью перенос

аэрозольных частиц исследовался компьютерным расчетом на основе модели Лагранжа. В качестве входных параметров расчетной модели, характеризующих состояние атмосферы в приземном слое, использовались данные реанализа метеорологических параметров за пятилетний период наблюдений. Предельный контур аэротехногенного воздействия определялся калибровкой расчетных данных дальностью пространственной корреляции спектрального индекса, характеризующего аэрозольное загрязнение в безоблачный период, на примере складированных отходов обогащения магнетитсодержащих руд месторождений Кольского горнопромышленного комплекса.

Показан сдерживающий характер аэротехногенного загрязнения на возрастание продуктивности лесных биоценозов в пределах контура воздействия с применением вероятностной графовой модели, подготовленной с учетом независимого сочетания факторов загрязнения, высотной отметки, экспозиции, угла наклона, минимальной температуры поверхности, индекса стресса влажности растений на мониторинговых полигонах по данным спутниковых наблюдений. Разработанный подход в силу многофакторности уместно использовать для повышения объективности оценки воздействия горнопромышленных предприятий на природную среду региона.

**Остапенко С.П., Опалев А.С.**

*Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия*

*e-mail: a.opalev@ksc.ru*

## **ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНЦЕНТРИРОВАННОЙ ВОДНОЙ СУСПЕНЗИИ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ МАГНЕТИТА**

Основой современного промышленного производства являются добыча и обогащение полезных ископаемых, что определяет актуальность исследований в этой области. Одним из факторов интенсификации переработки минерального сырья является ускорение массопереноса в разделительных аппаратах. Вместе с тем, возможность повышения эффективности обогатительного передела за счет увеличения концентрации ограничена недостаточностью данных о технологических свойствах суспензий, в том числе частиц микронного размера, рассматриваемых в настоящее время как отходы.

Расчетом показана значимая дисперсность прослоек воды при увеличении концентрации частиц более половины объема суспензии, что связано с уменьшением расстояния между ними. В концентрированной суспензии структура, толщина и механические свойства прослоек воды определяют взаимодействие частиц, что необходимо учитывать при переработке минерального сырья, характеризуемого гидрофильным характером смачивания поверхности, то есть наличием на поверхности гидратного слоя. В этой связи научный интерес представляет изучение тонкодисперсных систем, образованных частицами минералов и прослойками воды между ними, с целью получения концентрированных суспензий с заданными структурно-механическими свойствами.

Практический интерес представляет исследование свойств концентрированных водных суспензий магнетита для разработки технологических решений по повышению полноты выделения его тонких классов крупности и снижению нагрузки на природную среду при хранении значительного количества отходов обогащения железных руд.

В результате изучения реологии концентрированной водной суспензии тонкодисперсных частиц выполнена оценка предельного сдвигового напряжения и гистерезиса вязкости на примере магнетита месторождений Заимандровского железорудного района. Компьютерным моделированием показано, что свойства суспензии магнетита определяются структурно-механическими свойствами цепочечных агрегатов частиц:

взаимодействие агрегатов обуславливает предельное сдвиговое напряжение суспензии, а прочность связи частиц в агрегате - антибатную зависимость вязкости суспензии от скорости деформации и ее гистерезис.

Расчетным методом исследовано взаимодействие частиц магнетита в цепочечном агрегате в концентрированной суспензии с учетом сдвиговой деформации. Изучен баланс сил взаимодействий электростатического, дисперсионного и магнитного диполь-дипольного, гидродинамического и силы, препятствующей сближению из-за наличия структурированного гидратного слоя на поверхности частиц. Расчетом показано и подтверждается экспериментом, что гидратный слой препятствует образованию механических контактов, тем самым обеспечивается устойчивость суспензии тонкодисперсных частиц магнетита, в том числе к процессам концентрирования и разбавления, к воздействию гидродинамических сил, что позволяет характеризовать её как лиофильную систему.

***Петров А.А., Месяц С.П.***

*Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия*

*e-mail: s.mesyats@ksc.ru*

## **ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИ ЭКОИНВЕСТИЦИОННОМ ПОДХОДЕ К ВОССТАНОВЛЕНИЮ ПРИРОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ, НАРУШЕННЫХ В ХОДЕ ОСВОЕНИЯ ГЕОРЕСУРСОВ**

Социально-экономическое развитие общества обеспечивается увеличением темпов освоения природных георесурсов, достигших, в свою очередь, критических пределов негативного влияния на природную среду. После освоения практически всей пригодной для жизни территории Земли и доступных ресурсов жизнеобеспечения, человечество начало генерировать такое количество отходов, что естественные механизмы саморегуляции, выработавшиеся в процессе эволюции, утратили свою способность эффективно справляться с ними.

Признание важности уменьшения негативных последствий человеческой деятельности получило международное внимание: Генеральная Ассамблея ООН объявила период с 2021 по 2030 годы «Десятилетием восстановления экосистем», целью которого является координация глобальных усилий по восстановлению природной среды и ведению мониторинга достигнутых результатов.

Необходимость преодоления глобального экологического кризиса определяет сохранение биосферы Земли как ключевую интегральную проблему, с которой сталкивается человечество, вызванную деградацией природной среды. Эта проблема, обладая междисциплинарным характером, требует в первую очередь решения вопросов сохранения и восстановления почвенно-растительного покрова, с учетом современного понимания его определяющей роли в поддержании устойчивого состояния биосферы, обеспечивающего циклическое воспроизводство жизни на планете.

На основании изучения самоорганизующейся природы почв обоснована методология и разработана технология восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, в соответствии с принципом их самоорганизации, созданием биологически активной среды. Образование биологически активной среды в результате создания сеяного злакового фитоценоза без нанесения плодородного слоя - суть экоинвестиционного подхода, заключающегося в увеличении энергетического потенциала системообразующей функции биоты для повышения скорости восстановления природных экосистем. Восстановление природных экосистем рассматривается как эволюция системы «горная порода-биота» в конкретных климатических условиях.

Объектами исследования определены складированные отходы рудообогащения Хибинской группы месторождений апатитсодержащих руд и Ковдорского месторождения бадделеит-apatит-магнетитовых руд, характеризующихся наибольшим проявлением факторов, лимитирующих процессы самовосстановления: мелкодисперсность и бесструктурность субстрата, отсутствие органического вещества и элементов питания растений, низкая влагоемкость, сильные проявления ветровой и водной эрозии.

Информационное обеспечение в рамках экоинвестиционного подхода к восстановлению природных экосистем, нарушенных в ходе освоения георесурсов, формируется как система для мониторинга и оценки состояния природной среды, а также как инструмент для подготовки и реализации управленческих решений, направленных на улучшение ее состояния. Информационная система интегрирует комплекс программных модулей обработки данных мониторинга динамики восстановления природных экосистем на всех этапах биологической организации горной породы и реализует взаимодействие функциональных модулей (базы данных, алгоритмы и программы обработки данных, геоинформационные компоненты), связывая их едиными информационными потоками, что обеспечивает перманентную актуализацию данных мониторинга и качество принимаемых управленческих решений при реализации экоинвестиционного подхода к восстановлению природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов.

Модель взаимодействия программных модулей информационной системы основана на концепции клиент-серверной архитектуры веб-приложений. При разработке веб-компонентов информационной системы применяется технологический стек MERN – комплексная среда для создания веб-приложений на основе языка программирования JavaScript.

**Потанов В.П., Попов С.Е.**

*ФИЦ информационных и вычислительных технологий (Кузбасский государственный технический университет), г. Кемерово, Россия  
e-mail: ogidog@yandex.ru*

## **ГОРНАЯ ЭНДОСКОПИЯ – ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ВИДЕОПОТОКОВ**

В работе рассматриваются ограничения существующих методов анализа видеоизображений, полученных с помощью скважинных эндоскопов, для оценки состояния массива горных пород при его отработке. Предлагается использовать современные методы искусственного интеллекта для значительного улучшения интерпретации видеоданных, извлечения существенной дополнительной информации, необходимой для геологоразведки, инженерной геологии, нефтегазовой промышленности, горного дела и научных исследований. Подробно рассматривается созданный программный комплекс, использующий специализированную нейронную сеть и методы обработки изображений для комплексного анализа скважинного видео в различных режимах. Приводятся потенциальные вычислительные сервисы, сформированные на базе комплекса, предназначенные для решения таких задач, как анализ целостности скважин, оценка прочности пород, диагностика бурения, задачи геомеханического моделирования и др. В настоящее время комплекс включает в себя 16 различных видов сервиса. Отличительной особенностью созданного комплекса является то, что его результаты могут передаваться для дальнейших расчетов и использоваться как начальные и граничные условия в сложных программных комплексах типа FIDESYS, ANSYS.

В работе отмечается, что существующие методы обработки видеопотоков скважинных эндоскопов не позволяют в полной мере оценить пространственную

информацию о состоянии массивов горных пород при техногенных нагрузках. Разработанное программное обеспечение призвано решить эту проблему за счет использования современных методов искусственного интеллекта, включающих в себя мультиагентные системы, позволяющих существенно расширить возможности интерпретации видеоданных и извлечь большой объем дополнительной информации. Это позволяет предположить, что одним из вопросов для дальнейшего рассмотрения может стать более детальный сравнительный анализ ограничений существующих методов и возможностей нового подхода на основе искусственного интеллекта. Разработанные алгоритмы основываются на современных моделях машинного зрения, методах изометрического анализа и цифровой корреляции изображений, которые с помощью интеллектуальных агентов собираются в контейнеры и реализуют выбранный стек сервисов, таких, например, как:

1. **Загрузка и обработка изображений скважины:**
  - Приложение позволяет загружать серию изображений с определенной глубиной (распознает глубину и ее изменение между кадрами).
  - Выполняется автоматическая сортировка изображений по глубине.
  - Поддерживаются различные форматы изображений (tif, tiff, png, jpg).
2. **Расчет векторов смещений между слоями:**
  - Использует алгоритм оптического потока (optical flow TVL1) для определения смещений между последовательными слоями изображений.
  - Применяет медианную фильтрацию для удаления шумов.
3. **Расчет тензоров деформации:**
  - Вычисляет компоненты тензора деформации (xx, yy, xy) на основе векторов смещений.
  - Учитывает пространственное разрешение по всем осям.
4. **Расчет тензоров напряжений:**
  - Преобразует деформации в напряжения с учетом упругих свойств материала (модуль Юнга, коэффициент Пуассона).
5. **Анализ прочности по различным критериям разрушения:**
  - Максимальных напряжений (Max Stress)
  - Цая-Хилла (Tsai-Hill)
  - Хоффмана (Hoffman)
  - Цая-Ву (Tsai-Wu)
6. **Визуализация результатов:**
  - Отображение векторного поля смещений.
  - Визуализация компонентов деформации.
  - Построение карт разрушения по различным критериям.
  - Создание срезов данных по осям X, Y и Z с субпиксельной интерполяцией.

Набор сервисов может расширяться, в зависимости от решаемой задачи. Программный комплекс был опробован на реальных видеопотоках, полученных для ряда шахт Кузбасса и показал высокую результативность в интерпретации и оценке состояния горного массива. Дополнительной особенностью разработанного комплекса является возможность формирования начальных и граничных условий для решения задач такими программными комплексами как FIDESYS, ANSYS и другие.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий и гранта Российского научного фонда №23-17-00148, <https://rscf.ru/project/23-17-00148/>*

#### **Список использованных источников:**

1. Chambers D. (ed.) Digital Image Correlation: Advanced Methods and Applications. New York: Nova Science, 2017. — 125 p.

2. Merzkirch M. Mechanical Characterization Using Digital Image Correlation: Advanced Fibrous Composite Laminates. Springer, 2022. — 311 p. — ISBN 978-3-030-84039-6.

**Рассказов И.Ю.**

*Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия*

*e-mail: rasskazov@igd.khv.ru*

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ГОРНЫХ УДАРОВ И СНИЖЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РИСКА**

Интенсивная добыча полезных ископаемых часто сопровождается динамическими проявлениями горного давления: от внезапных выбросов породы и газа до разрушительных горных и горно-тектонических ударов. В этих условиях для контроля и эффективного управления горным давлением необходимо применение нескольких дополняющих друг друга методов и технических средств, объединенных в единую систему комплексного геомеханического мониторинга (СКГМ), которая позволяет регистрировать и определять параметры не только крупных геодинамических событий, но и их предвестников.

Основными направлениями совершенствования СКГМ являются разработка научно-методических и программных средств, обеспечивающих необходимую помехозащищенность при регистрации разномасштабных данных, их совместный анализ с выделением потенциально удароопасных участков массива горных пород, надежный прогноз опасных геодинамических явлений и оценку эффективности применяемых профилактических мероприятий.

В АСКГД «Prognoz ADS», которая является важным элементом системы комплексного геомеханического мониторинга, фильтрация технологических помех производится как на аппаратном, так и на программном уровне с использованием специальных алгоритмов. Для обработки данных применяются методы интеллектуального анализа и машинного обучения. Для выделения формирующихся очагов горных ударов предложен подход, базирующийся на теории случайных графов с использованием установленной компоненты связности и разработанных алгоритмов, основанных на методах кластерного анализа. Надежность прогноза удароопасности обеспечивает методика, в которой используются модели случайного леса, градиентного бустинга и рекуррентные нейронные сети.

Наличие системы комплексного мониторинга открывает новые возможности для разработки эффективных методов снижения удароопасности и геодинамического риска, основанных на взрывной разгрузке массива. Их реализация включает в себя бурение веером скважин в район формирующегося очага горного удара и проведение сотрясательного взрывания, обеспечившего снижение удароопасности и перемещение опасной зоны вглубь массива. Для предотвращения горно-тектонических ударов взрывным воздействием разгружаются высоконапряженные зоны, формирующиеся вдоль границ тектонических блоков.

Применение системы комплексного мониторинга на ряде удароопасных рудников доказало возможность обеспечить допустимый уровень безопасности горных работ за счет выявления и эффективной разгрузки потенциально удароопасных участков еще на ранних стадиях подготовки горных и горно-тектонических ударов.

**Розанов И.Ю.**

*Горный институт КНЦ РАН, г. Анапты, Россия*

*e-mail: i.rozanov@ksc.ru*

## **АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ОБРУШЕНИЙ МАССИВОВ ПРОЧНЫХ СКАЛЬНЫХ ПОРОД**

Разработка месторождений полезных ископаемых открытым способом неизбежно сопровождается изменением геомеханического состояния вмещающего массива горных пород, начиная от незначительных деформаций уступа и заканчивая существенными подвижками по границам структурных блоков, обширными оползнями и техногенными землетрясениями.

Процесс обрушения массивов горных пород, слагающих борт карьера, описывается совокупностью характеристик (параметров). Различают временные, кинематические, геометрические и другие характеристики. Под кинематическими параметрами понимают смещение, скорость, ускорение и др. параметры сдвижения характерных точек разрушающихся объектов.

Для получения информации об изменении кинематических параметров необходимо организовать на наблюдаемом объекте систему геомеханического мониторинга состояния массива горных пород, при этом одним из самых эффективных направлений остается применение геодезических методов сбора информации. Результативной технологической новинкой стало внедрение в практику мониторинга устойчивости бортов карьеров радарных технологий.

Принцип проведения измерений радаром основан на возбуждении и приеме отраженных электромагнитных волн радиодиапазона. После приема отраженной волны автоматически выполняется интерферометрический анализ, который позволяет получить данные о смещении объекта путем сравнения информации, собранной в разное время, о сдвиге фаз отраженного от объекта сигнала. Это дает возможность рассчитать и другие кинематические параметры.

На характер развития процесса обрушения, а, следовательно, и на изменение кинематических параметров во времени влияет большое количество факторов, как естественных, так и техногенных. К естественным факторам можно отнести физико-механические свойства горных пород, слагающих борт карьера, наличие структурных неоднородностей, параметры залегания систем трещин, обводненности массива и т.д. К техногенным факторам относятся, например, параметры выполнения буровзрывных работ, экскавации и других технологических операций, а также проектные параметры отработки карьера (угол наклона борта карьера, углы наклонов отдельных уступов, размеры транспортных берм и т.д.).

Кроме того, в зависимости от указанных факторов могут фиксироваться различные виды обрушений, такие как оползни, плоскостные и клиновые обрушения, комбинированные обрушения, вывалы и осыпи трещиноватых и дезинтегрированных пород и т.д.

На одном из горнодобывающих предприятий Северо-Западного региона России довольно долгое время функционирует радарная система мониторинга, что позволило накопить значительное количество данных о процессах деформирования и разрушения участков борта эксплуатируемого карьера.

В настоящем докладе представлены данные об изменении различных кинематических параметров во времени при различных видах обрушений, характерных для месторождений, расположенных в массиве прочных скальных пород.

## **ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗА УДАРООПАСНОСТИ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ ГОРНЫХ ПОРОД**

Метод естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) позволяет оценивать напряженно-деформированное состояние (НДС) горных пород различного состава за счёт анализа параметров электромагнитного фона в области исследований. Применение бесконтактных эмиссионных методов горной геофизики показало их эффективность для оперативной диагностики состояния конструкций и вмещающих массивов, включая возможность организации мониторинга в процессе горных работ на шахтах, рудниках и при строительстве инженерных подземных сооружений.

На сегодняшний день одной из самых современных разработок в области регистрации ЕЭМИ является прибор Angel-M, созданный АО «ВНИМИ» (г. Санкт-Петербург). Данная аппаратура используется в частности специалистами в Индии [1], Израиле [2] и других странах. Помимо самой аппаратуры разработаны базовые методики регистрации ЕЭМИ, которые адаптируются и совершенствуются в зависимости от конкретных геотехнических задач, одной из которых является прогноз удароопасности.

Для получения достоверных результатов важно учитывать специфику измерений и корректно интерпретировать данные. Особое внимание при обработке сигналов следует уделять раннему выявлению скрытых признаков потенциально опасных процессов в массиве горных пород, что требует использования моделирования, лабораторных и полевых исследований. Также необходимо учитывать влияние промышленных и природных помех. Кроме того, при стандартном 10-секундном замере оцифрованный сигнал может содержать свыше миллиона точек, при длительном мониторинге объём информации значительно возрастает, таким образом требуется обработка и анализ больших массивов данных.

В работе [3] предложено применение методов машинного обучения для анализа измерений электромагнитного поля при деформировании и разрушении горных пород. Для этого было поставлено несколько задач [3]:

1. Создание базы данных измерений ЕЭМИ при деформировании и разрушении горных пород для последующего анализа и использования в машинном обучении.
2. Исследование зависимости электромагнитного поля от процесса деформации и разрушения горных пород с использованием компьютерного моделирования.
3. Разработка алгоритмов для автоматического определения опасных процессов в массиве горных пород на основе измерений электромагнитного поля.

Указанные задачи были решены посредством разработки алгоритма машинного обучения. При исследовании взаимосвязи ЕЭМИ и НДС применялись методы, схожие с подходами машинного обучения, используемыми в анализе аудио-, видео-, медицинских сенсорных данных (методы решающих деревьев и ансамблевого подхода Random Forest).

Основой для создания модели машинного обучения послужили сигналы ЕЭМИ, записанные в ходе лабораторных экспериментов на образцах различных горных пород и искусственных материалов. Системой нагружения образца являлся испытательный гидравлический пресс лаборатории ВНИМИ (модель ПГК1500Г200), создающий усилие до 150 тс. В качестве датчика ЕЭМИ использовалась антенна Angel-M, также применяемая при измерениях в натурных условиях.

Из каждого записанного сигнала ЕЭМИ извлекались амплитудно-временные (28 параметров), спектрально-временные (6 параметров) и мел-спектральные (40 параметров)

характеристики. Относительный вклад отдельных признаков в формирование прогностической модели машинного обучения, отражающий их влияние на точность и устойчивость принимаемых решений, представлен на рисунке 1.

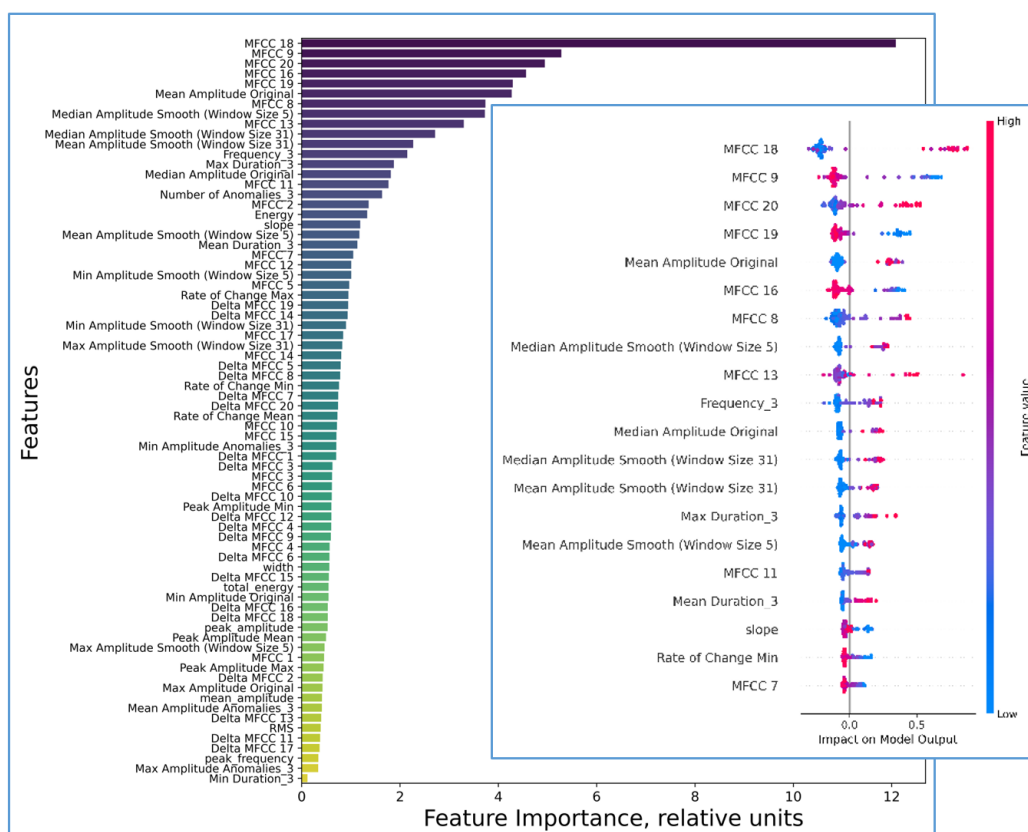


Рисунок 1 – Диаграммы влияния признаков на выходные данные модели

В рамках настоящей работы приводятся некоторые практические примеры применения алгоритма машинного обучения для прогнозирования удароопасности по электромагнитному излучению горных пород с использованием аппаратуры Angel-M на ряде месторождений в России и странах СНГ.

#### Список использованных источников:

1. Das, D. and Mallik, J. Landslide forecasting in the Eastern Himalayas by Fracture Induced Electromagnetic Radiation (FEMR) Technique, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-744, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-744>
2. Das, S., Frid, V., Rabinovitch, A. et al. Insights into the Dead Sea Transform Activity through the study of fracture-induced electromagnetic radiation (FEMR) signals before the Syrian-Turkey earthquake (Mw-6.3) on 20.2.2023. Sci Rep 14, 4579 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54935-8>
3. Романевич К.В. Мулев С.Н. Применение методов машинного обучения для анализа данных электромагнитного излучения при деформировании горных пород. Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Цифровые технологии в горном деле», 13-16 июня 2023 г. – Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2023. – с. 53-55. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.491.4>

**Рудов М.С.**

*ФИЦ Информационных вычислительных технологий, г. Кемерово, Россия*

*e-mail: sanctumdeus@yandex.ru*

## **ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Экологический мониторинг является неотъемлемой частью горнодобывающих предприятий. Повышение концентрации пылевых фракций в атмосфере может влиять как на работников, так и на прилегающие территории. Поэтому необходим постоянный мониторинг в зоне работ горнодобывающей промышленности и анализ выбросов пылевых фракций в атмосферу.

Для мониторинга этих процессов была создана система экологического мониторинга с использованием элементов технологии искусственного интеллекта. Для мониторинга экологических процессов были созданы и протестированы интеллектуальные датчики пыли и газа (РКГ и РКПА).

РКГ – для измерения газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ), РКПА – способны мерить концентрацию пылевых частиц (PM1 0.3 – 1.0 мкм, PM 2.5 1.0 – 2.5 мкм, PM10 2.5 – 10 мкм). Данные с таких датчиков в режиме реального времени обрабатываются и сохраняются в нашей системе. Где в дальнейшем их можно увидеть в виде графиков или отчётов. В работе приводятся примеры работы датчиков по измерению концентрации пыли от промышленных взрывов на угольном разрезе и системы обработки данных основанных на длинных временных рядах.

В результате разработки, внедрения и тестирования данной системы основной на невидимом интернете позволила в значительной мере уменьшить показатели превышений ПДК (предельно допустимой концентрации) пылевых фракций и возможности просмотра данных с датчиков атмосферы в режиме реального времени в удобном формате для пользователей.

**Рыбин В.В.**

*Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия*

*e-mail: v.rybin@ksc.ru*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ БОРТОВ КАРЬЕРОВ В СКАЛЬНЫХ ПОРОДАХ И МОНИТОРИНГ ИХ УСТОЙЧИВОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Горным институтом КНЦ РАН с конца XX века проводились исследования, направленные на разработку методологии геомеханического обоснования устойчивых параметров бортов карьеров в скальных породах. Эти исследования включали в себя определения физико-механических свойств, напряжённо-деформированного состояния массива пород, оценки влияния структурных нарушений, гидрогеологического фактора на процесс деформирования и разрушения элементов открытой геотехнологии. В результате была разработана методология, заключающаяся в последовательном формировании ряда моделей: инженерно-геологической, геомеханической и расчётной. Разработанная методология позволяет подойти к определению рациональных конструкций бортов карьеров как на базе накопленных в процессе эксплуатации месторождения геомеханических данных, так и данных полученных в результате выполнения специальных исследований, учитывающих специфику конкретного предприятия.

Реализация предложенной методологии на практике состоит в выборе места расположения и разработке проекта опытно-промышленного участка (ОПУ), представительного для данного месторождения на основе анализа имеющихся данных о геомеханическом состоянии породного массива; проведении в пределах ОПУ серии опытно-промышленных и экспериментальных работ (ОП и ЭР); распространении результатов ОП и ЭР на весь карьер; разработке регламента на проектирование конечного контура карьера и на заключительном этапе, составлении проекта конечного контура карьера, учитывающего особенности массива пород.

Разработанный методический подход к геомеханическому обоснованию устойчивых параметров бортов и уступов карьеров в достаточной степени соответствует особенностям скальных высокопрочных массивов и может быть применён в соответствующих условиях на различных предприятиях ведущих горные работы открытым способом. Горным институтом КНЦ РАН данный подход используется для разработки регламентов на проектирование открытой добычи полезных ископаемых на крупных рудных карьерах северо-запада Арктической зоны РФ.

Внедрение в практику отработки месторождений обоснованных с помощью данного подхода вариантов открытой геотехнологии возможно только при условии организации комплексного мониторинга устойчивости бортов карьеров. При этом надежный контроль устойчивости бортов карьеров обеспечивается разработкой и реализацией на практике комплексной многоуровневой системы мониторинга геомеханического состояния геологической среды, включающей в себя как наблюдения за поверхностью бортов карьеров, так и изучение законтурного массива пород на различных масштабных уровнях. Взаимная увязка различных видов мониторинга, анализ получаемых данных о геомеханическом состоянии массива пород и принятие решений о безопасной работе предприятия по всей совокупности используемых методов и средств лучше всего осуществляется с применением цифровых технологий.

**Семенова И.Э.**

*Горный институт КНЦ РАН, г. Анапиты, Россия*

*e-mail: i.semenova@ksc.ru*

## **ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ГОРНОМ ПРЕДПРИЯТИИ. ЗАПРОСЫ И РЕШЕНИЯ**

Моделирование геомеханического состояния массива горных пород является неотъемлемой частью современного подхода к обеспечению безопасности горных работ на отрабатываемых месторождениях. Независимо от уровня геомеханических и геодинамических рисков, знания о параметрах природного и техногенного поля напряжений являются основой для технологических решений, от выбора системы разработки, определения границ охранных целиков, направления ведения горных работ, до определения устойчивости и крепления горных выработок. При проектировании горного предприятия эти задачи решаются коллективами научных и проектных организаций, которые используют известные пакеты программ (Ansys, Abaqus, Fidesis, Rocscience и др.) с широким функционалом и возможностями. Для корректного обоснования параметров модели и граничных условий специалисты-пользователи ПО должны иметь достаточно высокий профессиональный уровень и опыт работы с пакетами, каждый из которых имеет свои особенности дискретизации области и самих расчетных процедур, влияющие на получаемый результат моделирования.

В последние годы наблюдается положительный тренд на создание геомеханических служб непосредственно на горных предприятиях, закрывающих широкий круг вопросов,

связанных с мониторингом геомеханического и геодинамического состояния массива горных пород, обеспечением безопасности горных работ, а также прогнозным моделированием геомеханической ситуации по мере развития очистных выемок. Разработка и развитие пакета программ Sigma GT [1] нацелена прежде всего на то, чтобы дать в руки специалистам таких служб инструмент, позволяющий минимизировать ошибки в постановке задач и интерпретации результатов геомеханического моделирования.

ПК Sigma GT устанавливается на предприятии совместно с уже разработанным комплексом разномасштабных геомеханических моделей месторождения, от рудного поля до отдельных элементов горной технологии с учетом особенностей рельефа, типа и параметров напряженно-деформированного состояния (НДС), геометрии и параметров рудного тела, значимых разломных структур, применяемых систем разработки и т.п. Мелкомасштабные модели бескаркасные. Их основное преимущество в том, что используя одну модель можно выполнить неограниченное количество вариантов расчета. Срок использования такой модели 3-5 лет. А если необходима уточненная картина НДС, то есть инструменты автоматической генерации подмоделей, как с уплотненными сетками конечных элементов, так и с разбиением, адаптированным под элементы горной технологии и их комбинацию. Причем возможно несколько уровней вложенности моделей. Автоматизация процесса задания граничных перемещений, геометрии геологических структур и очистных пространств обеспечивает учет техногенного поля напряжений исходного варианта.

Время расчета одного варианта от нескольких минут до 2-х часов в зависимости от размерности модели и изменений, внесенных в конкретном расчетном варианте. К настоящему времени весь процесс от подготовки расчетного варианта, редактирования модели, непосредственно расчета НДС, постобработки данных, визуализации с привязкой к привычным горному инженеру планам горных работ и разрезам, 3D распределениям данных происходит в SigmaGT без использования сторонних приложений.

В тоже время можно экспортировать результаты в форматах, используемых в ГГИС на предприятии для комплексирования их с технологическими и геологическими моделями. По запросу заказчика разрабатываются дополнительные функции, например оценка участков массива по критериям устойчивости, удароопасности, трещинообразования.

Наиболее актуальна возможность оперативных геомеханических прогнозов на горных предприятиях, ведущих отработку запасов удароопасных месторождений, как при годовом планировании горных работ, так и при вынужденных отклонениях от плана.

Для разработчиков ПО Sigma GT важно, чтобы получаемые результаты моделирования отражали в достаточной мере особенности массива горных пород и были источником принятия верных с точки зрения обеспечения геомеханической безопасности решений.

#### **Список использованных источников:**

1. Семенова И.Э., Аветисян И.М. Развитие концепции геомеханического обоснования горных работ в удароопасных условиях // Горный журнал. - 2022. - № 1. - С. 28-33.

**Сидоров Д.В.**

ООО «Полигор», г. Санкт-Петербург, Россия

e-mail: mail@polygor.com

## **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПО «PRESS 3D URAL» ДЛЯ КРАТКО-, СРЕДНЕ- И ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА УДАРООПАСНОСТИ УЧАСТКОВ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД И РУД**

Напряженное состояние горного массива при выемке полезного ископаемого формирует процессы перераспределения напряжений (деформации пород), которые происходят в статическом или динамическом режиме, в зависимости от их физического состояния и параметров горного давления. Перераспределение напряжений в скальном массиве хрупких пород происходит мгновенно, в динамической форме, с выделением энергии в очаговой зоне и распространением упругих колебаний в массиве. Такой процесс называется сейсмическим событием. Сейсмические события, приведшие к разрушениям пород в горных выработках, классифицируются как горные удары.

В настоящее время при решении проблемы горных и горно-тектонических ударов на рудниках особую актуальность приобретают вопросы их заблаговременного прогнозирования. Период прогнозирования удароопасности зависит от уровня решаемой задачи и разделяется на кратко- средне- и долгосрочное прогнозирование, охватывающее период от дней, месяцев до нескольких лет (десятков лет). Так, краткосрочный прогноз направлен на предсказание ближайших изменений напряженного и удароопасного состояния при проходке одиночных горных выработок и влияет на принятие локальных технических решений по безопасному ведению горных работ. Среднесрочное прогнозирование охватывает период от месяца до 1 года и направлено на предсказание тенденций изменений напряженного и удароопасного состояния, и принятие технических решений по безопасной отработке запасов, в границах очистных блоков. Долгосрочное прогнозирование охватывает период от 1 года и более, и направлено на предсказание тенденций изменений напряженного и удароопасного состояния, и принятие стратегических технических решений, при отработке запасов в границах шахтного поля.

Для решения динамических задач горной геомеханики целесообразно использовать специализированное программное обеспечение позволяющее оперативно учитывать пространственно-временное изменение горно-геологических, горно-технических и геодинамических условий месторождений. Для осуществления кратко-, средне- и долгосрочного прогноза удароопасности на рудниках России возможно использовать ПО «PRESS 3D URAL» (разработчик ООО «Полигор»), позволяющее заблаговременно оценивать напряженно-деформированное и удароопасное состояние массива горных пород и целиков различного назначения с совокупным учетом широкого диапазона горно-геологических и горнотехнических факторов: произвольной пространственной конфигурации выработанного пространства, краевой части рудной залежи, целиков и других опорных элементов; произвольного месторасположения конструктивных элементов относительно границ выработанного пространства; различных физико-механических свойств вмещающих пород и руд; переменной мощности рудных элементов; параметров разгрузочных мероприятий; параметров тектонических нарушений.

## ПОВЫШЕНИЕ РЕНТАБЕЛЬНОСТИ ОТРАБОТКИ КАРЬЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПО DIGGER SLOPE

Одной из главных целей стратегического планирования открытых горных работ является безопасное и ответственное использование ресурсов для максимизации чистой приведенной стоимости (NPV) в долгосрочной перспективе.

Для её достижения производится оптимизация конечного контура карьера, а также определяется оптимальная последовательность развития горных работ в карьере (пушбеков) на основе выбранных критериев (технических, экономических, геомеханических) [1].

Программное обеспечение Digger Slope позволяет получить геомеханические критерии для оптимизации оболочек карьера на основе данных разведки. Данные критерии представляют собой рекомендованные параметры откосов карьера, оптимальные в заданных условиях месторождения на всех масштабных уровнях: уступ, группа уступов, конструктивный борт в целом (Рисунок 1).

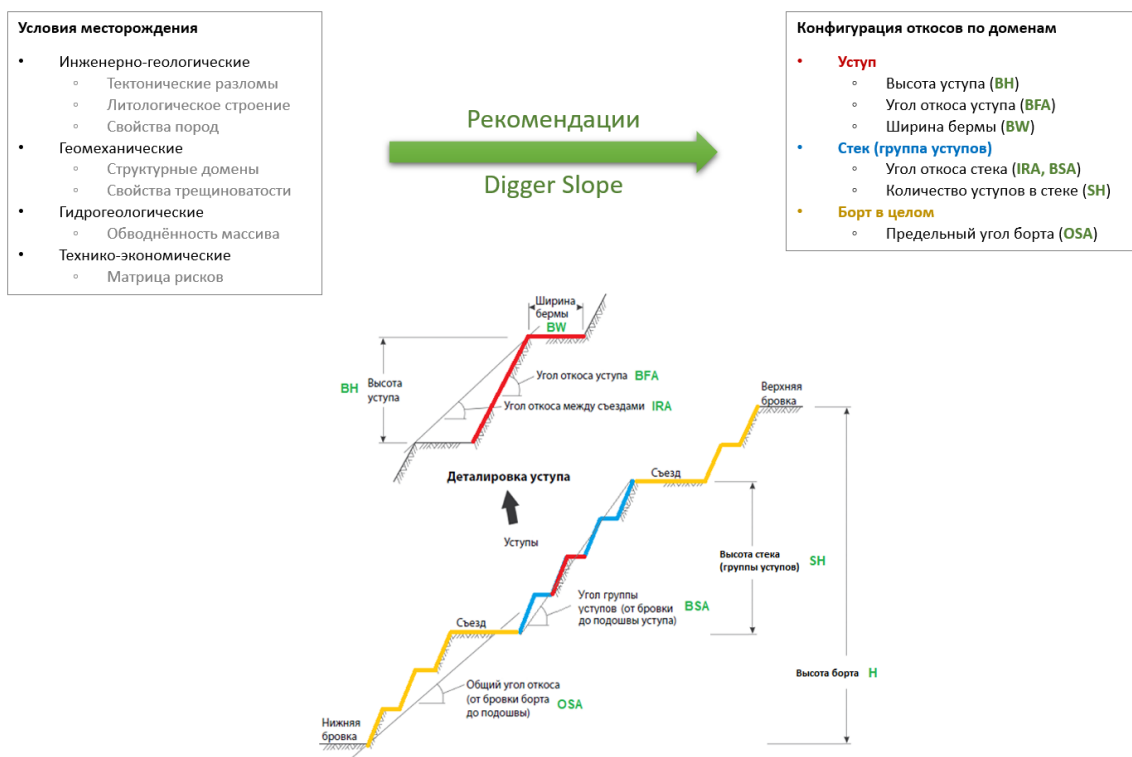


Рисунок 1 – Геомеханические критерии

На базе комплексного кинематического анализа программа учитывает все структурные особенности горного массива и геомеханические риски при оценке устойчивости откосов в соответствии с ФНП № 439 [4], обеспечивая инженерные решения на стыке безопасности и эффективности ведения горных работ [2].

При этом программа в автоматизированном режиме выполняет все расчёты и районирование рекомендованных конфигураций откосов, выделяя проектные сектора карьера по данным литолого-структурной доменизации породного массива [3], что в разы повышает скорость проектирования и позволяет прорабатывать больше данных и сценариев в одни и те же сроки.

В общем процессе оптимизации контура карьера (Рисунок 2) результаты расчёта в ПО Digger Slope необходимы на нескольких этапах. Во-первых, полученные результаты используются при построении математической оболочки карьера, позволяя максимизировать NPV. Во-вторых, на этапе детального проектирования контура карьера учёт рекомендованных конфигураций откосов позволяет соблюсти критерии безопасности и сократить потенциальные издержки при обработке месторождения.

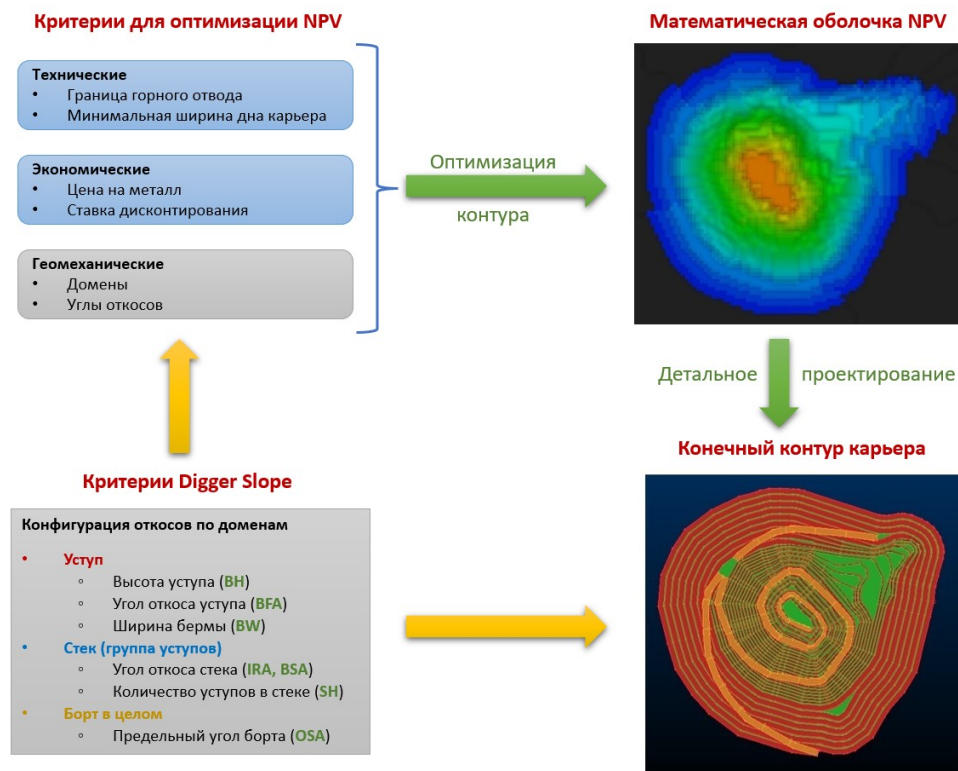


Рисунок 2 – Схема оптимизации NPV

Такой подход к оптимизации карьера позволяет осуществить полноценное стратегическое планирование, обеспечивая, наряду с экономическими, выполнение геомеханических критериев безопасности при проектировании горных работ, тем самым повышая рентабельность обработки месторождения.

#### Список использованных источников:

- Капутин Ю. Е. Обоснование бортового содержания и оптимизация стратегии развития открытых горных работ. — СПб., Недра, 2017. — 280 с.
- Ильясов Б.Т., Солуянов Н.О., Садинов Ш.М., Содиков И.Ю. Оптимизация бортов карьера Бесапантау на основе 3К-моделирования в программном комплексе DIGGER SLOPE // Горный вестник Узбекистана. - 2023. - № 1. - С. 4-12
- Солуянов Н.О. Методика построения геомеханической модели для планирования открытых горных работ // Маркшейдерия и недропользование. - №6, ноябрь-декабрь 2015 г.
- Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов». Утверждены приказом Ростехнадзора № 439 от 13 ноября 2020 г.

**Степанов Г.Д.**

*АО «Кольская ГМК», рудник «Северный», г. Заполярный, Россия*

*e-mail: Georgest0503@mail.ru*

## **ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ НАРУШЕННОСТИ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

Эксплуатация подземных рудников, особенно в удаленных регионах Российской Федерации, представляет собой фундаментальный элемент экономической деятельности. Длительная отработка месторождений приводит к продолжению работы многих подземных рудников на глубинах, где увеличивается риск угроз, связанных с удароопасностью. Это создает новые вызовы перед техническим персоналом, включая необходимость оптимальной добычи руды и предотвращения повреждений горной техники, а также несчастных случаев.

В современной практике разработки рудников существует множество методов оценки устойчивости горных выработок. Однако их широкое применение часто требует значительных ресурсов, как человеческих, так и материальных. Это ограничивает их использование в условиях, где целесообразность таких затрат подвергается сомнению. В условиях рудника «Северный глубокий», характеризующегося низким уровнем удароопасности, нецелесообразно применять все доступные методы из-за необходимости большого количества персонала и крупного фонда основных средств. В связи с этим, принято решение об использовании методов, которые позволяют прогнозировать изменения напряженно-деформированного состояния массива (НДС) при добыче месторождения с минимальными ресурсами.

В данной работе рассматриваются численные методы моделирования с целью оптимизации прогнозирования обрушений при увеличении горного давления с учётом степени нарушенности массива горных пород. Представлены две модели: первая модель описывает степень нарушенности массива через критерий Бартона без учета коэффициентов, отвечающих за пригрузку и обводненность; вторая модель содержит информацию о главных компонентах тензора напряжений, включая их значения и направления.

Для верификации численного моделирования был выбран участок с частыми напластованиями горных пород, окружающих лежащий бок рудной залежи. Результаты расчетов позволили выявить зоны влияния очистных работ и выработок, где высока вероятность образования обвалов. Подтверждением расчетов служит событие на пересечении выработок, включенных в число проблемных. Также стоит отметить, что форма вывалообразования соответствует форме при преобладании тектонических напряжений, что было установлено по результатам моделирования НДС массива.

Рассмотренный подход прогнозирования позволяет на этапе ежемесячного планирования горных работ исключить нахождение техники и персонала в выработках, где возможны концентрации напряжений, пересмотреть план горных работ, а также разработать мероприятия для минимизации рисков. Этот подход предоставляет возможность более эффективного использования ресурсов и снижает вероятность чрезвычайных ситуаций, что способствует обеспечению безопасности работников и сохранности оборудования. В целом, применение данного подхода к оценке устойчивости горных выработок в рудниках цветных металлов позволяет повысить эффективность производственного процесса и улучшить условия работы в подземных условиях.

**Счастливец Е.Л., Юкина Н.И., Быков А.А.**

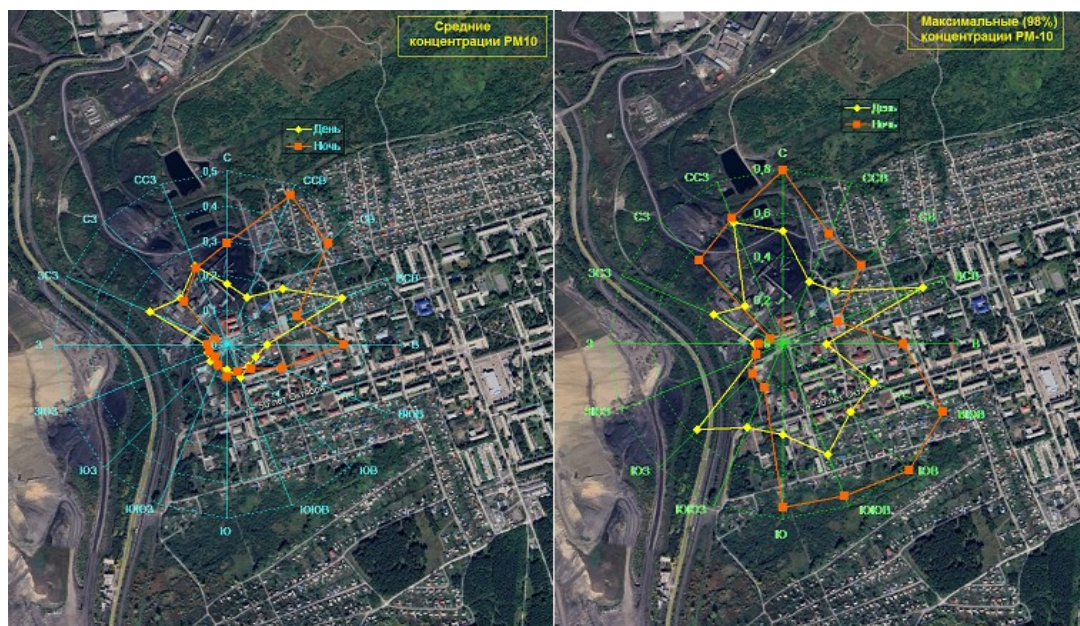
ФИЦ информационных и вычислительных технологий, г. Кемерово, Россия

e-mail: schastlivtsev@ict.sbras.ru, yukina@ict.sbras.ru

## **О ВЛИЯНИИ ВРЕМЕНИ СУТОК НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ ПЫЛЬЮ В РАЙОНЕ УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА**

В Кемеровском филиале ФИЦ ИВТ разработан программно-аппаратный комплекс (ПАК) для мониторинга загрязнения атмосферы [1]. Комплекс включает в себя метеостанцию, датчики автоматического контроля загрязнения атмосферы, модель расчета загрязнения воздуха и сервисы для сбора, передачи, хранения и обработки информации о загрязнении атмосферы и сопутствующих метеопараметрах. Также разработаны вспомогательные программы, позволяющие синхронизировать данные датчиков и метеостанции, а также группировать эти данные по скоростям и направлениям ветра.

В течение нескольких лет проводилась проверка работоспособности ПАК на основе реальных данных, полученных в процессе экспериментов в зоне влияния нескольких предприятий по открытой добыче угля в Кузбассе. Наибольшие ряды данных накоплены для одного из угледобывающих предприятий Кузбасса в городе Киселевске. Группировка данных замеров частиц PM10 по 16 румбам позволила построить “розы” среднего и максимального загрязнения, которые, как и роза ветров, показывают значения, когда “наблюдатель” стоит лицом к направлению ветра. Заметим, что ветер со стороны разреза попадает в сектор направлений ветра от южного (Ю) до северо-западного (СЗ) румба. На рисунке представлены данные, дополнительно сгруппированные за дневное (с 8 до 20 часов) и ночное время (с 20 до 8).



Розы среднего (слева) и максимального (справа) загрязнения атмосферы частицами PM10 для одного из датчиков ПАК за дневное и ночное время

Приведенные на рисунке данные построены на основе обработки замеров концентрации пыли PM10 по результатам наблюдений с декабря 2020 по февраль 2021, когда метеостанция выдавала данные непрерывно. Итого на рисунке обобщены около 3000 наблюдений, приведенных к интервалу 20 минут (время осреднения для разовой ПДК).

Прежде всего, заметим, что роза средних концентраций показывает незначительное и практически одинаковое днем и ночью загрязнение при направлении ветра со стороны разреза (Ю – СЗ). Наиболее вероятным объяснением этого является тот факт, что производство работает круглосуточно, пост расположен близко к полю отработки, а мелкие частицы до 10 мкм в выбросах открытых горных работ составляют не более 20% [2].

Для ветров западной половины (со стороны жилых зон) основными источниками выброса пыли являются транспортные магистрали и улицы, а также трубы установок автономного отопления (печи частного сектора). В литературе часто подчеркивается [3,4], что эти источники выбрасывают в основном мелкодисперсную пыль, что и подтверждают приведенные данные мониторинга. Это тем более вероятно, что наблюдения относятся к зимнему времени (с декабря по февраль), когда печи автономного отопления работают постоянно и сжигают основную массу топлива (кузбасского угля).

И наконец, группировка замеров для дневного и ночного времени (см. рисунок) показала несколько неожиданный, с первого взгляда, результат, что загрязнение мелкодисперсной пылью в ночное время заметно больше, чем днем. Тут представляется влияние двух факторов. Во-первых, ночью, как правило, значительно меньше скорость ветра, что приводит к росту приземных концентраций всех загрязняющих веществ, в том числе и РМ10. А во-вторых, печи автономного отопления загружаются на ночь большей, чем днем массой топлива, что и приводит к росту выбросов пылевых частиц.

Таким образом, анализ данных непрерывного мониторинга загрязнения воздуха позволяет получать дополнительную полезную информацию о формировании уровней загрязнения атмосферы и его причинах, что может быть использовано при выработке управленческих решений по нормализации экологической обстановки в промышленных районах.

#### **Список использованных источников:**

1. Счастливец Е.Л., Юкина Н.И., Быков А.А. Анализ информации датчиков непрерывного контроля загрязнения воздуха в городе с развитой промышленной инфраструктурой // Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2023». Севастополь, 2023. - С.106-110.
2. Справочник по борьбе с пылью в горнодобывающей промышленности. // Под ред. А.С. Кузьмича. М.: Недра, 1982.-240 с.
3. Гусак Д.В., Волков Ю.В. Особенности распространения пыли, поступающей от автотранспорта, в городских условиях//Вестник научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. - Выпуск 1. – 2024. - С. 83-92.
4. Р.В. Орлов, А.Б. Стрелева. Н.С. Барикаева. Оценка взвешенных частиц рм10 и рм2.5 в атмосферном воздухе жилых зон // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» № 12 (134) 2013. Научно-технический центр «ТАТА», Саров. - С. 39-41.

**Федоров А.Ю.**<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>АО «Комбинат КМАруда», г. Губкин, Россия

<sup>2</sup>ИДГ РАН, г. Москва, Россия

e-mail: fedorovandrey31@gmail.com

## **ОРГАНИЗАЦИЯ ПОДЗЕМНОГО ПУНКТА НАБЛЮДЕНИЙ В ПРЕДЕЛАХ ШАХТНОГО ПОЛЯ КОРОБКОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КМА**

На современном этапе развития горного производства для обеспечения безопасного проведения горнопроходческих работ следует предусмотреть проведение стационарных наблюдений за микросейсмичностью и обводненностью разрабатываемых массивов горных пород. Шахтное поле Коробковского железорудного месторождения КМА представляет собой сложную природно-техногенную геосистему, в пределах которой наряду с проходкой и осушением горных выработок, добычей руды выполняется комплекс мероприятий по использованию отработанного подземного пространства под закладку промышленных отходов.

В процессе разработки Коробковского железорудного месторождения к основным видам гидрогеологических работ относятся:

- погоризонтные наблюдения за притоками воды в горные выработки, по стволам шахты и к водосборникам участковых водоотливных установок;
- обследование состояния осушения и консолидации хвостовой пульпы в заложенном массиве;
- разработка проектов по бурению опережающих шпуров, разведочных скважин на обводненность кровли выработки и контроль их выполнения.

Погоризонтные наблюдения за водопритоками в пределах шахтного поля проводятся с использованием стандартной аппаратуры вручную в соответствии с техническим регламентом. Особое внимание уделяется наблюдениям за процессами закладки промышленных отходов и анализу устойчивости межкамерных перегородок. Ранее были прослежены перетоки между отработанными камерами при закачке пастообразной пульпы [1]. Отмеченные эффекты свидетельствуют о наличии гидравлической взаимосвязи в пределах рудной толщи, разрабатываемой с использованием взрывных технологий. Шахтное поле характеризуется единой фильтрационной структурой. Необходимо осуществлять мониторинг за естественными водопритоками в горные выработки, которые вносят значительный вклад в формирование общего водного баланса, включающего техническую и оборотную воду.

Обводненность железорудного массива зависит от условий формирования режима трещинно-жильных вод, которые получают преимущественное развитие в тектонически ослабленных зонах. В 2023 г. были проведены первые измерения в отработанной камере, расположенной на горизонте -75 м за реакцией системы «пласт-выработка» на проведение промышленных взрывов в шахте и карьере [2]. Весной 2024 г. удалось организовать подземный пункт наблюдений с установкой аппаратурно-измерительного комплекса (рис. 1).

С октября 2024 г. была запущена стационарная регистрации сейсмических и гидрогеологических параметров в горной выработке. Первые результаты измерений представлены на рисунке 2. Данные наблюдений за водопритоком из субгоризонтальной скважины позволяют проследить сезонный тренд уменьшения интенсивности расхода от 1,155 до 1,147 м<sup>3</sup>/час. В ряде случаев отмечены скачкообразные изменения водопритока, которые не связаны с промышленными взрывами и техническими причинами. Сводная сейсмическая запись осложнена откликами на проведение промышленных взрывов [3].



Рисунок 1 – Общий вид подземного пункта (слева) и системы регистрации (справа) (1 – расходомер EM470; 2 – акселерометр RefTek 147-01/3; 3 – аналогово-цифровой преобразователь L-Card E14-140M; 4 – промышленный компьютер ICO300E; 5 – портативный монитор; 6 – АКБ; 7 – субгоризонтальные скважины

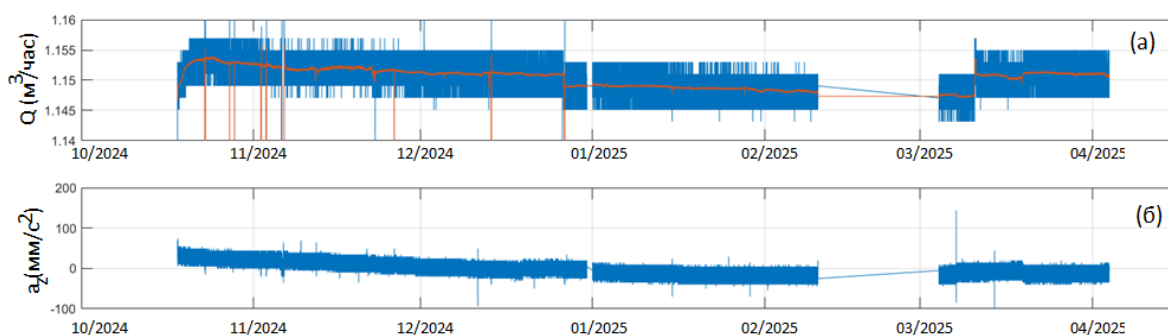


Рисунок 2 – Диаграммы регистрации водопритока (а) и ускорения (б) в подземном пункте с 10.2024 по 04.2025 гг.

Переход на новый уровень наблюдений за гидрогеологической ситуацией, и микросейсмическим фоном с использованием современных аппаратурно-измерительных комплексов, которые отличаются высокой точностью измерений и частотой регистрации, позволит:

- определить фоновые вариации сейсмических и гидрогеологических параметров;
- оценить реакцию обводненной части железорудного массива на взрывное воздействие.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН (тема № 125012200570-5).*

#### Список использованных источников:

1. Лейзерович С.Г., Помельников И.И., Сидорчук В.В., Томаев В.К. Ресурсовоспроизводящая безотходная геотехнология комплексного освоения месторождений Курской магнитной аномалии / Под ред. Д. Р. Каплунова. М.: Горная книга. – 2012. – 547 с.
2. Иванов А.Г., Караваев А.В., Федоров А.Ю. Реакция систем «пласт-скважина» и «пласт-выработка» на промышленные взрывы // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025;(4):135-151. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_4\_0\_135
3. Куликов В.И., Павлов Д.В. Оценка характеристик разлома на основе сейсмических и деформационных измерений // Динамические процессы в геосферах. 2016;(8):69-76.

**Федюков А.А., Будник Д.Р., Запрудин В.А., Топко Д.Л., Митькиных П.В.**  
Институт АО «Уралмеханобр» г. Екатеринбург, Россия  
e-mail: Fedyukov\_AA@umbr.ru, budnik\_dr@umbr.ru, Zaprudin\_VA@umbr.ru,  
Topko\_DL@umbr.ru, Mitkinykh\_PV@umbr.ru

## **ПРОГРАММНЫЙ ПРОДУКТ «ГОРИЗОНТ» ДЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЛУЖБ ПОДЗЕМНОГО РУДНИКА И ФОРМИРОВАНИЯ ПАСПОРТОВ КРЕПЛЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

Процесс крепления является частью цикла проходки и производится с целью сохранения устойчивости горной выработки на весь срок ее эксплуатации. С увеличением производительности рудников растут и темпы проходки горных выработок. Это требует внедрения новых подходов к организации взаимодействия специалистов рудника, связанных с решением задач крепления. Программа «Горизонт» создана для ускорения процесса составления паспорта крепления планируемых горных выработок и обработки данных наблюдений за их устойчивостью.

Программный продукт «Горизонт» работает на основе базы данных геологических типов пород и руд месторождения, составленных на основе анализа процессов образования и последующих изменения месторождения, полевых наблюдений, а также технологических факторов, определяющихся применяемой на руднике системой разработки.

Разработчиком программы составляется номограмма – графическое представление об устойчивости массивов в зависимости от особенностей строения пород и руд каждого месторождения индивидуально. В рамках внедрения программы составляется база данных типовых паспортов крепления горных выработок, из которой программный комплекс по определенному алгоритму выбирает нужный паспорт крепления.

Также предусмотрен модуль мониторинга для формирования базы данных наблюдений за устойчивостью закрепленных горных выработок, выявления нарушений технологии возведения крепи или необходимости внесения корректировок в применяемые типовые паспорта или изменения типов применяемых крепей.

Для упрощения работы пользователей взаимодействие специалистов и служб подземного рудника осуществляется путем заполнения соответствующих полей (форм) интерфейса программы в соответствии с их должностными обязанностями.

Руководитель проходческого участка в соответствии с утвержденным планом развития горных работ заполняет данные о названии выработки, ее протяженности, сечении, привязке к горизонту проходки.

Затем геологическая служба по номограмме определяет геологический класс устойчивости массива пород или руд на участке расположения выработки.

После заполнения всех необходимых полей программный продукт в автоматическом режиме формирует паспорт крепления выработки в соответствии с требованиями «Правил безопасности при ведении горных работ...» ФНиП №505.

Геомеханической службой рудника осуществляется сбор и систематический анализ результатов мониторинга устойчивости горных выработок и их крепления. Полученные данные обрабатываются с применением программного модуля «Мониторинг».

В докладе представлена подробная информация о применении программного продукта на одном из рудников.

*Хисматуллин Д.И.*

*ООО «СПб-Гипрошахт», г. Санкт-Петербург, Россия*

*e-mail: info@spbgipro.ru*

## **ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПО RS-2 И RS-3 ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТСЛОЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИИ МАССИВА ПРИ КАМЕРНОЙ ДОБЫЧЕ С ДАЛЬНЕЙШЕЙ ОЦЕНКОЙ ВТОРИЧНОГО ЗАСОРЕНИЯ**

В современных условиях подземной разработки рудных месторождений особую актуальность приобретает проблема прогнозирования деформационных процессов в массиве горных пород. Геомеханическое моделирование становится ключевым инструментом для обеспечения безопасности и эффективности горных работ при камерной добыче полезных ископаемых.

Методологическая основа базируется на использовании специализированного программного обеспечения RS-2 и RS-3, представляющего собой комплекс для численного моделирования геомеханических процессов. В основе программ лежит усовершенствованный метод конечных разностей, позволяющий учитывать сложные реологические свойства породного массива, его анизотропию и блочность структуры.

Методика учитывает многофакторный анализ напряженно-деформированного состояния массива, временные характеристики отработки месторождения, а также особенности структурных характеристик массива.

Практическая значимость внедрения результатов моделирования проявляется в оптимизации параметров камерной системы разработки и разработке эффективных мероприятий по управлению горным давлением. Это позволяет минимизировать риски обрушений и деформаций, повысить безопасность горных работ, увеличить эффективность добычи и сократить потери руды при разработке.

Технологические решения, разработанные на основе моделирования, включают оптимизированные параметры камер и целиков, схемы закладки выработанного пространства, системы крепления выработок, последовательности отработки блоков и программы мониторинга состояния массива.

Экономический эффект от применения программного обеспечения RS-2 и RS-3 проявляется в экономической эффективности. Это достигается за счет снижения затрат на крепление выработок, уменьшения потерь руды, повышения производительности труда, сокращения простоев из-за деформаций массива и продления срока службы выработок.

Комплексное использование геомеханического моделирования позволяет обеспечить высокую точность оценки состояния массива горных пород, своевременно принимать меры по предотвращению отслоений и деформаций, минимизировать вторичное засорение выработанного пространства, повысить эффективность и безопасность горных работ, а также оптимизировать технологические процессы добычи.

*Хмелинин А.П.*

*ИГД СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

*e-mail: hmelinin@misd.ru*

## **ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД И ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СТРАТЕГИЧЕСКОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ**

Освоение месторождений стратегически важного минерального сырья в современных условиях сопряжено с переходом на глубокие горизонты добычи и, как следствие, с

необходимостью решения ряда актуальных проблем горного дела, связанных с обеспечением безопасности горных работ при сохранении высокой производительности труда. Полнота и достоверность знаний о геологической среде и её свойствах определяют надежность оценок устойчивости подземных сооружений и прогноза безопасности ведения горных работ.

В ИГД СО РАН на протяжении ряда лет проводятся исследования физического состояния геологической среды, включая процессы накопления и высвобождения энергии в массивах горных пород и их возможные катастрофические проявления.

Разработаны методы, приборы и математические модели для диагностики и контроля состояния массива горных пород:

- автоматизированные программно-аппаратные комплексы измерения напряжений и деформаций в массиве горных пород методами параллельных скважин, гидроразрыва;
- скважинная инклинометрическая система для определения вертикальных смещений горных пород и заложочного массива; многоканальная измерительная система «Карьер» для контроля развития деформационных процессов при открытой отработке кимберлитовых месторождений Якутии;
- численный метод моделирования распространения упругих волн вдоль поверхности выработок произвольной геометрии в неоднородных средах. Установлено, что по фазовым характеристикам и дисперсионным кривым поверхностных волн можно оценивать состояние и определять упругие параметры горных пород в окрестности выработки на расстояние до  $1,7$  ее радиуса.
- Математические модели горных пород с учетом иерархии его структурных уровней и способности запасать энергию в форме внутренних самоуравновешенных напряжений. Численно решена задача об активном высвобождении запасенной энергии в массиве в окрестности выработанного пространства.

С помощью представленного инструментария проведены исследования исходного поля напряжений на рудниках Скалистый и Таймырский (ПАО «ГМК «Норильский никель»), Айхал, Удачный, Интернациональный (АК «Алроса» (ПАО)), калийных рудниках АО «Уралкалий». На основе полученной информации проведена корректировка проектов отработки месторождений стратегического минерального сырья, даны рекомендации по организации геомеханического мониторинга, которые включены в проекты гидро-геомеханического мониторинга отработки месторождений.

Недостаточная изученность физического состояния геологической среды приводит к снижению достоверности оперативного прогноза существующими методами катастрофических проявлений горного давления в условиях больших глубин. Для решения этой проблемы в ИГД СО РАН разрабатывается комплекс методов и приборов, использующих динамические признаки предразрушения массива горных пород.

**Целовальникова О.Н., Кулькова М.С., Иванов А.С.**

*Горный Институт КНЦ РАН, г. Анапиты, Россия*

*e-mail: o.tselovalnikova@ksc.ru, m.kulkova@ksc.ru, as.ivanov@ksc.ru*

## **ВЫЯВЛЕНИЕ СИСТЕМ ТРЕЩИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БПЛА И ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ**

Изучение геолого-структурных условий обрабатываемых месторождений, в частности системной трещиноватости, является традиционно важным направлением для решения целого комплекса вопросов для обеспечения безопасности и эффективности горных работ.

Одной из проблем геолого-структурного исследования является изучение бортов карьера, находящихся в труднодоступных условиях для картирования структурных неоднородностей.

Цель данного исследования в выявлении систем трещин в приконтурном массиве горных пород с помощью использования беспилотного летательного аппарата (БПЛА), геолого-структурного картирования и обработки данных с использованием программных средств.

Методы исследования заключаются: в обработке ранее выявленной трещиноватости; в картировании геолого-структурных неоднородностей горных выработок; в использовании БПЛА для сбора данных о трещиноватости массива находящихся в труднодоступных участках бортов карьера.

Картирование обнажений подземных горных выработок производилось сотрудниками Горного института КНЦ РАН. Обследование проводилось на разных горизонтах и интервалах горных выработок, с учетом геологической разности. Снимались показатели по трещинам: азимутальная характеристика, тип трещины, расстояние между трещинами, длина трещин, литология, заполнитель трещин, степень выветривания, раскрытие трещин, макро и микрошероховатость, Ja, Jr, и др. Для определения параметров залегания основных систем структурных неоднородностей при картировании обследовано двадцать интервалов подземных горных выработок и описаны 610 структурных неоднородностей.

Обследование карьера проводилось сотрудниками Горного института КНЦ РАН с использованием БПЛА. При использовании БПЛА с помощью программных средств выявлялись азимутальные характеристики трещин для участков бортов карьера. Для определения параметров залегания основных систем структурных неоднородностей при использовании БПЛА описано более 40 структурных неоднородностей. Обработка всех полученных данных производилась с помощью программных средств, с построением диаграмм трещиноватости и выявления систем трещин. Полученные результаты также проанализированы с данными по трещиноватости, предоставленными геологической службой рудника «Северный».

Перспективы исследования заключаются в совмещении используемых методов выявления геолого-структурных неоднородностей.

#### **Список использованных источников:**

1. Полевые методы изучения трещин в горных породах. Госгеолтехиздат. – М., 1956г.
2. Рекомендации по изучению трещиноватости горных пород при инженерно-геологических изысканиях для строительства, Стройиздат. – М., 1974г. – 40с.
3. Трещиноватость горных пород. Основы теории и методы изучения. СибГИУ. – Новокузнецк, 2008г. – 41с.

## **ПРИМЕНЕНИЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ ИНФОРМАЦИОННОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА<sup>4</sup>**

Развитие современных технологий машинного обучения и больших языковых моделей позволяет упростить взаимодействие конечного пользователя с информационными системами различного назначения. Подобные системы могут осуществлять интеллектуальный поиск информации, общаясь с пользователем на естественном языке, оказывать поддержку при разработке программного обеспечения и т.п.

В рамках совместных исследований с лабораторией Mineframe был разработан прототип интеллектуальной справочной системы, которая направлена на автоматизацию анализа и обработки больших объёмов технической документации по руководству пользователя Geotech-3D и предоставлению ответов от поисковой системы в форме текста на естественном языке. Цель создания справочной системы заключалась в обеспечении контекстно-ориентированного поиска и генерации точных, релевантных ответов на естественном языке. Данная система призвана значительно упростить взаимодействие пользователей (исследователей и инженеров) с документацией и повысить эффективность их работы. Немаловажная особенность задачи состояла в том, что требовалось обрабатывать информацию, представленную не только в виде текста, но и в виде таблиц, схем. Система должна была поддерживать загрузку и обработку информации в наиболее популярных форматах: PDF, DOCX, XLSX, а также текстовые файлы и сканированные материалы, сохранённые в PDF формате. Разработанная система способна автоматически распознавать структуру таблиц и учитывать ее при обработке текста, что позволяет точно отвечать на вопросы, связанные с числовыми и категориальными данными

Одной из ключевых возможностей, предоставляемых интеллектуальной справочной системой, является контекстно-ориентированный поиск с учётом специфики геотехнических и инженерных данных. Система поддерживает диалоговый режим взаимодействия. Этот режим предоставляет возможность уточнять запросы и получать развёрнутые пояснения на основе обработанных документов. Перечисленный набор функций способен значительно сократить время на поиск и анализ информации, позволяя эффективно работать с технической документацией.

Ядром системы является блок контекстно-ориентированного поиска, осуществляемого с применением RAG-технологии (Retrieval-Augmented Generation). Данная технология способна комбинировать семантический поиск по векторной базе данных FAISS с генерацией ответов с помощью большой языковой модели (LLM) YandexGPT. RAG-технология позволяет минимизировать ошибки, связанные с «фантазированием» языковой модели, так как поиск осуществляется исключительно среди документов, загруженных пользователем. Для обработки запросов применяются методы промпт-инжиниринга. Благодаря использованию таких методов происходит управление поведением больших языковых моделей и повышается релевантность поиска при обработке типовых пользовательских запросов. Это способно улучшить корректность ответов и адаптировать их стиль под техническую специфику руководства пользователя Mineframe Geotech-3D. Использование фреймворка LangChain обеспечивает гибкость интеграции и масштабируемость системы. Этот инструмент позволяет интегрировать большие языковые модели и внешние источники данных, а также управлять контекстом запросов.

---

<sup>4</sup> Работа выполнена в рамках текущей темы НИР «Разработка теоретических и организационно-технических основ информационной поддержки управления жизнеспособностью региональных критических инфраструктур Арктической зоны Российской Федерации» (регистрационный номер 122022800547-3).

При практическом тестировании, система получила положительные в 75% запросов, однако запросы типа «Как...» требовали дополнительной доработки из-за сложности интерпретации инструкций.

Оказалось, также, что существенный процент ответов, признанных пользователями неудовлетворительными, относились к запросам, содержащим термины, смысл которых сильно отличался в зависимости от раздела справки. Было принято решение уточнять контекст запроса в зависимости от того раздела, информация из которого необходима пользователю. Эксперименты показали повышение точности поиска информации при разделении документов на смысловые разделы.

Таким образом, опыт разработки интеллектуальной справки для системы Mineframe показал значительный потенциал применения больших языковых моделей в области автоматизации работы с технической документацией. Использование RAG-технологии и больших языковых моделей способно обеспечить точность и релевантность результатов и сократить время на рутинные задачи. В перспективе планируется обеспечить поддержку дополнительных форматов данных. Помимо этого, архитектура системы позволяет интегрировать её в исследовательские процессы, например, на веб-сайты и имеет возможность настройки под необходимую специфическую область и задачи.

**Шибеева Д.Н., Асанович Д.А., Малодушев К.А., Шамшура Д.А.**

*Горный институт КНЦ РАН, г. Анапиты, Россия*

*e-mail: shibaeva\_goi@mail.ru*

## **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО ПОДДЕРЖКУ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ВЫБОРЕ РЕЖИМОВ И УСЛОВИЙ СУХОЙ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ**

Большинство действующих месторождений отрабатываются с середины XX века, вследствие чего высокорентабельная приповерхностная часть практически выработана в ходе многолетней интенсивной эксплуатации [1]. При переходе к отработке глубоких горизонтов и подземной добыче полезных ископаемых, значительно увеличиваются прямые производственные затраты и капиталовложения, наблюдается тенденция к ухудшению качества добываемых руд и усложняются условия их разработки [2]. Для железорудных карьеров установлено, что с ростом глубины разработки горно-геологические факторы характеризуются снижением содержания железа в сырой руде; уменьшением мощности рудных тел, изменением углов падения залежей, дизъюнктивными нарушениями; повышением удельного веса скальных пород в общем объеме горной массы; увеличением средней прочности и блочности пород; изменением гидрогеологических условий разработки (возрастанием водообильности); изменением устойчивости пород в бортах карьеров [3-4].

Снизить влияние изменения вещественного состава (соотношения пустых вмещающих пород и пород с промышленно значимым минералом) добытой горной массы на процессы рудоподготовки и последующего «глубокого» обогащения возможно посредством предварительной концентрации (предконцентрации). При обогащении железных руд, предконцентрация реализуется посредством сухой магнитной сепарации (СМС). Примеры, подтверждающие эффективность разделения железных руд посредством сухой магнитной сепарации, представлены в работах [5-6], в том числе реализованные авторами [7-8]. Для повышения эффективности использования ранее полученных и текущих результатов экспериментальных исследований обогатимости железных руд посредством СМС, применения их для реализации диагностического анализа (выявления закономерностей и взаимосвязей) и формирования прогнозных моделей, разрабатывается программный

продукт, обеспечивающий систематизацию данных и поддержку принятия решений при выборе режимов и условий СМС.

Основой систематизации результатов являются характеристики исследуемого сырья: гранулометрический, химический и минералого-петрографический состав с привязкой к предприятию, эксплуатирующему запасы, а также параметры, определяющие режимы и условия реализации сухой магнитной сепарации, технологические показатели, характеризующие ее эффективность. На текущем этапе работы над программным продуктом, обеспечивающим поддержку принятия решений при выборе режимов и условий сухой магнитной сепарации, разработана его общая концепция, реализован модуль «Формирование данных», направленный на загрузку, первичную обработку и систематизацию результатов исследований, а также модуль «Анализ данных». Модуль «Анализ данных», обеспечивает возможность проверки корректности проводимых лабораторных испытаний на основании оценки соответствия качественных и количественных характеристик единичных проб, определения режимов и условий реализации процесса сухой магнитной сепарации по поиску «похожих», удовлетворяющих характеристикам исходной пробы и обеспечивающих достижение заданных показателей в продуктах разделения с учетом допустимых отклонений.

#### **Список использованных источников:**

1. Лукичев С.В., Жиров Д.В., Чуркин О.Е. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевого комплекса Мурманской области // Горный журнал. - 2019. - № 6. - С. 19–24.
2. Чуркин О.Е., Гилярова А.А. Методические подходы к оценке инвестиционной привлекательности перспективных рудных месторождений Мурманской области // Фундаментальные исследования. - 2020. - № 11. - С. 205-210. DOI: 10.17513/fr.42899.
3. Лель Ю.И., Сандригайло И.Н., Терехин Е.Ю., Ворошилов Г.А. Горно-геологические и горнотехнические условия разработки глубоких карьеров // Известия Уральского государственного горно-геологического академии. - 2000. - Вып.11. - С.77-85.
4. Разработка методики определения производительности глубоких карьеров по горнотехническим возможностям: Отчет о НИР (заключительный) // ИГД МЧМ СССР; Рук. Ткачев А.Ф., №ГР 01880058566, Инв. 02860062732. – Свердловск, 1989. – 130с.
5. Пелевин А. Е. Технологии обогащения железных руд России и пути повышения их эффективности // Записки Горного института. - 2022. - Т. 256. - С. 579-592. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.61>.
6. Лебедок А.В., Маркворт Л. Современное обогащение железной руды – вызовы и решения от ALLMINERAL // Горная Промышленность. - 2022. - №3. - С.84-88. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-84-88>.
7. Shibaeva D.N., Tereschenko S.V., Kompanchenko A.A. Analysis of the effect of dry magnetic separation on the process of ferruginous quartzites disintegration // Minerals. - 2021. - Vol. 11. Iss. 8. № 797. <https://doi.org/10.3390/min11080797>.
8. Шибаева Д.Н., Терещенко С.В., Асанович Д.А., Шумилов П.А. К вопросу о необходимости классификации горной массы, направляемой на сухую магнитную сепарацию // Записки Горного института. - 2022. - Т. 256. - С. 603-612. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.79>.



РНО  
КНЦ