

ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ
КОЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



MINING INSTITUTE
KOLA SCIENCE CENTRE
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ



АПАТИТЫ
16-18 июня 2021 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

(16-18 июня 2021 г.)

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ



Издательство Кольского научного центра
2021

DOI: 10.37614/978.5.91137.450.1

УДК 622.2:004.9

T29

T29 Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Цифровые технологии в горном деле», 16-18 июня 2021 г. — Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2021. — 76 с.

ISBN 978-5-91137-450-1

В сборник включены тезисы докладов, представленных на Всероссийской научно-технической конференции «Цифровые технологии в горном деле», проведенной в Горном институте КНЦ РАН. В сборнике представлены материалы, посвященные обсуждению современного состояния и актуальных проблем применения цифровых технологий, 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 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.

Редакционная коллегия: Лукичев С.В. (отв. редактор), Наговицын О.В., Журавлева О.Г., Гилярова А.А., Жидкевич Е.Б.

УДК 622.2:004.9

Конференция проведена при информационной поддержке

**ГОРНЫЙ
ЖУРНАЛ**



Научно-технический и методический журнал
**РАЦИОНАЛЬНОЕ
ОСВОЕНИЕ НЕДР**

научно-технический и производственный
**ГОРНЫЙ
ЖУРНАЛ КАЗАХСТАНА**
Қазақстанның кен журналы

Научное издание
Технический редактор В. Ю. Жиганов
Подписано в печать 19.05.2021. Формат бумаги 60×84 1/8.
Усл. печ. л. 8.84. Заказ № 14. Тираж 105 экз.

ISBN 978-5-91137-450-1

© Горный институт ФИЦ КНЦ РАН, 2021
© ФИЦ «Кольский научный центр РАН», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Асминг В. Э., Федоров А. В., Моторин А. Ю. Программный комплекс для мониторинга сейсмичности Хибинского горного массива LORS ₂	6
Моторин А. Ю., Баранов С. В., Шебалин П. Н. Модель области повторных толчков в Хибинском массиве.....	8
Белгородцев О. В., Наговицын Г. О. Вариант отработки запасов рудопроявления Вуоннемиок.....	9
Билин А. Л., Наговицын Г. О. Параметры участков открытых горных работ на месторождении Партомчорр при применении водоводных сооружений под паводковые потоки и новой конструкции борта карьера.....	10
Билин А. Л., Корниенко А. В. Оптимизация выемочных единиц на открытых горных работах при применении каркасных и блочных моделей.....	11
Бирюков В. В., Опалев А. С., Никитин Р. М. Методика разработки цифровых двойников обогатительного оборудования.....	13
Васильев Б. Ю. Начальные положения концепции нелинейной модели рельефа.....	13
Вильнер М. А., Андреев А. А., Васильев Д. А. Геомеханическая модель камер подземного растворения при разработке месторождения каменной соли.....	15
Гаврилов В. Л., Ткач С. М. Потенциал запасов месторождения и роль цифровых двойников при оценке его изменения в жизненном цикле проекта.....	16
Гаврилов В. Л., Хоютанов Е. А. Картирование запасов месторождений коксующегося угля по показателям спекаемости.....	17
Гилярова А. А. Оценка экономических эффектов цифровых технологий в горнодобывающем производстве.....	19
Глатко Я. С., Сульгимов Р. В. Роботизация в горной промышленности.....	19
Гусева И. П. О методе прогнозирования притока метана в очистные выработки угольных шахт.....	20
Дерябин С. А., Рзаде Ульви Азар оглы, Кондратьев Е. И. Методика автоматической интеграции слабоструктурированных потоков гетерогенной информации для высокоточного динамического 3d моделирования транспортно-технологического процесса открытых горных работ.....	23
Дмитриев С. В., Семенова И. Э., Шестов А. А. Обеспечение гетерогенности сетки при внедрении контактных элементов в трехмерные модели напряженно-деформированного состояния.....	24
Емельянов И. А., Беляков Н. А. Влияние домораживания грунтового массива на изменение напряженно-деформированного состояния комбинированной крепи шахтного ствола.....	25
Жерлыгина Е. С., Куранов А. Д., Филиппов А. А. Выявление проблем обработки данных геомеханического мониторинга на горных предприятиях.....	26
Жирова А. М., Жиров Д. В. Связь пространственно-временных закономерностей в распределениях сейсмических событий с гравитационным воздействием луны.....	27
Журавлев А. Г. Концепция модульного построения автоматизированных технико-экономических расчетов карьерного транспорта.....	29
О Журавлева. Г., Жукова С. А., Аветисян И. М., Дмитриев С. В. Особенности разрушения массива горных пород при отработке удароопасного месторождения встречными фронтами.....	30
Зуенко А. А., Фридман О. В., Журавлева О. Г., Зуенко О. Н. Применение методов CONSTRAINED CLUSTERING для исследования особенностей формирования сейсмоактивных зон при ведении горных работ.....	31
Каган М. М., Панасенко И. Г. Архитектура централизованной системы удаленного сбора разнородной геофизической информации.....	32
Козырев А. А., Каган М. М., Чернобров Д. С., Панасенко И. Г. Система микросейсмического мониторинга прибортового массива карьера на основе сейсмических датчиков в глубоких скважинах за конечным контуром карьера.....	33

Козырев С. А., Власова Е. А., Соколов А. В. Компьютерное моделирование процесса разрушения горных пород скважинными зарядами при их взрыве на свободную поверхность применительно к уступной отбойке.....	34
Куранов А. Д. Роль цифровых технологий при проектировании и эксплуатации предприятий в горнодобывающей отрасли	34
Куранов А. Д., Багаутдинов И. И., Киселев В. А. Оценка рисков проявления горного давления в массиве при отработке запасов полиметаллических руд с учетом результатов геодинамического районирования.....	36
Лукичев С. В. Цифровое прошлое, настоящее и будущее горнодобывающих предприятий.....	38
Мелихов М. В. Космические технологии управления природно-техногенными рисками в горнопромышленных регионах.....	39
Мелихов М. В. Космический радарный мониторинг горнопромышленных комплексов.....	39
Миков Л. С., Попов С. Е. Определение деформации земной поверхности на разрезе «Первомайский» по данным SENTINEL-1.....	41
Мустафин М. Г. Перспективы цифровизации маркшейдерско-геодезических работ	
Наговицын О. В., Степачева А. В. Формирование цифрового двойника месторождения твердых полезных ископаемых.....	42
Наговицын О. В., Возняк М. Г. Обеспечение безопасности на роботизированном горном предприятии.....	43
Наговицын Г. О. Автоматизированное планирование открытых горных работ для сплошных систем разработок в горно-геологической информационной системе MINEFRAME.....	45
Никитин Р. М., Бирюков В. В., Каменева Ю. С., Вишнякова И. Н. Аналитическое представление результатов многопараметрических экспериментов по флотации сульфидных медно-никелевых руд.....	46
Опалев А. С., Паливода А. А. Моделирование системы жидкость – твердые частицы при сопряженном решении задачи в ROCKY DEM И ANSYS FLUENT.....	47
Осипова И. А. Построение индустриального графа знаний для системы управления качеством добываемого угля.....	47
Осипова И. А. Сценарии цифровизации процесса угледобычи.....	48
Остапенко С. П., Месяц С. П. Геоинформационный подход к оценке восстановления природных экосистем по данным спутниковых наблюдений.....	50
Панжин А. А. Идентификация и визуализация современных геодинамических движений.....	51
Пашичев Б. Н. Исследование ископаемых углей с использованием цифровой оценки их микроструктуры по методу «ЭНТРОПИЯ-СЛОЖНОСТЬ».....	53
Рассказов И. Ю., Федотова Ю. В., Аникин П. А., Сидляр А. В., Корчак П. А. Совершенствование автоматизированной системы геомеханического мониторинга и раннего предупреждения опасных геодинамических явлений.....	55
Розанов И. Ю., Ковалев Д. А. Анализ результатов измерений радарной системы мониторинга устойчивости борта карьера «ЖЕЛЕЗНЫЙ» АО «КОВДОРСКИЙ ГОК».....	57
Рыбин В. В., Константинов К. Н., Наговицын О. В. Организация системы комплексного мониторинга устойчивости объектов открытой геотехнологии с применением цифровых технологий.....	58
Семенкин А. В. Модульное построение методики технико-экономических расчетов применения циклично-поточной технологии.....	58
Семенова И. Э., Аветисян И. М. Перспективы систем геомеханического прогноза и обоснования горных работ на удароопасных месторождениях.....	60
Серяков В. М. О разработке и реализации цифровых технологий для решения вопросов геомеханической оценки вариантов развития горных работ при освоении месторождений.....	61
Соннов М. А. Применение метода спектральных и конечноэлементных расчётов с использованием CAE FIDESYS при геомеханическом моделировании, сравнение их эффективности для решения разнотипных задач.....	61

Счастливец Е. Л., Быков А. А., Юкина Н. И., Харлампенков И. Е. Программно аппаратный комплекс для мониторинга загрязнения атмосферы.....	62
Темкин И. О., Мясков А. В., Дерябин С. А. Платформа управления транспортно-технологическими процессами при добыче полезных ископаемых открытым способом: архитектура, принципы построения и функционирования.....	63
Федорин В. А., Татарина О. А. Цифровой метод в задачах оптимизации доступа к георесурсам	65
Филиппов В. Г. Методика определения средней квадратической погрешности измерения превышения на станции высокоточным цифровым нивелиром.....	67
Захаров В. Н., Трофимов В. А., Филиппов Ю. А. Моделирование деформирования анкеров с учетом реологического поведения пород массива.....	68
Хакулов В. А., Шаповалов А. В., Игнатов В. Н., Игнатов М. В. Создание аппаратно-программного комплекса мониторинга процессов экскавации для геомеханического обеспечения горных работ.....	70
Чендырев М. А., Журавлев А. Г. Моделирование заполнения бункеров перегрузочных пунктов в системах транспорта.....	71
Чурсин И. Н. Мониторинг процессов сдвижения земной поверхности с использованием интерферометрической обработки спутниковых снимков SENTINEL-1....	73
Шibaева Д. Н., Власов Б. А., Шумилов П. А., Терещенко С. В. Влияние геометрических параметров лотка вибропитателя на скорость перемещения кусков горной массы.....	74
Шibaева Д. Н., Терещенко С. В. К вопросу о целесообразности повышения информативности процессов предварительного кускового обогащения.....	75

В. Э. Асминг¹, А. В. Федоров¹, А. Ю. Моторин²

¹Кольский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Апатиты, Россия,
e-mail: AsmingVE@mail.ru

²Кировский филиал АО «Апатит», г. Кировск, Россия

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОНИТОРИНГА СЕЙСМИЧНОСТИ ХИБИНСКОГО ГОРНОГО МАССИВА LORS2

Отработка апатит-нефелиновых месторождений на протяжении 80 лет с выемкой и перемещением порядка 4.5 млрд т руды привела к повышению сейсмической активизации района и увеличению скорости деформирования массива. Это в свою очередь приводит к возникновению целого спектра геодинамических явлений: от шелушения и заколообразования до горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений [1-4]. Сейсмическая активность Хибинского массива есть результат совместного влияния целого ряда факторов: геодинамических (тектонические процессы), антропогенных (горные работы), гидрогеологических (обводненность массива пород), метеорологических (резкие перепады температуры) [2, 5]. Для обеспечения безопасности горных работ в условиях повышенного геодинамического риска необходим постоянный мониторинг процессов и явлений в горной среде и их учет при планировании работ.

Сейсмический мониторинг в зонах горных работ Хибинского массива до 2021 года выполнялся только КФ АО «Апатит», где с конца 80-х годов прошлого столетия действуют автоматизированные системы контроля состояния горного массива (АСКСМ) [6]. В настоящее время функционируют три сейсмические сети, расположенные на территориях Кировского, Расвумчоррского и Восточного рудников. Преимущественно эти сети ориентированы на обнаружение и локацию сейсмических событий на территориях, окруженных датчиками сетей, однако, они способны обнаруживать и лоцировать события за пределами своих территорий, хотя и со значительно меньшей точностью [6-8].

Кольский филиал Федерального исследовательского центра «Единая Геофизическая служба РАН» (КоФ ФИЦ ЕГС РАН) проводит непрерывный сейсмический мониторинг Кольского полуострова и соседних территорий. Для мониторинга зоны ответственности КоФ ФИЦ ЕГС РАН применяется комплекс автоматического детектирования и локации сейсмических событий NSDL [9, 10].

В 2019-2020 годах в рамках совместных работ КоФ ФИЦ ЕГС РАН и КФ АО «Апатит» был создан программный комплекс автоматизированного мониторинга сейсмической активности Хибинского массива, получивший название LORS2 (локатор рудничных событий).

Структура программного комплекса организована так, чтобы вся совместная обработка данных сейсмологических сетей проводилась в СППГУ КФ АО «Апатит».

В КоФ ФИЦ ЕГС РАН установлена система детектирования и локации сейсмических событий NSDL [9, 10], работающая по данным ближайших к Хибинскому массиву сейсмических станций региональной сети мониторинга. NSDL автоматически обнаруживает и определяет параметры сейсмических событий, формируя соответствующие бюллетени и сохраняя в базу данных волновые формы.

Также в КоФ ФИЦ ЕГС РАН работает программа-сервер FosServer. Эта программа реагирует на запросы, посылаемые программой-клиентом FosClient, установленной в СППГУ КФ АО «Апатит», по протоколу TCP/IP, пересылает ей суточные бюллетени и волновые формы обнаруженных сейсмических событий.

В СППГУ КФ АО «Апатит» установлены следующие программы. FosClient –программа-клиент для связи с сервером FosServer по протоколу TCP/IP. Запрашивает и сохраняет бюллетени и волновые формы сейсмических событий по станциям КоФ ФИЦ ЕГС РАН. FosReader - программа автоматического детектирования и предварительной локации событий по данным сетей КФ АО «Апатит». LORS2 – программа интерактивной ручной обработки записей сейсмических станций, производит локацию сейсмических событий по данным КФ АО «Апатит» и КоФ ФИЦ ЕГС РАН, ведет результирующую базу данных.

Локация событий в LORS2 производится по временам приходов объемных сейсмических волн Р и S на датчики сетей мониторинга. Изначально эти времена определяются автоматическими системами, в процессе работы могут быть откорректированы человеком-интерпретатором. Все алгоритмы локации, включенные в программу LORS2, являются модификациями и комбинациями

двух базовых алгоритмов – минимизации невязки времени в очаге и поиска на сетке. Для визуализации к ним добавлен метод засечек.

Ввиду того, что описываемый программный комплекс создавался для обработки данных сейсмических сетей, расположенных непосредственно в зоне ведения горных работ, большое внимание уделено повышению достоверности обнаружения целевых сигналов в сильно зашумленной среде и точности определения моментов вступления объемных волн. Для решения этих задач в системе реализован новый подход к локации близких событий, основанный на идее целостного восприятия записи сигнала, очень близкой к представлениям психологии о восприятии образов человеком.

Реализованные в программном пакете алгоритмы и методы обнаружения и локации мест генерации сейсмических событий позволяют значительно повысить достоверность получаемых решений, повысить точность и оперативность окончательной интерактивной обработки записей сейсмических сигналов.

Список использованных источников

1. *Козырев А. А., Аккуратов М. В., Федотова Ю. В., Жукова С. А.* Влияние обводненности пород на сейсмичность // Комплексные геолого-геофизические модели древних щитов. Труды Всероссийской с международным участием научной конференции г. Апатиты, 28–30 сентября 2009 г. Апатиты: Геологический институт КНЦ РАН. 2009. С. 243-247.
2. *Козырев А. А., Федотова Ю. В., Аккуратов М. В., Жукова С. А.* Взаимосвязь обводненности пород и сейсмичности в зоне стыковки подземного рудника и карьера // Проблемы и тенденции рационального и безопасного освоения георесурсов: сб. докладов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 50-летию Горного института. С. 385-390.
3. *Жукова С. А., Федотова Ю. В.* Анализ влияния массовых взрывов и обводненности на активизацию сейсмических событий с $E > 107$ Дж Хибинского массива // Сборник научных трудов. Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Санкт-Петербургский университет. 2017. С. 245–251.
4. *Zhukova S., Korchak P., Streshnev A., Salnikov I.* Geodynamic rock condition, mine workings stabilization during pillar recovery at the level +320 m of the Yukspor deposit of the Khibiny massif // VII International Scientific Conference “Problems of Complex Development of Georesources”. 2018. V. 56. С. 02022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185602022>
5. *Жукова С. А., Самсонов А. В.* Оценка влияния природных факторов на проявление сейсмичности Хибинского массива // Горный журнал. 2014. № 10. С. 47-51.
6. *Корчак П. А., Жукова С. А., Меньшиков П. Ю.* Становление и развитие системы мониторинга сейсмических процессов в зоне производственной деятельности ОАО «Апатит» // Горный журнал 2014, № 10, с.42-46.
7. *Аккуратов М. В.* Сейсмический мониторинг на рудниках ОАО "Апатит" // Проблемы и тенденции рационального и безопасного освоения георесурсов. Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 50-летию Горного института КНЦ РАН. 2011. Издательство: ООО "Реноме". Страницы: 374-379
8. *Аккуратов М. В., Асминг В. Э., Виноградов Ю. А., Корчак П. А.* Объединенная система контроля состояния Хибинского горного массива на базе сетей сейсмических станций Кольского филиала ГС РАН и ОАО "Апатит". // Материалы Шестой Международной сейсмологической школы "Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных", Апатиты, 15-19 августа 2011 года. Обнинск, ГС РАН, 2011, С. 7-10.
9. *Асминг В. Э., Федоров А. В., Прокудина А. В., Евтюгина З. А.* Автоматическая система мониторинга региональной сейсмичности NSDL. Принципы построения и некоторые результаты использования // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А. А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. 2017. С. 33–36.
10. *Фёдоров А. В., Асминг В. Э., Евтюгина З. А., Прокудина А. В.* Система автоматического мониторинга сейсмичности Европейской Арктики // Сейсмические приборы. 2018. Т. 54, № 1, с.29-39. DOI: 10.21455/si2018.1-3.

А. Ю. Моторин¹, С. В. Баранов², П. Н. Шебалин³

¹ Кировский филиал АО «Апатит», г. Кировск, Россия

² ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Апатиты, Россия,

e-mail: bars.vl@gmail.com

³ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия

МОДЕЛЬ ОБЛАСТИ ПОВТОРНЫХ ТОЛЧКОВ В ХИБИНСКОМ МАССИВЕ¹

В тектонически нагруженных массивах горных пород добыча полезных ископаемых приводит к возникновению техногенной сейсмичности, результатом которой могут быть катастрофические проявления сейсмических событий в виде внезапного обрушения консоли налегающих пород, горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений [1]. Техногенные сейсмические события часто сопровождаются повторными толчками (афтершоками). Другим фактором, инициирующим повторные толчки, являются промышленные взрывы [2, 3].

В данном исследовании на примере Хибинского массива рассматривается оценка области, в которой ожидаются повторные толчки, инициированные сейсмическими событиями или взрывами, по энергии триггера. В качестве исходных данных используется каталог сейсмических событий с энергией $E \geq 10^4$ Дж, зарегистрированных сетью сейсмического мониторинга Кировского филиала (КФ) АО «Апатит» [4] за 1996-2020 г. Также использовались данные о массовых и технологических взрывах, производимых для проходки горных выработок и отработки рудных тел, проводимых КФ АО «Апатит» на Кировском и Расвумчоррском подземных рудниках за тот же период.

Выделение сейсмических событий-триггеров и инициированных ими толчков осуществлялось по методу ближайшего соседа аналогично работе [5]. Здесь в качестве триггеров рассматривались сейсмические события с магнитудой $M_{tre} \geq 1.5$ ($\lg E_{tre}[\text{Дж}] = 1.8M_{tre} + 4 \geq 6.7$). Выделение взрывов-триггеров и инициированных ими толчков выполнялось модифицированным методом ближайшего соседа, аналогично работе [3]. Рассматривались взрывы-триггеры с $M_{trb} \geq 2$ ($\lg E_{trb}[\text{Дж}] = 7.6$).

В результате было показано, что эпицентральные расстояния и расстояния по глубине от сейсмических событий-триггеров до инициированных ими толчков с $M \geq M_{tre} - 1.5$ подчиняются степенному распределению. Аналогичный результат был получен ранее и для тектонической сейсмичности [6, 7]. Для случая взрывов-триггеров оказалось, что эпицентральные расстояния и расстояния по глубине до инициированных ими сейсмических событий с $M \geq M_{trb} - 1.5$ подчиняются экспоненциальному распределению.

Таким образом, затухание поствзрывной сейсмичности происходит быстрее, чем затухание постсейсмической активности по мере удаления от события-триггера. Это связано с тем, что сейсмическое событие-триггер происходит при определенном уровне напряжений в некоторой окрестности гипоцентра. Скачок напряжений, вызванный таким триггером, и их последующая релаксация приводят к возникновению афтершоков. Аналогичный механизм справедлив и для повторных толчков, инициированных взрывами. Взрывы не имеют диаграммы направленности и происходят независимо от уровня напряжений. Поэтому число толчков, инициированных взрывами, меньше [8], а их убывание с расстоянием от взрыва триггера происходит быстрее, чем в случае, когда триггером является сейсмическое событие.

Используя степенной характер пространственного распределения постсейсмической активности и закон продуктивности землетрясений (подтвержденный ранее для Хибинского массива [5]), мы получили усредненную модель максимальных расстояний от сейсмического события-триггера до инициированных ими толчков.

Похожая модель была получена и для поствзрывной сейсмичности. В этом случае использовался закон сейсмической продуктивности взрывов [3], установленный нами ранее для Хибинского массива.

Для учета отклонения полученных моделей от реальных данных мы использовали диаграммы ошибок. Для практического использования этих закономерностей была построена модель области повторных толчков в виде цилиндра с центром в гипоцентре триггера (сейсмическое событие или взрыв). Радиус и высота цилиндра определяются независимо по диаграмме ошибок методом трех стратегий [9], исходя из степени важности прогноза.

¹ Исследование включает результаты выполнения проекта № 19-05-00812, поддержанного РФФИ, а также Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01304-20).

Таким образом, построенная пространственная модель постсейсмической активности позволяет оценивать область, где ожидаются повторные толчки сразу после того, как произошло сейсмическое событие с энергией $\lg E[\text{Дж}] \geq 6.7$. Пространственная модель поствзрывной сейсмичности позволяет получать такие оценки уже на этапе планирования взрывов с энергией $\lg E[\text{Дж}] \geq 7.6$.

Список использованных источников

1. Козырев А. А., Семенова И. Э., Рыбин В. В., Панин В. И., Федотова Ю. В. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения). Апатиты: ООО «Апатит-Медиа», 2016. 112 с.
2. Козырев А. А., Семенова И. Э., Журавлева О. Г., Пантелеев А. В. Гипотеза происхождения сильного сейсмического события на Расвумчоррском руднике 09.01.2018 // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-Технический Журнал). 2018. № 12. С. 74–83.
3. Baranov S. V., Zhukova S. A., Korchak P. A., Shebalin P. N. Seismic productivity of blasts: A case-study of the Khibiny Massif. // Eurasian Mining. 2020 V. 2. P 14-18.
4. 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.
5. Баранов С. В., Жукова С. А., Корчак П. А., Шебалин П. Н. Продуктивность техногенной сейсмичности // Физика Земли. № 3. 2020. С. 40-51.
6. Felzer K. R., Brodsky E. E. Decay of Aftershock Density with Distance Indicates Triggering by Dynamic Stress // Nature. 2006. V. 441 (7094). P. 735-738. DOI: 10.1785/0120030069.
7. Richards-Dinger K., Stein R.S., Toad S. Decay of aftershock density with distance does not indicate triggering by dynamic stress // Nature. 2010. V. 467 (7315). P. 583–86. DOI: 10.1038/nature09402.
8. Баранов С. В., Жукова С. А., Шебалин П. Н., Моторин А. Ю. О независимости сейсмической продуктивности от механизма возмущения среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 11. С. 333-342.
9. Баранов С. В., Шебалин П. Н. О прогнозировании афтершоковой активности. 2. Оценка области распространения сильных афтершоков. // Физика Земли. 2017. № 3 P. 43-61.

О. В. Белгородцев, Г. О. Наговицын

Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия,

e-mail: o.belogorodcev@ksc.ru, Nagovitsyn_go@bk.ru

ВАРИАНТ ОТРАБОТКИ ЗАПАСОВ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ ВУОННЕМИОК

На основании анализа результатов поисково-оценочных работ и компьютерного моделирования объектов открыто-подземной геотехнологии представлено решение практической задачи по вскрытию и отработке запасов рудопроявления Вуоннемиок.

В среде горно-геологической информационной системы (ГГИС) MINEFRAME создана цифровая геологическая модель рудопроявления Вуоннемиок, включающая каркасные и блочные модели рудных тел. Произведен автоматизированный анализ горно-геологических условий залегания рудопроявления с подсчетом балансовых и забалансовых запасов.

Определены параметры и границы предохранительного целика под охраняемыми водными объектами на земной поверхности, создана его цифровая модель и подсчитаны рудные запасы в его пределах с бортовым содержанием 4 и 2 % P_2O_5 .

Рассчитана годовая производственная мощность и срок отработки 1 очереди строительства при отработке запасов подземными горными работами участка Вуоннемиок. На основе анализа мощности налегающих пород над рудопроявлением и топоповерхности, выявлены рациональные места заложения основных вскрывающих подземных горных выработок на земной поверхности. Создана цифровая пилотная схема вскрытия и подготовки запасов к очистной выемке. Объем строительства горно-капитальных выработок определен с помощью автоматизированного модуля планирования горных работ.

Для обеспечения безопасной и комфортной среды, при ведении подземных горных работ в условиях Крайнего Севера и отработке запасов системой разработки с обрушением руды и вмещающих пород, выполнены исследования необходимости создания предохранительной и термоизоляционной подушки.

Мощность породной подушки и ее месторасположение на земной поверхности определены с учетом компьютерного моделирования увеличения объема внешнего отвала при ведении открытых горных работ на Ньоркпахском карьере.

А. Л. Билин, Г. О. Наговицын

Горный институт КНЦ РАН, Анапты, Россия, e-mail: a.bilin@ksc.ru

ПАРАМЕТРЫ УЧАСТКОВ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ПАРТОМЧОРР ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ВОДОВОДНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПОД ПАВОДКОВЫЕ ПОТОКИ И НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ БОРТА КАРЬЕРА²

Месторождение Партомчорр является одним из перспективных месторождений Хибинского рудного района. Месторождение предполагается к разработке комбинированным способом с доминированием подземного способа отработки.

Одной из главных особенностей горно-геологических условий месторождения является то, что рудные тела, выхода которых под морену прослеживаются по простиранию до 6 км на переломе от долины к склону гор, имеют падение в 30-40 градусов на восток под горный хребет. Из-за этого при увеличении глубин участков открытых горных работ (ОГР) очень быстро нарастает прирезка вскрышных пород по склону до гребней гор.

Второй особенностью месторождения является наличие двух ручьев, пересекающих рудную зону поперек, летом практически пересыхающих, но полноводных в период весеннего снеготаяния. На первом этапе работ были оценены параметры участков ОГР при оставлении водоохраных целиков под паводковые потоки этих ручьев, что серьезно ограничило промышленные запасы как на открытых, так и на подземных горных работах.

Всего было выделено четыре участка ОГР при расчетном экономически допустимом коэффициенте вскрыши $6 \text{ м}^3/\text{м}^3$. В целом проектная производительность при отработке этих участков по руде составляет 3 млн. т в год, что составляет половину от производительности перспективного подземного рудника при производительности по вскрыше $3,35 \text{ млн м}^3$ в год.

В целом было установлено, что в случае оставления охранных целиков под паводковыми водотоками открытые горные работы при комбинированной разработке месторождения Партомчорр могут играть только вспомогательную роль, обеспечивая 3 млн т добычи руды в течение 9 лет на период строительства и развития производительности подземного рудника.

На следующем этапе работ в качестве альтернативы оставлению гидроизолирующих целиков рассмотрено изменение параметров ОГР при формировании специальных наклонных берм на бортах карьеров, на которых предполагается размещение обводных каналов с уклоном 4-4,5 %. В этом случае первый и второй, а также третий и четвертый участки объединяются между собой в два средних по размерам вытянутых карьерных пространства.

При сохранении традиционной конструкции бортов карьеров запасы руды возросли в 2,54 раза, а объемы вскрыши – в 2,86 раза.

Новая конструкция борта карьера, предложенная и обоснованная в Горном институте КНЦ РАН, имеет субвертикальные откосы уступов и позволяет конструировать борт до вписывания транспортных коммуникаций под углом 60 градусов, что позволит сократить объем вскрыши в карьере на 19%.

Производительность по руде возросла до 6 млн. т в год при производительности по вскрыше $5,52 \text{ млн м}^3$ в год. Период строительства карьеров оценен в 4 года, объем горно-капитальных работ –

² Исследования выполнены в рамках гранта по приоритетному направлению деятельности РФ "Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами" № 14-17-00761п (научн. рук. акад. Н. Н.Мельников).

19 млн м³, а период устойчивой добычи – 14 лет. Выработанное пространство карьеров частично используется для внутреннего отвалообразования.

Таким образом, в случае осуществления гидроизоляционных мероприятий участки ОГР способны существенно улучшить экономические показатели объединенного подземно-открытого рудника. Из участков первоочередного освоения на половинную производительность карьеры превращаются в полноценную 1-ю очередь эксплуатации на полную производительность обогатительной фабрики с отодвиганием срока начала строительства подземного рудника почти на 10 лет.

А. Л. Билин, А. В. Корниенко

Горный институт КНЦ РАН, г. Анапты, Россия, e-mail: a.bilin@ksc.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫЕМОЧНЫХ ЕДИНИЦ НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ КАРКАСНЫХ И БЛОЧНЫХ МОДЕЛЕЙ

Оптимизация потерь и разубоживания является одним из направлений рационализации недропользования.

Принципы рационализации потерь и разубоживания применительно к средним по месторождению выдержанным по параметрам плоским случаям разработаны в классической работе акад. М. И. Агошкова и подготовленных под его руководством методических указаниях, ставших базовыми для разработки многих отраслевых инструкций. Разработанные принципы раскрывали механизмы возникновения потерь и позволяли оценивать ожидаемые их уровни применительно к усредненным по месторождениям горно-геологическим условиям.

Между тем оптимизировать потери и разубоживание (примешивание) необходимо не только в целом по месторождению, а индивидуально для каждого взрываемого рудного блока и даже для отдельных его частей с учетом изменения конкретных горно-геологических, технологических и экономических условий.

В настоящее время уровень состояния компьютерного моделирования, возможности создания сложных геологических моделей, применение методов геостатистики позволяют поставить и решить задачу автоматического обоснования границ выемочных рудных единиц в рациональных по уровню потерь и разубоживания контурах с учетом ряда входящих параметров.

В горно-геологической информационной системе (ГИИС) MineFrame разработан модуль формирования рациональных выемочных единиц (ВЕ) на открытых горных работах, учитывающий заданное направление углубки и оптимизирующий потери и разубоживание с учетом пространственной изменчивости состава руд и примешиваемых пород.

Первоначально был разработан алгоритм, опирающийся на каркасную модель месторождения и учитывающий только среднее содержание в рудах.

В диалоговом режиме пользователем задаются фактические (или ожидаемые) технологические показатели и показатели экономической конъюнктуры по каждому полезному компоненту. Для комплексных руд оптимизация осуществляется по условному основному компоненту.

Задается направление углубки и программный модуль поуступно отстраивает горизонтальное сечение рудных тел на отметке середины высоты уступа или подступа, создает набор прирезок, которые анализируются с заданным шагом по фронту, формируя контур, учитывающий качество теряемых руд и примешиваемых пород.

На основе введенных расчетных данных рассчитывается браковочное содержание основного (или условного) полезного компонента и определяется рациональный уровень примешивания, определяется положение линии отрыва выемочного блока для каждого рудного тела.

Далее между двумя заданными ограничивающими положениями горных работ (например, между двумя годовыми положениями) или в целом внутри карьера – между топографической поверхностью и контуром карьера на конец отработки поуступно рассчитывается ожидаемый уровень потерь и разубоживания.

Результатом расчета является таблица промышленных и эксплуатационных запасов в рассматриваемой карьерной прирезке (или в целом для карьера), ожидаемые уровни потерь и разубоживания (для каждого добычного уступа и каждого рудного тела), а также набор каркасных

моделей выемочных единиц. Полученные контуры ВЕ в будущем будут являться ориентирами при проектировании взрывных блоков.

Кроме использования каркасных моделей месторождений для данных целей возможно использование и блочных моделей, в том числе при отсутствии каркасных моделей конкретного варианта кондиций.

Следует отметить, что расчет предусматривает произвольную ориентацию блоков блочной модели, а также расположение отрезков, что позволяет использовать в расчетах блочные модели любых типов (регулярные, с поддроблением по границе каркасной модели рудного тела, ориентированные вдоль падения рудного тела и т.д.).

В последнем случае «откосные» отрезки выемочных единиц анализируются по браковочному метропроценту при использовании алгоритма, в основе которого лежит метод бинарного поиска.

Отчетная таблица расчета уровней потерь и разубоживания по рудным телам и горизонтам (табл. 1) при наличии anomalно высоких показателей указывает на нестандартность соотношения отдельных рудных тел и отдельных выемочных единиц.

Таблица 1

Фрагмент отчетной таблицы выделения выемочных единиц и определения уровней потерь и разубоживания

Уступы	Выемочные единицы	Эксплуатационные запасы (объем выемочной)	Геологические запасы руды, м ³	Извлекаемые запасы, м ³	Потери, м ³	Разубоживание, м ³	Коэф-фициент потерь, %	Коэф-фициент разубоживания, %	Дополнительные потери, м ³
735/750	1	1 497 933	1 367 845	1 350 467	17 377	147 466	1,27	9,84	0
	2	622 397	483 086	463 925	19 161	158 471	3,97	25,46	0
	Итого	2 120 330	1 850 931	1 814 393	36 538	305 937	1,97	14,43	0
...									
660/675	1	2 262 880	2 063 686	2 030 019	33 667	232 861	1,63	10,29	0
	2	6 532	9 970	2 035	7 934	4 497	79,59*	68,85*	0
	Итого	2 269 413	2 073 656	2 032 055	41 601	237 358	2,01	10,46	0
...									
600/615	1	2 286 675	2 101 208	2 077 589	23 619	209 087	1,12	9,14	0
	Итого	2286675	2 101 208	2 077 589	23 619	209 087	1,12	9,14	0
Итого		22853654	20 454172	20 106 474	347 698	2747179	1,70	12,02	0

Примечание: * – Аномальные показатели.

Для анализа таких случаев используется процедура «закрытия» все посторонних блоков геологических запасов и выемочных единиц. Это позволяет более тщательно проанализировать конкретную ситуацию с последующим применением одного из возможных специальных технологических мероприятий по снижению общего уровня потерь и разубоживания.

Таким образом, в развиваемой с 1996 г. ГГИС MineFrame разработано программное приложение формирования рациональных выемочных единиц для открытых горных работ, учитывающее заданное направление углубки с учетом пространственной изменчивости состава руд и примешиваемых пород.

В. В. Бирюков, А. С. Опалев, Р. М. Никитин

Горный институт КНЦ РАН, Анапты, Россия, e-mail: birukovval@rambler.ru

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ОБОГАТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Технологическое оборудование предприятий первичной переработки минерального сырья, серийно выпускаемое машиностроительными предприятиями, как правило, оснащается встроенной автоматизированной системой настройки технологических параметров, управления и сбора данных о функционировании. Данные цифровые системы могут быть интегрированы в SCADA системы предприятий и использованы для управления их технологическими и экономическими показателями.

В настоящей работе показана последовательность действий по разработке цифровых двойников обогатительных аппаратов на примере лабораторного магнитно-гравитационного сепаратора. В основу разработки цифровых двойников разделительных аппаратов заложена сепарационная характеристика – многомерная функциональная зависимость извлечения полезного компонента в технологические продукты от физических, физико-химических свойств исходного сырья и управляющих параметров технологического процесса.

В работе разработана последовательность действий по постановке вычислительного эксперимента, заключающаяся в формировании системы дифференциальных уравнений, движения отдельных фаз многофазного континуума, их взаимодействие между собой под действием физических сил различной природы в программном комплексе ANSYS Fluent. Система дифференциальных уравнений дополнена условиями однозначности, включающими геометрию рабочей зоны аппарата, начальными и граничными условиями. Обоснован выбор программной среды, имеющей в своем составе модуль вычислительной гидродинамики, позволившей реализовать вычислительный эксперимент. В результате проведения серий вычислительных экспериментов над созданной моделью магнитно-гравитационного сепаратора получены поля скоростей и концентраций различных фракций суспензии в объеме модельного объема аппарата и интегральные характеристики потоков. На основе полученной информации были получены аналитические выражения пофракционных сепарационных характеристик процесса разделения компонентов суспензии и технологические показатели работы аппарата.

Полученная информация дала возможность разработать прогнозную модель работы магнитно-гравитационного аппарата и реализовать на ее основе в среде DELPHI цифровой двойник аппарата, необходимый для определения оптимальных вариантов настройки управляющих параметров процесса разделения для различных вариантов исходного питания.

Последовательность реализации вычислительных экспериментов над моделью магнитно-гравитационного аппарата, представленная в данной работе, пригодна для моделирования любого разделительного оборудования и получения прогнозных цифровых двойников для использования в составе SCADA систем и моделей технологических цепей обогатительных предприятий.

Б. Ю. Васильев

*Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: vasilev.bogdan.yurievich@mail.ru*

НАЧАЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА

Необходимым этапом при проектировании работ для строительства объектов на местах освоения полезных ископаемых, а также выполнения последующего топографического мониторинга района работ является построение цифровой модели местности (ЦММ).

Топографический мониторинг – один из способов контроля за безопасностью проводимых работ, а также способ отследить антропогенные изменения местности.

Исходные данные для построения ЦММ могут быть получены в ходе различных съемок местности при проведении инженерных изысканий. К числу таких съемок относятся: наземные, воздушные и космические.

Построенная цифровая модель рельефа состоит из двух частей:

- цифровая модель объектов местности (ЦМОМ);
- цифровая модель рельефа (ЦМР).

Наибольшее внимание при построении ЦММ стоит уделять построению ЦМР, так как цифровая модель рельефа служит для трехмерного отображения земной поверхности, что особенно важно для районов проведения горных работ. Ошибки при построении цифровой модели рельефа могут негативно сказаться на результатах проектирования, строительства, а также мониторинга, что крайне нежелательно.

Цифровая модель рельефа может быть представлена в виде:

- регулярной сети точек;
- нерегулярной сети точек;
- растровой модели.

На данный момент наиболее удачным отображение модели рельефа на территориях с резким изменением кривизны поверхности принято считать нерегулярную сеть точек, так как она позволяет корректно (без сглаживания) передавать такие участки.

В местах, где из-за технологических причин выбранного метода или особенностей рельефа нет необходимости в отображении резких изломов поверхности, при построении ЦМР активно используют «ручное» сглаживание и практически не используют автоматическое. Это связано с тем фактом, что инструменты автоматического сглаживания, используемые в популярных программных решениях, либо сглаживают особенности рельефа, либо являются высокочувствительными по времени и предполагают аналитическую работу исполнителя по выборке точек, по которым будет формироваться тренд.

Чаще всего цифровая модель поверхности строится по принципу Делоне для ограниченной области. Такую поверхность можно считать кусочно-линейной, так как она состоит из плоских треугольных граней.

Ключевым отличием цифровой модели рельефа является тот факт, что все точки, используемые для построения поверхности, были получены выборочно, при условии, что они являются «характерными» точками рельефа. Точки вершин/низины в таком случае являются локальными экстремумами, так как выше или ниже данных точек в ближайшей области исходных точек нет. Данный факт важен при интерполяции между точкой низины/вершины и соседними точками, так как не может быть ни одной точки (артефакта), которая, полученная в результате интерполяции, оказалась ниже/выше точки, являющейся точкой низины/вершины.

Для сглаживания линейной модели рельефа необходимо применять затратные с точки зрения памяти компьютера алгоритмы, а также в значительной степени увеличивать количество точек, которые будет отражать новую цифровую модель рельефа.

При этом любое нелинейное описание поверхностей требует не только точек рельефа, но и значения производных к гладкой функции в них. Обычно это решается на уровне сплайновых поверхностей, где гладкость обеспечивается на уровне первой и второй производных. В применении к топографическому рельефу гладкость на уровне второй производной не только избыточна, но и приводит к негативным явлениям (артефактам).

Чтобы избежать артефактов, которые могут появиться при использовании сплайновых поверхностей, необходимо использовать математическую нелинейную модель рельефа:

- основанную на триангуляции Делоне, где каждый треугольник представляется нелинейной функцией 3-го порядка, гладко склеенной с соседями;
- для узлов такой нелинейной поверхности требуется восстановить (определить) первую производную (касательную) функции поверхности, с учетом разрывов на структурных линиях рельефа;
- для точек, которые являются локальными экстремумами, касательная должна быть задана строго горизонтально, так как изменение этого положения может привести к появлению артефактов;
- нормаль для узлов триангуляции следует определять как простую арифметическую сумму от нормалей соседних с этим узлом граней;
- точки, принадлежащие нелинейной поверхности, следует задавать барицентрически с целью облегчения дальнейшей алгоритмизации процесс обработки.

В качестве формулы функции третьего порядка, в начальном представлении можно использовать:

$$Ax^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dy^2 + E = z$$

Предлагаемая нелинейная модель позволит избежать возникновения артефактов, связанных с появлением локальных экстремумов, противоречащих исходным данным, а также обеспечит разрывы на структурных линиях, что необходимо в местах резкого изменения кривизны поверхности. Такая нелинейная модель, прагматичная в своей программной реализации, позволяет эффективно решать основной комплекс картографических задач с учетом особенностей как рельефа, так и основных методов его съемки, а также эффективна при построении ЦМР, так как уменьшает время ручной обработки.

М. А. Вильнер, А. А. Андреев, Д. А. Васильев

Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

e-mail: mary.vilner@gmail.com

ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАМЕР ПОДЗЕМНОГО РАСТВОРЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАМЕННОЙ СОЛИ

Методы добычи каменной соли, являющейся высоко востребованным сырьем, в зависимости от горно-геологических условий могут быть шахтными или бесшахтными. При значительной глубине залегания пластов и их сложной гипсометрии целесообразно применять бесшахтные методы – например, метод растворения солей через скважины с поверхности. Помимо технологических трудностей поддержания устойчивой формы подземной камеры существует сложность контроля формы. Для обеспечения устойчивости стенок и кровли на протяжении всего периода эксплуатации необходимо обеспечивать проектную форму, близкую к телу вращения, а также поддерживать постоянное и достаточное противодействие во избежание чрезмерных смещений.

Существует ряд эмпирических методик, позволяющих определять устойчивость конструктивных элементов камер. Одна из наиболее полных – методика, предложенная Р. С. Пермяковым. Методика позволяет рассчитать размеры целиков и оценить их устойчивость при размещении дополнительных камер. Основным недостатком эмпирических методик является высокая вынужденная степень упрощения геологического строения и фактических параметров камер. Кроме того, в таком случае не может быть учтено начальное напряженное состояние массива.

Целью исследования является прогноз устойчивости стенок существующих камер и междукамерных целиков при интенсификации горных работ, а именно добавлении новых камер или увеличении размера существующих. Задача решена созданием численной геомеханической модели месторождения, позволяющей учесть фактические геометрические параметры камер и целиков между ними, а также длительные прочностные свойства солей.

Пространственная геомеханическая модель создана на основании геофизических замеров, произведенных в существующих скважинах. Расчеты выполнялись в программном комплексе Simulia Abaqus, реализующем конечно-элементное моделирование. Модель включает в себя месторождение со всеми камерами и учитывает особенности строения вмещающей толщи с небольшой степенью упрощения.

Результатами расчетов являются значения горизонтальных и вертикальных перемещений стенок камер и возникающие в них напряжения, которые сравниваются с допускаемыми значениями, приведенными в нормативных документах. Результаты подтверждают правильность выбора местоположения дополнительных камер и их устойчивость на протяжении эксплуатации.

В. Л. Гаврилов¹, С. М. Ткач²

¹Институт горного дела СО РАН, г. Новосибирск, Россия,

e-mail: gvlugorsk@mail.ru

²Институт горного дела Севера ФИЦ ЯНЦ СО РАН, г. Якутск, Россия,

e-mail: tkach@igds.ysn.ru

ПОТЕНЦИАЛ ЗАПАСОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ И РОЛЬ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ЕГО ИЗМЕНЕНИЯ В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ ПРОЕКТА

Анализ многочисленных стратегий, концепций и программ развития России, её регионов и субъектов, действовавших ранее и принятых на перспективу до 2035 г. и далее показывает, что широкомасштабная высокотехнологичная социально ориентированная альтернатива сырьевому варианту совершенствования и подъема экономики фактически только декларируется. В ситуации, когда качество существующей и пополняемой низкими темпами минерально-сырьевой базы (МСБ) твёрдых полезных ископаемых ухудшается, а требования потребителей на высоко конкурентном рынке возрастают, необходим поиск и реализация различных резервов повышения эффективности работы горнопромышленного комплекса, одного из базовых для страны. Цель - снижение уровня и последствий влияния действующих, ожидаемых, неявных или скрытых рисков и противоречий.

Основой существования добывающих и перерабатывающих полезные ископаемые предприятий является их МСБ. Объектами исследования в рамках рассматриваемой проблемы являются угольные, россыпные и рудные месторождения с запасами и/или прогнозными ресурсами различных категорий изученности, расположенные преимущественно в Республике Саха (Якутия). Их оценка выполнялась в разное время по разным критериям и кондициям. Часть информации появляется в настоящее время при доразведке разрабатываемых и разведке новых залежей. В достаточно большом числе случаев, особенно в отношении сложных по строению залежей с неоднородными по потребительским свойствам запасами полезных ископаемых, оценки, полученные при проведении геологоразведочных работ, как показывают исследования, требуют постоянного уточнения для повышения уровня обоснованности и определённости принимаемых управленческих решений.

Появление новых технологий добычи и переработки сырья, изменившиеся и продолжающие меняться рыночные условия, длительные жизненные циклы проектов в горнопромышленном комплексе дополнительно стимулируют проведение работ по оперативной периодической переоценке минерально-сырьевого потенциала (МСП) месторождений. Такого рода работы предполагают широкое использование интенсивно развивающихся информационных технологий и создание цифровых двойников месторождений различного назначения и детализации. В числе созданных и актуализируемых двойники крупных угольных Эльгинского и Нерюнгринского, золотороссыпного Куранахского месторождений, ряда менее значимых объектов восточной и арктической зон Якутии.

МСП объектов недропользования предопределяет их экономическую привлекательность, социальную значимость для районов их нахождения и разнообразные угрозы для окружающей среды. Анализируя различные существующие подходы, включая авторские, можно выделить несколько видов такого потенциала: природный, предельный, достижимый, инвестиционный и экологический. Данные составляющие, являющиеся вероятностными величинами, постоянно количественно, качественно и структурно трансформируются в условиях VUCA-мира, которых характеризуется изменчивостью, неопределенностью, неоднозначностью, сложностью.

Природный МСП определяет суммарные потенциальные возможности объекта недропользования. Тесно связанный с ним предельный потенциал, как максимальная ценность кондиционных запасов месторождения, рассчитывается на определенный период времени и базируется на актуальных технологиях, обеспечивающих полноту выемки, как полезного ископаемого, так и полезных (вредных) компонентов из него с достижением ожидаемых финансовых целей предприятий. Ценность извлекаемых балансовых запасов классическими и развивающимися технологиями добычи, подготовки и обогащения сырья определяет достижимый МСП. В свою очередь, он условно дифференцируется на базовый, скрытый, убыточный и пересекающийся.

Обозначенные типы МСП: определяют значимость этапов освоения месторождения путём последовательного перехода от природной возможности к созданной действительности, возможности его реализации и превращения в капитал. Типизация отражает последовательность накопления

знаний о МСП рудных, россыпных и угольных месторождений, начиная с поисков и оценки природного объекта и завершая ценой реализованной продукции.

В процессе многоэтапного изучения недр формируются огромные объемы измеряемой в различных шкалах горно-геологической, технологической, экономической и иной информации о месторождениях и формируемых на их основе цепочках создания добавленной стоимости. Данная информация, различная по значимости, точности, детальности, способам предоставления, требует корректной обработки для синтеза новых знаний об объектах освоения. Это, в свою очередь, формирует объективную необходимость применения цифровых технологий для получения оперативных текущих и прогнозных оценок разнообразных ситуаций.

Выделенные категории МСП месторождений способствует ориентации добывающих предприятий на максимальное приближение к реализации предельного МСП за счёт совершенствования используемых и введения новых технологий и методов организации. В числе разработанных, предложенных и развиваемых понятий, категорий и мер: геолого-экономическое разубоживание руд и россыпей; кластерная организация полей переменных в запасах (например, содержания полезных и вредных компонентов в рудах и россыпях); позабойное нормирование и управление потерями и разубоживанием; комплексное управление качеством в цепочках добычи и поставок минерального сырья потребителям; дифференциация зольности на составляющие в сложных по строению угольных пластах; селективная простая и площадная выемка различных по качеству запасов. Предложенные подходы позволяют: повысить полноту выемки, сохранить природное качество МСБ; увеличить извлечение полезных компонентов с требуемым рынком качеством из единицы погашаемых запасов, величина и качество которых характеризуются высокой изменчивостью и неопределенностью.

Дифференциация потенциала с учётом возможностей информационных технологий позволяет перейти к более точной вещественной и стоимостной оценке запасов месторождений при их многостадийном освоении путём использования развиваемого системного подхода к устойчивому управлению качеством. Подход учитывает выявляемые при цифровом геолого-технологическом моделировании и картировании особенности полезных ископаемых в недрах, формирующие дополнительные резервы их ресурсосберегающего извлечения посредством разработанных приемов.

В. Л. Гаврилов¹, Е. А. Хоютанов²

¹Институт горного дела СО РАН, г. Новосибирск, Россия,

e-mail: gvlugorsk@mail.ru

²Институт горного дела Севера ФИЦ ЯНЦ СО РАН, г. Якутск, Россия,

e-mail: khoiutanov@igds.ysn.ru

КАРТИРОВАНИЕ ЗАПАСОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОКСУЮЩЕГОСЯ УГЛЯ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ СПЕКАЕМОСТИ

В развитии угольной отрасли страны обозначился устойчивый тренд на увеличение экспортных поставок сырья, добываемого в сложных горно-геологических условиях, включая районы пионерного освоения Амурской области, Республик Тыва, Якутия, Хакассия, Забайкальского и Хабаровского краёв. В обозначенных регионах основной интерес направлен на освоение месторождений ценных марок угля, в первую очередь, коксующегося.

Ужесточение конкуренции на внешнем и внутреннем рынке топливно-энергетических ресурсов в целом и его угольного сегмента в частности ведёт к необходимости устранения противоречий между жёсткими требованиями покупателей к качеству поставляемой угольной продукции и высокой изменчивостью потребительских свойств рассматриваемого полезного ископаемого в запасах и прогнозных ресурсах. Для коксующихся углей, наряду с зольностью и содержанием вредных примесей, наиболее значимыми являются показатели спекаемости и коксуемости, характеризующие пригодность сырья для получения качественного и прочного кокса. В мире, как показывает анализ, используются различные показатели для оценки с различных позиций возможностей угля к переходу через пластическое состояние в кокс, который бы по своим характеристикам соответствовал требованиям металлургического производства. Прямые корреляции между этими показателями могут отсутствовать или быть статистически недостаточно значимыми.

В нашей стране по исторически сложившейся традиции наиболее широко применяют показатель толщины пластического слоя, который присутствует в основных классификациях коксующегося угля и учитывается при подсчете их запасов и ресурсов. В ряде случаев, включая требования реальных или потенциальных потребителей, для дополнительной оценки свойств угля выполняется оценка и по другим показателям. Для Эльгинского, Нерюнринского, Чульмаканского и Денисовского месторождений в Южной Якутии, на примере которых проводятся исследования, это индекс свободного вспучивания и степень окисленности угля. Последний показатель связан, в первую очередь, с воздействием на твердое топливо кислорода воздуха и воды в зонах, приуроченных к выходам пластов под четвертичные отложения и тектоническим нарушениям. Совместное использование обозначенных показателей для оценки уровня соответствия угля аналогам-конкурентам повышает уровень обоснованности принимаемых решений в рамках комплексного управления качеством добываемого и поставляемого на экспорт минерального сырья.

В пределах литологического разреза одного месторождения или даже его участка могут находиться разные марки и сорта угля, не говоря уже о разных залежах одного и того же угленосного района. При этом процесс оконтуривания и дифференциации запасов по маркам и сортам в целях их рационального ресурсосберегающего освоения может усложняться. Это вносит дополнительные возмущения в процесс управления.

Информационной базой для выполнения работ по картированию запасов коксующегося угля, включая показатели спекаемости, являются первичные и синтезированные на этой основе материалы многостадийной геологической разведки месторождений и данные опробования качества угля в технологических потоках при ведении добычных работ, его внутрикарьерной подготовке и обогащении. Для уточнения и верификации получаемых результатов при необходимости используются карты-прототипы «Южякутгеологии», ИГД УрО РАН, ИГД СО РАН, других организаций.

Последовательность действий в рамках данной работы включает выполнение следующих этапов:

- анализ и использование открытой и фондовой информации об исследованиях спекаемости и коксующести угля;
- формирование баз данных пластов и месторождений с максимальным применением первичной геолого-маркшейдерской информации;
- статистическая и геостатистическая оценка показателей спекаемости в запасах и технологических потоках, исследование их взаимосвязей;
- построение цифровых моделей месторождений и пластов в них с применением горно-геологических информационных систем;
- построение с применением различных методов геотехнологических карт;
- адаптация существующих и разработка новых способов простой и площадной селективной выемки угля;
- планирование добычных работ в режиме управления качеством угля, включая перспективные работы по управлению группой не связанных между собой показателей (зольность, обогатимость, спекаемость, окисленность).

По Эльгинскому месторождению, одному из основных объектов исследований, с учётом зон окисления построены модифицированные карты в 2D и 3D вариантах, характеризующие изменчивость толщины пластического слоя в запасах четырёх самых мощных пластов. На примере детально разведанного участка с использованием разных методов при разной плотности разведочной сети сформированы более точные модели. Выполненное сравнение полученных результатов показало определённую ограниченность и сложность применения вшитых в ГГИС методов построения моделей пластов и квалиметрической оценки запасов, целесообразность апробации нелинейных методов геостатистики для снижения уровня различных допущений и ограничений при моделировании неаддитивных показателей качества, к которым можно отнести и спекаемость.

Дополнительное изучение георесурса показывают, что существующие и выявляемые резервы совершенствования процесса управления потребительскими свойствами коксующегося угля позволяют повысить эффективность освоения сложных по строению и неоднородных по качеству запасов месторождений. В основе новых технологических и управленческих решений должны лежать не утверждённые по практически постоянным для недропользователя кондициям объёмы с унифицированным качеством угля, а реальные для текущего уровня планирования геологические запасы во всем их природном разнообразии.

А. А. Гилярова

Горный институт КНЦ РАН, г. Анапты, Россия, e-mail: a.gilyarova@ksc.ru

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Горнодобывающее производство на современном этапе характеризуется интенсивным применением цифровых технологий, позволяющих повысить эффективность, снизить себестоимость производимой продукции и обеспечить устойчивое развитие горнопромышленных предприятий. Цифровые технологии предоставляют возможность повысить эффективность принятия управленческих решений, полноту извлечения полезного ископаемого из недр, оптимизировать технологические и производственные цепочки, повысить безопасность горных работ, упростить как внутреннюю, так и внешнюю логистику.

В работе выполнен анализ эффектов от внедрения цифровых технологий на ряде крупнейших горнопромышленных предприятий Российской Федерации. Выявлено, что экономические эффекты заключаются, прежде всего, в снижении эксплуатационных затрат, и в целом, себестоимости производимой продукции, что повышает рентабельность предприятия. Вместе с тем, для конкретного предприятия, в силу различия как горно-геологических условий эксплуатируемого месторождения, так и степени цифровизации экономические эффекты от применения цифровых технологий будут соответственно разными. Поэтому, чтобы оценить экономические эффекты цифровых технологий для каждого конкретного случая, необходимы дополнительные специальные расчеты и сопоставление показателей финансово-экономической эффективности предприятия без цифровых технологий и с их применением.

В этих целях разработан новый метод оценки эффективности предприятий горнодобывающего производства, позволяющий учитывать степень применения цифровых технологий, с многовариантным параметрическим и сценарным моделированием результирующих финансовых потоков. В рассмотрение принимаются основные горнотехнические и экономические ресурсы (запасы полезных ископаемых, геологические, технологические, технические, инфраструктурные, кадровые, финансовые и др.) и ограничения (рисковые, коммерческие, инвестиционные и др.). Метод реализуется посредством алгоритма, обладающего универсальностью и заключающегося в выполнении шести результирующих шагов для достижения поставленной цели: 1) формируются два основных сценария: базовый и с применением цифровых технологий; 2) для каждого сценария нормированными расчетами определяются основные дисконтированные показатели рентабельности; 3) многовариантными параметрическими расчетами оценивается чувствительность показателей на изменчивость влияющих факторов; 4) выполняется сценарное моделирование результирующих финансовых потоков; 5) выполняется сопоставление значений показателей рентабельности по сценариям; 6) выполняется оценка эффектов применения цифровых технологий по комплексному изменению дисконтированных показателей рентабельности.

Метод не только позволяет учитывать применение на предприятии горнодобывающего производства цифровых технологий, но и функционально базируется на их использовании в части многовариантных параметрических расчетов и сценарного моделирования результирующих финансовых потоков. Такой подход позволяет минимизировать влияние факторов неопределенности и субъективизма как в оценке эффективности действующего предприятия, так и инвестиционного горнорудного проекта.

Я. С. Глатко, Р. В. Сультимов

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия, e-mail: yr.glatko@yandex.ru, roman.sultimov@mail.ru

РОБОТИЗАЦИЯ В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Добывающая промышленность является ключевой отраслью для ряда государств, она обеспечивает необходимыми энергетическими ресурсами, металлами, строительными материалами все сферы хозяйственной деятельности человека. В то же время добыча полезных ископаемых

связана со значительным негативным воздействием на окружающую среду, а также рисками для жизни и здоровья человека. Современный тренд развития мировой цивилизации направлен на экологизацию производства и внедрение принципов устойчивого развития. В условиях глобализации мирового рынка минерального сырья и металлов для сохранения инвестиционной привлекательности компании на всех стадиях ее становления и развития необходимо соблюдение основных мировых трендов в области охраны окружающей среды и сохранения жизни и здоровья сотрудников.

В связи с вышесказанным в настоящее время особое внимание уделяется обеспечению безопасности сотрудников и повышению производительности их труда. Особое место в решении этих задач занимает процесс роботизации горного производства. Горные предприятия небезосновательно стремятся воплотить в производстве концепцию безлюдной добычи полезных ископаемых. Полная роботизация горного предприятия исключит появление человека в опасных зонах. Значительно вырастет объем добычи за счет того, что роботы смогут максимально эффективно использовать свои производственные мощности.

Анализ существующих роботизированных установок в горной отрасли показал, что необходимо провести систематизацию по степени их автономности. Аналогичная задача уже стояла в автомобильной промышленности и был создан стандарт J3016 маркетинговой группой SAE совместно с Комитетом по техническим стандартам. Учитывая существующие примеры систематизаций автономных устройств и опыт из смежных отраслей, мы разработали свой аналог. По сравнению с существующими систематизациями нами предложена доработка данной классификации с учетом современных решений.

Проведя анализ существующих роботизированных систем по степени их автономности, было установлено, что на открытых горных работах уже есть все возможности для внедрения концепции безлюдного карьера. Однако горнодобывающие предприятия, добывающие подземным способом, могут роботизировать только отдельные процессы. Связано это в основном с отсутствием GPS-сигнала и сложностью проведения WI-FI и 5G LTE в горных выработках.

Предложена концепция установки кубов-мишеней в горных выработках для навигации роботизированных систем в шахтных условиях. Для проверки данной гипотезы спроектирован робот и предложена методика проведения исследования.

Методика заключается в сравнении точности съемки полигонометрических ходов, пройденных с помощью тахеометра и с помощью сканера, установленного на роботизированное устройство. Будет пройден основной и рабочий всячий полигонометрический ход. За эталон будет принята съемка центров кубов-мишеней с помощью тахеометра. Съемка сканером будет проведена 10 раз для оценки точности измерений с помощью формулы Гаусса. Результатом исследования будет определенная средняя квадратическая погрешность измерения координат точек хода.

И. П. Гусева

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
г. Москва, Россия, e-mail: pozitifchiik_96@mail.ru*

О МЕТОДЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРИТОКА МЕТАНА В ОЧИСТНЫЕ ВЫРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Интенсификация добычи угля подземным способом за счет внедрения высокопроизводительных очистных комплексов приводит к необходимости совершенствования существующих и разработки новых методов дегазации.

Дегазация шахт уменьшает поступления метана из угольных пластов и пород в горные выработки, полностью прекращает или значительно снижает простои выемочных участков; повышает производительность труда и безопасность ведения горных работ в газовых шахтах и, при определенных условиях, предотвращает полностью или частично возникновение газодинамических явлений в виде внезапных выбросов угля и газа, суфляров и пр.

Основным требованием для организации безопасной работы в длинном забое является получение производственной информации на основе измерений концентрации метана и скорости проветривания в длинном забое. В таких условиях актуальным становится совершенствование современных методик прогнозирования поступления метана в выработанное пространство.

По данным измерений, проведенных в лаве, концентрация метана в вентиляционном потоке непрерывно увеличивается и достигает максимума на выходе потока из длинных забоев в конвейерный штрек. Но надо отметить, что выделение метана в выработанное пространство зависит от большого количества факторов: горно-геологических, технологических, организационных и пр.

На основании данных газовой съёмки, определения проницаемости угля в зоне опорного давления поверхности угля в выемочном столбе разработан способ прогнозирования притока метана в очистной забой на основе шахтных измерений. По результатам исследования шахтного газа при разработке длинных забоев можно рассчитать приток метана в выработку с рабочей поверхности угольного пласта и вмещающих пород.

Вместе с тем отметим, что данный вопрос требует дополнительных экспериментальных исследований, в том числе, с анализом концентраций метана в выработанном пространстве с применением специальных датчиков для измерения концентрации метана в горных выработках.

С. А. Дерябин, Рзазаде Ульви Азар оглы, Е. И. Кондратьев
НИТУ МИСИС, г. Москва, Россия, e-mail: deryabin.sa@misis.ru

МЕТОДИКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИНТЕГРАЦИИ СЛАБОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ГЕТЕРОГЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

При разработке вычислительных алгоритмов платформы интеллектуального управления транспортно-технологическими процессами открытых горных работ используются технологии цифрового дублирования. В настоящей работе представлена методика автоматической интеграции слабоструктурированных потоков гетерогенной информации для высокоточного динамического 3D моделирования. Предлагаемая методика подразумевает унификацию и предопределение потоков данных и их источников, необходимых на разных стадиях формирования цифровой технологической среды, детерминирует порядок использования таких данных, формат их получения, процессы преобразования и структурирования, а также методы расчета количественных оценок результатов.

При разработке методики использовались современные международные и отечественные стандарты в области разработки и проектирования программных систем и сред, в том числе: ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015, ГОСТ 34.602-89, ГОСТ 34.603-92, ГОСТ Р 57100-2016, ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010; руководящие промышленные государственные стандарты в области ведения горных работ, в том числе ГОСТ 2.850-75 – 2.857-75; нормативно-справочная информация по эксплуатации программных библиотек и сред и промышленных протоколов передачи данных, используемых в рамках реализации проекта.

Основу методики составляют разработанные алгоритмы обработки геотехнологических, геоинформационных и горно-геологических данных, представляющих разнотипную по физической природе и способам измерения информацию, продуцируемую независимыми функциональными сущностями, определяющими комплексное понятие «транспортно-технологический процесс».

Обобщенная схема решения задачи формирования цифрового представления технологической среды в виде единой интерактивной динамической модели, в соответствии с предложенной методикой, имеет следующий вид:

1. При интеграции платформы в общую информационную среду предприятия, определяется порядок и структура адресного обращения к эксплуатируемым информационно-управляющим системам и/или к системам управления распределенного хранилища данных.
2. После успешной интеграции и отладки взаимодействия платформы с информационно-управляющими агентами запускается непрерывный цикл автоматического построения виртуальной технологической среды.
3. Платформой формируется запрос на получение сведений (метки) о времени и дате последнего обновления данных к каждому из числа доступных источников информации, в том числе:
 - хранилищу данных телеметрии мобильных объектов ГТК;
 - хранилищу данных маркшейдерской съемки;
 - хранилищу данных спутниковой или аэрофотосъемки;

- хранилищу данных блочной горно-геологической модели (отбора проб грунта из скважин).
4. Полученная временная метка сравнивается с датой и временем последнего обновления модели в платформе. В случае наличия временной метки, позднее зафиксированной в платформе, формируется запрос на предоставление актуальных данных. При отсутствии «свежих» временных меток, используются наиболее поздние данные, полученные платформой.
 5. При отсутствии в платформе ранее полученных данных маркшейдерской съемки запускается процесс построения каркасной модели карьера. В случае получения новых данных маркшейдерской съемки запускается процедура вычисления разницы высот опорных точек вдоль плоскости: при фиксации разницы высот, превышающей величину установленной погрешности измерения (± 2 см), в качестве данных каркасной модели используются новые значения.
 6. Новые данные телеметрии мобильных объектов ГТК проходят процедуру верификации и очистки, включающую в себя определение размерности и допустимости значений для исключения выбросов и снижения влияния шумов. Преобразованная выборка проходит процедуру построения графовой модели транспортной сети карьера, включающую в себя выделение ребер, терминальных и узловых вершин. Полученный массив координат ребер сравнивается с имеющейся графовой моделью. В случае отсутствия расхождений или отсутствия новых значений координат узловых и терминальных вершин, в качестве новых значений принимаются исходные. В случае наличия расхождения разных терминальных и узловых вершин, принадлежащих одним и тем же ребрам, в качестве новых значений принимаются свежие координаты для построения графовой модели.
 7. Для полученных каркасной и графовой модели определяется общая опорная координатная точка, в соответствии с которой происходит взаимная интеграция.
 8. Запускается процедура интеграции визуальной подложки с каркасно-графовой моделью. В случае наличия новых данных спутниковой или аэрофотосъемки в качестве визуальной подложки модели используются новые значения. При отсутствии новых данных, в качестве визуальной подложки используются предыдущие данные.
 9. На сформированной модели запускается процедура выделения границ технологических зон и множественного разбиения пространства на элементарные примитивы различной формы. А затем запускается процедуры присвоения дополнительных информационных признаков, характеризующих географическое положение в пространстве, принадлежность к одной из технологических зон и их качественно-количественные состояния.
 10. Запускается процедура построения блочной горно-геологической модели в соответствии с формой и геометрическими характеристиками сформированной модели замощения. В случае наличия новых данных отбора проб грунта в скважинах, используются новые данные, при отсутствии свежих данных, используются данные имеющиеся в платформе.
 11. Готовая общая модель принимается к использованию и отправляется в модуль визуализации. Цикл работы может многократно повторяться с п. 3.

В докладе планируется с конкретными примерами рассмотреть основные этапы и инструменты реализации предложенной методики, которая позволяет реализовать механизмы динамического 3D моделирования транспортно-технологических процессов и открывает возможности для исследования различного рода вычислительных оптимизационных моделей интеллектуального управления открытыми горными работами, опираясь на функциональные возможности платформы.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕТЕРОГЕННОСТИ СЕТКИ ПРИ ВНЕДРЕНИИ КОНТАКТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТРЕХМЕРНЫЕ МОДЕЛИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

В статье предлагается вариант алгоритма трехмерного численного моделирования напряженно-деформированного состояния в окрестности структурных неоднородностей методом конечных элементов. Моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) используют, в том числе при анализе реализации разрушений в массиве горных пород, которые могут происходить в виде отрыва или сдвига по плоскостям ослаблений.

Массив горных пород имеет блочное строение, где границами блоков различного масштабного уровня являются структурные нарушения разного порядка. Плоскости поверхностей структурных неоднородностей имеют, как правило, сложную геометрию и пространственную ориентацию, поэтому наиболее адекватные результаты могут быть получены путем трехмерного моделирования нарушенного массива. Кроме этого важно учитывать тип напряженно-деформированного состояния, которое может быть не только гравитационным, но и гравитационно-тектоническим, включающим горизонтальную пригрузку массива горных пород. Учет этих особенностей позволяет получить наиболее адекватную геомеханическую модель исследуемого объекта. Для этого были изучены и проанализированы имеющиеся подходы моделирования нарушений сплошности массива, в том числе с помощью контактного элемента Гудмана, и разработана его трехмерная модификация.

Горному инженеру необходимо иметь удобный инструмент, позволяющий создавать и редактировать геомеханическую модель с учетом планов горных работ и соответствующих разрезов. Навигация по модели, редактирование её отдельных блоков для задания геологии, создание локальных подмоделей делает необходимым использование структурированных сеток конечных элементов. Модификация модели с внедрением контактных элементов влечет за собой создание неструктурированной сетки, что усложняет дальнейшие манипуляции с ней. Для решения этой проблемы был разработан специальный нулевой элемент, позволяющий сохранить структурированный формат сетки при внедрении контактного элемента. Этот нулевой элемент, как и контактный элемент, имеет нулевую толщину, а его узлы обладают усредненными прочностными характеристиками смежных блоков ненарушенного массива.

Для проверки физического вклада фиктивного «нулевого» элемента в систему линейных уравнений и влияние его на НДС моделируемого участка массива был проведен численный эксперимент. Он заключался во внедрении целого слоя «нулевых» элементов в изотропный массив, без включения контактных элементов. В результате моделирования, поле напряжений в исследуемом участке осталось неизменным.

На основе полученных знаний и исходя из необходимости исследования НДС массива для проведения прогнозного моделирования, было принято решение попытаться подобрать необходимые деформационные характеристики контакта эмпирически. Для этого с использованием уже имеющейся модели одиночной выработки было произведено моделирование разгрузочной строчки скважин. В качестве структурной неоднородности моделирующий её слой модели был задан пустотой. Исходя из результатов проведенных численных экспериментов, проведена оценка деформационных параметров в диапазоне от $1e^0$ до $1e^{10}$ и их взаимное влияние на распределение напряжений в окрестности структурных неоднородностей. Выявлены наиболее адекватные характеристики контактного элемента, которые будут использованы для проведения прогнозного моделирования НДС на контактах естественных и техногенных неоднородностей. Также в определенной мере подтверждено соотношение нормальной и тангенциальной жесткости моделируемых структур, которое использовалось в нескольких проанализированных работах.

Результатом данных исследований является инструмент, позволяющий создавать трехмерные модели напряженно-деформированного состояния массива горных пород, учитывая его структурные неоднородности и сохраняя структурированное строение конечно-элементной сетки. Проведена оценка влияния деформационных характеристик контактного элемента на напряженно-деформированное состояние массива горных пород в окрестности структурной неоднородности.

ВЛИЯНИЕ ДОМОРАЖИВАНИЯ ГРУНТОВОГО МАССИВА НА ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ КРЕПИ ШАХТНОГО СТВОЛА

В течение последних нескольких десятилетий подземная добыча полезных ископаемых на территории Российской Федерации преимущественно велась на месторождениях, вскрытие которых было выполнено в прошлом, однако к настоящему времени горнодобывающая промышленность постепенно вступает в новый период развития, характерной особенностью которого является увеличение объемов строительства вертикальных стволов для вскрытия новых месторождений. При этом преимущественно разработка новых месторождений предполагается на больших глубинах, а значит и вскрываемые вертикальные стволы относятся к глубоким или сверхглубоким. Такие стволы зачастую проходятся в неблагоприятных горно-геологических условиях (слабые водонасыщенные горные породы и грунты), что обуславливает необходимость использования специальных способов подземного строительства, наиболее распространённым из которых является искусственное замораживание пород. Обозначенное обуславливает актуальность проведения научных исследований современными методами для выявления влияния искусственного замораживания на устойчивость породных обнажений и состояние несущих конструкций вертикальных стволов.

Целью настоящего исследования является обоснование влияния параметров искусственного замораживания горных пород при проходке вертикального ствола в сложных горно-геологических условиях на напряженно-деформированное состояние его крепи.

Для достижения поставленной цели потребуются решить следующие задачи:

- исследовать влияние сформированного в различных литотипах ледопородного ограждения на напряженно-деформированное состояние крепи вертикального ствола;
- исследовать влияние морозного пучения ледопородного ограждения на напряженно-деформированное состояние крепи вертикального ствола при домораживании горных пород;
- разработать методику компьютерного моделирования оценки напряженно-деформированного состояния системы «крепь – ледопородное ограждение – горный массив».

Поскольку основной инженерной задачей при проектировании ледопородного ограждения является определение необходимой толщины замороженных пород для обеспечения устойчивости породных обнажений в период проходки, а также времени и технических средств, необходимых для его формирования, то многие отечественные и зарубежные ученые проводили исследования в данной области. Значительный вклад в развитие способа искусственного замораживания горных пород и изучению свойств мерзлых пород внесли И. Д. Насонов, Н. Г. Трупаков, С. С. Вялов, З. Х. Венг, Е. Пиментел, Ф. З. Ли [1-7], однако полученные ими эмпирико-аналитические решения включают в себя ряд существенных допущений или являются неуниверсальными, что ограничивает их область применения.

Как было указано выше, при проведении глубоких и сверхглубоких стволов в неблагоприятных горно-геологических условиях необходимо применение ледопородного ограждения, выполняющего роль временной водонепроницаемой крепи. С учетом этого в ряде ситуаций на больших глубинах с целью обеспечения надежной водонепроницаемости бывает необходимо выполнять работы по домораживанию горных пород. При этом замороженные грунты формируют на крепь ствола значительные дополнительные нагрузки, величина и интенсивность которых зависят от следующих факторов:

- физико-механические характеристики горной породы;
- глубина залегания;
- температура породы;
- содержание свободной и связанной воды;
- склонность породы к морозному пучению в результате домораживания.

Для выполнения оценки влияния обозначенных факторов на напряженно-деформированное состояние крепи вертикального ствола необходимо выполнить многовариантное численное моделирование. Оно включает следующие основные этапы:

- создание численной конечно-элементной модели, позволяющей корректно учесть основные физико-механические свойства талых и замороженных пород;
- поочередное изменение параметров модели, которые отвечают за факторы, влияющие на формирование ледопородного ограждения (физико-механические свойства замороженных пород, толщина ледопородного ограждения, температура замороженных пород и т.д.).

После выполнения многовариантного численного моделирования и анализа полученных данных с целью выявления качественного и количественного влияния основных факторов на ледопородное ограждение и напряженно-деформированное состояние крепи вертикального ствола выполняется нелинейная аппроксимация полученных результатов моделирования и формулируется методика, позволяющая эффективно решать задачу прогноза напряженно-деформированного состояния крепи в условиях применения специального способа искусственного замораживания.

Список использованных источников

1. Замораживание фильтрующих горных пород: учебник / авт. И. Д. Насонов. — М.: Недра, 1968. — 188 с.
2. Замораживание грунтов в подземном строительстве: учебник / авт. Н. Г. Трупаков. — М.: Недра, 1974. — 278 с.
3. О прочности мерзлых грунтов под фундаментами сооружений: учебник / авт. В. Г. Березанцев. В кн.: Мерзлотоведение. — М.: Изд. АН СССР. — Т. 11. Вып. 1947. — С. 48–54.
4. Реологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов: учебник / авт. С. С. Вялов. — М.: Изд-во АН СССР, 1959. — 190 с.
5. Z. H. Wang, X. R. Zhu, G. X. Zeng et al., “The experimental researches on the ground freezing with liquid nitrogen under water flowing,” *Journal of Zhejiang University*, vol. 32, no. 5, pp. 534 – 540, 1998.
6. E. Pimentel, A. Sres, and G. Anagnostou, “Large-scale laboratory tests on artificial ground freezing under seepage-flow conditions,” *Geotechnique*, vol. 62, no. 3, pp. 227–241, 2012.
7. F. Z. Li, H. Ding, and X. Z. Zhang, “Model test research of formation law of double-row-pipe freezing wall in water rich sand layer under seepage,” *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, vol. 38, no. 2, pp. 386–395, 2019.

Е. С. Жерлыгина, А. Д. Куранов, А. А. Филиппов

*Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: bazilyak.e.s@gmail.com*

ВЫЯВЛЕНИЕ ПРОБЛЕМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

В связи с непрерывным развитием горнодобывающей промышленности регулярно встают вопросы безопасного производства горных работ. Одним из способов обеспечения безопасности в этом направлении является осуществление маркшейдерского мониторинга за состоянием земной поверхности и подземного пространства.

Рынок цифровых технологий представляет широкий спектр программных комплексов по моделированию геомеханических процессов, при помощи которых можно прогнозировать состояние породного массива и развитие сдвижений и деформаций в нем [1-6].

Помимо моделирования существует необходимость оценки ситуации посредством натуральных наблюдений.

Производство инструментальных измерений непрерывно связано с последующей обработкой данных – пополнением маркшейдерской вычислительной и графической документации. Опыт взаимодействия с различными горными предприятиями показал, что, несмотря на технический прогресс, многие организации осуществляют обработку, хранение и интерпретацию материалов чуть ли не вручную, порой используя лишь программы пакета Microsoft Office, например, Excel. Пополнение данных в подобном формате не всегда могут обеспечить необходимую оперативность обработки сведений и желаемую полноту визуализации за наблюдаемыми процессами.

В настоящее время существуют программные продукты, способные накапливать и визуализировать параметры, оцениваемые маркшейдерами. Так, например, программное обеспечение SSR-VIEWER обеспечивает возможность мониторинга с одной точки в течение 12 месяцев, что позволяет пользователям выявить и проанализировать характер долгосрочных изменений. Имея в своем распоряжении обширную библиотеку для построения графиков и ряд других мощных инструментов, пользователи SSR-VIEWER могут сопоставлять данные и выявлять существующие тенденции, одновременно избегая путаницы в объеме доступной информации.

Кроме того, вкладка «собственные настройки анализа» дает пользователям возможность видеть различные наборы данных в виде единого, легко настраиваемого графика. Эффективный инструмент для создания отчетов помогает наглядно продемонстрировать результаты анализа [7].

Еще одним решением по хранению и обработке данных мониторинга является программа КРЕДО РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИЙ. Помимо анализа результатов циклов наблюдений за смещением деформационно-осадочных марок, циклических измерений произвольных физических величин, выполненных совместно с геодезическими наблюдениями деформаций и осадок, расчета скорости вертикальных осадок, плановых деформаций, кривизны деформационной поверхности и других параметров, этот программный продукт позволяет визуализировать результаты наблюдений [8].

Стоит отметить, что в большинстве случаев мониторинг геомеханических процессов производится на протяжении многих лет, что подразумевает накопление и увязку большого количества данных измерений, а также необходимость производства анализа изменения параметров, рассматриваемых специалистами маркшейдерской службы. К сожалению, на сегодняшний день не выявлено универсальной программы, которая могла бы сочетать в себе функции и операции по оценке всех необходимых критериев. И решение подобных вопросов для частных (индивидуальных) запросов конкретных предприятий является перспективным направлением.

Список использованных источников

1. URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>
2. URL: <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-autodyn>
3. URL: <https://www.civildem.com/products/civildem-for-ansys/>
4. URL: <https://optumce.com/products/optumg3/>
5. URL: <https://www.itascacg.com/software/why-choose-flac-3d>
6. URL: <http://ru.midasuser.com/web/page.php?no=13>
7. URL: <https://www.groundprobe.com/product/ssr-viewer/?lang=ru>
8. URL: https://credo-dialogue.ru/press-tsentr/novosti/1590-new_version_credodeformation_calculation_2-0.html

А. М. Жирова, Д. В. Жиров

Геологический институт КНЦ РАН, г. Анапты, anzhelaz@geoksc.apatity.ru

СВЯЗЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ В РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ С ГРАВИТАЦИОННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЛУНЫ

Целью работы является установление связи пространственно-временных закономерностей в распределениях сейсмических событий с солнечно-лунным приливным воздействием. Для анализа этих процессов необходимо было получить длительные ряды достоверных наблюдательных данных, как для сейсмических событий в районе действующих рудников Кольского региона, так и для фазовых изменений Луны. Существующие базы данных сейсмических событий дополнены для района рудника Расвумчорр событиями, произошедшими за период с 8 апреля 2001 г. по 31 июля 2019 г., и для Кировского рудника — за период с 7 июня 1987 г. по 31 июля 2019 г. Для этих же периодов собраны сведения о фазах Луны.

Построены временные ряды сейсмичности (количества событий и энергии), приведённые к календарным суткам. В течение всего изучаемого временного периода число зарегистрированных сейсмических событий на Расвумчоррском руднике в основном не превышает 100 событий за сутки. Количество же суток с аномально высокой сейсмичностью (свыше 100 событий) - не более десяти. Максимальные значения энергии при этом составляют 2.14×10^9 Дж. Для Кировского рудника

основная масса событий также находится в пределах 100 в сутки, но суток с повышенной сейсмичностью значительно больше. Максимальные значения энергии сейсмических событий не превосходят 2.47×10^{10} Дж.

Для каждого лунного дня рассчитано суммарное количество землетрясений, а также суммарная сейсмическая энергия. Данные об основных явлениях в движении Луны взяты из таблиц расчётных моментов прохождений Луной перигея и апогея орбиты, полученных на основе полуаналитической теории движения Луны ELP 2000-82. В результате построены графики распределения количества и энергии сейсмических событий по дням синодических месяцев. Установлено, что пик энергии и количества сейсмических событий для района Кировского рудника приходится на период перед полнолунием и новолунием, т.е. перед сизигиями, а спад - на 1-ю и 3-ю четверти, т.е. в квадратуры. Однако для Расвумчоррского рудника результат неоднозначен. Получены также данные о зависимости количества и энергии событий от суточных часов, дней недели и месяцев в году за весь изучаемый период времени. Установлено, что максимальные значения количества событий отмечаются в следующие часы: в 7-8 часов, в 16 часов и в 23-24 часа, а для энергии событий, кроме перечисленных часов, ещё и в период 20 часов. Распределение сейсмических событий по дням недели показало, что рост количества событий происходит к концу недели, т.е. проявляется так называемый эффект выходного дня, заключающийся в семидневной периодичности сейсмической активности с максимумом числа событий в выходные дни. Так, для района рудника Расвумчорр это 5-й–7-й дни недели, для Кировского рудника – 6-й–7-й дни. Эффект свидетельствует о том, что на естественные процессы в геосферах воздействует антропогенная составляющая. Повторяемость сейсмических процессов во времени, в частности годовые циклы, могут быть связаны с естественными природными циклами, обусловленными суточным вращением Земли.

А. Г. Журавлев

ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия, e-mail: juravlev@igduran.ru

КОНЦЕПЦИЯ МОДУЛЬНОГО ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ КАРЬЕРНОГО ТРАНСПОРТА³

Современные экономические условия диктуют все ужесточающиеся требования к срокам, достоверности, точности прогнозов и учета рисков, более детальной проработки этапов работы карьера при проектировании горнодобывающих предприятий с открытым способом разработки. Это же относится и к проектированию транспортных систем карьеров.

Сложности, возникающие в методическом плане при обосновании параметров транспортных систем карьеров на современном этапе:

1. Сложность математического описания зависимостей параметров и показателей транспортной системы от параметров карьера (взаимное влияние, многофакторность и др.).

2. Каждое месторождение уникально. Следовательно, в определенной степени уникальна и транспортная система, а потому даже отбор вариантов для последующих детальных технико-экономических расчетов целесообразно выполнять для конкретного месторождения. Необходимы соответствующие методики автоматизированных расчетов.

3. Внедрение новых технологий требует прогнозирования параметров транспорта в новых условиях (крутонаклонные съезды, роботизированные машины и т.д.)

4. Необходимы методики учета прогноза развития техники и технологий при долгосрочном планировании 20-50 лет.

5. Требуется создание комплексной методики обоснования параметров транспортных систем карьеров на базе комплексных автоматизированных расчетов (цифровых платформ).

Построение требуемой методики возможно по модульному принципу, подразумевающему объединение отдельных расчетных компонентов алгоритма, привязанных к определенному звену транспорта или его части/процессу – это позволяет использовать уже имеющиеся алгоритмы (рис. 1).

Поэтому основное внимание уделяется разработке обобщающих алгоритмов построения виртуальной технологической системы транспорта из отдельных модулей, методов сравнения

³ Исследования выполнены в рамках Государственного задания № 075-00581-19-00, тема № 0405-2019-0005

вариантов, методик многокритериальной комплексной оценки вариантов (с учетом влияния горно-геометрических, технологических, технических и экономических факторов) (рис. 2).

Выводы

1. Модульность комплексной методики технических, технологических и экономических расчетов позволяет:

- комбинировать любую схему транспорта;
- при автоматизированных расчетах обеспечить адаптивность в выстраивании необходимой траектории расчетов при решении конкретной задачи;
- обеспечить вариативность к перечню исходных данных.

2. Требуется разработка теоретических основ автоматизированного построения технологической схемы транспорта в отличие от существующего подхода, основанного на экспертной оценке и сравнении вариантов.

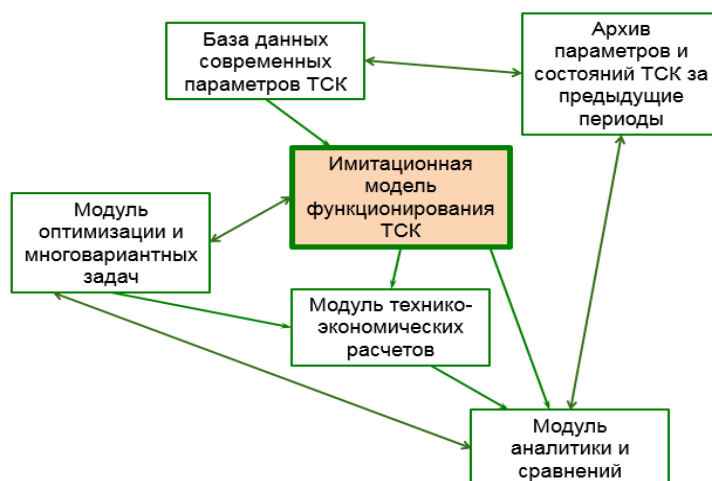


Рис. 1. Модульная структура расчетов при оптимизации параметров транспортной системы карьера

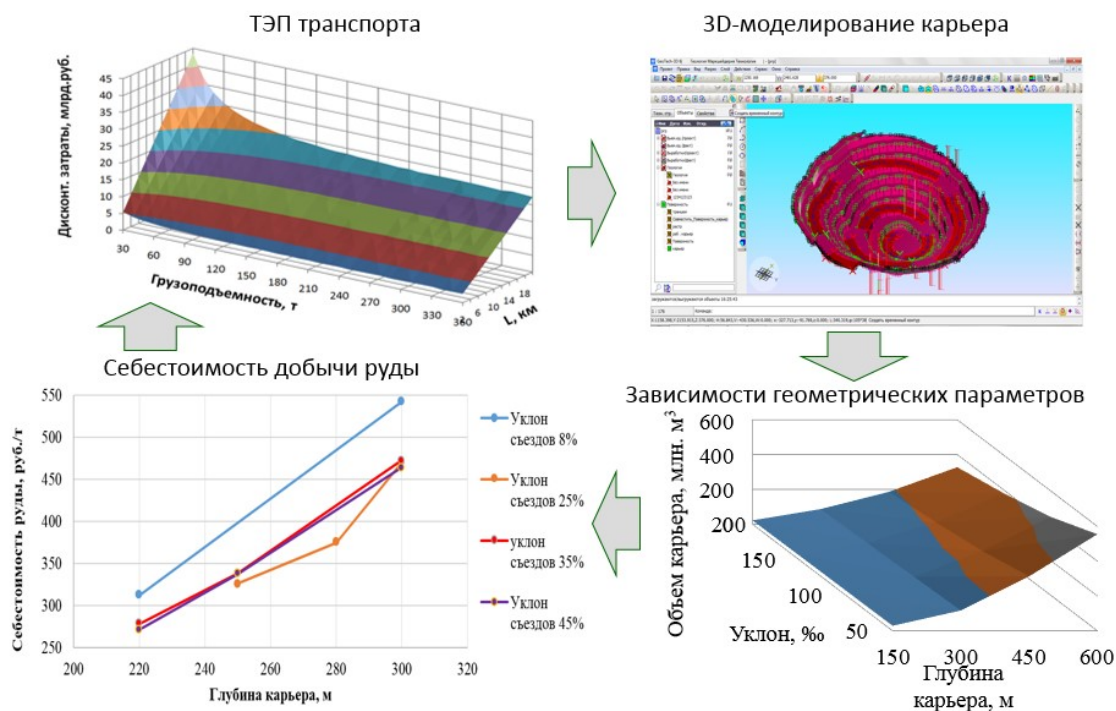


Рис. 2. Принципиальная схема методического подхода к совместной оптимизации параметров транспортной системы и карьера

ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОТРАБОТКЕ УДАРООПАСНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВСТРЕЧНЫМИ ФРОНТАМИ

При отработке удароопасных месторождений Хибин существует проблема возникновения опасных геодинамических явлений. В основе процессов подготовки и реализации таких явлений лежат изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород. Рост напряжений на обрабатываемых горизонтах и увеличение зон концентрации напряжений связаны не только с углублением и интенсификацией горных работ, но и с технологией отработки месторождений.

Наибольшее накопление упругой энергии в скальном массиве происходит в зонах концентрации сжимающих напряжений, поэтому для исследования процессов концентрации и диссипации энергии выбран характерный высоконапряженный участок массива одного из удароопасных месторождений Хибин, отработка которого проводилась встречными фронтами. На этом участке были рассчитаны энергии упругого деформирования пород и ее удельные значения по результатам численного моделирования НДС массива пород. Исследуемая область массива не пересекается крупными разломными структурами, находится в зоне влияния растягивающих напряжений, действующих в консоли подработанных пород. Таким образом, рассматриваемый участок располагается между встречными фронтами горных работ, в непосредственной близости к консоли подработанных пород, что определяет характер изменения НДС массива на данном участке.

Для учета пространственно-временных характеристик сейсмичности на месторождении и выявления особенностей взаимодействия событий различного энергетического класса опробован модифицированный концентрационный критерий [1-2]. С помощью этого параметра определяются цепочки взаимодействующих друг с другом событий. Авторами проведена кластеризация сейсмических событий на основе данного параметра, характеризующего сближение сейсмособытий, и фактора времени.

Выявлены два наиболее крупных кластера сейсмических событий. Местоположение первого кластера - стыковочная секция и консольная часть массива горных пород; второго – область ведения горных работ в стороне от стыковочной секции. В первом кластере пространственное распределение гипоцентров сильных сейсмических событий сформировалось в виде субвертикальной линии, что, по-видимому, соответствует формированию трещины, выходящей на поверхность, по которой постепенно могло происходить самообрушение пород консольной части. Полученный результат соответствует результатам моделирования НДС массива горных пород, а именно – распределению значений растягивающих напряжений.

Также установлено снижение удельной энергии деформирования массива на исследуемом участке месторождения за пятилетний период, что обусловлено уменьшением объема нетронутого массива горных пород за счет постепенного самообрушения консоли пород всяческого бока рудной залежи. Оценка динамики изменения удельной энергии деформирования массива на отдельных участках месторождения является важной задачей, поскольку при интенсивном развитии горных работ происходит постоянное перераспределение напряжений.

Представленный подход применим для изучения процесса разрушения массива горных пород под влиянием природно-техногенных факторов.

Список использованных источников

1. Герман В. И. Прогноз обрушений на рудниках по данным сейсмического мониторинга // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2014. — № 2. — С. 99—109. DOI: 10.1134/S1062739114020124.
2. Журков С. Н., Куксенко В. С., Петров В. А., Савельев В. Н., Султанов У. С. О прогнозировании разрушения горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. № 6. С.11–18.

А. А. Зуенко¹, О. В. Фридман¹, О. Г. Журавлева², О. Н. Зуенко¹

¹Институт информатики и математического моделирования КНЦ РАН,
г. Апатиты, Россия, e-mail: zuenko@iimm.ru

²Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия,
e-mail: o.zhuravleva@ksc.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ CONSTRAINED CLUSTERING ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СЕЙСМОАКТИВНЫХ ЗОН ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ⁴

Рассмотрено применение методов *Constrained Clustering* и *Data Mining* для исследования особенностей формирования сейсмоактивных зон при ведении горных работ. Разработан подход к решению задачи *Constrained Clustering*, основанный на агрегировании данных, полученных в результате оценивания характеристик кластеризуемых объектов несколькими независимыми экспертами, и анализе альтернативных вариантов разбиения на кластеры методами *Constraint Programming* с использованием оригинальных эвристик. В рамках подхода созданы: метод оценки оптимального значения целевой функции путем иерархической кластеризации мультимножеств с учетом априорных ограничений предметной области и метод генерации с применением полученной оценки дополнительных ограничений на искомое решение в виде “smart-таблиц”. Подход позволяет находить наилучшее разбиение в задачах рассматриваемого класса, имеющих высокую размерность.

В рамках настоящих исследований для систематического решения задачи *Constrained Clustering* предложено использовать парадигму *Constraint Programming*. Основное внимание уделено вопросу уменьшения количества и упрощению ограничений задачи в процессе её постановки. Предлагаемые методы в совокупности обеспечивают возможность получения глобального оптимума для задач высокой размерности.

В качестве базовой модели для решения задачи *Constrained Clustering* была использована модель, описанная в [1].

В отличие от исследований, представленных в [1], в настоящей работе предполагается, что и кластер, и кластеризуемый объект представляются как мультимножества, а расстояние (d_{ij}) между ними ищется с помощью метрик в пространстве мультимножеств Петровского [2].

Актуальным направлением исследований представляется разработка способов ускорения обработки нечисловых ограничений (новых методов распространения нечисловых ограничений). Данное направление исследований наиболее полно отражено в [3]. В ходе исследований было предложено генерировать ограничения не для всех пар объектов, а лишь для некоторых, что способно существенно снизить размерность решаемой задачи.

Кратко опишем предлагаемый подход:

1 шаг. Оценить диапазон значений, в который должен попадать искомый оптимальный диаметр разбиения. Для нахождения первоначального разбиения предлагается использовать метод FPF (*Furthest Point First*), представленный в [4]. На основе полученной оценки генерируются ограничения *cannot-link* для тех пар кластеров, для которых $d_{ij} > d$.

2 шаг. Выполнить конкретизацию верхней границы интервала $D \in [d/2, d]$. Для этого осуществляется процедура иерархической кластеризации мультимножеств, описанная в [3]. Существенная модификация данной процедуры заключается в том, что в ходе кластеризации анализируются ограничения *cannot-link*. В результате данного шага получаем новый интервал для оценки D .

3 шаг. Сгенерировать ограничения для систематического решения задачи CSP. Предыдущие два этапа позволяют генерировать ограничения не для всех пар кластеризуемых объектов. Ограничения представляются с помощью предложенных одним из авторов *smart-таблиц* D -типа [3]. Обработка данных ограничений производится с помощью высокоэффективных авторских методов удовлетворения нечисловых ограничений [3].

4 шаг. Решить сгенерированную на предыдущем шаге задачу *Constrained Clustering* с помощью описанных далее эвристик для поиска переменной и её значения.

В качестве объектов кластеризации выступали условные пространственные ячейки, на которые разбит один из участков высоконапряженного массива горных пород Кукисвумчоррского апатит-нефелинового месторождения. Цель кластеризации состояла в исследовании особенностей формирования

⁴ Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 20-07-00708-а).

сейсмоактивных зон. Рассматривается комплекс факторов, влияющих на сейсмичность массива горных пород, и оценивается степень их влияния. Авторы исходят из того, что формирование каждого кластера сейсмособытий определяется уникальной комбинацией природных и техногенных воздействий. Причем для одних кластеров доминирующим может быть природный фактор, для других – техногенный, а в ряде случаев решающее влияние может оказывать комплексный природно-техногенный фактор.

Согласно описанным выше шагам, были рассчитаны расстояния между исходными кластерами (один объект – один кластер) и сформирована матрица расстояний, найдено первоначальное разбиение с использованием метода FPF, найдена оценка для оптимального диаметра разбиения. Далее проводится кластеризация сейсмособытий согласно модифицированному методу иерархической кластеризации с учетом полученных с помощью метода FPF ограничений, уточняется верхняя граница кластеризации и интервал для оценки диаметра разбиения.

Для рассматриваемой задачи *Constrained Clustering* будет сгенерировано всего пять ограничений. Заметим, что без подготовительных этапов, состоящих в применении метода FPF и иерархической кластеризации с учетом ограничений, количество генерируемых ограничений оценивалось бы величиной $(14 \cdot 13) / 2 = 91$.

Список использованных источников

1. Duong K.C., Vrain C. Constrained Clustering by Constraint Programming. // Artificial Intelligence Journal. 2017. vol 244. pp. 70-94.
2. Петровский А.Б. Методы групповой классификации многопризнаковых объектов (часть 1) // Искусственный интеллект и принятие решений. 2009, № 3. – С. 3-14.
3. Zuenko A., Oleynik Y., Yakovlev S. and Shemyakin A. Matrix-Like Representation of Production Rules in AI Planning Problems. // Proc. of the Fourth Int. Scientific Conf. Intelligent Information Technologies for Industry (ITI'19) Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. vol 1156 (Springer, Cham). pp. 393-402.
4. Gonzalez T. Clustering to minimize the maximum intercluster distance // Theoretical Computer Science. 1985. №38. – pp 293–306.

М. М. Казан, И. Г. Панасенко

Горный институт КНЦ РАН, г. Анатимы, Россия,

e-mail: m.kagan@ksc.ru, i.panasenko@ksc.ru

АРХИТЕКТУРА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ УДАЛЕННОГО СБОРА РАЗНОРОДНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В Горном институте КНЦ РАН с 2012 года успешно действует система удаленного (с использованием интернета) сбора в реальном времени геофизических данных о состоянии массива горных пород на подземном руднике горного предприятия.

По результатам эксплуатации системы с учетом выявленных достоинств и недостатков текущей реализации предложена архитектура программной части системы мониторинга, имеющая следующие особенности:

- учет трехэтапного (датчик – регистратор – шлюз) преобразования физической величины в числовое значение, помещаемое в хранилище данных, и наличия различных передаточных функций у датчика и регистратора;
- учет возможности подключения к одному шлюзу нескольких регистраторов при ограничении числа одновременных подключений к шлюзу, организация параллельной работы с несколькими шлюзами и очередей для работы с несколькими регистраторами одного шлюза;
- возможность подключения приложений автоматической обработки поступающих данных;
- программные интерфейсы для публикации собранных данных и приема результатов автоматической обработки;
- монитор состояния горных объектов и аппаратных компонентов системы;
- генерация оповещений о существенных событиях с индивидуальными настройками доставки каждого типа оповещений;
- координация совместной работы всех подсистем посредством планировщика, ведущего очередь заданий-запросов и выполняющего их диспетчеризацию;
- объектная модель, максимально упрощающая добавление поддержки новых типов устройств.

Предложенная архитектура находится в стадии реализации.

А. А. Козырев, М. М. Казан, Д. С. Чернобров, И. Г. Панасенко
 Горный Институт КНЦ РАН, г. Анапаты, Россия,
 e-mail: a.kozyrev@ksc.ru, m.kagan@ksc.ru, d.chernobrov@ksc.ru, i.panasenko@ksc.ru

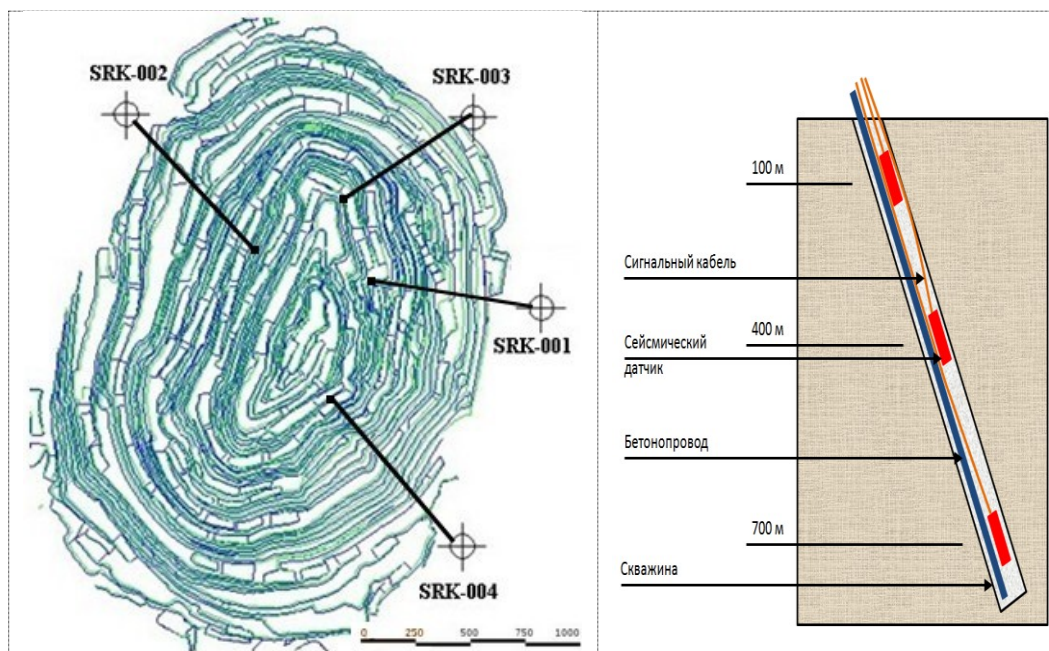
СИСТЕМА МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИБОРТОВОГО МАССИВА КАРЬЕРА НА ОСНОВЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ В ГЛУБОКИХ СКВАЖИНАХ ЗА КОНЕЧНЫМ КОНТУРОМ КАРЬЕРА

Микросейсмический мониторинг прибортового массива в настоящее время применяется на целом ряде карьеров в целях своевременного выявления процессов внутри породного массива, влияющих на устойчивость бортов. Мониторинг организуется на основе сети сейсмодатчиков, которые устанавливаются в скважинах различной глубины, пробуренных в бортах карьера. Однако практика эксплуатации таких систем показывает, что, вследствие проводимых в карьере горных работ, срок эксплуатации скважин на бортах карьера ограничен. Поэтому не всегда удается обеспечивать непрерывный мониторинг бортов.

На карьере рудника «Железный» Ковдорского ГОКа была поставлена задача разработки сейсмической системы, позволяющей обеспечить длительный срок жизни сейсмической сети, не зависящий от проводимых на борту карьера горных работ. Задача была решена путем создания сейсмической сети из 12 датчиков, установленных в 4-х глубоких (до 1 км) наклонных скважинах с устьями, расположенными на поверхности за пределами конечного контура карьера. Параметры скважин приведены в таблице, а их расположение в карьере - на рисунке.

Параметры скважин для установки датчиков

№	№ скв.	x	y	z	Азимут	Угол, град.	Глубина, м	Диаметр
1	SRK_001	-1225	-419	212	278	55	1020	HQ (96 мм)
2	SRK_002	-2783	60	259	120	58	1040	
3	SRK_003	-1365	330	232	240	55	1040	
4	SRK_004	-1430	-1269	271	308	55	1100	



Расположение скважин с сейсмодатчиками в карьере и схема расположения датчиков в скважинах

Конфигурация сейсмической сети обеспечивает мониторинг с энергетическим порогом 1 кДж практически всего прибортового массива за исключением верхних горизонтов Юго-Западного борта карьера.

Система позволяет заблаговременно выявлять процессы формирования поверхностей ослабления, по которым возможен сдвиг крупных породных блоков борта карьера. В результате исследований установлены зависимости, связывающие динамику микросейсмической активности в прибортовом массиве пород и развития деформационных процессов.

В процессе опытной эксплуатации системы сейсмического мониторинга выявлена опасная зона в нижней части юго-западного участка борта под дном карьера на глубинах от -250м до -350м, с проявлением мощных событий с энергией более 10^5 Дж и частичным проявлением обрушений участков борта над выявленной сейсмоактивной зоной. Повышенная сейсмоактивность под дном карьера в юго-западной его части связана с активизацией геологических структур в процессе формирования контура карьера, затрагивающей также вышележащие участки борта.

С. А. Козырев, Е. А. Власова, А. В. Соколов

Горный институт КНЦ РАН, г. Анапты, Россия, e-mail: s.kozyrev@ksc.ru

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД СКВАЖИННЫМИ ЗАРЯДАМИ ПРИ ИХ ВЗРЫВЕ НА СВОБОДНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСТУПНОЙ ОТБОЙКЕ

В настоящее время для описания процесса разрушения горных пород при взрыве удлиненных зарядов используются упрощенные модели, в которых удлиненный заряд представляется в виде непрерывного ряда элементарных сосредоточенных зарядов, инициируемых последовательно через равные промежутки времени. При этом рассматриваются только параметры волн напряжений в заданной области, по интенсивности которых судят о характере разрушения массива. Динамика процесса практически не учитывается. При взрывании скважинных зарядов ВВ, расположенных на уступе скального массива, форма зоны дробления для отдельного заряда условно принимается в виде вертикального полуцилиндра с выпуклостью в сторону боковой открытой поверхности с примыкающими полусферами по концам заряда. Для расширения существующих представлений о механизме действия взрыва скважинного заряда при уступной отбойке с использованием программного продукта Ansys Autodyn разработана численная 3D модель взрыва скважинных зарядов на свободную поверхность, что позволило для конкретных условий взрывания в динамике оценить характер разрушения и перемещения отбиваемого слоя, получить количественные значения давлений и скоростей смещения при взрыве скважинного заряда в различные моменты времени как в сторону свободных поверхностей, так и в тыльную часть массива на различных высотных уровнях заряда.

Как показали результаты математического моделирования при наличии боковой открытой поверхности уступа, симметрия распространения разрушений от заряда не соблюдается. Разрушения в основном направлены в сторону боковой и верхней открытых поверхностей. В противоположную тыльную сторону массива на уровне торца заряда разрушения распространяются на небольшие расстояния в пределах зоны дробления напряжениями сжатия в прямой волне. Зоны разрушения на уровне торца заряда, средней его части, на уровне недозаряда и на дневной поверхности существенно отличаются друг от друга.

Полученные результаты позволили расширить существующие представления о механизме действия взрыва скважинного заряда при уступной отбойке и в динамике оценить характер разрушения и движения отбиваемого слоя при взрыве на свободную поверхность, а количественные значения параметров волн напряжений - оценить ширину зон трещинообразования и наведенной трещиноватости в тыльную часть массива на различных высотных уровнях уступа.

А. Д. Куранов

Горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Kuranov_AD@pers.spmi.ru

РОЛЬ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

Стабильная работа горнодобывающего предприятия невозможна без постоянного развития производства. Что такое развитие горнодобывающего производства – это в первую очередь развитие ресурсной базы. Всем решениям по развитию ресурсной базы предшествует целый комплекс изысканий, который в условиях постоянно ухудшающихся условий ведения подземных работ все сложнее осуществлять. Тем самым, сегодня определяющим трендом развития горнодобывающих предприятий является поиск инструментов, направленных на уменьшение времени принятия технических решений.

Где взять инструмент для оптимального принятия решений? Конечно, инструменты 4-й промышленной революции позволяют повысить эффективность работы предприятий. Сегодня инструменты Индустрии 4.0 – это большие данные, искусственный интеллект, имитационные модели и цифровые двойники - всё то, что позволяет увеличить производительность и снизить эксплуатационные затраты предприятия. Все эти технологии позволяют реализовать Smart Mining.

Однако развитие цифровых технологий в горной отрасли и технологий добычи ограничиваются новым зарождающимся трендом – геомеханические проблемы становятся фактором сдерживания. Это происходит за счет трудоемкости детального изучения массива пород и обработки этих данных.

Что на практике представляет из себя данный фактор сдерживания. Это совокупность рисков потери устойчивости горнотехнических систем, которые выражаются в:

- опасности вывалов в подземных горных выработках, оползней при разработке месторождений полезных ископаемых;
- прорастание водопроводящих трещин, потеря водозащитных толщ, охранных целиков;
- динамических проявлениях горного давления – микроударов, горных ударов
- горно-тектонических ударов, вызванных ими техногенных землетрясений, а также опасности техногенных землетрясений различного генезиса.

И несмотря на развитие технологий и средств обеспечения их безопасности, приведенные риски при добыче полезных ископаемых и других формах недропользования не снижаются. Чтобы снять этот тренд, нужен качественно новый подход к решению геомеханических проблем. Необходимо регламентировать применение цифровых технологий для решения геомеханических проблем на основе систематизации всего лучшего опыта научных организаций и широкое внедрение данных инструментов в горное производство.

Сегодня определяющим трендом развития горнодобывающих предприятий является создание инструментов, направленных на уменьшение времени принятия решений. В этой связи закономерен спрос на цифровые технологии, однако развитие цифровых технологий и технологий добычи ограничивается геомеханическими проблемами, сложностью массивов горных пород. Тем самым, внедрение цифровых технологий в горную промышленность отстает именно ввиду сложности изучения массива. Одна из миссий исследователей, изучающих процессы, происходящие в массиве горных пород, – сокращать данное отставание.

А. Д. Куранов, И. И. Багаутдинов, В. А. Киселев

Горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,

e-mail: Kuranov_AD@pers.spmi.ru, Bagautdinov_I@pers.spmi.ru

ОЦЕНКА РИСКОВ ПРОЯВЛЕНИЯ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ В МАССИВЕ ПРИ ОТРАБОТКЕ ЗАПАСОВ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУД С УЧЕТОМ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

Современный уровень развития горнодобывающего сектора промышленности, характеризующийся последовательным движением в сторону увеличения глубин разработки в

совокупности с сохранением или увеличением объема извлекаемых запасов, ставит перед специалистами горной отрасли новые вызовы и задачи. Цифровые инструменты Industry 4.0 уже становятся нормой в ведущих предприятиях отрасли. Однако их внедрение в горную промышленность происходит медленнее, чем в другие отрасли производства. Это связано с тем, что массив горных пород и происходящие в нем процессы достаточно сложны для автоматизации их изучения. С другой стороны, недропользователи, так или иначе, проводят целый комплекс работ, в результате которых формируются достаточно обширные объемы данных о свойствах массива, его структуры, результатах различных мониторингов и изысканий. В этой связи, весьма актуальной задачей являлась разработка методики оценки рисков проявления горного давления в массиве, основанная на комплексной обработке данных о массиве и протекающих в нем процессах, которую возможно бы было автоматизировать.

Разработанная методика оценки рисков является универсальной и состоит из четырех основных этапов, которые, в свою очередь, могут быть уточнены и дополнены для решения конкретных задач исследования:

1. Сбор сведений о месторождении. Визуальная и/или инструментальная оценка исходного поля напряжений в массиве горных пород. Выполнение геодинамического районирования, как базового метода для выявления блочной структуры массива горных пород, установления динамики взаимодействия блоков и реконструкции главных напряжений, оценку удароопасности массива и его участков по структурному анализу, выделения активных геодинамических зон.

2. Разработка формата и создание базы данных на основании всех имеющихся геомеханических данных и данных изысканий, и мониторингов.

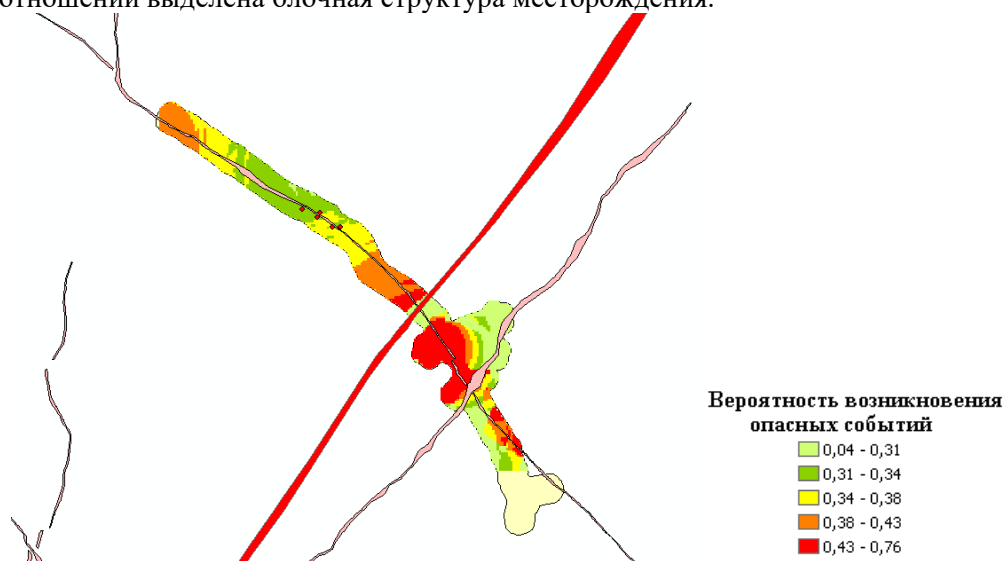
3. Выделение перечня факторов, влияющих на возникновение опасных событий (проявления горного давления), которые представляют собой геопространственные объекты, изменчивость которых отражается при помощи семантической и графической информации. Создание базы данных, которая содержит сведения об известных случаях проявления горного давления.

4. Расчет влияния каждого фактора на основе функции стандартного нормального распределения (1). Для оценки параметров $w = (w_0, w_1, w_2, \dots, w_k)$, при решении задачи оценки вероятности возникновения проявлений горного давления используется подход, связанный с применением искусственных нейронных сетей (ИНС).

В работе использована одна из разновидностей ИНС – многослойный перцептрон, проходящий обучение с учителем, с перестройкой веса связей в процессе обучения. Искусственная нейронная сеть сформирована в среде программного комплекса Advangeo.

$$F(u) = \frac{1}{1 + e^{-u}} = \frac{1}{1 + e^{-(w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_n x_n)}} \quad (1)$$

Геодинамическое районирование территории выполнено методом структурной морфометрии с учетом анализа базисных, вершинных, остаточных и гониобазисных поверхностей различных порядков. Результаты морфоструктурного анализа увязаны с геологическими данными, и с учетом возрастных соотношений выделена блочная структура месторождения.



Фрагмент плана вероятности возникновения опасных событий

Оценка направления и прогноз величины главных напряжений в блоках выполнена методом численного конечно-элементного моделирования в среде лицензированного программного продукта Simulia Abaqus.

Таким образом, по результатам обучения искусственной нейронной сети на основе переданных данных и междисциплинарного анализа опасных факторов проявления горного давления в научно-исследовательской работе построены карты прогноза опасных геодинамических событий. Фрагмент плана вероятности возникновения опасных событий на одном из горизонтов рудника приведен на рисунке.

С. В. Лукичев

Горный институт КНЦ РАН, г. Анатиты, Россия, e-mail: s.lukichev@ksc.ru

ЦИФРОВОЕ ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Процесс цифровой трансформации горного производства носит эволюционный характер и начался с появления на крупных предприятиях, в проектных и научных организациях электронных вычислительных машин (ЭВМ). На том начальном этапе решение задач горной технологии с использованием ЭВМ носило в основном демонстрационный характер, было слабо интегрировано в рабочий процесс и не имело практически никакой экономической значимости. Но важным результатом того начального этапа явилось понимание необходимости комплексного подхода к решению задач горной технологии и как следствие - возникновение центров разработки специализированного программного обеспечения.

Как и для любого начального этапа решения сложной научно-технической проблемы наблюдалась дифференциация общей проблематики на отдельные области. Так разработчики горно-геологических информационных систем (ГГИС), создавая свои программные продукты, занимались автоматизацией решения Геологических, Маркшейдерских и Технологических задач. Разработчики систем диспетчеризации – программно-техническими решениями в области управления работой горно-транспортного оборудования. Разработчики систем обеспечения геомеханической безопасности – программами расчета напряженно-деформированного состояния массива и программно-техническими комплексами мониторинга его состояния в границах ведения горных работ. Свои программные продукты создавались для решения задач проветривания выработок, проектирования скважинной отбойки и т.п.

Что касается ГГИС, то развитие программных продуктов этого класса шло, как правило, от решения задач оценки запасов месторождения к моделированию объектов горной технологии, программных средств решения маркшейдерских задач, инструментов проектирования и планирования горных работ.

В процессе разведки месторождения, технико-экономической оценки кондиций, инвестиционной оценки горного проекта происходит детализация моделей горно-геологических объектов, что приводит к увеличению объема цифровой информации и требует использования адекватных средств визуализации, редактирования моделей и управления ими. В ГГИС MINEFRAME для этого используется реляционная БД, обеспечивающая многопользовательский контролируемый доступ к данным и их восстановление в случае потери.

На стадии разработки проекта осуществляется детализация выбранного в результате предпроектной проработки варианта технологии с выделением этапов развития горных работ, построением календарного плана, расчетом затрат на строительство объектов инфраструктуры. Тенденция к переходу на дистанционно управляемое оборудование и роботизированные технологические комплексы предполагает изменение как в конструктивных элементах системы разработки, так и в технологических схемах работы комплексов. Одновременно с этим меняются и требования к проветриванию выработок, особенно в случае перехода на электрический транспорт.

Реализация проекта в процессе эксплуатации месторождения сопровождается резким увеличением объема цифровой информации, которая отражает текущее состояние производства и используется для планирования и управления горными работами. Источниками и потребителями цифровых данных являются:

- Геологическая служба, осуществляющая эксплуатационную разведку и использующая весь доступный объём данных для уточнения качественных характеристик запасов в выемочных единицах.
- Маркшейдерская служба, обеспечивающая реализацию проектных решений, связанных с проходкой горных выработок, формированием конструктивных элементов карьера, отвалов, складов полезных ископаемых и других объектов.
- Служба геомеханической безопасности, обеспечивающая контроль за состоянием массива горных пород вблизи выработанного пространства.
- Технологическая служба, осуществляющая планирование и локальное проектирование горных работ.
- Диспетчерская служба, осуществляющая управление работой предприятия в режиме реального времени.

Для решения упомянутых задач в ГГИС разработаны сотни инструментов, работающих с цифровыми данными и моделями и, в свою очередь, формирующих новые модели. Для рациональной организации работы с цифровыми данными требуется выполнение следующих условий:

1. Оснащение рабочих мест специалистов набором инструментов (программных средств), достаточным для решения всего перечня текущих задач. Специалист, решая свои задачи, напрямую участвует в формировании цифрового пространства предприятия.
2. Обеспечение коллективного доступа к БД в локальной вычислительной сети предприятия.
3. Создание бесшовной технологии работы с цифровой информацией, что означает доступ к данным и моделям, минуя обменный формат.

Оценивая функционал известных на российском рынке ГГИС можно констатировать, что достигнутый уровень развития в целом соответствует требованиям **Цифрового рудника** - способа представления объектов и процессов горной технологии в виде цифровых моделей, описывающих свойства и поведение реальных объектов в едином цифровом пространстве предприятия.

Следующим этапом цифровой трансформации является **Цифровой двойник**, который можно охарактеризовать как Цифровой рудник, имеющий коммуникационные связи в online режиме между реальными единицами оборудования и их цифровыми моделями. Для создания Цифрового двойника требуется выполнение следующих условий:

- наличие высокоскоростной беспроводной сети Wi-Fi, покрывающей пространство ведения горных работ;
- использование технологии промышленного интернета вещей, обеспечивающей взаимодействие технологического оборудования как между собой, так и с центром управления работой этого оборудования;
- наличие цифровых двойников оборудования, обеспечивающих их интеграцию в цифровые двойники технологических процессов добычи и транспортирования горной массы.

Переход горнодобывающего предприятия на цифровую технологию управления производством является необходимым условием повышения его конкурентоспособности. При этом важным вопросом цифровой трансформации горной промышленности является обеспечение технологической независимости отрасли, которая невозможна без развития российского программного обеспечения, особенно в таком критически важном классе, как ГГИС. При этом следует заметить, что развитие отечественных цифровых технологий - это не только ответственность разработчиков, но и встречное движение пользователей, делающих выбор в пользу отечественных или импортных решений.

КОСМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫМИ РИСКАМИ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ РЕГИОНАХ

Космические технологии находят многоцелевое практическое применение в недропользовании при решении различных проблем, связанных с информационным обеспечением горных работ для рационального и безопасного использования природных ресурсов.

Совместно с другими методам исследований их внедрение позволяет решать следующие задачи в горном деле:

- актуализация цифровых 2D и 3D карт и планов (картография, топография и геодезия);
- подготовка площадок для инвесторов;
- надзор и контроль строительства наземных инфраструктурных объектов;
- инвентаризация земельного отвода горнопромышленных объектов и создание БД;
- поиск полезных ископаемых и инженерно-геологических структур;
- многорежимный мониторинг природно-техногенных изменений (рельефа, геологии, водного и лесного хозяйств, растительности, почв, снежного покрова и атмосферы);
- допуск к архивной информации;
- оперативная информация по чрезвычайным ситуациям;
- надзор и контроль рекультивации земель.

Научно-технический и инновационный потенциал космической отрасли на потребительском рынке реализуется в виде интегрированных геоинформационных ресурсов на базе международных спутниковых систем. Многократная дистанционная съемка космическими аппаратами с полным покрытием всей поверхности Земли ведется в разных диапазонах электромагнитных волн (видимом, радиоволновом, инфракрасном и ультрафиолетовом). Сбор и анализ геопространственной информации выполняется с помощью интеллектуальных цифровых платформ. Пользователям доступны орбитальные снимки мультимасштабных территорий различного пространственного разрешения: от низкого (>100 м) до сверхвысокого (< 1 м). В целом программные продукты имеют широкий функционал, встроенные облачные сервисы хранения информации и искусственный интеллект, что дает возможность в режиме реального времени производить интерактивную визуализацию, автоматизированную обработку и ретроспективный анализ оцифрованных геопространственных данных по тематическим индексным геоиндикаторам.

Преимуществами методов спутникового дистанционного зондирования с учетом некоторых ограничений являются:

- многоуровневость проблем;
- многозадачность исследований;
- высокотехнологичность и цифровизация;
- актуальность, доступность и информативность геоданных;
- оперативность и интегрированность процессов сбора, анализа и обмена геоданными;
- точность обработки геоданных за счет GPS/ГЛОНАСС-технологий;
- цена.

Приложение космических технологий рассмотрено применительно к Баренцеву Евро-Арктическому горнопромышленному региону РФ, на примере которого показаны потенциальные возможности данного метода при управлении природно-техногенными рисками в обеспечении промышленной и экологической безопасности.

М. В. Мелихов

Горный институт КНЦ РАН, г. Анатиты, Россия, e-mail: m.melikhov@ksc.ru

КОСМИЧЕСКИЙ РАДАРНЫЙ МОНИТОРИНГ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Космический радарный мониторинг имеет положительный опыт внедрения в горной промышленности.

Приложение данного метода на базе прикладных геоинформационных ресурсов позволяет дистанционно обнаружить потенциально опасные природно-техногенные геодинамические изменения земной поверхности на мультимасштабных территориях горнопромышленных комплексов.

Метод нашел практическое применение в решении следующих задач:

- создание высокоточных 3D цифровых моделей рельефа (DEM) по данным стерео- (анализ амплитуд) или интерферометрических съемок (анализ фаз);
- мониторинг смещений и деформаций наземных капитальных объектов и сооружений в районах ведения горных работ (борта карьеров, промплощадки, отвалы, гидротехнические сооружения, здания, подрабатываемые подземными рудниками объекты и др.) на основе построения 3D цифровых карт (DEM) и графиков смещений земной поверхности с точностью измерений ≥ 0.1 мм;
- картирование и инвентаризация деформаций наземных горных объектов и сооружений (уступов, бортов и отвалов) с определением точных метрических характеристик;
- картирование горных объектов и сооружений на основе диэлектрических характеристик отражающих поверхностей (влажности, подмораживания / оттаивания, солесодержания, металлосодержащих материалов и др.);
- вычисление скоростей движения наземных объектов (геологические процессы, ледники, горная техника и др.) на основе построения интерферометрии маршрутов.

Метод спутниковой радарной интерферометрии (SAR-метод) использует эффект интерференции электромагнитных волн и основан на математической обработке последовательных когерентных амплитудно-фазовых измерений со сдвигом в пространстве. Радиолокационная съемка космическими аппаратами ведется на всей поверхности Земли с периодичностью каждые 1÷12 дней и не зависит от климатических условий. Радарные спутниковые геоданные могут быть верифицированы и интегрированы в наземные системы натурных наблюдений с помощью прикладных цифровых платформ.

Приведен пример практического применения метода спутниковой радарной интерферометрии на базе европейской спутниковой системы ESA Sentinel-1 применительно к одному из крупнейших отечественных железорудных горнопромышленных комплексов с целью оценки рисков развития опасных геодинамических процессов на его территории в обеспечении промышленной безопасности при ведении открытых горных работ.

Л. С. Миков, С. Е. Попов

ФИЦ ИВТ, г. Кемерово, Россия, e-mail: mikov@ict.sbras.ru, popov@ict.sbras.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА РАЗРЕЗЕ «ПЕРВОМАЙСКИЙ» ПО ДАННЫМ SENTINEL-1⁵

В работе рассмотрены вопросы оценки состояния и изменения земной поверхности на территории разреза «Первомайский» (Кемеровская область) за 2020 год. Продемонстрировано применение многопроходной серии спутниковых радарных данных Sentinel-1 с использованием метода интерферометрии малых базовых линий (SBaS) для определения динамики смещений земной поверхности с помощью построенных карт вертикальных смещений.

⁵ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-47-420002 p_a

В настоящее время Кузбасс является одним из крупнейших горнопромышленных регионов в России. Высокая техногенная нагрузка, связанная с ежегодным увеличением объемов угледобычи, ведет к перераспределению напряженно-деформируемого состояния значительных объемов горной массы с неблагоприятными последствиями для окружающей природной среды [1]. Деформации земной поверхности в подобных регионах, возникающие вследствие неравномерных оседаний и горизонтальных сдвижений горных пород, достигают больших по протяженности территорий и являются источником аварийных ситуаций, которые, в свою очередь, могут нанести вред не только окружающей среде и режиму работы предприятия, но также и человеческим жизням.

На разрезе «Первомайский» осуществляется активная добыча угля открытым способом. Так, например, в 2012 году было добыто 2 млн т угля, а в 2018 году – уже 6,5 млн т [2]. Такая интенсивная добыча оказывает непосредственное влияние на рельеф, поэтому для предупреждения чрезвычайных ситуаций необходимо проводить мониторинг состояния земной поверхности.

Сегодня для определения деформаций земной поверхности активно используются спутниковые радиолокационные данные. Преимущество их заключается в относительно небольшой цене за квадратный километр, а также независимость съемки от погодных условий и времени суток. Для обработки таких данных были разработаны 3 основных метода:

- дифференциальная интерферометрия (DinSAR). Используется для обработки двух изображений;

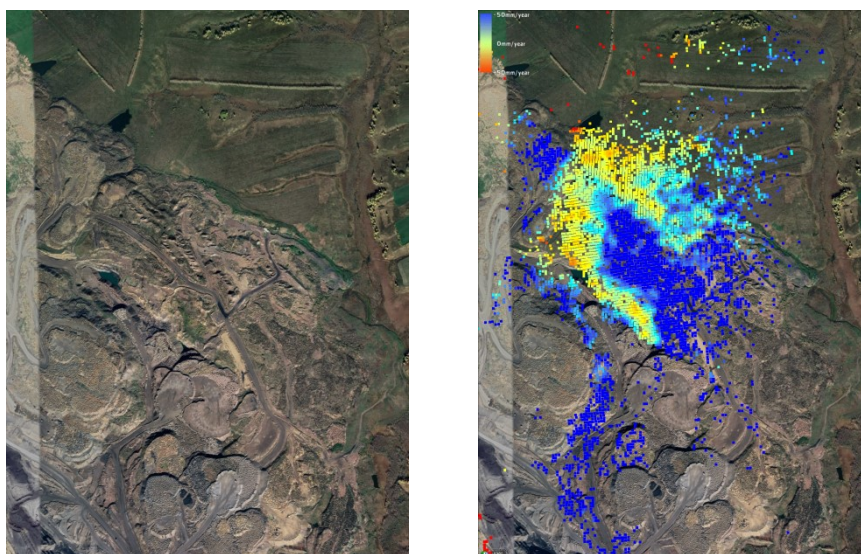
- метод постоянных отражателей (PS). Используется для точечной оценки деформаций на основе многопроходной серии изображений;

- метод малых базовых линий (SBaS). Используется для площадной оценки деформаций на основе многопроходной серии изображений.

В нашей работе мы использовали последний метод, так как он позволяет выявить динамику площадных деформаций земной поверхности за длительный период времени.

В качестве объекта исследования была выбрана северная часть разреза «Первомайский» (рис 1). Для расчетов было отобрано 31 радиолокационное изображение с космического аппарата Sentinel-1В за период с 01.01.2020 по 07.01.2021гг. с периодичностью съемки 12 дней. Вся обработка проводилась в разработанном программном комплексе в рамках выполнения проекта РФФИ. Для более точной корегистрации радарных изображений использовалась цифровая модель рельефа SRTM.

В ходе обработки исходных изображений методом SBaS была построена карта средних скоростей изменения вертикальных смещений земной поверхности (рис.). Данная карта представляет собой векторный файл с 8198 точками. Каждая точка содержит набор атрибутов, например, географические координаты, значение средней скорости смещения, значение когерентности и т.п. Синим цветом выделены точки с отрицательными вертикальными смещениями со значениями более -50 мм/год, означающие просадки земной поверхности, красным со значениями более +50 мм/год – поднятия земной поверхности.



Слева - район исследования (подложка Google Maps), справа - карта средних скоростей изменения вертикальных смещений

Минимальное значение средней скорости смещений составило -394 мм/год, максимальное +208 мм/год. Большие области синего цвета на рисунке 2 соответствуют местам активной добычи угля, а области желтого и оранжевого цветов – горным отвалам, где активно складывается добытая горная порода.

Таким образом, использование радарных данных с космического аппарата Sentinel-1 целесообразно для задач мониторинга состояния земной поверхности, особенно в районах с интенсивными горными работами. Полученные результаты могут стать основой для разработки систем мониторинга и мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций как на территории карьера, так и близлежащих районах.

Список использованных источников

1. Мухихин В. В. Мониторинг процессов оседаний земной поверхности в районах интенсивного недропользования на основе интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования: дис. ... канд. техн. наук. Пермь. – 2012. 146 С.
2. СДС-Уголь [Электронный ресурс].-2018.-URL: <http://sds-ugol.ru/struk/pret/> (дата обращения 05.04.2021)

М. Г. Мустафин

*Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: Mustafin_MG@pers.spmi.ru*

ПЕРСПЕКТИВЫ ЦИФРОВИЗАЦИИ МАРКШЕЙДЕРСКО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ РАБОТ

Развитие компьютерных технологий и маркшейдерско-геодезических приборов создает новые возможности для качественного роста повышения безопасности и эффективности горных работ. Речь идет о переходе делопроизводства на модельный и информационно-ориентированный подход или включение BIM-технологии в производство маркшейдерско-геодезических работ.

В последние годы цифровизация различных процедур, создание клонов реального процесса позволила визуализировать и анализировать на моделях конкретный вид работ.

Последовательность развития компьютерных технологий делопроизводства можно выразить следующей цепочкой: автоматизация и визуализация расчетов, создание специализированных программ и программных комплексов, ГИС и BIM –технологии.

В соответствии с национальным стандартом РФ (ГОСТ Р 57563 2017/ ISO/TS 12911:2012, Моделирование информационное в строительстве) информационное моделирование зданий и сооружений (building information modelling, BIM), - это процесс создания и использования информации по строящимся, а также завершенным объектам капитального строительства в целях координации входных данных, организации совместного производства и хранения данных, а также их использования для различных целей на всех этапах жизненного цикла.

Более конкретное руководство применения информационного моделирования зданий и сооружений приводится в Своде правил «Организация строительства» (СП 48.13330.2019). В этом документе дано определение, что есть информационная модель объекта - это совокупность взаимосвязанных сведений, документов и материалов об объекте капитального строительства или линейном объекте, формируемых в электронном виде на этапах выполнения инженерных изысканий, осуществления архитектурно-строительного проектирования, строительства, реконструкции, капитального ремонта, эксплуатации и (или) сноса объекта капитального строительства. Там же дана формулировка понятия «научно-техническое сопровождение» (НТС), которое состоит в комплексе работ научно-аналитического, методического, информационного, экспертно-контрольного и организационного характера, осуществляемых специализированными организациями в процессе изысканий, проектирования и возведения объектов (строительства) для обеспечения качества строительства, надёжности (безопасности, функциональной пригодности и долговечности) зданий и сооружений, с учётом применяемых нестандартных проектных и технических решений, материалов, конструкций и технологий.

В Своде правил «Основания зданий и сооружений» (СНиП 2.02.01-83) приводится описание инженерно цифровой модели местности (ИЦММ): форма представления инженерно-

топографического плана в цифровом объектно-пространственном виде для автоматизированного решения инженерных задач и проектирования объектов строительства. ИЦММ состоит из цифровой модели рельефа и цифровой модели ситуации.

Все приведенные официальные формулировки подчеркивают важность, а главное эффективность применения цифровизации в производстве любых видов работ.

В чем суть и преимущества цифровизации и ВМ–технологии? Под цифровизацией понимается не просто перевод в «цифру» всех процессов, но и обеспечение их эффективного использования. Для этого разрабатываются модель и база данных объекта, управляющая программа для моделирования того или иного сценария развития горных работ, что собственно и позволяет принять наиболее правильное решение. При этом необходимо иметь ПК по моделированию НДС массива горных пород, наличие упорядоченных информационных модулей по нормативно-методической документации, регламентирующей тот или иной вид работ, адаптированный в базу данных.

Применительно к производству маркшейдерско-геодезических работ современное состояние можно считать как начало создания ВМ–технологии. Современные цифровые карты и планы - это основа для создания моделей и баз данных. 3D модели обеспечивают эффективность планирования горных работ, подсчета запасов, учета геологических особенностей, но главное - выделение зон и их классифицирование, в зависимости от которых применяются меры по безопасному ведению горных работ в этих зонах. Информационное моделирование обеспечивает соблюдение нормативно-правовых актов при ведении горных работ. Специальные маркшейдерско-геодезические наблюдения создают систему контроля всех параметров системы «Здание», «Шахта», «Карьер» и др. В купе эти модели, снабженные базой данных, и система контроля представляют собой ВМ–технологию.

В связи с тем обстоятельством, что ВМ–технология производства маркшейдерско-геодезических работ создается на годы, она содержит важные с наличием результатов интеллектуальной собственности данные, то конечно, ее разработка должна быть сугубо отечественной.

Наработки для создания ВМ–технологии имеются. Например, программный комплекс по моделированию НДС массива горных пород «НЕДРА».

О. В. Наговицын, А. В. Степачева

Горный институт КНЦ РАН, г. Анапты, Россия,

e-mail: o.nagovitsyn@ksc.ru, stepacheva@mineframe.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Цифровые двойники самых разнообразных объектов: машин, зданий, процессов производства, городов и многих других вошли в практику отраслей промышленности и решают вполне реальные задачи. Цифровой двойник представляет собой виртуальную копию реального объекта, имеющую связь с реальным объектом посредством датчиков, сетевых средств связи – промышленного интернета вещей, специального ПО.

С помощью цифрового двойника можно управлять основными характеристиками изделий, технологическими и производственными процессами и проигрывать различные ситуации без риска и вмешательства в реальное производство.

Определений этого понятия можно найти довольно много. Возьмём за основное следующее: цифровой двойник – это набор компьютерных имитационных моделей, позволяющих виртуально проектировать, проверять и оптимизировать детали, изделия и технологические процессы. Делать это нужно оперативно и с максимальным приближением к реальному объекту. Цифровые двойники используют данные с датчиков, установленных на реальных объектах. Это позволяет представлять их состояние, режим работы или расположение практически в реальном времени.

Основное отличие цифрового двойника месторождения твёрдых полезных ископаемых (ЦДМТП) от других промышленных цифровых двойников состоит в том, что процесс поддержания двойника в актуальном состоянии означает не только мониторинг его изменения в процессе отработки его части, а в получении новых сведений о неотработанной части. Таким образом, главная

функция ЦДМТП заключается в уточнении наших представлений о месторождении и использовании этих данных в дальнейшей отработке запасов. Другой особенностью формирования ЦДМТП является то, что в процессе его актуализации задействованы люди, вовлеченные в процесс сбора и обработки данных опробования, их интерпретации и корректировки геологической модели.

Для выполнения этих задач необходим комплекс автоматизированных инструментов ГГИС для поддержания ЦДМТП в актуальном состоянии. Можно выделить несколько функциональных блоков, задействованных в этом процессе:

- Инструменты пополнения базы данных опробования (от бурения и координатной привязки до лабораторного опробования и внесения данных в БД).
- Средства для каркасного моделирования, позволяющие модифицировать часть триангуляционной сети поверхности геологических объектов.
- Средства блочного моделирования, модифицирующие часть блочной модели, интерполяционные методы пересчета качественных показателей.

ГГИС MINEFRAME соединяет и структурирует в едином трёхмерном информационном пространстве горно-геологические данные при отработке месторождения твёрдых полезных ископаемых. В ГГИС анализируется и хранится информация о скважинном, бороздовом и шламовом опробовании, качественных показателях полезного компонента в руде, горных выработках, залегании пластов и закладочных работах, формируется план горных работ на основе актуальной геологической информации, содержащейся в ЦДМТП.

Пополнение базы данных опробования в реальном времени возможно с использованием моделей горных выработок и интерактивных инструментов ввода данных опробования. Координаты устьев скважин пополняются по маркшейдерской съёмке. Выделенные кондиционные интервалы полезного ископаемого или литологические типы пород служат исходной информацией для поддержания ЦДМТП.

Технологическое и геологическое моделирование, в том числе и создание цифровых двойников, дают нам возможность повысить качество добываемой руды, уровень производственной безопасности, определить оптимальную стратегию развития горнодобывающего предприятия.

О. В. Наговицын, М. Г. Возняк

*Горный институт КНЦ РАН, г. Анатимы, Россия,
e-mail: o.nagovitsyn@ksc.ru, voznyak@mineframe.ru*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ НА РОБОТИЗИРОВАННОМ ГОРНОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Анализ аварийных случаев и случаев производственного травматизма показывает преобладающую роль человеческого фактора среди причин возникновения данных ситуаций. Однако более детальное рассмотрение причин позволяет сделать вывод, что значительная часть ошибок, совершаемых персоналом, происходит в условиях дефицита информации, часто персонал имеет ошибочное представление об уровне опасности, что становится причиной несчастных случаев. Работа роботизированной системы управления производством основывается на многоуровневом анализе и обмене данными. На основе данных, получаемых от оборудования, находящегося в работе, формируется и пополняется цифровой двойник предприятия и технологических процессов. Это позволяет получить наиболее полное представление об актуальном состоянии горных работ в каждый момент времени и принимать последующие решения исходя из него. Роботизированная система управления производством, основываясь на актуальном состоянии рабочей среды, будет формировать необходимые команды и своевременно передавать их оборудованию, поэтому дефицит информации будет значительно уменьшен и перестанет являться основной причиной возникновения аварийных ситуаций.

Для обеспечения безопасного ведения горных работ, законом «О недрах» предусматривается ряд требований, в большинстве своем, направленных на обеспечение безопасности людей. При использовании роботизированной системы следующие требования станут не актуальными:

- к выполнению работ допускаются только те лица, которые имеют специальную подготовку и квалификацию, а к руководству горными работами лица, имеющие соответствующее специальное образование;

- обеспечение персонала специальной одеждой, средствами индивидуальной и коллективной защиты;
- машины, оборудование и материалы, применяемые в производстве, должны соответствовать требованиям правил безопасности и санитарным нормам;
- выполнение контроля за состоянием рудничной атмосферы, содержанием в ней кислорода, вредных газов и пыли;
- запрещение ведения горных работ, если температура воздуха, содержание в рудничной атмосфере кислорода, вредных газов и пыли не соответствуют требованиям норм и правил безопасности, санитарных норм и правил;
- разработка и проведение мероприятий, обеспечивающих охрану работников предприятий, ведущих работы, связанные с пользованием недрами;

На рисунке приведена диаграмма, отображающая разницу в требованиях к обеспечению безопасности на роботизированном и обычном предприятии.



Требования для обеспечения безопасности горных работ на обычном и роботизированном предприятии

Можно выделить несколько основных этапов в организации и обеспечении безопасных условий ведения горных работ по мере перехода от механизированных технологий добычи к роботизированным комплексам:

1. Текущее состояние – основное внимание уделяется безопасности людей, что обеспечивается в основном регламентированными технологическими и организационными мероприятиями.

2. Переходный период – усиление требований к безопасности людей, так как появляется фактор присутствия в рабочем пространстве вместе с ними роботизированных машин, появление автоматических средств обеспечения безопасной работы.

3. Комплексная роботизация – люди, в целом, выведены из рабочего пространства, их безопасность и безопасность роботов обеспечивается автоматическими средствами.

Для обеспечения безопасных условий работы техники на роботизированном производстве необходимо проведение комплекса геолого-маркшейдерских наблюдений и осуществление специальных мероприятий по прогнозированию и предупреждению внезапных выбросов газов, горных ударов, прорывов воды, обрушений пород, а также управление деформационными процессами горного массива. Для этого необходимо наличие автоматической системы обеспечения безопасности ведения горных работ, реализующей следующие функции:

1. Постоянный геомеханический мониторинг, при котором выявляются критические подвижки массива. В случае возникновения аварийной ситуации каждой единице техники поступит команда о необходимости перемещения в безопасное место.

2. Вся техника, применяемая на карьере, передает в систему данные о своем окружении. Эти данные используются для принятия решения о проведении каких-либо мероприятий по исправлению обнаруженных проблем и предотвращения причин их возникновения. Например, при обнаружении препятствия на дороге одним самосвалом весь следующий по этой дороге транспорт изменит маршрут с учетом этого препятствия.

3. Вся техника на карьере обменивается с системой о статусе выполнения своих работ, система в свою очередь управляет очередностью процессов связанной техники, например взрывание не будет выполнено, если в радиусе опасной зоны находится техника.

4. Постоянное обновление цифровой модели карьера за счет съемки, выполняемой беспилотниками. Такая съемка также позволяет обнаруживать появление на карьере посторонних объектов, людей, животных и т.д.

Полная роботизация горного производства окажет значительное влияние на ведение технологических процессов, что в перспективе потребует и изменения требований к ведению работ, в том числе и требований для обеспечения безопасности. 90% травм и аварий происходит по причине неверных действий персонала. Роботизированная система управления горным предприятием полностью исключит человеческий фактор, как причину возникновения несчастных случаев, и позволит избежать ряда издержек, связанных с устранением последствий аварий на производстве.

Г. О. Наговицын

Горный институт КНЦ РАН, Анапты, Россия, e-mail: Nagovitsyn_go@bk.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ ДЛЯ СПЛОШНЫХ СИСТЕМ РАЗРАБОТОК В ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ MINEFRAME

Из большинства отечественных и зарубежных исследований известно, что планирование горных работ является одним из важнейших вопросов, определяющих последовательность, а также структуру комплексной механизации, применяемую при отработке запасов карьера.

В рамках задачи повышения эффективности перспективного планирования в горно-геологической информационной системе MINEFRAME разработаны алгоритмы и программные средства модуля автоматизированного долгосрочного планирования открытых горных работ для сплошной системы разработки пластовых месторождений.

Модуль позволяет производить сравнительный анализ выбора структуры комплексной механизации на основе имитационного моделирования технологических процессов открытых горных работ.

На основе исходных данных формируется сценарий планирования в зависимости от варианта структуры комплексной механизации: различным типам уступов, характеризующихся технологией их разработки, присваиваются конкретные модели выемочно-погрузочного оборудования в соответствии со схемой расстановки, создаются транспортные цепочки, устанавливается последовательности отработки блоков с заданием углов рабочего борта карьера. Возможно задание трасс для моделирования автомобильных схем транспортирования, а также бестранспортных - с внутренним отвалообразованием.

Сценарий используется, чтобы смоделировать комплекс технологических процессов открытых горных работ так, как они бы происходили в действительности с учетом заданных исходных данных и ограничений с возможностью визуализировать процесс отработки запасов месторождения

Выбор оптимальной структуры комплексной механизации производится на основе анализа получаемых отчетных данных каждого сценария планирования по показателям работы техники и оборудования.

В результате расчета сценария планирования формируются следующие отчеты:

1. Отчет по плану производства горных работ;
2. Отчет по качественным характеристикам;
3. Отчет по провозной способности автосамосвалов;
4. Отчет по ремонтам экскаваторного парка;
5. Отчет по буровзрывным работам.

Таким образом, на основе компьютерного и имитационного моделирования реализованы алгоритмы и программные средства выбора структуры комплексной механизации и моделирования комплекса технологических процессов открытых горных работ, повышающие эффективность перспективного планирования для сплошных систем разработки.

Р. М. Никитин, В. В. Бирюков, Ю. С. Каменева, И. Н. Вишнякова

Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия,

e-mail: remnik@yandex.ru

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ФЛОТАЦИИ СУЛЬФИДНЫХ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД⁶

Перерабатываемые руды Печенгского рудного поля характеризуются низким содержанием сульфидов и относительно стабильным составом рудных и силикатных минералов. В общей шихте, поступающей на обогатительную фабрику АО «КГМК», преобладают вкрапленные руды, среди которых выделены три геолого-технологических типа: рядовые, труднообогатимые (тонковкрапленные) и оталькованные. Флотационное обогащение труднообогатимых руд характеризуется повышенным содержанием никеля в хвостах флотации и неудовлетворительным качеством черного концентрата.

Истощение запасов разрабатываемых месторождений приводит к необходимости вовлечения в переработку бедных труднообогатимых тонковкрапленных медно-никелевых руд, что неизбежно приводит к снижению показателей обогащения. Поэтому поиск путей повышения технологических показателей для данного типа руд является актуальной задачей.

Одним из таких путей является разработка методических основ формирования имитационной модели процесса флотационного обогащения медно-никелевых руд. В настоящее время в Горном институте КНЦ РАН проведены исследования по изучению вещественного состава труднообогатимой тонковкрапленной медно-никелевой руды, определены характеристики ее измельчения. В результате серии лабораторных экспериментов по сокращению крупности проб сульфидной медно-никелевой руды Печенгского месторождения предложен алгоритм имитационной модели измельчения сульфидных медно-никелевых руд, основанный на использовании Гаусса - Лапласа распределения.

Целью данной работы явилось проведение подготовительного этапа разработки и создания алгоритма имитационной модели, состоящего в аналитическом представлении результатов многопараметрических экспериментов по флотации сульфидных медно-никелевых руд. Достижение поставленной цели предполагает использование комплексного подхода, включающего традиционные теоретические представления кинетики флотации, рассматривающей закономерности изменения скорости процесса для общего количественного описания процесса, и выявление аналитического вида зависимостей технологических показателей флотации от ее основных факторов (крупность частиц, расход реагента, аэрация, гидродинамика потока, плотность пульпы). В частности, рассмотрена зависимость результатов флотации сульфидных медно-никелевых руд от содержания в питании флотации класса крупности $-0,071$ мм. Установлено, что величина выхода пенного продукта коррелирует со временем измельчения, подчиняясь экспоненциальной зависимости вида распределения В. Вейбулла, одновременно с тем, что распределение содержания полезного компонента в классах крупности с высоким значением коэффициента детерминации отвечает В(бета) распределению. Тем самым обусловлена возможность получения трехмерной сепарационной характеристики флотации.

⁶ Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР 0226-2019-0063 "Развитие теории переработки стратегического минерального сырья Кольского горнопромышленного комплекса в соответствии с экологической стратегией развития отрасли".

А. С. Опалев, А. А. Паливода

Горный институт КНЦ РАН, г. Анатиты, Россия, e-mail: a.opalev@ksc.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЖИДКОСТЬ – ТВЕРДЫЕ ЧАСТИЦЫ ПРИ СОПРЯЖЕННОМ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ В ROCKY DEM И ANSYS FLUENT

В работе представлены результаты исследований возможности использования сопряженного решения задачи в Rocky DEM и ANSYS Fluent при моделировании систем жидкость – твердые частицы в рабочих объемах аппаратов для сокращения крупности минеральных частиц (мельницах).

Для изучения сопряженного решения задачи программами Rocky DEM и ANSYS Fluent использовалась модель прямоугольного объема со сторонами основания 0,10 и 0,04 м, и высотой 0,30 м, расположенного в поле гравитации. Во входное отверстие вертикально вверх подавался поток воды со скоростью 0,05 м/с. Генерация сферических частиц осуществлялась двумя способами: три частицы с различными физическими свойствами, но одинаковым диаметром 0,03 м и набор 100 частиц для каждого типа материала с диаметром 0,01 м. В частности, для моделирования свойств материала частиц в Rocky использовались предустановленные свойства пенопласта, древесины и алюминия.

Следующий этап работы заключался в установлении возможности исследования движения частиц в потоке жидкой среды в зависимости от физических свойств жидкости (вязкость, плотность) и геометрических (размер) и физических (плотность) свойств частиц.

Использовалась модель вертикальной трубы диаметром 0,2 м и длиной 0,4 м. Во входное отверстие вертикально вверх подавался восходящий поток жидкости. Скорость потока может варьироваться от задаваемых свойств жидкости и твердых частиц. Диаметр сферических частиц варьировал в пределах 5-20 мм. В качестве жидкой фазы в задаче использовались вода и глицерин, что обусловлено значительными различиями их плотностей и вязкости.

В результате вычислительных экспериментов удалось реализовать сопряжённое решение задачи программами Rocky DEM и ANSYS Fluent и получить компоненты скорости и координаты каждой частицы относительно пространственных осей, а также установить траектории частиц в течение времени моделирования. Получено графическое изображение процесса взаимодействия восходящего потока жидкости с твердыми частицами.

И. А. Осипова

Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия, e-mail: minesur@mail.ru

ПОСТРОЕНИЕ ИНДУСТРИАЛЬНОГО ГРАФА ЗНАНИЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ДОБЫВАЕМОГО УГЛЯ⁷

Рациональное использование запасов угля как невозполнимого минерального ресурса обуславливает необходимость управления его качеством. Важно также отметить, что качество углей является приоритетом в международной торговле [1]. Международное энергетическое агентство в 2021 году ожидает оживления и роста угольной генерации в мире на 3% после самого большого в истории падения на 5 % по итогам 2020 года, следует из отчета агентства [2].

Несмотря на низкий уровень требований отечественной энергетики к качеству потребляемых углей, проблема совершенствования управления качеством при их добыче, как способа повышения эффективности использования минерально-сырьевого потенциала месторождений, является актуальной для современной горной промышленности [2].

Горнодобывающее предприятие должно выполнить основную задачу - не только сохранить заложенное природой качество горной продукции, но и обеспечить постоянство этого качества. Причем постоянство качества должно быть обеспечено как в определенных объемах добычи (суточной, сменной), так и в отгружаемых потребителю партиях. Средние значения показателей качества по месторождению, как правило, известны благодаря геологоразведочным данным. Именно

⁷ Программа ФНИ государственных академий наук Тема 1 - Методы учета переходных процессов технологического развития при освоении глубокозалегающих сложно-структурных месторождений полезных ископаемых. (№ 0405-2019-0005).

это качество сырья стремится обеспечить горнодобывающее предприятие, и на эти значения показателей качества настроена технология потребителя. Однако в объеме месторождения качество сырья может заметно меняться. Это является причиной колебаний качества в потоке добытого сырья, избежать этих колебаний невозможно [3].

На сегодняшний день разработаны и внедряются на горных предприятиях автоматизированные системы управления количеством и качеством угля в режиме онлайн измерения и анализа (АСУККУ) [4]. В этой системе рассматривается процесс управления угледобычей, где сравнивается и определяется геолого-маркшейдерская информация качества угля для отдельных пластов. В свою очередь в процессе добычи она может отличаться от плановой. Помимо этого в системе встраивается функционал, позволяющий отказаться от усреднения расчета показателей добываемого угля.

На практике реализации автоматизированных систем управления количеством и качеством угля в режиме онлайн измерения и анализа горные инженеры сталкиваются с проблемой состава, достоверности, полноты, периодичности информации, а также способах и технических средствах ее сбора, что в определенных случаях не позволяет принять тактическое решение.

Здесь предлагается применить современный подход для процесса принятия решений в режиме реального времени. Это создание индустриального графа знаний. Индустриальные графы знаний (industry knowledge graphs) показывают преимущества онтологического подхода, обеспечивающего гибкое моделирование и интероперабельность данных, стек семантических технологий, позволяющий выполнять анализ неструктурированной информации и интеллектуальный поиск данных во множестве разнородных источников, а также машинное обучение, обеспечивающее анализ и классификацию данных, в т.ч. в условиях неполной информации [5, с. 32].

Создание индустриального графа знаний (industry knowledge graphs) в режиме реального времени позволит проводить мониторинг происходящих процессов.

Список использованных источников

1. Фрейдина Е. В., Ботвинник А. А., Дворникова А. Н. Системный подход к развитию управления качеством угольной продукции // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. - № 6. С. 13-24.
2. МЭА прогнозирует рост добычи угля в 2021 году: [сайт]. URL: https://prime.ru/Financial_market/20201214/832574767.html (дата обращения: 28.03.2021 г.).
3. Васильев С. Б., Демченко И. И. Повышение объективности оценки колебаний качества горной продукции // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies4. - 2013 - № 6. С. 403-411.
4. Автоматизированные системы управления количеством и качеством угля АСУККУ. Использование онлайн анализа: [сайт]. URL: <https://www.enelex.cz> (дата обращения: 30.03.2021 г.).
5. Муромцев Д., Волчек Д., Романов А. Индустриальные графы знаний – интеллектуальное ядро цифровой экономики // ControlEngineering Россия. - 2019. - Т. 5. - № 83. - С. 32-39.

И. А. Осипова

Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия, e-mail: minesur@mail.ru

СЦЕНАРИИ ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОЦЕССА УГЛЕДОБЫЧИ⁸

В современных условиях горнодобычи все больше функций производственных, управленческих и других переходит от человека к роботам. Цифровые технологии повышают эффективность разработки месторождений, оптимизируют технологические и производственные цепочки, повышают безопасность горных работ, упрощают логистику на добывающих предприятиях по всей стране [1].

⁸ Программа ФНИ государственных академий наук Тема 1 - Методы учета переходных процессов технологического развития при освоении глубокозалегающих сложно-структурных месторождений полезных ископаемых. (№ 0405-2019-0005)

Цифровизация постепенно приходит и в угольную промышленность. В ее основе лежит концепция «цифрового горного предприятия», в которую входят как внедрение новейших технологий типа роботов, искусственного интеллекта, автоматизированных систем, так и интеграция всего этого с бизнес-приложениями. Характерным тому примером является работа «умного» угольного пласта. Он способен передавать исполнительному органу угольного комбайна данные о своих текущих размерах и прочностных характеристиках, о наличии в нем нежелательных твердых включений и других значимых для угледобычи параметров. В соответствии с этой информацией в режиме реального времени автоматически могут меняться методы работы комбайна: например, наклон резцов, скорость подачи исполнительного органа комбайна, вектор его перемещения по плоскости очистного забоя. Обмениваясь информацией с машиной, угольный пласт указывает маршрут и транспортные средства, необходимые для доставки угля в требуемую точку к требуемому времени для начала следующего производственного цикла. Кроме того, все машины и оборудование, применяемые на горном предприятии, оснащенные соответствующим программным обеспечением, могут подавать сигналы об износе тех или иных деталей и автоматически заказывать нужные запасные части через Интернет. Одним из пионеров цифровизации является Сибирская угольная энергетическая компания (СУЭК). На ее предприятиях действуют автоматические диспетчерские на шахтах и угольных разрезах, автоматические системы поддержания оптимальных технологических параметров в процессах на обогатительных фабриках, в портах. Кроме того, там работает и целый комплекс интеллектуальных систем – это и подземный Wi-Fi, позволяющий не только четко координировать работы, но и обеспечить высокую степень безопасности занятого на подземной добыче персонала, и встраиваемые в светильники на касках датчики метана, и функциональные 3D-модели всех шахт, и различные тренажеры-симуляторы для подготовки сотрудников. Компания получает государственную поддержку на свои проекты: например, возмещение затрат на создание объектов инновационной инфраструктуры в рамках проекта по увеличению добычи угля в Хабаровском крае. Аналогичные технологии работают и в шахте «Распадская-Коксовая» компании «ЕВРАЗ». Подземная сеть Wi-Fi в режиме online контролирует все идущие там работы [2].

Другим направлением цифровизации угольной отрасли является внедрение автоматизированных систем контроля и управления технологическими объектами шахты (АСКУ ТО). К ним можно отнести систему контроля и управления конвейерными линиями; систему контроля и управления канатно-кресельной дорогой; систему шахтной стволовой сигнализации; систему контроля и управления водоотливной установкой; системы наблюдения, оповещения и поиска персонала; систему контроля и управления вентиляторами главного проветривания; систему аэрогазового контроля; систему диспетчерского управления электроснабжением шахты. Все это уже успешно работает на таких шахтах Кузбасса как «Алардинская», «Грамотеинская», «Осинниковская», «Сибиргинская». С 2017 года на Солнцевском угольном разрезе используется автоматизированная система управления горнотранспортным комплексом, которая в режиме реального времени отслеживает работу всей техники на предприятии. Получая данные с датчиков, установленных на каждой машине, она анализирует обстановку на рабочих площадках и подает команды водителям и машинистам перестроиться под более оптимальный режим работы. Прорабатывается вопрос об организации безлюдных шахт. Лава с «безлюдной выемкой угля» уже работает на кузбасской шахте «Польсаевская». Вся работа осуществляется специальным программным обеспечением, которое благодаря многочисленным датчикам, установленным в нужных местах, способно управлять основными угледобывающими операциями: движение угольного комбайна, установка секций крепи забоя, добыча угля и погрузка его на транспортеры [2].

На сегодняшний день в России компанией «ВИСТ Групп» при научно-методическом сопровождении ИПКОН РАН на решение вопросов повышения эффективности и безопасности открытых горных работ была разработана система «Интеллектуальный карьер». Она решает следующие задачи:

1. Роботизированная перевозка самосвалами горной массы по фиксированному маршруту между стационарными пунктами погрузки-разгрузки в заранее заданном режиме.
2. Роботизированная перевозка самосвалами горной массы между экскаваторами и пунктами разгрузки, без оснащения дистанционным управлением экскаваторов и другой техники.
3. Роботизированная перевозка самосвалами горной массы с использованием дистанционно управляемой техники.
4. Роботизированная перевозка самосвалами горной массы в соответствии с разработанным программным обеспечением без участия оператора [2].

На мировом рынке многие компании предлагают свои решения в области цифровых технологий на горнодобывающем предприятии. Например, компания АВВ предлагает повышение эффективности производства, а именно рассмотрения процесса отработки начиная с разведки месторождения и заканчивая анализом производства.

Список литературы

1. С роботом в карьер [Электронный ресурс] <https://www.google.com/amp/s/rg.ru/amp/2020/04/28/rossijskie-dobyvaiushchie-predpriatiia-vnedriaiut-cifrovye-tehnologii.html> URL: <https://www.google.com/amp/s/rg.ru/amp/2020/04/28/rossijskie-dobyvaiushchie-predpriatiia-vnedriaiut-cifrovye-tehnologii.html> (дата обращения: 07.05.2020)
2. Цифровые технологии в производстве [Электронный ресурс] URL: https://business71.ru/fn_31258.html

С. П. Остапенко, С. П. Месяц

Горный институт КНЦ РАН, г. Анапты, Россия,

e-mail: s.ostapenko@ksc.ru, s.mesyats@ksc.ru

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Значительные площади природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, обуславливают целесообразность дистанционного мониторинга, в том числе с использованием данных мультиспектральной спутниковой съемки, обеспечивающей возможность изучения процессов их восстановления по изменению спектральных отражательных характеристик поверхности Земли, например, по соотношению интенсивности отражения солнечного излучения в красном и инфракрасном диапазонах, характеризующему вегетационный индекс. Однако в области тени при отсутствии прямого солнечного освещения расчет вегетационного индекса неточен, что требует изучения условий затенения поверхности при спутниковой съемке и возможности корректировки вегетационного индекса восстанавливаемых природных экосистем.

Исследование условий затенения подстилающей поверхности проводилось по цифровой модели рельефа с учетом азимута Солнца в момент спутниковой съемки космическим аппаратом Sentinel-2 на примере ограждающей дамбы складированных отходов обогащения апатитсодержащих руд Хибинской группы месторождений в ходе мониторинга восстановления природных экосистем в соответствии с принципом их самоорганизации по разработанной в Горном институте КНЦ РАН технологии (рис. 1).

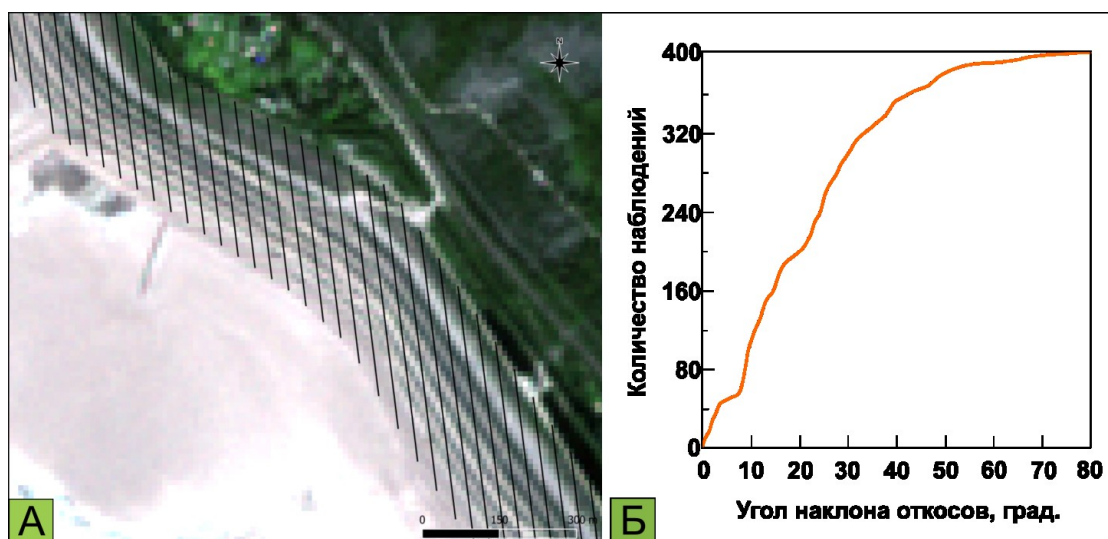


Рис. 1. Расчетные условия затенения ограждающей дамбы складированных отходов рудообогатения при спутниковой съемке в период максимальной вегетации (конец июля – начало августа):

А – расположение линейных трансект на дамбе; Б – распределение угла наклона откосов дамбы по профилю трансект

Частичное затенение ограждающей дамбы при спутниковой съемке обусловлено малой высотой Солнца над горизонтом ($\sim 40^\circ$), сравнимой с максимальным углом наклона откосов (рис. 1, Б). Формирующийся лесной фитоценоз и низкое расположение источника излучения над горизонтом способствуют дополнительному затенению откосов. Так, в случае угла наклона откосов более 30° (25 % наблюдений, рис. 1, Б), длины тени и откоса, как показывают расчеты, сравнимы.

Для учета влияния затенения на спектральные отражательные характеристики по спутниковым снимкам изучена корреляция вегетационного индекса природного ландшафта с суммарной яркостью в видимом и инфракрасном диапазонах в условиях прямого солнечного освещения и в тени облаков нижнего яруса (рис. 2, А).

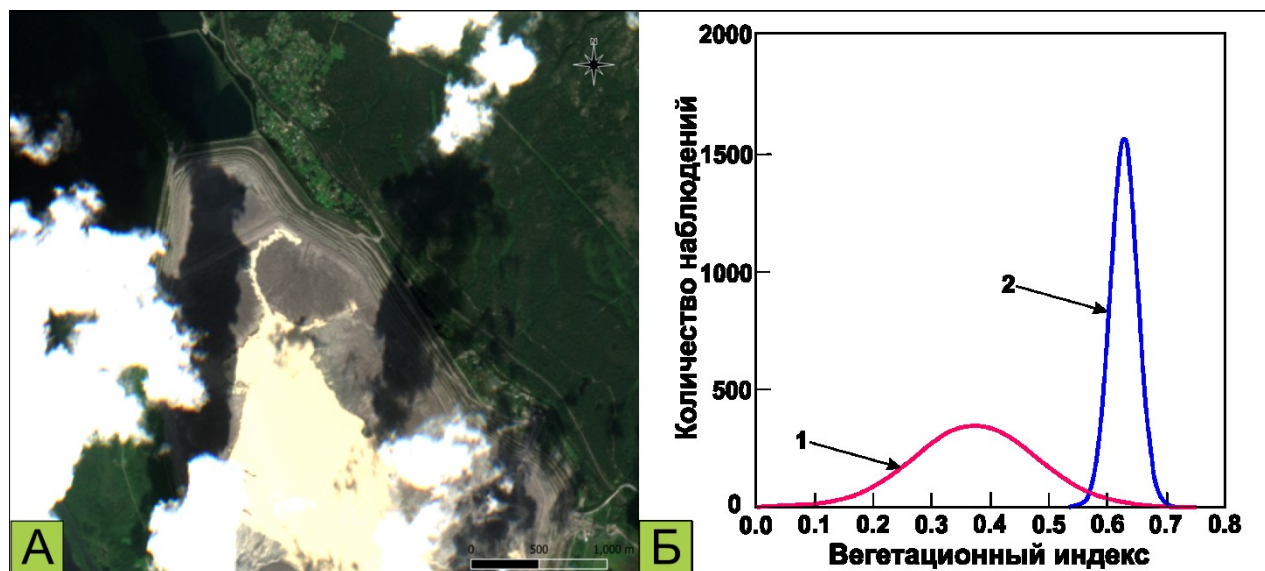


Рис. 2. Влияние условий освещения на вегетационный индекс формирующегося фитоценоза (по данным спутниковых наблюдений в июле 2020 г.):

А – изменение яркости подстилающей поверхности в тени облаков на спутниковом снимке; Б – корректировка вегетационного индекса формирующегося лесного фитоценоза на мониторинговом полигоне с учетом условий освещения: 1 и 2 – функции плотности распределения до и после корректировки вегетационного индекса, соответственно

Линейная зависимость вегетационного индекса природного ландшафта от суммарной яркости в видимом и инфракрасном диапазонах использована для корректировки вегетационного индекса лесного фитоценоза, формирующегося на ограждающей дамбе складированных отходов рудообогатения при реализации разработанной в Горном институте технологии восстановления природных экосистем (рис. 2, Б). Установлено, что вегетационный индекс формирующегося лесного фитоценоза на мониторинговом полигоне (0.63) составляет $\sim 90\%$ индекса фитоценоза окружающего природного ландшафта (0.73), что соответствует актуальному состоянию процесса восстановления природных экосистем.

А. А. Панжин

Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия, e-mail: panzhin@igduran.ru

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ

Вопрос возможности исследования современных геодинамических движений с использованием данных деформационного мониторинга, проводимых как в режиме дискретных наблюдений на пунктах геодезических и маркшейдерских сетей, так и с использованием данных постоянно действующих геодезических станций, неоднократно рассматривался в связи с исследованием

современной геодинамики Уральского региона, вызванной как естественными, так и техногенными факторами.

Определение цикловых пространственных координат наблюдательных пунктов и их изменений во времени осуществляется, в зависимости от размеров сетей, методами Precise Point Positioning для больших сетей, и классическими методами Double Difference для локальных сетей. Также эти методы могут использоваться в комбинации, как для расчета и уравнивания геодезической сети, так для привязки локальных и региональных геодезических построений к международной геодезической сети.

Важным аспектом при исследовании и визуализации современных геодинамических движений является моделирование природных, техногенных и экологических систем, которое позволяет выявить многие необходимые для их анализа свойства и характеристики, в том числе скрытые закономерности их пространственно-временного распределения. При этом многое зависит от исследования, адекватного объекту и его компонентам: идентификации и визуализации как количественной, так и качественной пространственно-временной информации.

Также визуализация геодинамических движений по результатам цикловых геодезических измерений позволяет более обоснованно выделять активные геологические структуры, блоки, тектонические разломы, что необходимо для прогнозирования мест возможных сейсмических событий и принятия профилактических мер для обеспечения безопасности населения, промышленных объектов и др.

В качестве ключевого источника информации о геодинамических движениях по результатам мониторинговых измерений, проводимых на больших пространственно-временных базах, целесообразно использовать не абсолютные значения величин векторов сдвижений наблюдательных пунктов, а их скорости, приведенные к годовому циклу. Приведение скоростей к годовому циклу необходимо при проведении мониторинговых измерений по нерегулярным по времени цикловым измерениям для приведения результатов к общей пространственно-временной базе.

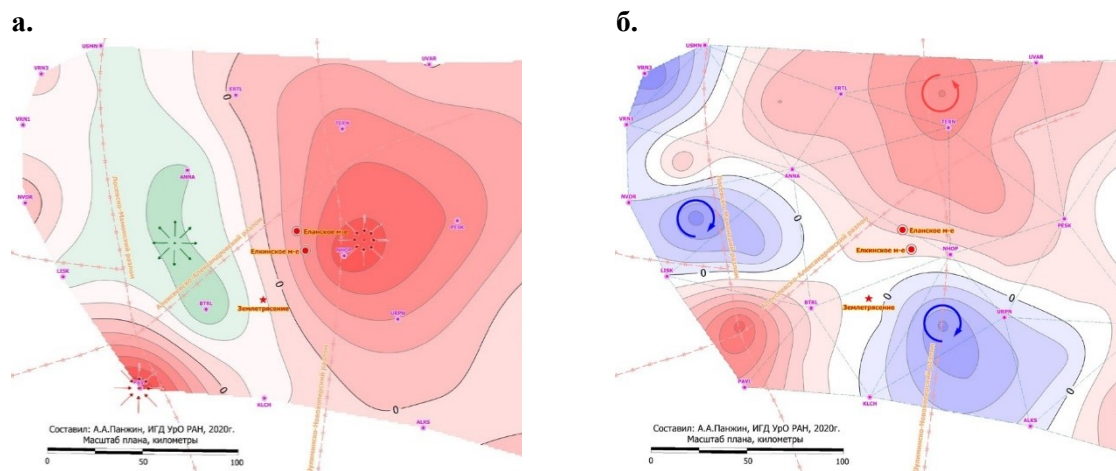
С целью идентификации современных геодинамических движений по результатам цикловых геодезических измерений, дополнительно к векторам сдвига и поля тензоров деформаций, предложено использовать характеристики векторного поля: дивергенцию и ротор.

Дивергенция позволяет дифференцировать области массива по параметру источников и стоков векторного потока: сходящийся векторный поток формирует области преимущественного объемного сжатия, расходящийся – области депрессии. Ротор поля определяет величину и направление вращательных движений геоблоков.

Дивергенция – одна из часто используемых дифференциальных характеристик векторного поля, представляющая собой одно число (скаляр), относящееся к определенной точке. Векторное поле в целом описывается скалярным полем дивергенции, которая отражает изменение величины векторов в непосредственной близости от рассматриваемой точки во всех направлениях. Дивергенция относится к числу объемных производных векторного поля. Для векторного поля на двумерном пространстве вычисление дивергенции отражает местоположение вершин и впадин на картине градиентов (направлений наискорейшего спуска). На вершинах дивергенция положительна, во впадинах соответственно – отрицательна.

Вторая характеристика векторного поля, используемая для оценки вихревых поверхностных движений, – ротор поля. Ротор, наряду с дивергенцией, является дифференциальной характеристикой векторного поля движений. В качестве образа ротора можно использовать представление о вращении брошенной в поток маленькой пылинки (увлекаемой потоком с собой, без его заметного возмущения) или о вращении помещенного в поток с закрепленной осью маленького (без инерции, вращаемого потоком, заметно не искажая его) колеса с прямыми (не винтовыми) лопастями. Если то или другое при взгляде на него вращается против часовой стрелки, то это означает, что вектор ротора поля скорости потока в данной точке имеет положительную проекцию в направлении на нас.

Методы и алгоритмы определения дивергенции и ротора поля опробованы на основании реальных данных мониторинговых наблюдений за скоростями современных геодинамических движений, выполненных в 2019-2020 гг. на полигоне Воронежского кристаллического массива (рис.).



Дивергенция (а) и ротор (б) векторного поля территории геодинамического полигона Воронежского кристаллического массива

Таким образом, с целью идентификации современных геодинамических движений по результатам цикловых геодезических измерений предложено использовать характеристики векторного поля: дивергенцию и ротор. Дивергенция позволяет дифференцировать области массива по параметру источников и стоков векторного потока: сходящийся векторный поток формирует области преимущественного объемного сжатия, расходящийся – области депрессии. Ротор определяет величину и направление вращательных движений геоблоков. По этим параметрам на основании геоинформационного моделирования выделяются активные геологические структуры, консолидированные геоблоки, области сжатия и депрессии - для прогнозирования мест возможных сейсмических событий и обоснования профилактических мер по обеспечению безопасности населения, промышленных объектов и др.

Б. Н. Пашичев

*Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: borisnik-pa@yandex.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКОПАЕМЫХ УГЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОЙ ОЦЕНКИ ИХ МИКРОСТРУКТУРЫ ПО МЕТОДУ «ЭНТРОПИЯ-СЛОЖНОСТЬ»

В настоящее время в связи с отработкой всё более глубоко залегающих угольных пластов возрастают частота и сила проявления таких газодинамических явлений (ГДЯ) как внезапные выбросы и горные удары, что создаёт проблемы безопасности ведения горных работ. Существуют различные теории, объясняющие формирование ГДЯ, однако, согласно общепринятой, опасность возникновения газодинамических явлений в шахтах определяют три основных природных фактора: горное давление; газоносность и давление газа в массиве горных пород и свойства самого массива (геологическое строение, тектоническая нарушенность, физико-механические свойства). В нашей работе исследуется влияние последнего фактора – микроструктурных особенностей, нарушенности, неоднородности строения угля [1–3].

Исследование структуры угля связано с концепцией иерархической нарушенности геоматериалов. Исходя из предположения, что неоднородность, хаотичность структуры углей находит своё отражение в рельефе поверхности изломов угольных образцов, при исследовании особенностей их микроструктуры нами использовалась информация, полученная по цифровым снимкам поверхности угольных образцов, сделанных сканирующим электронным микроскопом, с тысячекратным увеличением (рис. 1).

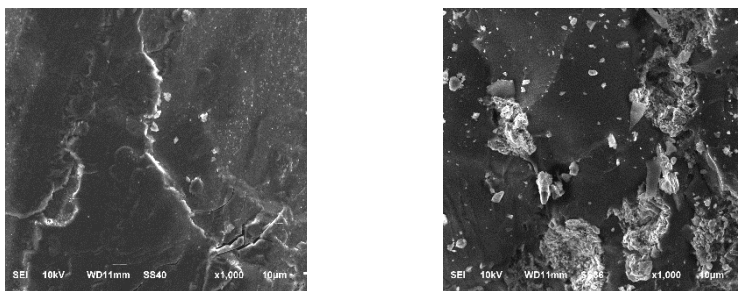


Рис. 1 – Цифровые изображения поверхности образцов углей из: (А) – неопасной области пласта, (Б) – выбросоопасной зоны

За последние несколько лет последовательно развиваются методы анализа пространственных структур с различными уровнями упорядоченности, для описания которых используются: направленные и комплексные вейвлеты, контурлеты, курвлеты и др. Современный метод описания изображений с использованием шиарлет–преобразования обладает набором характеристик, включающих сдвиг и направленный перенос [4].

Для характеристики неоднородности микроструктуры применён математический аппарат, предложенный в работе [4], и адаптированный нами под исследование ископаемых углей, позволяющий обрабатывать цифровые изображения поверхности угля и рассчитывать диаграммы пространственной «энтропии – сложности». Оценка пространственной сложности и энтропии для двумерных изображений, состоит из двух этапов: (1) разложение цифрового изображения, например, электронной микрофотографии угля, на шиарлет-коэффициенты, характеризующие локальную анизотропность и ориентацию основных структур, при помощи дискретного шиарлет-разложения. Затем проводится нормализация квадратов коэффициентов разложения и интерпретация полученных значений как функции плотности распределения структур различного масштаба и ориентации в обрабатываемом распределении. На следующем этапе (2) по полученному распределению квадратов шиарлет-коэффициентов определяется относительная энтропия Шеннона:

$$S[P] = -\sum P_i \log_2 P_i^{\circ},$$

и сравнивается с её равновероятным распределением, на основании чего и вводится понятие статистической сложности как произведение энтропии на расхождение между наблюдаемым и равновероятным распределением:

$$C = J[P, P_e] \cdot S[P] / S[P_e].$$

Значения энтропии и сложности получены с помощью программного обеспечения «Shearlexity» использующего стандартные библиотеки языка Python, scipy, matplotlib, библиотеки для шиарлет-разложения в PyShearlets [4].

В работе исследовались образцы угля из выбросоопасной и невыбросоопасной зон пласта. В результате анализа снимков образцов установлено, что угли, полученные из зоны, опасной по выбросам, характеризуются сочетанием упорядоченных и хаотично расположенных элементов, а образцы из неопасной зоны расположены в области невысокой энтропии, т.е. обладают более упорядоченной структурой. Полученные диаграммы «энтропии–сложности» приведены на рисунке 2.

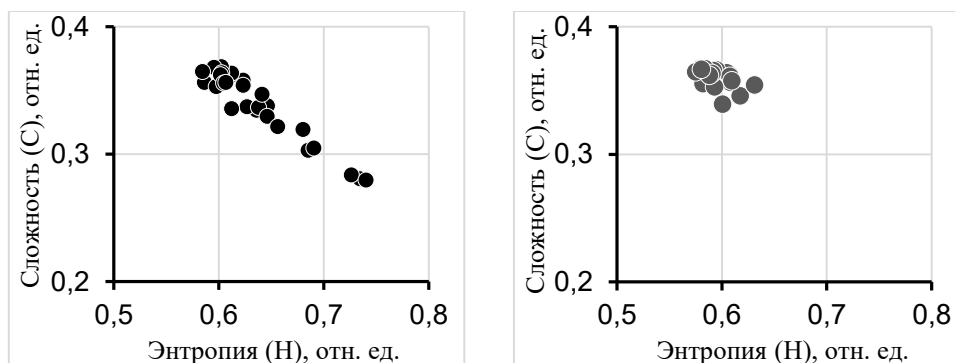


Рис. 2. Диаграммы «энтропия-сложность» образцов углей из: (А) – неопасной области пласта, (Б) – выбросоопасной зоны

В нашей работе исследована возможность использования диаграмм «энтропия–сложность» для количественного описания степени нарушенности углей по их изображениям, получаемым средствами сканирующей электронной микроскопии. В результате проведенных исследований установлено, что двумерные распределения значений мер информационной энтропии (H) и статистической сложности (C) могут в большинстве случаев служить информативными признаками, по которым угли могут быть дифференцированы на склонные и несклонные к выбросоопасности по степени сложности их микроструктуры.

Список использованных источников

1. Малинникова О. Н., Ульянова Е. В., Долгова М. О., Зверев И. В. Изменение микроструктуры ископаемых углей в результате внезапных выбросов угля и газа // Горный журнал. – 2017. – № 11. – С. 27–32.
2. Гагарин С. Г., Еремин И. В., Лисуренко А. В. Структурно-химические аспекты нарушенности каменных углей выбросоопасных пластов // ХТТ. – 1997. – №3. – С. 3–14.
3. Ульянова Е. В., Малинникова О. Н., Пашичев Б. Н., Малинникова Е. В. и др. Микроструктура ископаемых углей до и после газодинамических явлений // ФТПРПИ. – 2019. – № 4. – С. 10 – 17.
4. Brazhe A. Shearlet-based measures of entropy and complexity for two-dimensional patterns, Phys. Rev., 2018, E 97. – P. 061301(7).

И. Ю. Рассказов¹, Ю. В. Федотова¹, П. А. Аникин¹, А. В. Сидляр¹, П. А. Корчак²

¹ Институт горного дела – обособленное подразделение Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН, г. Хабаровск, Россия

² Кировский филиал АО «Апатит», г. Кировск, Россия

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОПАСНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

КФ АО «Апатит» отрабатывает ряд удароопасных месторождений апатит-нефелиновых руд Хибинского массива, характеризующихся сложными геомеханическими условиями. К настоящему времени на подземных рудниках зарегистрирован весь спектр динамических проявлений горного давления, вплоть до сильных и разрушительных горных ударов.

Для геомеханического мониторинга разрабатываемых месторождений используются различные системы (разночастотные сейсмические, деформационные, геодезические, и т.п., принадлежащие КФ АО «Апатит», ФИЦ КНЦ РАН и других научно-исследовательских организаций), регистрирующие в режиме реального времени или дискретно различные параметры изменения напряженно-деформированного состояния разрабатываемых месторождений. В том числе и сейсмоакустическая система контроля горного давления «Prognoz-ADS» (ИГД ДВО РАН, Хабаровск).

Автоматизированная система контроля горного давления «Prognoz-ADS» предназначена для непрерывной регистрации в массиве горных пород импульсов сейсмоакустической эмиссии (являющихся следствием упругого разрушения горных пород) в частотном диапазоне 0,2...12 кГц, определения их параметров (энергии, координат, спектральных и иных характеристик акустических событий) и представления результатов мониторинга в виде каталогов, карт, графиков с применением современных программных средств 3D визуализации и диспетчеризации. Программный комплекс системы позволяет выделять и контролировать параметры акустически-активных и потенциально удароопасных зон, проводить оценку геомеханического состояния массива горных пород для раннего предупреждения опасных геодинамических явлений.

На рудниках КФ АО «Апатит» первая система была установлена в 2015 году на экспериментальном участке блока 7/10 Кукисвумчоррского крыла с целью оценить возможность и перспективность применения данных систем для наблюдений в условиях Кировского рудника КФ АО «Апатит». Комиссией по горным ударам от 24.01.2019 г. на основании полученных результатов и рекомендаций, представленных в методике контроля горного давления, вынесено решение о

возможности использования АСКГД «Prognoz-ADS» на рудниках КФ АО «Апатит» и разработке проекта АСКГД для мониторинга центральной части шахтного поля Расвумчоррского рудника.

С помощью АСКГД «Prognoz-ADS» на Расвумчоррском руднике требовалось организовать мониторинг геомеханического состояния участка массива горных пород, находящегося под влиянием крупных геодинамически активных тектонических нарушений. В феврале 2020 г. АСКГД прошла опытно-промышленные испытания на руднике и передана службе в промышленную эксплуатацию.

По данным АСКГД «Prognoz-ADS» Расвумчоррского рудника проведен анализ и выявлен ряд закономерностей формирования акустически активных зон в местах концентрации напряжений, позволяющих характеризовать геомеханическое состояние удароопасных участков в массиве горных пород. Так, на основе результатов выявлено, что акустически активные зоны формируются вдоль разрывных нарушений различного ранга, где в основном регистрируются крупные сейсмоакустические события. При этом выделены очаговые области формирования опасных зон и диапазон глубин с концентрацией напряжений, в пределах которого были зафиксированы самые сильные события.

Применение геоакустической системы контроля горного давления на действующих горнодобывающих предприятиях дает возможность направленного управления горным давлением путем выделения опасных акустически активных зон и их контроля при проведении разгрузочных мероприятий. Предложенный подход, заключающийся в разгрузке удароопасных участков горного массива, в экспериментальном порядке апробирован в условиях глубоких горизонтов Николаевского месторождения методом сотрясательного взрывания скважин, выполненным в соответствии с установленным порядком производства взрывных работ. С 15 по 26 июня 2019 года системой «Prognoz-ADS» в районе обрабатываемого блока 45 выявлена крупнейшая за весь период наблюдений акустически активная зона. В пределах ААЗ зарегистрировано 850 событий с суммарной энергией 19000 Дж. Для проведения разгрузки предупредоопасного участка массива составлен проект сотрясательного взрывания и выполнено бурение двух вееров скважин диаметром 105 мм с расстоянием между веерами 5 м. После проведения взрывных работ 25.06.2019 07:11 наблюдался кратковременный рост акустической активности в течение первых суток. В последующие 10 дней зафиксирован спад акустической активности до минимального фонового уровня.

Для повышения качества оценки текущего геомеханического состояния участка массива и краткосрочного прогноза его изменений в ИГД ДВО РАН постоянно ведется работа по модернизации и совершенствованию компонентов системы и программного обеспечения.

Так, для оценки и расчета прогнозируемой погрешности расчета координат сейсмоакустических событий разработана программа «AntennaCalc». Применение этой программы для данных Расвумчоррской системы показало, что точность расчета координат сейсмоакустических событий является удовлетворительной и соответствует заявленной погрешности локации (≤ 10 м). Повышение точности локации возможно за счет более равномерной расстановки сети геофонов в нижней части зоны контроля и адаптации алгоритмов расчета координат сейсмоакустических событий, которые состоят из 5 и более сигналов.

В настоящее время специализированные программные комплексы представляют результаты сейсмоакустического мониторинга системой «Prognoz-ADS» в табличном виде или графическом (плоские карты и полноценные 3D модели). На Расвумчоррском и объединенном Кировском рудниках графическое представление результатов сейсмоакустического мониторинга осуществляется при помощи программы «GeoAcoustics3DView», позволяющей отобразить на экране 3D объекты подземных горных выработок, совмещенные с очагами сейсмоакустических событий.

Полученные в настоящее время первые результаты сейсмоакустического мониторинга по данным АСКГД «Prognoz-ADS» Расвумчоррского рудника определяют перспективный круг задач по модернизации элементов системы и ее программного обеспечения. Дальнейшее совершенствование автоматизированной системы раннего предупреждения опасных геодинамических явлений и геомеханического мониторинга позволит не только повысить достоверность прогнозных критериев, но и оперативно и эффективно контролировать и управлять геомеханическими процессами с помощью разгрузки удароопасных участков массива горных пород на Расвумчоррском руднике при выявлении акустически активных зон.

И. Ю. Розанов¹, Д. А. Ковалев²

¹ Горный институт КНЦ РАН, г. Анапты, Россия, e-mail: ivan-rozanov@yandex.ru

² ООО «ГЕКСАГОН ГЕОСИСТЕМС РУС», г. Москва, Россия, e-mail: dmitry.kovalev@geosystems.ru

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ РАДАРНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА УСТОЙЧИВОСТИ БОРТА КАРЬЕРА «ЖЕЛЕЗНЫЙ» АО «КОВДОРСКИЙ ГОК»

Разработка месторождений полезных ископаемых открытым способом неизбежно вызывает изменения геомеханического состояния геологической среды, что проявляется в формировании новых полей напряжений и деформаций. В результате в карьерах могут иметь место разномасштабные разрушения пород от вывалов в пределах одного или нескольких уступов до существенных подвижек по границам структурных блоков, обширных оползней и техногенных землетрясений.

Случаи потери устойчивости бортов можно свести к минимуму путем изменения параметров отработки карьера (например, снижение генерального угла наклона борта карьера или уменьшение высоты уступов), однако зачастую подобный подход является экономически не целесообразным.

Ведение открытых горных работ с применением экономически эффективных параметров возможно при условии организации комплексной системы мониторинга, которая позволит спрогнозировать вероятное обрушения по месту, масштабу и времени и позволит свести к минимуму экономические потери.

Подобный подход позволит предприятиям существенно увеличить как генеральные углы бортов карьеров, так и углы отдельных откосов, и высоту уступов. Экономический эффект при этом составит от нескольких сотен миллионов до нескольких миллиардов рублей в зависимости от размеров и глубины карьера, что в разы покроет затраты на организацию системы мониторинга.

Механизм развития деформаций и разрушений пород в массивах иерархично-блочной структуры применительно к условиям контроля устойчивости бортов и уступов карьеров обуславливает иерархичную структуру комплексной системы мониторинга, в частности, разделения ее на региональный и локальный уровни.

На региональном уровне мониторинг целесообразно выполнять с использованием методов космической геодезии (GPS-технологий) и светодальномерных измерений по специально оборудованным фундаментальным пунктам геодинимических полигонов.

Для локального мониторинга наиболее эффективным методом в настоящее время является применение наземных интерферометрических радаров.

Основным преимуществом радаров по сравнению с другими методами локального мониторинга является их способность контролировать состояние поверхности карьера 24 часа в сутки в любую погоду, невзирая на осадки (снег, дождь, град, туман) или плохую видимость в карьере, вызванную пылью, выхлопными газами и т.п. Большим плюсом, также является и высокая точность измерений (0,1 мм).

В зарубежной практике радары применяются достаточно давно. В России интерферометрический радары стали применяться только с 2014 года.

Одним из первых радаров в России был установлен на карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК».

За 7 лет работы радара был накоплен значительный статистический материал и зафиксировано несколько обрушений различного объема. Все эти данные позволили выявить закономерности развития процесса деформирования массива, определить предельные параметры и разработать методические подходы к мониторингу устойчивости и на их основе составить ряд инструкций, которые в настоящее время используются на предприятии.

К настоящему времени радарная система мониторинга насчитывает уже 4 радара (3 мобильных радара IBIS ArcSAR и 1 стационарный радар IBIS FM) и покрывает практически все участки борта карьера «Железный».

В. В. Рыбин, К. Н. Константинов, О. В. Наговицын
Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия,
e-mail: v.rybin@ksc.ru

ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА УСТОЙЧИВОСТИ ОБЪЕКТОВ ОТКРЫТОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Расширение и углубление карьерных выемок и связанная с этим интенсификация открытых горных работ ставят перед горно-обогатительными предприятиями ряд вопросов, связанных с организацией обеспечения устойчивости как бортов карьеров и отвалов, так и промышленных объектов, находящихся в пределах промплощадки и горного отвода предприятия. Основная цель системы мониторинга устойчивости объектов горного предприятия состоит в обеспечении безопасного непрерывного производственного цикла предприятия.

Предложена структура комплексной системы мониторинга, учитывающая горно-геологические и горнотехнические условия разработки месторождения, особенности основных объектов производства и инфраструктуры, методы контроля и технические характеристики применяемых измерительных средств.

На основе предварительного группирования, составлен перечень потенциально опасных объектов, которые необходимо включить в систему мониторинга. Для каждой группы объектов определены их особенности, свойства, критерии устойчивости и другие характеристики, на основе которых производится методическое сопровождение мониторинга с целью обеспечения безопасной и бесперебойной эксплуатации выделенных объектов.

Реализован макетный вариант системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия на базе ГГИС MINEFRAME, сформирована база данных объектов мониторинга. Выбранный подход показывает преимущества цифрового решения комплексной интеграции экспериментальных данных наблюдений за потенциально опасными объектами в едином информационном пространстве, объединяющем наиболее важные объекты геологической среды, горной технологии, производственной инфраструктуры. В свою очередь, это создает предпосылки для разработки цифровых двойников объектов мониторинга, как составной части цифрового горного предприятия.

А. В. Семенкин

Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия, e-mail: semenkin@igduran.ru

МОДУЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ МЕТОДИКИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИКЛИЧНО-ПОТОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

На сегодняшний день большинство месторождений разрабатываются открытым способом, при этом многие карьеры достигают отметки более 400 м. Для выдачи заданных объемов им необходимо углубляться, что ведет к ухудшению горнотехнических условий. Затраты на транспорт составляют 55-70 % от общих затрат на добычу. Поэтому выбор рационального вида транспорта является актуальной задачей.

Для оперативного сравнения вариантов применения различных видов транспорта предлагается модульное построение методики расчета технико-экономических показателей транспорта при циклично-поточной технологии (ЦПТ). В данном исследовании рассматриваются затраты на дробильно-конвейерный комплекс технологии (ДКК) и экскаваторно-автомобильные комплексы (ЭАК). Затраты на комплексы были рассчитаны с годовой производительностью 5, 10, 20, 30 млн т в год при высоте подъема горной массы в карьере от 180 до 680 м.

На рисунке 1 представлена концепция построения модульных расчетов затрат на транспортный комплекс карьеров и сравнения их по вариантам.

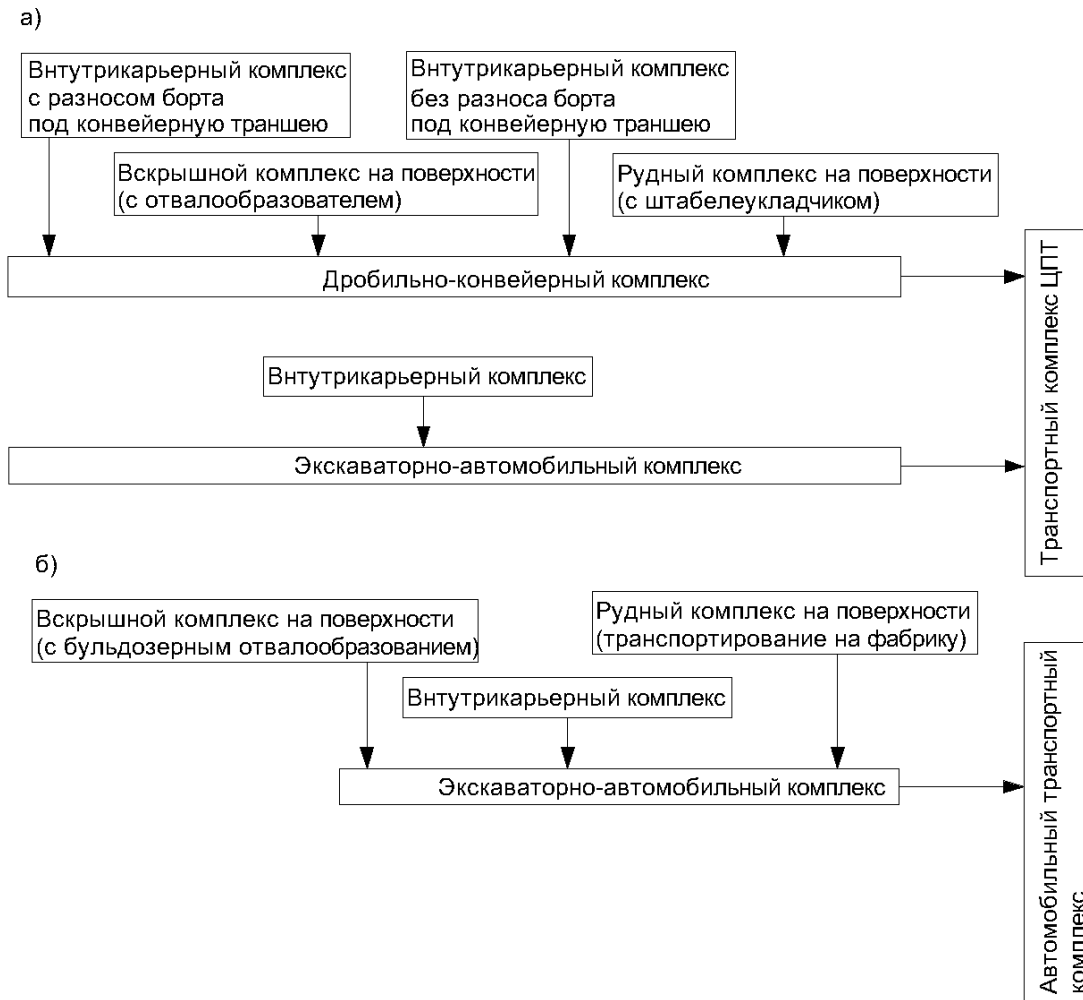


Рис. 1. Модули затрат на: а) Транспортный комплекс циклично-поточной технологии; б) Автомобильный транспортный комплекс.

Для примера приведено сравнение внутрикарьерного дробильно-конвейерного комплекса с разносом борта под конвейерную траншею совместно с затратами на внутрикарьерный комплекс ЭАК, которые входят в транспортный комплекс ЦПТ в сравнении с внутрикарьерным экскаваторно-автомобильным комплексом (рис. 2).

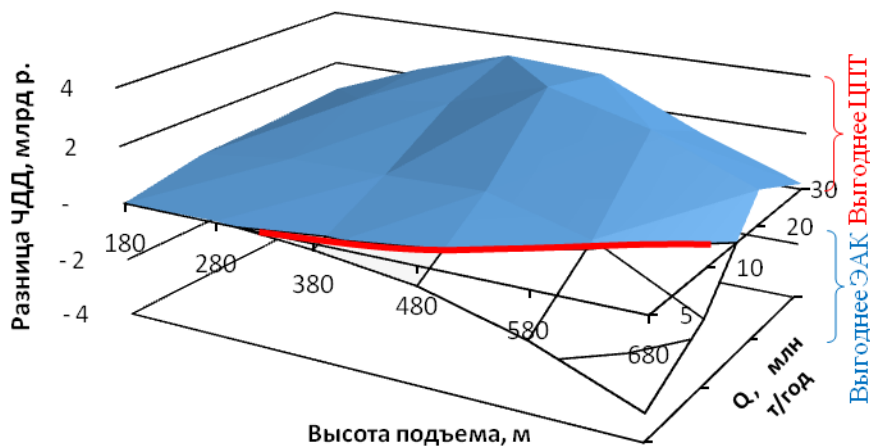


Рис. 2. Разница чистого дисконтированного дохода между вариантами использования ЦПТ и автомобильного транспорта

Выводы

1. Отдельные модули были опробованы ранее и дают верные результаты расчета.
2. Модульное построение позволяет определять затраты на транспортный комплекс по отдельным затратам звеньев транспорта, объединив их общим алгоритмом (суммирование).
3. Такой подход обеспечивает быстрый расчет большого количества вариантов на стадии предварительной оценки и обеспечивает выбор более рациональной схемы.

И. Э. Семенова, И. М. Аветисян

Горный институт КНЦ РАН, г. Анатиты, Россия,

e-mail: i.semenova@ksc.ru, i.avetisian@ksc.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ СИСТЕМ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА И ОБОСНОВАНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ НА УДАРООПАСНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Представлены основные подходы и их развитие для систем прогноза напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород при отработке сближенных удароопасных месторождений. Использование подобных систем на основе оригинального программного комплекса Sigma GT имеет место на нескольких российских горнопромышленных предприятиях, осуществляющих горные работы на месторождениях, представленных прочными скальными породами, склонными к хрупкому разрушению, и гравитационно-тектоническим типом НДС. При этом техногенное воздействие на массив сопровождается проявлениями горного давления в динамической форме.

В основе прогноза НДС участка массива пород лежит методика последовательных приближений, в соответствии с которой в первую очередь осуществляется постановка и решение ряда трехмерных, мелкомасштабных задач, отражающих основные горно-геологические и горно-технологические особенности моделируемого пространства [1].

Применение систем прогноза геомеханической ситуации непосредственно на горных предприятиях в течение более чем 15 лет показало их высокую эффективность, связанную, прежде всего, с оперативностью проведения расчетов НДС при обострениях геодинамической ситуации и возможностью рассмотрения различных вариантов горных работ с целью уменьшения концентрации напряжений и выдачи рекомендаций крепления и разгрузочных мероприятий в горных выработках. Кроме того система Sigma GT используется при годовом и долгосрочном планировании горных работ [2].

Изначально подобные системы разрабатывались для отдельных удароопасных блоков, и время их эффективной работы ограничивалось периодом 3 – 5 лет, то есть временем отработки блока. В дальнейшем, учитывая запросы предприятий, системы стали включать месторождение или даже несколько месторождений, а срок использования достигает 10 лет. В процессе применения происходит постоянное развитие и модернизация системы, ее адаптация к конкретным условиям и задачам.

Наиболее актуальными перспективными задачами являются: комплексирование результатов моделирования НДС с данными мониторинга, прежде всего сейсмического; создание иерархичной системы взаимосвязанных разномасштабных объемных моделей; более полный учет структурных неоднородностей массива горных пород [3]; развитие блоков локального моделирования и выдачи рекомендаций по безопасному ведению горных работ с учетом данных прогноза геомеханической ситуации. Решение данных задач рассмотрено на примере участка Хибинской апатитовой дуги, в пределах которого ведутся в зоне взаимного влияния подземные и открытые горные работы.

Таким образом, в процессе многолетнего использования системы геомеханического прогноза, основанного на численном моделировании НДС, показана ее эффективность для обоснования оптимальных параметров горных работ и разработки региональных и локальных разгрузочных мероприятий. Определены перспективные направления развития подобных комплексов.

Список использованных источников

1. *Козырев А. А., Енютин А. Н., Мальцев В. А., Семенова И. Э.* Методика регионального прогноза удароопасности и состояния массива пород и выбора технических решений по обеспечению

- безопасности и эффективности горных работ // Инновационный потенциал Кольской науки : сб. ст. – Апатиты : КНЦ РАН, 2005. С. 52–56.
2. *Козырев А. А., Семенова И. Э., Рыбин В. В.* и др. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения). – Апатиты – Кировск, 2016. – 112 с.
 3. *Семенова И. Э., Дмитриев С. В., Шестов А. А.* Численное моделирование неоднородностей в трехмерной постановке метода конечных элементов // Горный журнал. 2020. № 12. С. 35-39.

В. М. Серяков

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия, vms@ngs.ru

О РАЗРАБОТКЕ И РЕАЛИЗАЦИИ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ВОПРОСОВ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ВАРИАНТОВ РАЗВИТИЯ ГОРНЫХ РАБОТ ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Одной из постоянно возникающих задач при освоении месторождений полезных ископаемых является выбор экономически целесообразной и безопасной последовательности отработки их запасов. Хотя глобальная последовательность отработки содержится в общем проекте освоения месторождения, всегда появляется производственная необходимость оценки и выбора возможных вариантов развития работ в конкретных условиях и в конкретный момент отработки.

В этой связи для обеспечения сопровождения процесса отработки, соответствующим распределением напряженного состояния, разработан алгоритм расчета и программный комплекс, позволяющие проводить оценку полей напряжений в районах ведения очистных и закладочных работ. Для каждого этапа отработки происходит расчет соответствующего напряженного состояния. Исходными данными для расчетов в рассматриваемый момент времени служит напряженное состояние, соответствующее данной конфигурации выработанного и заложенного пространства. Для этой ситуации рассматриваются возможные варианты дальнейшего развития горных работ, и на основе их геомеханической оценки предлагается наиболее приемлемый вариант. В качестве исходного дальнейшего напряженного состояния рассматривается ситуация после реализации выбранного варианта развития очистных работ.

Таким образом, цифровое сопровождение процесса выемки и закладки данного месторождения состоит в последовательном рассмотрении напряженно-деформированного состояния массива после каждого этапа отработки. В случае упругого деформирования вмещающего и закладочного массивов показана сходимость процесса расчета и возможность алгоритма проводить расчеты нескольких сотен этапов отработки. Предложены варианты развития разработанного метода при учете нелинейного деформирования закладочного массива.

М. А. Соннов

ООО "Фидесис", г. Москва, Россия, e-mail: Sonnov@cae-fidesys.com

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНЫХ И КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫХ РАСЧЁТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CAE FIDESYS ПРИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ, СРАВНЕНИЕ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ РАЗНОТИПНЫХ ЗАДАЧ

Определение эффективных упругих модулей ядра.

На основе данных, полученных при помощи микротомографии, строится цифровая модель образца ядра и проводится моделирование его поведения под действием внешнего нагружения. Результаты расчетов позволяют определить как интегральные характеристики, такие как эффективные упругие свойства образца, так и особенности его поведения на микроуровне, например, в процессе разрушения.

Применение метода спектральных элементов позволяет увеличить скорость и точность вычислений в 3-5 раз. Для этого используется явная схема со спектральной сходимостью и выбираемым пользователем аппроксимационным порядком по пространству.

Геомеханическое моделирование напряженно-деформированного состояния горных выработок

Моделирование процессов зоны горных выработок включает в себя множество задач механики деформируемого твердого тела как в статической, так и в динамической постановках, линейных задач и задач с выраженной геометрической и физической нелинейностью. Проведение геомеханических расчетов в программном обеспечении CAE Fidesys с применением аппарата трехмерного конечно-элементного моделирования позволяет проводить моделирование напряжений и деформаций зоны горных выработок с учетом динамического изменения поля давлений.

Е. Л. Счастливцев, А. А. Быков, Н. И. Юкина, И. Е. Харлампенков

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Кемеровский филиал, Россия, e-mail: schastlivtsev@ict.sbras.ru

ПРОГРАММНО АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

В лаборатории моделирования геоэкологических систем ФИЦ ИВТ разрабатывается программно-аппаратный комплекс (ПАК) для мониторинга загрязнения атмосферы в режиме реального времени. Комплекс состоит из датчиков инструментального контроля загрязнения атмосферы, метеостанции, модели расчета загрязнения атмосферы и блоков управления данными.

Схема взаимодействия модулей ПАК представлена на рисунке 1.

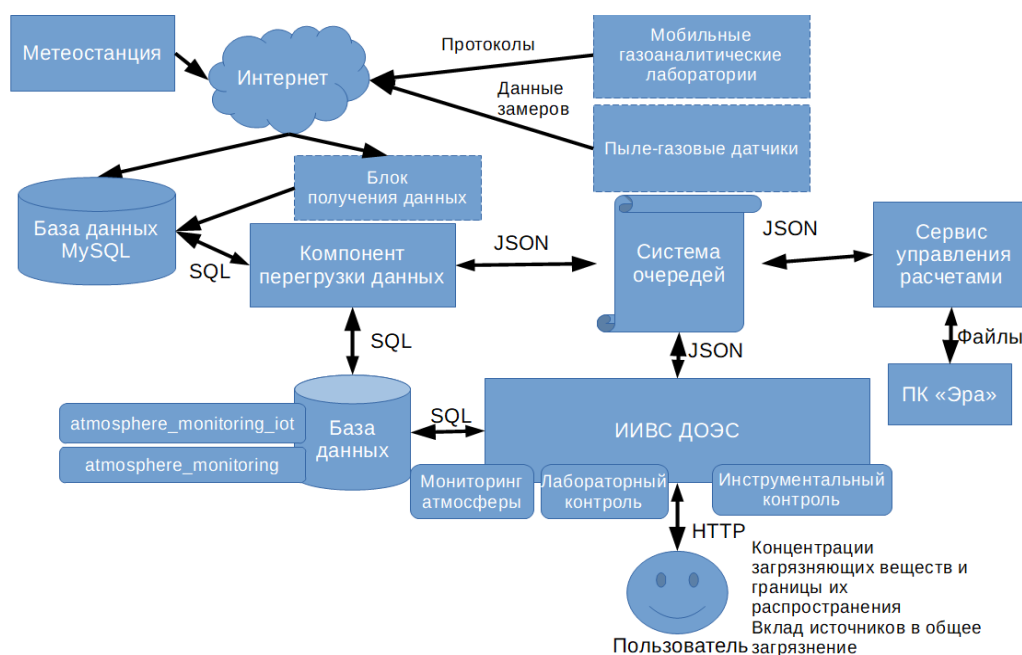


Рис. 1. Схема взаимодействия элементов системы мониторинга и оценки загрязнения воздуха в окрестности предприятия

В 2019 г. проведена успешная проверка работоспособности ПАК на основе реальных данных, полученных в процессе эксперимента на участке открытых горных работ ООО «Шахта № 12» (г. Киселевск, Кемеровская обл.), 01-08 октября 2019 г.

В 2020 г. для ООО «Шахта №12» ПАК был запущен в долговременную опытную эксплуатацию. Каждые 20 минут происходит измерение концентрации пылевых частиц и синхронно

определяются метеопараметры: скорость ветра (м/с), направление ветра (угловые градусы), температура воздуха (°С), атмосферное давление (ГПа) и влажность (%). В режиме реального времени для текущих метеоусловий с использованием облачного сервиса рассчитываются по нормативной модели МРР-2017 [1] разовые концентрации с использованием ПК ЭРА-ВОЗДУХ 3.0 [2]. Результаты мониторинговых расчетов представляются на карте территории в виде изолиний поля суммарных приземных концентраций. Кроме того, в заранее указанных контрольных точках вычисляются значения суммарных концентраций с указанием вклада отдельных групп источников (само предприятие, городские котельные, дороги, частный сектор). Для каждого срока исходные данные, результаты замеров и расчетов сохраняются в архивах и могут быть при необходимости проанализированы при поступлении запросов природоохранных органов, общественности и служб предприятия.

В настоящий момент система работает с неизменными (базовыми) параметрами источников из действующего тома ПДВ предприятия, что заведомо является причиной возможного несоответствия расчетов и замеров загрязнения атмосферы. Поэтому разработчиками программно реализована схема оперативной корректировки любых параметров, участвующих в расчете источников. В основе схемы лежит использование базового состояния данных по источникам. Изменения параметров по сравнению с базовыми задаются в индивидуальном для каждого источника файле, где каждая строка начинается с указания времени (день, месяц, год, час, минута, секунда), начиная с которого параметры источника принимают указанные далее значения или процент изменения по сравнению с базовыми. Далее они считаются неизменными до срока, указанного в следующей записи. Однако, если источником выделения являются взрывные работы, то источник выброса считается действующим начиная с указанного срока и в течение назначенного пользователем интервала (по умолчанию 20 мин). При этом для взрыва могут быть заданы его технические характеристики, после чего параметры облака взрыва и значения выбросов всех загрязняющих веществ, будут автоматически вычислены по нормативной методике [3]. Для реальных мониторинговых расчетов авторами разрабатывается модуль ПАК, позволяющий техническим службам предприятия в режиме дружественного интерфейса оперативно задавать изменения выбросов или рассчитывать их на основе планируемой нагрузки оборудования.

Список использованных источников

1. Приказ Минприроды России от 06.06.2017 N 273 "Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе" (Зарегистрировано в Минюсте России 10.08.2017 N 47734).
2. Программный комплекс ЭРА-ВОЗДУХ, <https://lpp.ru/>, доступ 18 февраля 2021.
3. Отраслевая методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу загрязняющих веществ при сжигании угля и технологических процессах горного производства на предприятиях угольной промышленности. ОАО «МНИИЭКО ТЭК», Пермь, 2014. 186с.

И. О. Темкин, А. В. Мясков, С. А. Дерябин

НИТУ МИСИС, г. Москва, Россия, e-mail: igortemkin@yandex.ru

ПЛАТФОРМА УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПРИ ДОБЫЧЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ: АРХИТЕКТУРА, ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Современные АСУ ТП, оснащенные разнотипными сенсорными устройствами и использующие высокоскоростные каналы передачи данных, предоставляют возможность собирать и анализировать огромные массивы данных о состоянии геофизических, горно-технологических и геопроостранственных параметров карьера. В 2013 г. в рамках программы «Интеллектуальный карьер» были сформулированы основные принципы и концепции организации процессов добычи полезных ископаемых в карьере с использованием роботизированных и автономных объектов горнотранспортного комплекса. Сегодня имеются положительные примеры внедрения отдельных элементов этих технологий на горнопромышленных объектах. Вместе с тем, следует отметить, что практика внедрения автоматизированных решений в смежных отраслях промышленности

(нефтегазовой, металлургической и др.) показывает более существенный экономический эффект от применения систем класса АСУ ТП, чем в горной промышленности. Это во многом связано со сложностью построения адекватных количественных моделей объекта управления и проблемами формального задания критериев оптимальности функционирования системы «технологическое оборудование – технологическая среда».

В этой связи, в наших работах, которые в течение ряда лет ведутся в НИТУ МИСиС в рамках реализации нескольких грантовых проектов и научно-технических договоров, и которые можно рассматривать как некоторое развитие проекта «Интеллектуальный карьер», основное внимание уделяется вопросам оптимизации оперативно-диспетчерского управления за счет интеграции и комплексирования разнородной информации для использования технологий цифрового дублирования при выработке управляющих решений.

В настоящем докладе рассматриваются вопросы, связанные с построением и функционированием интеллектуальной платформы управления транспортно-технологическими процессами. Термином платформа определяется комплекс объектно-независимых (инвариантных относительно геоструктуры месторождения, схем обработки месторождения, топологии и элементов горнотранспортного комплекса карьера) сервисов и регламентов их взаимодействия.

В результате анализа структуры решаемых в рамках АСУ ТП задач при построении архитектуры платформы был выбран сервис-ориентированный подход, обеспечивающий горизонтальное взаимодействие информационных сущностей, сгруппированных:

□ с учетом агентной схемы описания объекта управления:

а1. технические (мобильные) агенты – это мобильные транспортные объекты (большегрузные автосамосвалы, вспомогательные транспортные средства – дорожные машины различного назначения), а также условно стационарные горные машины (экскаваторы, перемещаемые буровые установки);

а2. инфраструктурные технологические агенты – описывают технологическую среду, в частности: карьерные дороги, борта карьера, экскаваторные и разгрузочные площадки, карьерные технологические дороги;

а3. геоструктурные агенты представляют собой элементы-блоки, описывающие структуру месторождения аналогично тому, как это делается в классических геоинформационных системах;

□ а также с учетом многофункциональной структуры мультиагентного информационно-управляющего комплекса (сенсорный, информационно-аналитический, управляющий блоки).

Были разработаны и протестированы ряд вычислительных моделей с целью их последующей имплантации в программную среду оперативно-диспетчерского управления. При этом использовались конкретные слабоструктурированные фрагменты данных в виде матриц и реляционных таблиц, описывающие геометрические параметры всего производственного пространства карьера, а также состояния технологической среды и технических агентов, в частности:

□ матрица смежности, описывающая дорожно-транспортную сеть открытых горных работ, заданную в форме графовой модели, элементы которой уточняются с использованием преобразования данных телеметрии горнотранспортной техники;

□ таблица, задающая координатную сетку технологической поверхности карьера, формируемая на основе данных маркшейдерской съемки;

□ таблица оценки качества дорожного полотна карьера, получаемая с использованием эвристического алгоритма оценки состояния отдельных микро-сегментов дороги по критериям наличия механических деформаций, величины уклонов и коэффициента сопротивления качению;

□ таблица оценки состояния узлов объектов горнотранспортного комплекса (ГТК), формирующаяся по данным телеметрии с использованием нейронных сетей с рекуррентной архитектурой, обучаемых на массивах данных, полученных на основе алгоритма управляемой кластеризации.

Перечисленные таблицы представляют собой прообраз единой цифровой модели, на базе которой должна решаться целевая задача платформы – управление транспортно-технологическими процессами (ТП) с использованием технологии цифрового дублирования

В рамках работ по развитию платформы в части функциональных механизмов интеграции и комплексирования гетерогенной информации для автоматического формирования цифровых моделей инфраструктурных агентов технологических зон карьера (дорога, перекресток, экскаваторная площадка и т.д.) была осуществлена доработка и настройка программных интерфейсов на базе стандартных протоколов передачи данных и протоколов MQTT/AMQP. Также были разработаны и

протестированы программные модули – интерпретаторы геоинформационных данных, которые обеспечивают быстрое и высокоточное преобразование информации в единую цифровую среду. Разработка программных модулей осуществлялась на базе унифицированной библиотеки абстракции геопространственных данных GDAL (Geospatial Data Abstraction Library). Использование данной библиотеки позволило существенным образом упростить технические процессы реализации интеграционного взаимодействия с существующими ГИС-системами для имплантации продуцируемых ими данных в среду Unity и непосредственным образом приступить к отработке механизмов комплексирования гетерогенных технологических данных для формирования динамического представления инфраструктурного агента «карьер» на разных эволюционных состояниях.

Существующий сегодня лабораторный вариант интеллектуальной платформы способен осуществлять обработку, анализ и хранение разнородной и разнотипной информации и обеспечивает возможность интегрировать большие массивы геоинформационных данных с задачами оперативного мониторинга и управления транспортно-технологическими процессами и другими менее оперативными задачами, реализуемыми в других классах программных систем (диагностика технологической среды и оборудования, прогнозирование ремонтов, управление поставками запасных частей и складами) без участия человека. В настоящее время изучаются проблемы, которые могут возникнуть при имплантации платформы в уже существующие и функционирующие АСУ ТП.

В. А. Федорин, О. А. Татарина

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ УУХ СО РАН), г. Кемерово, Россия,
e-mail: FedorinVA@ic.sbras.ru, TatarinovaOA@yandex.ru*

ЦИФРОВОЙ МЕТОД В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ ДОСТУПА К ГЕОРЕСУРСАМ

На сегодняшний день внедрение цифровых технологий в угольную промышленность стало необходимостью, тем самым повышается эффективность горного производства за счет анализа и совершенствования проектных и управленческих решений, полноты и комплексности извлечения полезных ископаемых, оптимизации логистики, безопасности ведения горных работ и решения экологических проблем. По программе развития угольной промышленности России осуществляется процесс формирования новых центров угледобычи на новых угольных месторождениях с благоприятными горно-геологическими условиями. Для этого предусматривается ускорение развития логистической инфраструктуры угледобывающих предприятий на основе исследования транспортной логистики способов вскрытия и методов доступа к георесурсам, с оцифровкой недр и поверхности [1]. Предложен подход, основанный на научной идее д.т.н. В. Д. Явлевского по изменению структуры вскрытия и порядка доступа к угольным месторождениям на основе автономного принципа вскрытия и динамического освоения месторождения модульными шахтоучастками с синхронным изменением производственной инфраструктуры угледобывающего предприятия, с единой транспортной инфраструктурой на поверхности месторождения [2]. Повышение технико-экономической эффективности решений по размещению технологических объектов на поверхности поля угледобывающего комплекса в условиях сложного рельефа местности и повышенной угленасыщенности месторождения может быть достигнуто за счет разработки оптимизационной модели в методе доступа к георесурсам для рационального размещения подъездного пути и коммуникационного коридора линейно-узловой структуры. В качестве алгоритма поиска построения поверхностной характеристики наиболее эффективным является метод динамического программирования (принцип оптимальности Р. Беллмана [3]), позволяющий достаточно точно найти несколько вариантов в условиях рельефа поверхности. Порядок счета с использованием данного метода выглядит следующим образом: проводится оцифровка поверхности с нанесением «запретных зон» (реки, населенные пункты, здания и т.д.) данные снимаются с топографических карт; преобразование значений координатной сетки в длины с учетом руководящего уклона (в нашем случае принимаем 0,01 радиан для железнодорожного транспорта); построение поверхности минимальных длин (в виде изолиний минимальных расстояний); нахождение точки примыкания и

оптимальной трассы [4]. В Институте угля СО РАН продолжены работы по решению задач оптимизации выбора расположения коммуникационного коридора и мест примыкания новых коммуникаций к существующим при освоении новых угольных месторождений методом динамического программирования [5]. Операцию выбора кратчайшего расстояния производят графически на топографической поверхности, представленной в виде изолиний равных отметок, и при сравнении нескольких вариантов выбирается наиболее оптимальная трасса коммуникационного коридора. Для численной реализации метода разработано алгоритмическое обеспечение, реализующее данный метод в среде EXCEL. Это позволяет существенно снизить объем обработки информации и оперативно получать варианты размещения технологических объектов при введении новых ограничений. Данный алгоритм позволяет рассчитать оптимальные трассы для различных видов транспорта между двумя или несколькими пунктами в условиях сложного рельефа местности, наличия «запретных зон» (построек, болот, оврагов и т.д.). Для выбора оптимальной примыкающей трассы использован метод динамического программирования для участка «Серафимовского» Ушаковского месторождения [6].

Развиваемый в Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН методический подход заключается в последовательном формировании моделей объектов горной технологии и их процессов оптимизации на основе технико-экономического анализа связанных с ними технологических процессов, включая технологический регламент взаимосвязанных производств. Для реализации инструментов проектирования и планирования горных работ используется модифицированная в Лаборатории для угольных месторождений программная платформа (рис. 1) системы Mine Frame 6.0. (по Генеральному соглашению о научно-техническом сотрудничестве и совместной деятельности с ГоИ КФ РАН) [7].

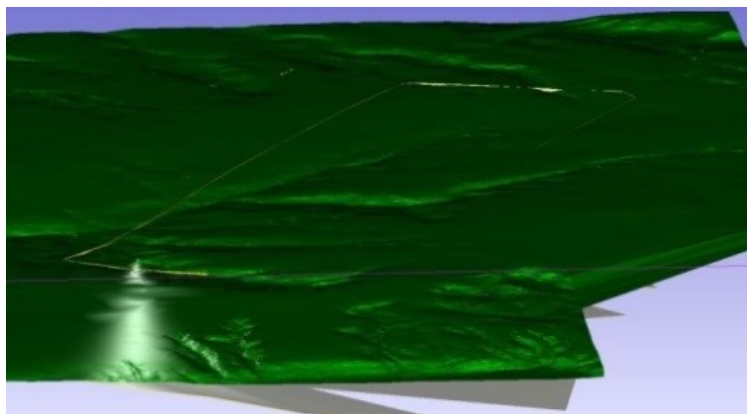


Рис. 1. Дневная поверхность участка «Серафимовский» с оцифровкой в Mine Frame

Практическая ценность заключается в эффективном решении задачи размещения технологических объектов на поверхности поля угледобывающего комплекса, нахождение оптимального пути примыкания к существующим магистралям, размещение подъездных путей шахты на основе разработанного методического, алгоритмического и программного обеспечения. Снижается трудоемкость, время поиска и обоснования наилучшего проектного решения. Наложение поверхностной и подземной характеристики на участке дает нам комплексный подход для формирования транспортной инфраструктуры месторождения и местонахождения основных вскрывающих выработок угольной шахты. Эскизная проработка транспортной логистики, технологий и способов разработки на участке Серафимовском показала, что используемая в работе геотехнологическая структура модульного шахтоучастка соответствует основным научно-техническим факторам экономической эффективности. Эффективная схема вскрытия и подготовки шахтных полей достигается за счет подземных и наземных характеристик размещения технологических объектов. Данный метод можно применять в условиях любого рельефа поверхности и произвольного распределения «запретных» зон, что дает возможность использовать его не только при компоновке комплекса поверхности шахты, но и при составлении технико-экономического обоснования строительства железных дорог, связывающих новые месторождения полезных ископаемых с центрами переработки сырья [8]. Данный подход позволяет минимизировать затраты на строительство и эксплуатацию сети автомобильных, железных дорог и линий электропередачи позволяя обеспечить эффективную работу угледобывающих предприятий мирового технико-

экономического уровня [9-10]. В случае оптимизации затрат на транспортировку углей ситуация может измениться в лучшую сторону, что обеспечит выход угольным компаниям на рентабельный уровень и окажет позитивное влияние на повышение конкурентоспособности на внешнем рынке, позволяя добиться дальнейшего развития и создания новых эффективных производственных комплексов (кластеров) в Кузбассе.

Список использованных источников

1. Прогноз научно-технологического развития отраслей ТЭК России на период 2035 г. URL: <https://minenergo.gov.ru/view-pdf/6365/66647> (дата обращения 09.04.2020.)
2. Ялевский В. Д., Федорин В. А. Модульные горнотехнологические структуры вскрытия и подготовки шахтных полей Кузбасса (Теория. Опыт. Проекты.). – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2000. – 224 с. Ил.
3. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. М., Наука, 1965.
4. Татаринова О. А. Транспортная логистика наземных грузоперевозок при освоении угольных месторождений // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – №. 6 (106).
5. Клишин В. И., Ордин А. А., Ческидов В. И., Федорин В. А. Основы концепции оценки предельных объемов добычи угля открытым и подземным способами в Кузбассе // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № ОВ7. – С. 47-52.
6. Татаринова О. А. Транспортно-технологические характеристики освоения Ушаковского месторождения (Участок Серафимовский) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 9. – С. 94-98.
7. Федорин В. А., Шахматов В. Я., Михайлов А. Ю. Комбинированный способ разработки угольных пластов Кузбасса на основе синтеза процессов ведения открытых и подземных горных работ // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2018. – №. 1. – С. 32-40.
8. Федорин В. А., Татаринова О. А. Основы метода доступа к георесурсам в задачах оптимизации транспортных характеристик освоения угольных месторождений подземным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – №. 3. С. 176-182.
9. Lollino G. et al. (ed.). Engineering geology for society and territory-Volume 2: Landslide processes. – Springer, 2014. – Т. 2.
10. Zhang X. G. et al. Gas Transportation and Enhanced Coalbed Methane Recovery Processes in Deep Coal Seams: A Review // Energy & Fuels. – 2016. – Т. 30. – №. 11. – С. 8832-8849.

В. Г. Филиппов

*Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: Vladimir-mail-150@yandex.ru*

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕЙ КВАДРАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПРЕВЫШЕНИЯ НА СТАНЦИИ ВЫСОКОТОЧНЫМ ЦИФРОВЫМ НИВЕЛИРОМ

Данное исследование посвящено методу оценки точности измерения превышения на станции цифровым нивелиром. В геодезии почти любая решаемая задача требует оценки точности. В связи с тем, что в результате модернизации и развития геодезических приборов изменяются и упрощаются способы решения задач, появляется необходимость в соответствующей модернизации методов оценки точности. В данной работе представлен один из методов решения задачи оценки точности измерения превышений на станции современными цифровыми нивелирами. Метод удобен в применении, не требует большого количества дополнительного оборудования, а также позволяет оперативно оценить точность предстоящих или уже выполненных измерений.

Одной из распространённых задач в геодезии является наблюдение за осадками и деформациями зданий и сооружений. Деформации могут приводить к нарушению прочности строительных конструкций и даже вызывать опасные разрушения сооружений. Решение задач по контролю прочности сооружений требует проведения комплекса измерительных операций по

выявлению причин деформации. Наблюдения за осадками выполняют различными методами нивелирования: геометрического, тригонометрического, гидростатического, микронивелирования, а также фотограмметрическим и стереофотограмметрическим методами. Наиболее широко распространён метод геометрического нивелирования, обладающего рядом достоинств: высокая точность и быстрота измерений, стандартные приборы и оборудование, возможность выполнять измерения в сложных стеснённых условиях.

При наблюдении за осадками точность нивелирования характеризуют средней квадратической погрешностью m_{hcm} определения превышения на станции. При выполнении такого вида работ, как наблюдения за деформациями, в последние годы чаще всего применяется геометрическое нивелирование с использованием современных цифровых нивелиров, а они, как известно, в паспортных данных характеризуются средней квадратической погрешностью на 1 километр двойного хода. Однако для оценки точности измерения на станции более распространённым вариантом является сопоставление средней квадратической погрешности измерений на станции m_{cm} с допустимой для данного вида работ.

Цель исследований – определение средней квадратической погрешности измерения превышения на станции цифровым нивелиром, оценка пригодности предлагаемого способа определения средней квадратической погрешности превышения на станции, а также определение зависимости средней квадратической погрешности измерения превышения на станции от комплекта приборов, которыми выполняются измерения, и от выбранной длины плеч нивелирования.

В ходе исследования данного вопроса были произведены многократные измерения превышения цифровым нивелиром с последующей обработкой и оценкой точности, выражающейся в виде средней квадратической погрешности измерения превышения на станции. Полученные результаты были сравнены с допустимыми, взятыми из нормативных документов. На основании проведённого исследования и сравнительного анализа было сделано заключение о возможности применения данного комплекта оборудования для наблюдения за деформациями и осадками зданий и сооружений, определена зависимость между величиной средней квадратической погрешности и выбранным комплектом оборудования, а также между величиной погрешности и длиной плеча нивелирования.

В. Н. Захаров, В. А. Трофимов, Ю. А. Филиппов

*Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: vnzakharov@gmail.com, asas_2001@mail.ru, filippov.yury@gmail.com*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ АНКЕРОВ С УЧЕТОМ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОРОД МАССИВА

Использование анкерного крепления весьма широко распространено как в чистом виде, так и в комбинации с другими способами крепления выработок. Для этого ежегодно в мире используются многие миллионы единиц устройств анкерного крепления различного типа.

Полностью залитые анкеры, которые представляют собой наиболее часто используемый тип анкеров: гладкий или ребристый стальной стержень (болт) вставляется в скважину, где пустое кольцевое пространство заполняется цементным или полимерным раствором. Передача нагрузки между породами и болтом происходит непрерывно по всей его длине за счет адгезии, механической блокировки и трения, возникающих на границах раздела анкер-раствор-порода.

Несмотря на значительный прогресс, связанный с использованием анкеров, все еще существует недопонимание относительно преимуществ и недостатков различных типов устройств и их применимость к различным проблемам горного производства.

На сегодняшний день построение конструкции анкерной системы остается в основном эмпирическим, основанным на классификации (ранжировании) горных массивов, таких как RMR7 и Q8, которые позволяют выработать рекомендации по плотности установки анкеров в зависимости от размера горной выработки и качества горного массива.

Однако в последнее время наблюдается быстро растущий интерес к разработке и применению численных моделей, основанных на различных алгоритмах дискретизации расчетной области, которые могут более реалистично включать в себя важные структурные особенности массива горных

пород (например, стыки блоков, плоскости напластования, разломы) и более качественно улавливать процессы механического разрушения, вызванные трещиноватостью.

Тем не менее, контактные характеристики взаимодействия анкера и массива до сих пор не сформулированы в полной мере. Помимо контактных поверхностей анкер-раствор-порода эффект взаимодействия между стержнем и массивом зависит от внутреннего сцепления залитого материала, например, смолы или цементного раствора.

Был проведен ряд исследований, посвященных изучению передачи нагрузки от стержня анкера к массиву для полностью залитых анкеров. Для этого используются испытание на вытягивание анкера, прикрепленного к тензометрическим датчикам. Предложены математические модели, которые предсказывают экспоненциальный спад напряжения сдвига по поверхности анкера в направлении свободного конца.

В случае натуральных исследований в шахтах имеются отличия от лабораторных экспериментов на вытягивание. Полевые эксперименты по мониторингу анкеров позволили выработать аналитический подход, в рамках которого сформулирована концепция нейтральной точки, которая полагала, что на поверхности анкера генерируются два сдвиговых напряжения на обеих сторонах от нейтральной точки, направленные в противоположные стороны. Один сегмент анкера тянет анкер к границе выработки, в то время как другой сегмент с нагрузкой толкает анкер вглубь массива.

Сложные взаимодействия между массивом, заполняющим раствором и анкерами требуют использование численных моделей с многочисленными параметрами и соответствующими соотношениями, что, тем не менее, позволяет более точно описать протекающие в массиве процессы.

Рассмотрим общие положения, касающиеся установки анкеров во взаимосвязи с развитием горных работ в массиве. Очевидно, что при проходке выработок массив деформируется и в нем происходит перераспределение исходных напряжений, и возникают те или иные взаимные неоднородные смещения частей массива. Эти смещения, как правило, увеличиваются при развитии выработанного пространства. И, более того, в отдельных частях массива растут градиенты смещений, т.е. деформации. Установленный анкер в той или иной степени следует за породами массива и также деформируется в зависимости от развития горных работ.

Вопросам анкерного крепления посвящены десятки и сотни исследований на протяжении многих лет. Основное внимание уделяется особенностям деформационного взаимодействия собственно анкера и закрепляемого массива горных пород, в том числе и тонкой прослойки (цементной, пластиковой и др.) между ними, обеспечивающей фиксацию анкера в скважине. При этом основной тестовой задачей, определяющей адекватность разрабатываемых подходов и вычислительных методов, является задача о выдергивании анкера из массива горных пород некоторой заданной силой, приложенной к его свободному концу. Подобного рода натурные эксперименты проводились неоднократно, что позволило накопить обширный экспериментальный материал, который может быть положен в основу контроля за теоретическими изысканиями с использованием численного анализа.

В значительно меньшей степени исследования касались определения фактических усилий, которые должны выдёргивать этот анкер в конкретных горнотехнических условиях. Отметим, что деформирование анкера и массива взаимосвязаны и взаимообусловлены, и, следовательно, выдергивающие усилия зависят от характера деформирования массива после установки анкера. При этом в начальный момент анкер полностью разгружен и не подвержен выдергиванию (за исключением сил начальной натяжки анкера гайкой).

Таким образом, нагрузка на анкер определяется изменением напряженно-деформированного состояния массива с течением времени. При этом, во-первых, может происходить дальнейшее развитие горных работ, с чем связаны новые подвижки массива, его деформирование и изменения напряженного состояния.

Во-вторых, многие породы проявляют свойство текучести. В частности, пучение пород может достигать десятков сантиметров и требует регулярных подрывок почвы выработки.

Задача о деформировании анкера решается в два этапа. Расчёты, выполненные на первом этапе, позволяют найти распределение параметров напряженно-деформированного состояния, сформировавшегося в массиве в результате проходки выработки еще до установки анкера.

На втором этапе уже задаются анкеры со своими свойствами в областях их расположения. В итоге получаем неоднородную по деформационным свойствам область, в которой в качестве начальных условий полагаем смещения везде равными нулю, напряжения во всей расчётной области,

кроме зон расположения анкеров, равными вычисленным на первом этапе, а в анкерах - равными нулю. При этом задаются характерные закономерности взаимодействия анкера и массива.

Решение поставленной таким образом задачи определяет состояние и поведение анкера в течение заданного промежутка времени.

В. А. Хакулов¹, А. В. Шаповалов¹, В. Н. Игнатов², М. В. Игнатов¹

¹ Кабардино-Балкарский государственный университет, г. Нальчик, Россия, e-mail: Vkh21@yandex.ru, Vet555_83@mail.ru, Ign_m@mail.ru

² Южно-Российский государственный политехнический университет, г. Новочеркасск, Россия, e-mail: VNIgnatov@yandex.ru

СОЗДАНИЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССОВ ЭКСКАВАЦИИ ДЛЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ

Тенденция внедрения современных производительных экскаваторно-автомобильных комплексов и переход к роботизированному горному производству кардинально меняют требования к геомеханическому обеспечению горных работ. Особенно это касается месторождений полезных ископаемых, обрабатываемых в скальных породах и отличающихся существенной изменчивостью структурных, прочностных свойств. Изменчивость структурных, прочностных свойств массивов горных пород отмечается внутри большей части месторождений твердых полезных ископаемых. При этом из-за высокой субъективной составляющей ставится под сомнение эффективность использования многих известных методологий оценки условий работы экскаваторно-автомобильных комплексов. Существующие методологии не позволяют адекватно регистрировать неоднородность и изменчивость массивов горных пород, эффективно их районировать для практического использования в перспективном, текущем планировании и проектировании горных работ. Имеющаяся на предприятиях широкая линейка типоразмера погрузочно-транспортного оборудования требует учета конкретных параметров экскаваторов при районировании по категориям взрываемости, а также оценки соблюдения проектных решений принимаемых на стадии буровзрывных работ. Сама методика районирования по категориям взрываемости требует комплексного подхода, учитывающего все основные характеристики экскаваторного забоя, влияющие на производительность экскаваторно-автомобильного комплекса: проработка подошвы уступа; гранулометрическая характеристика и параметры развала горной массы. Эти параметры экскаваторного забоя складываются из аналогичных параметров забойных блоков – частей экскаваторного забоя, обрабатываемых экскаватором с одного места стояния. Предлагается оценивать изменчивость технологического цикла, за который производится отработка объема горной массы в пределах забойного блока – с одного места стояния экскаватора (без перемещения).

Районирование экскаваторных забоев по традиционным методологиям весьма трудоемкий и продолжительный процесс, потому что объем забойных блоков подтверждается маркшейдерским замером, а фактическое время отработки забойных блоков устанавливается по данным хронометражных наблюдений. В то же время хронометражные наблюдения не могут использоваться для мониторинга в режиме реального времени на постоянной основе при отслеживании циклического изменения ритмичности отгрузки горной массы.

Одним из путей повышения эффективности перспективного, годового планирования и текущего управления является переход на современные информационные технологии горного планирования, использующие блочные модели месторождений. Процесс создания и наполнения блочной модели реальными данными о структурных и прочностных свойствах массивов вскрышных горных пород является большой проблемой. По результатам настоящих исследований предлагается кардинально изменить подход к районированию, сделав упор на горно-технологическое картирование.

Аппаратная часть комплекса горно-технологического картирования массивов пород размещается на экскаваторе и включает средства высокоточного позиционирования ковша, средства измерения энергетических показателей работы экскаватора и программные средства информационного обмена, а также специальное программное обеспечение.

Реализация системы открывает принципиально новые возможности проектирования горных работ, автоматизированного управления, а также новые возможности роботизации процессов горных работ и всего производства.

Конструктивно подсистема мониторинга и управления процессом экскавации состоит из двух частей: блок периферийных датчиков мониторинга процесса экскавации, который в герметичном, ударопрочном корпусе крепится с помощью магнитов на соединении рукоятки с верхней частью ковша экскаватора; блок управления размещается в кабине экскаватора. Мониторинг процесса экскавации предполагает регистрацию в режиме реального времени полного и неполного (перечерпания) цикла экскавации и параметров цикла экскавации: направления черпания; величины хода черпания; коэффициента наполнения ковша; времени черпания; времени поворота; времени цикла; угла поворота; энергетические показатели работы экскаватора.

Многомесячные работы по апробации в производственных условиях подсистемы установили надежность ее работы и позволили оценить эффективность практического использования.

Наибольшая ценность использования возможностей динамического мониторинга энергетических параметров представляется для горно-технологического картирования, когда решается комплекс задач оптимизации алгоритмов работы горного оборудования, повышения достоверности планирования и проектирования горных работ, текущего управления. В конечном итоге работа направлена на совершенствование современных программно-аппаратных и технических средств контроля и управления горными работами.

Список использованных источников

1. Капутин Ю. Е. Горные компьютерные технологии и геостатистика. Л: Недра. 2002. 424 с.
2. Хакулов В. А., Игнатов В. Н., Хакулов В. В. Роботизация открытых горных разработок // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), St. Petersburg, 2017, pp. 1-5.
3. Хакулов В. А., Шаповалов А. В., Игнатов М. В. Совершенствование перспективного проектирования горных работ на основе современных технологий повышения достоверности блочных моделей месторождений // Рациональное освоение недр. 2020. № 4. С. 43-49. doi: 10.26121/RON.2020.92.92.005.
4. Хакулов В. А., Шаповалов В. А., Игнатов В. Н., Игнатов М. В. Совершенствование управлением горными комплексами при работе экскаваторов с автосамосвалами в открытом цикле// Горный информационный аналитический бюллетень. 2020 № 10, специальный выпуск № 31, с. 57-72.
5. Исайченков А. Б. Оптимизация сопряжено выполняемых технологических процессов вскрышных работ при применении современных экскаваторно-автомобильных комплексов (на примере разреза «Тугнуйский»): дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2016. 231 с.

М. А. Чендырев, А. Г. Журавлев

*Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия,
e-mail: chendyrev@igduran.ru, juravlev@igduran.ru*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАПОЛНЕНИЯ БУНКЕРОВ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ ПУНКТОВ В СИСТЕМАХ ТРАНСПОРТА⁹

При понижении открытых горных работ может возникать необходимость в использовании комбинированного транспорта для снижения себестоимости перевозки, в частности конвейерного транспорта. Для сборочного звена в таких системах, как правило, применяются карьерные автосамосвалы, отличающиеся мобильностью и отсутствием жестких требований по крупности горной массы.

Для перегрузки из одного звена транспортной системы в другое необходимо использование перегрузочных пунктов. При разработке глубоких карьеров с ограниченными в плане размерами (алмазородные, меднородные, золоторудные, некоторые железорудные и др.) использование классических эстакадных перегрузочных складов затруднено ввиду отсутствия достаточных по

⁹ Исследования выполнены в рамках Государственного задания № 075-00581-19-00, тема № 0405-2019-0005.

размерам площадок. Вариантом решения проблемы являются бункерные перегрузочные пункты. При этом вопрос ограниченной аккумулирующей способности нивелируется организацией ритмичной работы звеньев транспорта, использованием магистральных видов транспорта с высокой производительностью (конвейер) или коротким временем цикла доставки на поверхность по кратчайшему расстоянию (например, скиповой подъемник).

В этих условиях важной научной задачей является обоснование вместимости бункера, обеспечивающего нормальную работу системы и при этом удовлетворяющего условиям минимальных пространственных размеров как в плане, так и по высоте для исключения неэффективного переподъема горной массы.

В докладе представлены результаты исследований приемных и перегрузочных бункеров в рамках решения указанных выше задач применительно к дробильно-конвейерным комплексам и автомобильно-скиповому транспорту.

Моделированием навала горной массы в бункере (рис. 1) с учетом расположения автосамосвалов относительно бункера определены рациональные параметры. Так, при двухсторонней разгрузке в бункер положительно сказывается смещение точки разгрузки самосвалов «внутрь» бункера, что может обеспечить повышение полноты загрузки бункера до 50 % или при той же полезной вместимости сократить высоту бункера.

На объем заполнения бункера при трехсторонней разгрузке в бункер автосамосвалов влияет очередность их разгрузки. Худший по заполнению случай имеет место при последовательной разгрузке трех автосамосвалов – с бокового разгрузочного места, центрального и второго бокового места, потери на неравномерности заполнения бункера могут составлять до 25 %. Сужение бункера по центральному месту разгрузки до 25 % оказывает малое влияние на объем заполнения бункера за счет лучшего его заполнения.

Оптимизация емкости бункера осуществляется путем моделирования динамики его заполнения и непрерывно либо циклически осуществляемой выгрузки из него. Разработанная модель позволяет варьировать количество мест разгрузки, производительность выгрузки, динамику сыпания горной массы из кузова автосамосвалов, неравномерность подачи самосвалов на разгрузку и др.

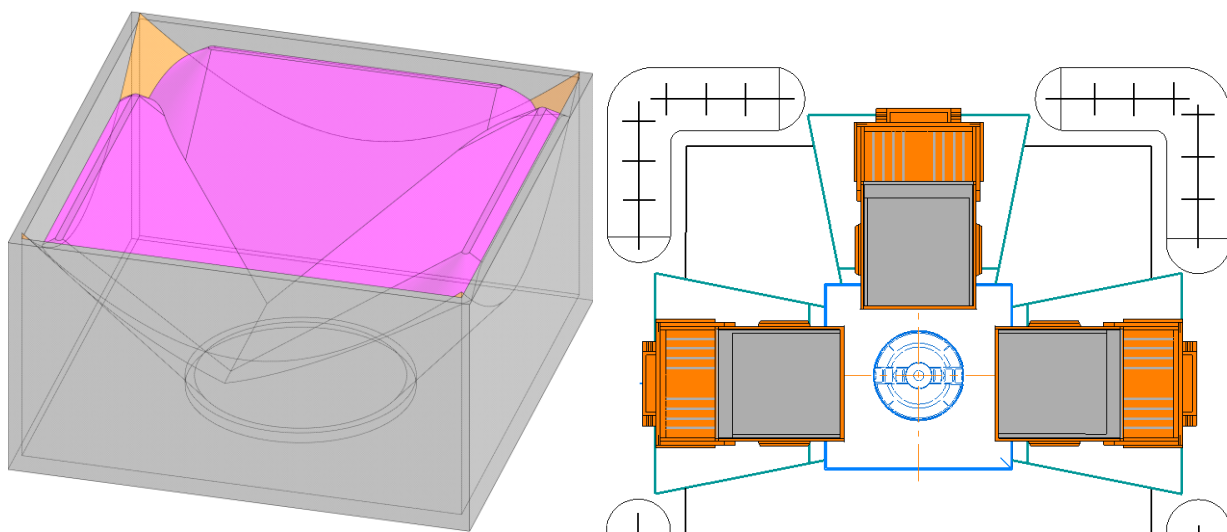


Рис. 1. Трехмерная модель насыпи в бункере от трех разгружаемых автосамосвалов (слева) и схема разгрузочных мест (справа)

Пример циклограммы заполнения перегрузочного бункера при различной емкости разгружающихся самосвалов и емкости скипа канатной наклонной карьерной подъемной установки приведен на рисунке 2. Как видно из графика, максимальная емкость бункера может требоваться на малый промежуток времени, и при реализации емкость бункера можно принять меньше.

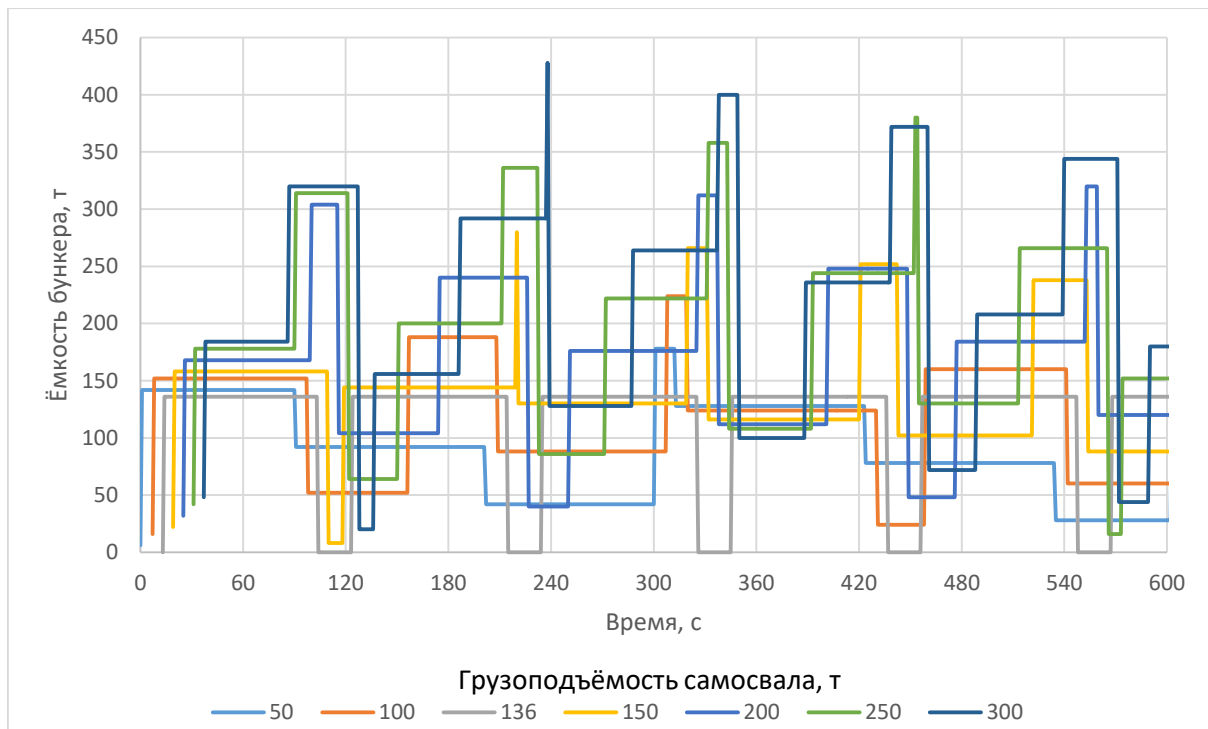


Рис. 2. Циклограмма заполнения бункера автосамосвалами с учетом циклической выгрузки на скиповой подъемник

Оценены рациональные параметры бункеров дробильно-перегрузочных установок с двумя бункерами, позволяющие обеспечить ритмичную их работу.

И. Н. Чурсин

*Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: chursin.ivan93@gmail.com*

МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССОВ СДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ SENTINEL-1

Для современных технологий добычи угля на угольных месторождениях характерны высокие темпы и объемы добычи, большие площади вовлекаемых территорий, и, как следствие, сильное техногенное воздействие на эти территории. Это воздействие влечет за собой такие явления, как оседания земной поверхности, землетрясения [1], провалы, трещины, а также выделение газа на поверхность, который может скапливаться в непроветриваемых помещениях и приводить к взрывам в жилых домах. Для предотвращения негативных последствий этих явлений возможно производить оперативные наблюдения с использованием радиолокационных спутниковых систем, которые могут охватывать достаточно большие площади, вовлеченные в горные работы. В настоящей работе были проведены наблюдения поверхности подработанных территорий вблизи Ленинска-Кузнецкого в Кемеровской области за 2017-2020 годы с использованием радиолокационных спутниковых снимков со спутников Sentinel-1.

Спутниковые снимки Sentinel-1 были скачаны с официального сайта миссии, а затем обработаны в программном пакете SNAP, в котором есть инструментарий для обработки непосредственно спутниковых данных Sentinel-1. Выбиралось одно главное изображение, с которым попарно строились интерферограммы с остальными изображениями в серии.

В результате обработки снимков в SNAP получены 18 интерферограмм по снимкам 2017 года, 16 интерферограмм по снимкам 2018 года, 10 интерферограмм по снимкам 2019 года и 10 интерферограмм по снимкам 2020 года. Важно также отметить, что на заданные периоды имеется

только съемка с нисходящих орбит, что лишает возможности подтвердить результаты количественных измерений обработкой съемки с восходящей орбиты. Тем не менее, данные, которые есть, дают возможность обнаружить просадки и измерить значения смещений, а затем сравнить их в тех местах, где присутствуют наземные наблюдения. В результате визуального изучения полученных интерферограмм, сопоставленных со слоями ГИС, содержащими планы горных работ и общую инфраструктуру района, были обнаружены зоны сдвижения земной поверхности.

Полученные интерферограммы были проанализированы в пакете STAMPS по методу постоянных отражателей [2], на основе которого были отобраны пиксели с наиболее стабильной фазовой составляющей, которые можно использовать для измерений сдвижения земной поверхности вдоль линии визирования спутника. Для участков сдвижения земной поверхности были составлены графики скоростей сдвижения, а также построены карты-схемы с годовыми величинами скоростей сдвижения.

Сопоставления с планами горных работ, в районе поселка Байкаим показало, что произошедшие процессы сдвижения хорошо коррелируют с отработкой лав Поленовского и Болдыревского пласта в разные годы.

Список использованных источников

1. Яковлев Д. В., Лазаревич Т. И., Цирель С. В. Генезис и развитие природно-техногенной сейсмоактивности Кузбасса // Уголь, 2013. сс. 53-57.
2. Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers // Geophysical research letters. 2004. Vol. 31. No. 23. Pp. 1–5.

Д. Н. Шibaева, Б. А. Власов, П. А. Шумилов, С. В. Терещенко

Горный институт КНЦ РАН, г. Анатимы, Россия,

e-mail: shibaeva_goi@mail.ru, sertereshchenko@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛОТКА ВИБРОПИТАТЕЛЯ НА СКОРОСТЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КУСКОВ ГОРНОЙ МАССЫ

Одним из главных мировых трендов цифровизации промышленности, работы отдельных технологических линий и аппаратов является создание цифровых двойников, которые позволяют увидеть продукт, услугу или работу производства еще на этапе планирования. Первым шагом к их созданию является цифровая модель, обеспечивающая возможность оценки и проверки конструкторских решений. В программном комплексе Rocky DEM, использующем для моделирования метод дискретных элементов, создана кинематическая модель радиометрического сепаратора с целью оценки влияния геометрических параметров лотка транспортирующего вибропитателя (прямоугольной, параболической и треугольной форм профилированной части лотка) на траектории и скорости движения кусков по его поверхности (рис. 1).

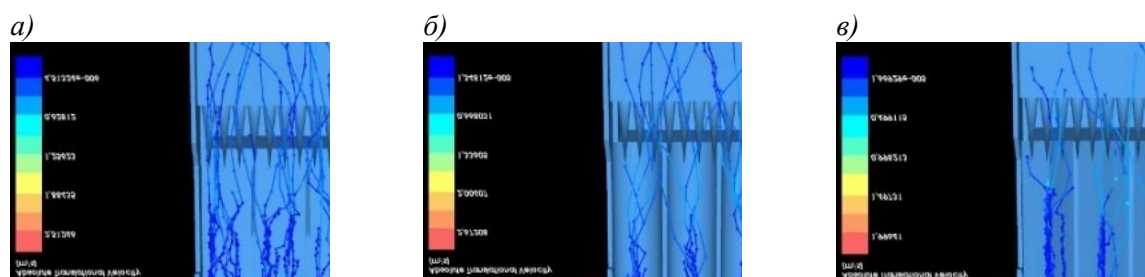


Рис. 1. Моделирование процесса перемещения рудной массы в зону облучения и регистрации в среде RockyDEM

Установлено [1], что треугольная форма профилированной части лотка транспортирующего вибропитателя обеспечивает наилучшее формирование однорядного потока кусков рудной массы. Показано, что для такой формы лотка 51 % траекторий проходят вдоль центральной оси, 30 %

траекторий с незначительным отклонением не более 3 %. Для лотка с параболической формой канала только 25 % траекторий проходят вдоль центральной оси и 22 % с незначительным отклонением, по лотку с прямоугольной формой канала количество траекторий, проходящих вдоль центральной оси, снижается до 8 % и возрастает количество траекторий с незначительным отклонением до 16 %. Минимизация числа соударений кусков рудной массы и площади их соприкосновения с поверхностью лотка вибропитателя треугольной формы обеспечила повышение до 0,675 м/с скорости движения кусков на 40 % по сравнению с прямоугольной (0,48 м/с) и на 18 % с параболической (0,57 м/с) формами.

Анализ результатов физического моделирования процесса перемещения рудной массы из приемного бункера радиометрического сепаратора в зону облучения и регистрации подтвердил преимущества треугольной формы лотка и целесообразность проведения предварительной оценки с применением имитационного моделирования: выравнивание траектории движения куска (переход в прямолинейную) происходит при прохождении только 24,7 % длины профилированной части лотка, тогда как для параболического профиля переход в прямолинейную траекторию происходит при прохождении уже 55,8 % длины лотка, что влияет на скорость прохождения куска по лотку: средняя скорость движения кусков рудной массы в потоке увеличивается на 30 % с 0,24 м/с до 0,31 м/с.

Список использованных источников

1. Tereshchenko S. V., Shibaeva D. N., Vlasov B. A., Shumilov P. A. Effect of vibrating feeder pan geometry on radiometric separator performance / Eurasian Mining. 2020. № 2. P. 39-42

Д. Н. Шibaева, С. В. Терещенко

Горный институт КНЦ РАН, г. Анатимы, Россия,

e-mail: shibaeva_goi@mail.ru, sertereshchenko@mail.ru

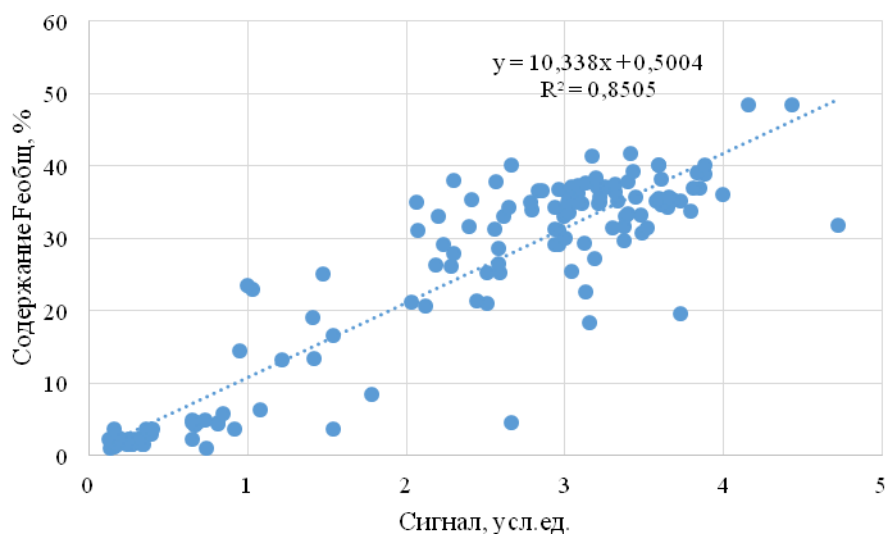
К ВОПРОСУ О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО КУСКОВОГО ОБОГАЩЕНИЯ

На пробе железистых кварцитов Оленегорского рудного поля проведены сравнительные исследования по изучению возможности реализации процесса их предконцентрации посредством магнитной и радиометрической сепарации кускового материала, прошедшего среднюю стадию дробления.

Преимущество радиометрической сепарации по сравнению с магнитной сепарацией заключается в том, что при ее реализации анализируется каждый кусок, прошедший через зону облучения первичным рентгеновским излучением, и регистрации от него вторичного излучения, что позволяет осуществлять сразу две технологические задачи: высокоточный процесс опробования кусковой добытой рудной массы с определением в ней содержания полезного компонента (поскольку анализируется каждый кусок отдельно) и ее разделение - выделение из технологического потока пустых и слабоминерализованных пород с возможностью формирования нескольких сортов рудной массы.

Результаты опробования и прогнозирования качества продуктов разделения за любой промежуток времени основываются на предварительно полученной корреляционной зависимости регистрируемого сигнала с поверхности куска и содержания в нем $Fe_{общ}$ (рис.). Установленные значения коэффициента корреляции – 0,92 и коэффициента аппроксимации полученных данных линейной функцией – 0,85 свидетельствуют об эффективности прогноза качества рудной массы, прошедшей через радиометрический сепаратор.

Итоговые результаты технологических исследований (табл.) демонстрируют близкие технологические показатели по обоим методам. Однако преимущество рентгенорадиометрического обогащения по сравнению с магнитной сепарацией определяется не только снижением потерь полезного компонента с немагнитной фракцией с 3,9 до 2,7% $Fe_{общ}$, а, главное, в открывающейся возможности обеспечивать информацией о качестве полезного компонента в технологическом потоке, поступающем на последующие обогатительные переделы, а также формировать техногенное месторождение и планировать его последующую отработку с учетом качественных характеристик немагнитной фракции.



Корреляционная зависимость регистрируемого сигнала с поверхности куска и содержания $Fe_{общ}$

Технологические показатели разделения железистых кварцитов

	Наименование продукта	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
			$Fe_{общ}$	$Fe_{магн}$	$Fe_{зем}$	$Fe_{общ}$	$Fe_{магн}$	$Fe_{зем}$
Магнитная сепарация								
	Магнитный продукт	74,7	32,9	22,2	8,1	96,1	99,7	96,0
	Немагнитный продукт	25,3	4,0	0,2	1,0	3,9	0,3	4,0
Радиометрическая сепарация								
	Магнитный продукт	77,1	32,3	21,5	7,9	97,3	99,7	97,2
	Немагнитный продукт	22,9	3,1	0,2	0,8	2,7	0,3	2,8
	Исходная руда	100	25,6	16,6	6,3	100	100	100

