

ГОРНАЯ ИНФОРМАТИКА

УДК 622 + 55:531

**РАЗВИТИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ НЕЛИНЕЙНОЙ ГЕОМЕХАНИКИ
ЧАСТЬ II: НОВЫЕ МЕТОДЫ, МОДЕЛИ МЕТАДАНЫХ, БАЗЫ ГЕОДАНЫХ
И БАЗОВЫЕ СЛОИ ЭЛЕКТРОННЫХ КАРТ ДЛЯ ТИПОВОГО ГЕОПОРТАЛА
ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ РЕГИОНОВ СИБИРИ**

В. П. Потапов¹, В. Н. Опарин², Л. С. Миков¹, С. Е. Попов¹

¹Федеральный исследовательский центр информационных
и вычислительных технологий (Кемеровский филиал),

E-mail: ict@ict.nsc.ru, ул. Рукавишниковая, 21, 650025, г. Кемерово, Россия

²Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН,

E-mail: oparin@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

Представлен новый методологический подход к созданию современных систем комплексного геомеханического мониторинга крупномасштабных объектов горного недропользования в Сибири с использованием мультимодальных и цифровых фабрик экспериментальных и теоретических данных разнородной геоинформации. Описаны основные элементы разрабатываемой геоинформационной системы с обозначением соответствующих связей, реализуемых через системы оркестрации контейнеров. Организованы технологии сбора и передачи информации с использованием Интернета вещей, с последующими этапами хранения, обработки и систематизации с учетом имеющейся профильной информации по объектам недропользования. Результаты тестирования информационной системы в различных режимах функционирования иллюстрируются на примере решения важных задач в Кузбассе и Норильском горно-промышленном комплексе. Для обработки нелинейных деформационно-волновых и сейсмозмиссионных процессов предложен новый энергетический подход к комплексному анализу в рамках теории волн маятникового типа.

Информационные системы и технологии, крупномасштабные объекты недропользования Сибири, модели метаданных, базы геоданных, типовой геопортал, горнопромышленный район, тестирование программных продуктов, "геомеханическая температура", термодинамические периоды

DOI: 10.15372/FTPRPI20220413

За последние десятилетия в России и за рубежом происходит накопление разнообразных данных, характеризующих как геомеханические свойства массивов горных пород, так и динамику их изменения под воздействием техногенных нагрузок при ведении горнодобывающих работ. При этом изменяются не только их количественные характеристики, но и происходят

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта (№ 20-05-00051), а также в рамках проекта НИР (№ гос. рег. 121062200075-4).

качественные изменения, обусловленные генерацией мультимедийных потоков. Теперь уже следует говорить не только о массивах экспериментальных данных, но и об их потоках, “облаках точек”, мульти- и гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли и др., для которых в настоящее время отсутствует общий методологический подход по созданию систем комплексного геомеханическо-геодинамического мониторинга. Существующие инструментarii практически не подготовлены к приему и обработке разнообразной информации, в связи с чем необходимо пересмотреть сами подходы к созданию современных систем геомониторинга, позволяющие решить поставленную задачу. Такой опыт обобщен в двухтомной монографии международного коллектива ведущих ученых, где отмечена необходимость комплексной обработки больших объемов экспериментальных данных разнородной информации в режиме облачных сервисов [1].

В данной части статьи отражены результаты по обоснованию нового подхода к созданию современных систем комплексного геомеханического мониторинга с использованием мультимодальных потоков и цифровых фабрик данных [2–4]. Рассмотрены основные элементы разрабатываемой геоинформационной системы и показаны соответствующие связи между ними, реализуемые через системы оркестрации контейнеров [5], каждый из которых инкапсулирует процессы оперативной обработки экспериментальных данных.

ЦИФРОВЫЕ ФАБРИКИ ДАННЫХ КАК БАЗОВЫЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЛЕКСНЫХ СИСТЕМ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

О мультимодальности геомеханических данных. Новые средства измерений для оценки изменения геомеханико-геофизических и иных свойств массива горных пород, а также горно-технологических параметров разработки месторождений полезных ископаемых можно разделить на следующие основные группы:

- системы дистанционного зондирования Земли (радары бокового обзора, лазерные сканеры, гиперспектральные системы, спутниковые радары и др.) [6];
- системы Интернета вещей (IoT), базирующиеся на комплексах “интеллектуальных датчиков” для замера физических характеристик, с последующей передачей экспериментальных данных на базовые станции [7];
- экспериментальные стенды для физического моделирования геотехнических процессов и оценки физико-механических свойств массивов горных пород [1];
- экспериментальные экспедиционные и горнотехнические производственные натурные замеры [1].

Именно последние на протяжении многих лет служат основой для получения новых знаний для решения актуальных задач горного дела. В ряде случаев получаемые данные систематизировались, создавались их прикладные базы, которые использовались одной или несколькими организациями. В настоящее время такое положение дел несколько улучшилось, но проблемы информационного обмена пространственными данными между различными заинтересованными организациями остаются, что препятствует получению новых знаний на современном уровне, соответствующем требованиям цифровой экономики. При этом объем информации, получаемой от различных систем промышленного мониторинга, возрос на порядки.

В [8] рассматривались новые подходы, основанные на использовании облачных сервисов и технологий работы с большими объемами информационных данных, которые позволяли решать проблему обмена геомеханической информацией как между отдельными организациями, так и специализированными системами геомеханического мониторинга. В связи

с появлением новых технологий генерации потоков пространственных данных о геомеханико-геодинамическом состоянии массива горных пород [1–4] возникла необходимость в формировании более общей методологии для создания систем комплексного геомеханико-геоэкологического мониторинга, учитывающих произошедшие изменения в процессах регламентированного сбора, хранения и предварительной обработки информации, с последующим созданием специализированных вычислительных моделей.

В продолжение работ по реализации новых подходов к созданию принципиально новых систем комплексного геомеханико-геоэкологического мониторинга [9] следует особо подчеркнуть, что разнообразная пространственная геоинформация о состоянии породных массивов, особенно в районах с высокими техногенными нагрузками, воздействующими на окружающую среду, становится настолько многомерной (включая форматы обмена и представления данных), что для ее обработки необходимо изменять и адаптировать уже имеющиеся информационные технологии. Для этого целесообразно применять подходы, основанные на работе с мультимодальными данными [10], определение которых позволяет на единой основе вести сбор и загрузку информационных данных в системах комплексного геомониторинга.

Мультимодальность описывает особенности взаимодействия данных с точки зрения текстовых, аудиальных, лингвистических, пространственных и визуальных ресурсов — модусов, которые необходимы для обмена информацией [11]. Если речь идет о средствах передачи информации (медиа), мультимодальность представляет собой использование нескольких модусов (средств информации) для создания единого подхода к обработке и анализу геоинформации. Коллекция данных модусов или элементов определяет влияние мультимодальности на различные ситуации или возможности повысить восприятие пользователем той или иной идеи или концепции. Концептуальная схема, представленная ниже, иллюстрирует такой мультимодальный подход к обработке геоинформации в комплексных мониторинговых системах:

Аэрокосмические ДЗЗ	Мультиспектральные, гиперспектральные, радарные снимки
Интеллектуальные датчики Интернета вещей	Данные по состоянию массива горных пород
Лабораторные и натурные эксперименты	Свойства горного массива
Объекты недропользования	Горно-геологические условия, техногенные и геомеханические процессы

Схема соответствует основным группам экспериментальных данных. В общем случае каждая модальность определяет достаточно большую группу однородных технологий, связанных с получением пространственно-временной информации (например, средства дистанционного зондирования Земли). В случае появления новых средств измерений модальность либо расширяется, либо формируется новая (при условии, что создана принципиально новая технология измерения свойств массивов горных пород).

Формирование модальностей позволяет сгруппировать используемые методы хранения и обработки информационных данных, опираясь только на соответствующие их метаописания, необходимые на последующих этапах работы с экспериментальными и иными данными, а также обеспечить интеграцию потоков данных, получаемых от различных средств измерений в пределах модальности.

Разделяя геоинформационные потоки на модальности, можно существенно оптимизировать структуры обработки, хранения и анализа геомеханической информации на основе стандартных цифровых платформ, называемых “фабриками данных”. Существенной особенностью таких фабрик является то, что мультимодальные данные, поступающие к ним, преобразуются

в цифровую форму в соответствии с их метаописаниями, характеризующими специфику прикладной области. Сама архитектура фабрик данных формируется из типовых элементов, таких как контейнеры, объединяемые в зависимости от типа модальности в хранилище данных; блок оркестрации; вычислительные блоки по обработке и анализу данных. Обобщенная архитектура цифровой фабрики данных как цифровой платформы геомеханического мониторинга приведены на рис. 1.

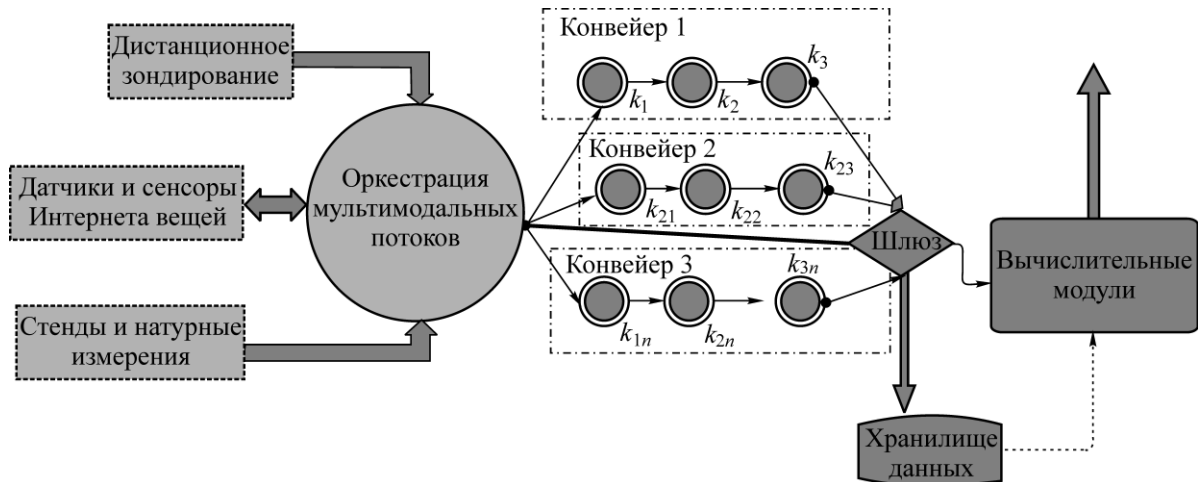


Рис. 1. Схема комплексного геомониторинга на основе цифровой фабрики данных ($k_{11} - k_{3n}$ — контейнеры процессов обработки группы мультимодальных данных, объединяемых в контейнеры определенного типа в зависимости от специфики генерации потоков)

Здесь показаны основные элементы цифровой фабрики данных, а также информационные связи между ними. Каждый из элементов выполняет определенные функции, реализуемые в зависимости от типа обрабатываемой модальности через множество контейнеров. Отдельный контейнер представляет собой инкапсулируемый модуль обработки данных, информационно связанный с другими. Кластер контейнеров образует конвейер, в результате работы которого реализуется функционал по обработке конкретного типа модальности. При этом промежуточные результаты обработки, а также сами исходные данные помещаются в хранилище данных, из которого они в дальнейшем могут быть получены на любом этапе работы системы геомониторинга. Это позволяет локализовать методы обработки данных, а также осуществлять их эффективное масштабирование для переноса в другие системы, поскольку любой контейнер имеет свой вход и выход.

При таком подходе, где все компоненты переводятся на уровень микросервисов [11], существенно упрощается не только разработка системы геомониторинга, но и достаточно просто реализуется переход на концептуально другие методы анализа геомеханической информации. Блок вычислительных моделей также представляет собой набор модулей, осуществляющих анализ экспериментальных данных с последующей передачей результатов на вышележащий уровень. При этом он готовит информационные потоки для цифровых двойников. Сами вычислительные модули не являются монолитным блоком, но могут реализовываться как микросервисы.

Если ранее системы геомеханического мониторинга строились как монолитные и состояли из больших программных комплексов, то переход на цифровые фабрики не требует больших интеллектуальных затрат и позволяет на единой методологической основе как разрабатывать специфические системы мониторинга, так и оперативно модифицировать уже существующие.

Одним из главных элементов цифровой фабрики является новый блок — оркестрация, основное предназначение которого заключается в управлении как конвейерами, так и группами контейнеров, системами хранения и моделирования информационных данных. О специфических особенностях реализации оркестрации опубликовано несколько работ [12, 13], однако для систем геомеханического мониторинга их применение рассматривается впервые. Отметим наиболее важные для цифровой фабрики особенности блока оркестрации, которые позволяют:

- абстрагироваться от базовой инфраструктуры фабрики данных и тем самым упростить разработку, развертывание и управление приложениями. При этом процедура развертывания приложений становится одинаковой и не зависит от количества их контейнеров;

- осуществлять бесперебойную работу кластеров контейнеров;
- масштабировать количество копий;
- повышать эффективность работы оборудования.

Продолжая аналогию с промышленным предприятием, оркестрация выполняет функции, аналогичные подразделению главного технолога, осуществляющего координацию всех производственных процессов.

Таким образом, для реализации комплексного геомониторинга как цифровой фабрики имеется достаточно просто организованная вертикально и горизонтально интегрированная информационная инфраструктура из стандартизованных и адаптивно заменяемых блоков, обеспечивающих регламентированный сбор, обработку, хранение и анализ мультимодальных потоков информации, которые характеризуют геомеханическое состояние породного массива и динамику изменения любых его физических или геоэкологических характеристик. В настоящее время осуществляется детализация отдельных элементов цифровых фабрик. Вопросы создания на их основе цифровых двойников рассмотрены в [14]. Они являются логическим основанием нового подхода к созданию систем комплексного геомеханического мониторинга на базе достижений современных информационных технологий и методов искусственного интеллекта, необходимых для работы с новыми типами больших потоков пространственной геоинформации. Данный подход основан на мультимодальности экспериментальных данных и технологиях цифровых фабрик. Он позволяет достаточно просто и быстро вести их разработку с ориентацией на различные профильные прикладные горно-технологические задачи с учетом перехода на обработку и анализ больших потоков данных.

Поскольку разрабатываемая информационная архитектура становится при этом более гибкой, она дает возможность адаптивно настраивать необходимые конфигурации, динамически изменяя способы сбора информации, методики и алгоритмы обработки пространственных данных, включая новые и известные математические модели с соответствующими комплексами программ.

Системы оценки геомеханических свойств массивов горных пород можно представить как набор различных модальностей, каждая из которых связана с определенными средствами измерений их физических свойств. Большое разнообразие форматов экспериментальных данных, технологий формирования потоков геопрограммной информации и моделей для их хранения требуют качественно и количественно новых подходов, которые позволят на единой методологической основе создавать современные комплексные системы цифрового геодинамико-геомеханического мониторинга с учетом специфики их применения в конкретных областях горного дела в Сибири.

Использование фабрик данных даст возможность существенно упростить не только архитектуру прикладных систем геомониторинга, но и значительно ускорить время их создания, опираясь на облачные сервисы как один из инструментов работы с пространственно-временной информацией, характеризующей свойства массива горных пород и их изменения, особенно в районах с высокими техногенными нагрузками. Специфику горно-технологических и иных условий для объектов крупномасштабного недропользования также можно учитывать при создании фабрик данных как базового элемента систем геомеханического мониторинга, формируя соответствующие конвейеры процессов сбора, загрузки и обработки потоков экспериментальных данных, помещая последние в специальные контейнеры.

Фабрика данных содержит в себе также программы ввода информации из каталогов сейсмических событий и выполняет визуальный комплексный анализ на основе разработанных авторами алгоритмов. Дальнейшее расширение фабрики данных предлагается выполнить за счет интеграции программ анализа линеаментов, в том числе с позиций геомеханической термодинамики [2], на основе спутниковых радарных данных (мультимодальность) с переносом информации в специализированную ГИС.

ДАННЫЕ ТЕСТИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ТИПОВЫМ ГЕОПОРТАЛОМ ДЛЯ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ РЕГИОНОВ СИБИРИ

Приведем некоторые результаты тестирования информационной технологии на примере решения ряда прикладных задач общего недропользования в Сибири с позиций геомеханико-геодинамической и геоэкологической безопасности этой минерально-сырьевой базы страны.

Работа специализированного программного комплекса “Сейсмика” для районов Кузбасса. Специализированный информационный комплекс, ориентированный на реализацию энергетического подхода к анализу сопряженных сейсмоземиссионных, нелинейных деформационно-волновых, геоэкологических и иных процессов, контролируемых соответствующими методами (спутниковыми ДЗЗ, сейсмологическими, деформационными и др.), позволяет в интерактивном режиме осуществлять сложный пространственно-временной анализ выделяемых групп сейсмособытий высоких энергетических уровней. Для этого можно использовать соответствующие каталоги данных как по мировой сети сейсмологических наблюдений, так и региональной по объектам горного недропользования (например, ВНИМИ или Алтае-Саянского филиала ФИЦ “Единой геофизической службы РАН” [7]). Геоинформационный комплекс “Сейсмика”, выполненный на основе языка Python и профильных для него библиотек, обеспечит мобильность и возможность их переноса на любые операционные среды.

Интерактивное взаимодействие с графической информацией осуществляется с помощью специализированного меню, позволяющего выделять часть графического изображения в пространстве, сохранять на диске и др.

Так, на рис. 2 представлен сравнительный гистограммный анализ распределения магнитуд сейсмособытий в Кузбассе за 2016 и 2020 гг. Приводятся четыре типа гистограмм, которые показывают незначительное расхождение в интегральном характере сейсмособытий и, следовательно, отсутствие катастрофического вида сейсмических проявлений в данные годы.

Характер изменения магнитуд сейсмических событий за те же годы иллюстрирует рис. 3. Наблюдаемые различия в характере графиков свидетельствует о том, что в начале 2016 г. фиксировались сейсмособытия, по-видимому связанные с перенастройкой группы сейсмостанций и изменениями в геотехнологиях добычи угля в Кузбассе, обусловленных ограничением на объемы используемых ВВ.

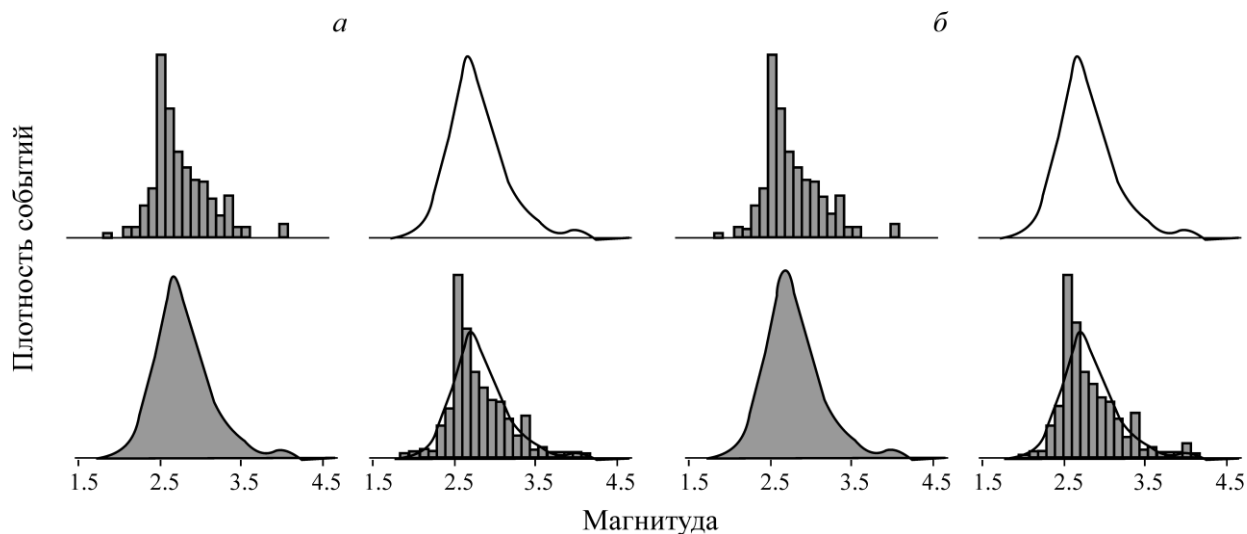


Рис. 2. Сравнительный анализ гистограмм четырех типов сейсмических событий в Кузбассе за 2016 (а) и 2020 гг. (б)

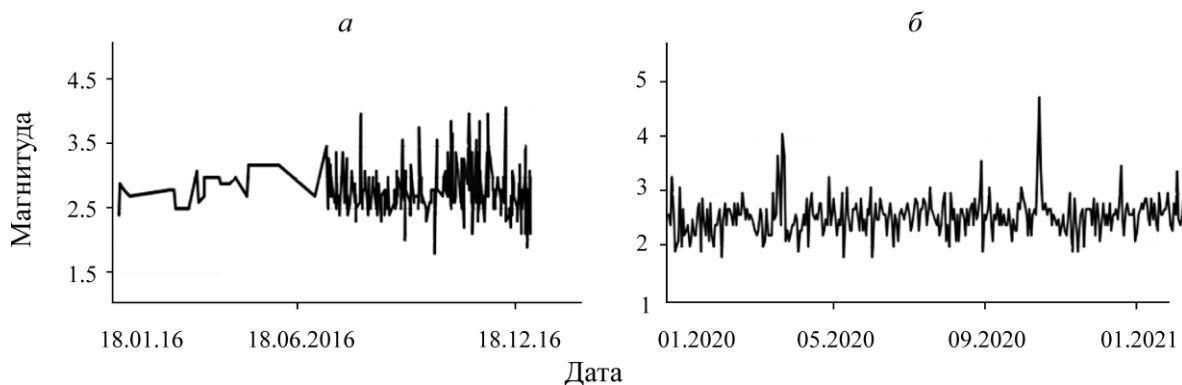


Рис. 3. Изменение магнитуд сейсмических событий за 2016 и 2020 гг. в Кузбассе

Согласно рис. 4, в 2016 г. произошло некоторое смещение сейсмособытий в сторону больших глубин по сравнению с 2020 г. Однако это может быть обусловлено изменением алгоритма обработки, а также “распознавания” данных, применяемого разработчиками каталога.

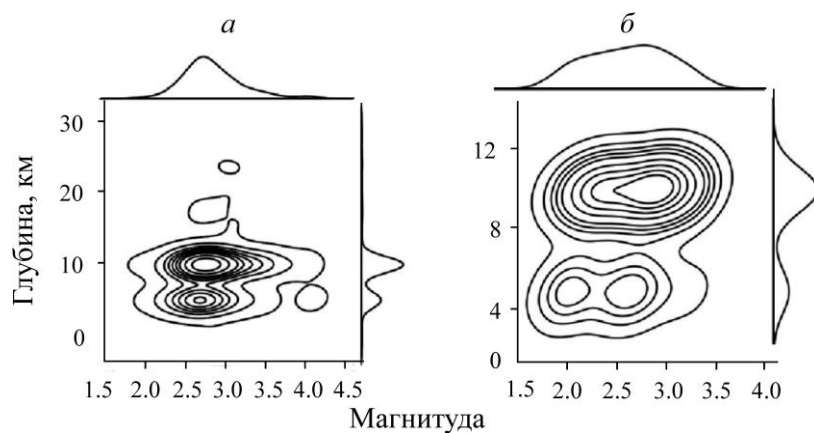


Рис. 4. Карта распределения магнитуд сейсмособытий в зависимости от их глубины за 2016 (а) и 2020 гг. (б) в Кузбассе

На рис. 5 демонстрируются карты плотности потока сейсмических событий и их распределение по горнодобывающему региону, дополняемые гистограммами по соответствующим осям координат. С другими примерами применения этого программного комплекса в его развитии можно ознакомиться в [1, 8, 10].

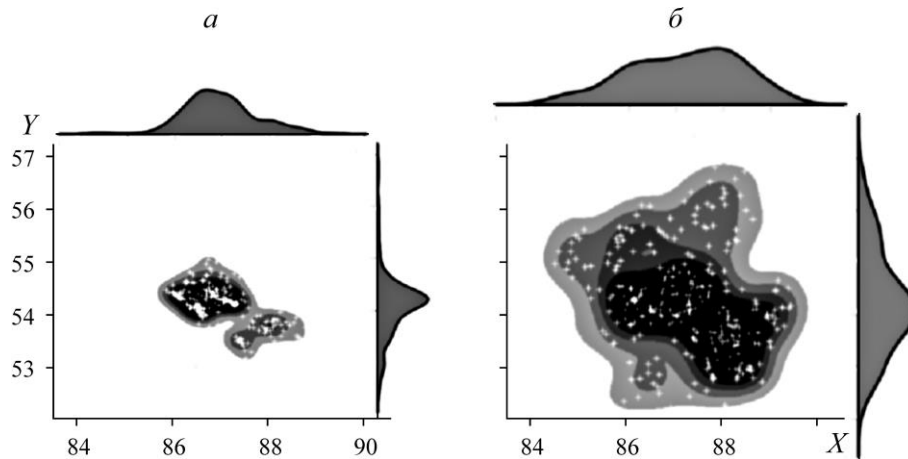


Рис. 5. Карты плотностей сейсмособытий в 2016 (а) и 2020 гг. (б) в Кузбассе

О РАБОТЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СБОРА И ОБРАБОТКИ РАДАРНЫХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГОВОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕХАНИКО-ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ КРУПНОМАСШТАБНОГО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ СИБИРИ

Рассмотрим некоторые возможности применения разработанного программного комплекса для решения актуальных задач оценки и наглядного представления взаимосвязей между процессами крупномасштабного деформирования поверхности Земли в регионах активного недропользования Сибири и опасными или потенциально возможными катастрофическими (в т. ч. по геоэкологическим аспектам) последствиями от подобного рода техногенной деятельности для среды обитания животного и растительного мира.

Из теории нелинейных упругих волн маятникового типа следует [15 – 17], что их возникновение и распространение в напряженных геосредах блочно-иерархического строения связано с широким диапазоном сопутствующих деформационных процессов, а также индуцируемым ими эмиссионным (сейсмо-электромагнитным, геохимическим, гидродинамическим и др.) процессом. В этом отношении развитие нелинейных деформационных процессов, вне зависимости от их источников, является наиболее энергоемким и разрушительным по своим потенциальным последствиям для окружающей среды. Уровень последствий напрямую зависит от размеров и энергетических характеристик источников возмущения таких процессов [17].

Для крупных и особо крупных из них по отмеченным параметрам необходимо использовать известные возможности спутниковых систем радарной интерферометрии, а также мировой и региональной сетей сейсмологических наблюдений в виде единого программного комплекса автоматизированного сбора и обработки разнородной информации.

Рассмотрим работоспособность создаваемого геоинформационного комплекса по разделу “Радарная интерферометрия”, а также их совместной цифровой системы “Сейсмика и геодинамика городов, техногенных объектов страны на основе методов радарной интерферометрии”.

Его применение показано на следующих примерах.

• Расчет смещений в результате крупного катастрофического по экологическим последствиям района Норильска (“аварийные баки”) с анализом соответствующих данных на мониторинговом объекте за период 2019–2020 гг. (рис. 6). Приведены результаты расчета смещений по методу SBAS с увеличенной зоной расчета, в которую попали точки эффективных отражателей (рис. 6а) и смещения по времени t для расчетных точек, а также температурная кривая (жирная линия), коррелирующая с расчетными смещениями (рис. 6б).

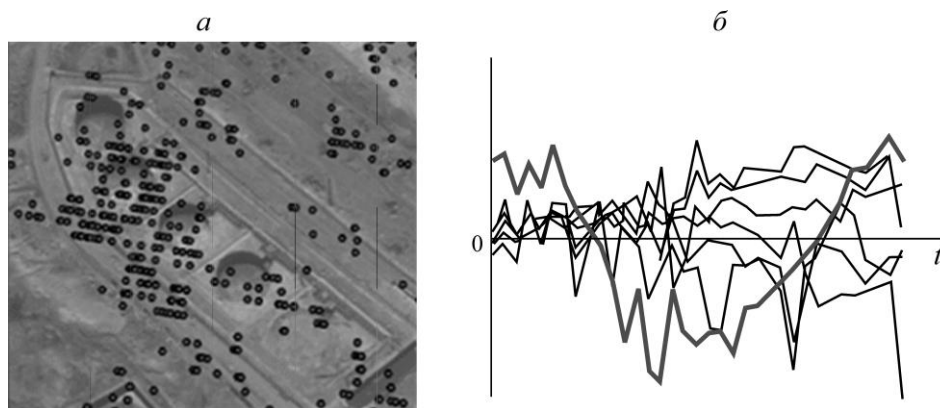


Рис. 6. Смещения в районе “аварийных баков” Норильска (а) и анализ смещений за 2019–2020 гг. (б)

• Скорость смещения (рис. 7) поверхности Земли в районе произошедшего катастрофического оползня разреза “Кийзакский” в 2019 г. [2]. Видно, что диапазон смещений в районе оползня за мониторинговый период 12.04.2019–11.06.2019 составил $-0.027 - +0.1933$ м, что отвечает средней скорости абсолютного деформирования ~ 0.11 м/мес.

• По результатам работы расчетной 3D-модели и соответствующим данным смещений спутниковой информации для района крупного оползневого события в период 2019–2020 гг. в пределах угольного разреза “Колыванский” в Новосибирской области (рис. 8) составлена карта смещений, а также показано изменение смещений во времени для отдельных точек оползня.

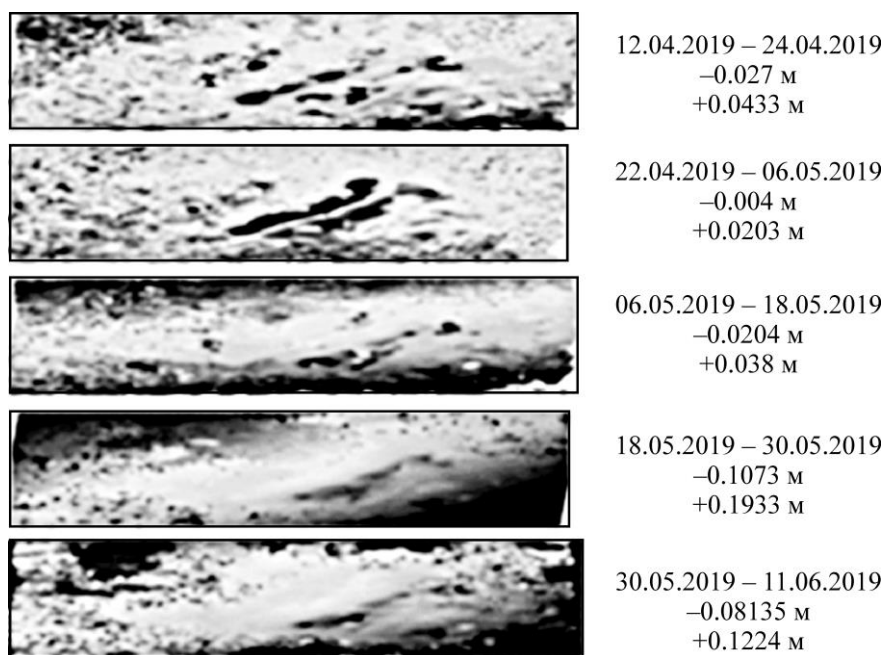


Рис. 7. Динамика оползня (скорости смещения) разреза “Кийзакский”

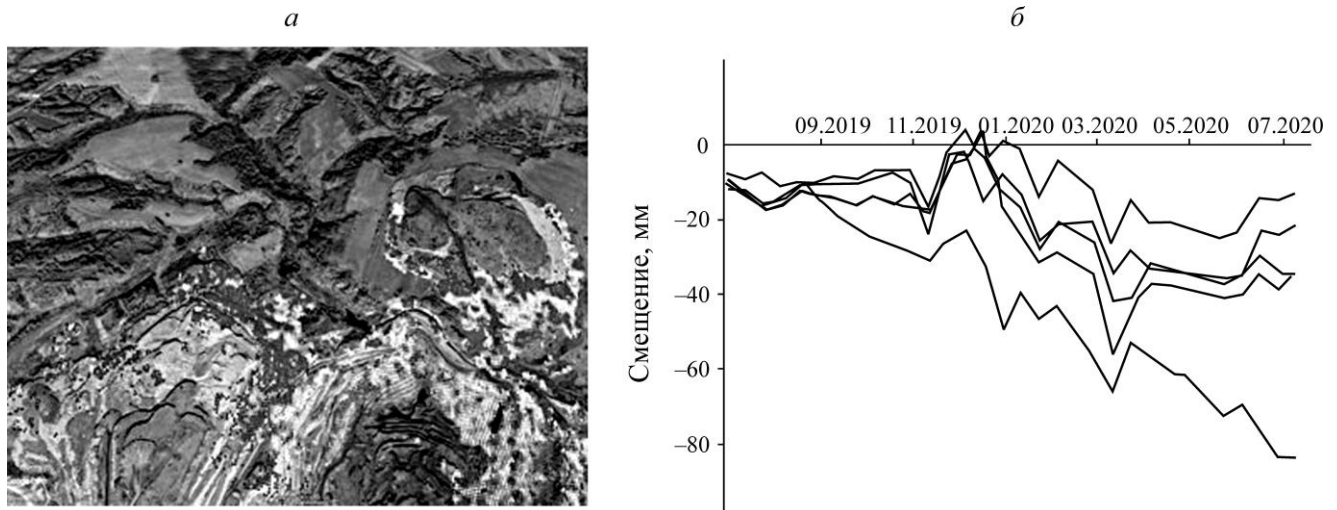


Рис. 8. Карта смещения оползня (а) на угольном разрезе “Колыванский” в 2019–2020 гг. и результаты расчета смещений по точкам (б)

• Примеры автоматизированного расчета полей линеаментов и результатов их представления в виде розы-диаграммы и гистограммы для угольного разреза “Черниговский” в 2016–2017 гг. приведены на рис. 9.

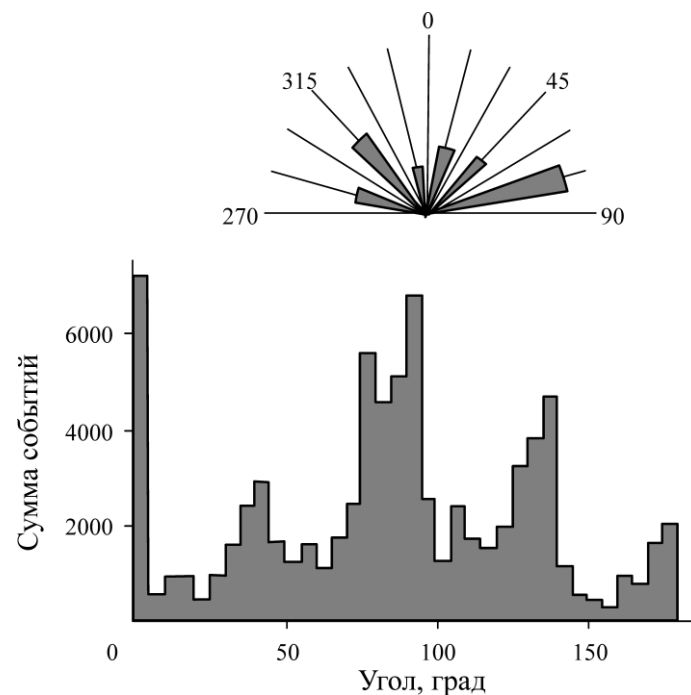


Рис. 9. Результаты расчетов в виде розы-диаграммы и гистограммы распределения трещиноватости для разреза “Черниговский” на период 2016–2017 гг.

• Результаты совместного представления в виде картографической информации работы комплексной цифровой системы “Сейсмика и геодинамика городов, техногенных объектов Сибири” с использованием спутниковых данных радарной интерферометрии и сейсмологических наблюдений представлены на рис. 10.

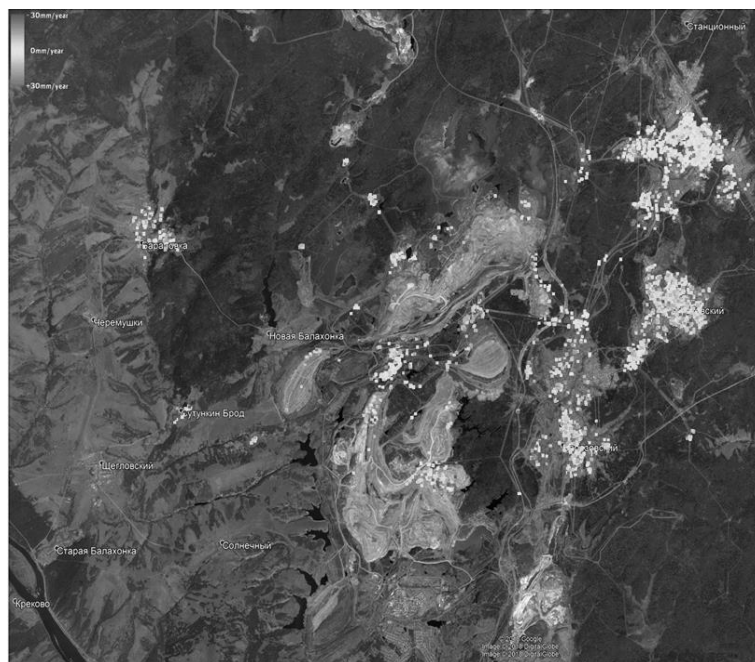


Рис. 10. Пример фрагмента атласа смещений для района разреза “Черниговский”

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРИОДОВ ЭВОЛЮЦИИ ОЧАГОВЫХ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ И ОКРЕСТНЫХ ЗОН ИХ НЕЛИНЕЙНОГО ВЛИЯНИЯ

В первой части статьи [2] показана перспективность применения термодинамического подхода, основанного на теории нелинейных упругих волн маятникового типа [15–17], применительно к геомеханической интерпретации результатов линеаментного анализа спутниковых данных ДЗЗ деформирования поверхности Земли при подготовке и реализации оползневых катастрофических событий на объектах крупномасштабного недропользования. Были выделены пять базовых термодинамических периодов T_i ($i \in 0, +, \pm, -, *$) общего деформационно-волнового цикла для очаговой зоны любого катастрофического проявления горного давления: два фоновых ($i \in 0, *$) — соответственно до и после катастрофического события; три основных ($i \in +, \pm, -$), представляющих длительность цикла от начала концентрации до окончания релаксации накопленной упругой энергии в очаговой зоне, превышающей ее уровень на периодах фоновых геомеханических состояний T_i ($i \in 0, *$).

Обозначим длительность цикла T_Σ как сумму длительностей составляющих его периодов T_i ($i \in +, \pm, -$):

$$T_\Sigma = \sum_{i \in (+, \pm, -)} T_i. \quad (1)$$

Как известно [1], эти три периода отвечают стадиям линейного, нелинейного допредельного и запредельного деформирования образцов горных пород в условиях объемного их нагружения до разрушения, а в сейсмологии — периодам форшоковой, собственно периоду землетрясения и афтершоковой сейсмоактивности.

С активным использованием спутниковых методов ДЗЗ появились возможности определять не только иерархию размеров и топологию структурных отдельностей массивов горных пород, но и их динамико-кинематические характеристики в широком диапазоне, в том числе и для “медленных” групп волн маятникового типа [17]). Это принципиально важное обстоя-

тельство, поскольку появляются инструментальные предпосылки для объединения разноуровневых геоблоковых систем в комплексную геомеханическую систему, которую можно аналитически описывать в рамках общей. В первую очередь это касается поиска количественного показателя геомеханического состояния контролируемых объектов крупномасштабного недропользования с позиций их безопасного функционирования для окружающей среды обитания растительного и животного мира.

Для комплексной интерпретации разнородной геомеханико-геодинамической и иной экспериментальной информации с позиций диагностики, контроля и прогнозирования катастрофических событий будущего проявления в географической системе координат необходимо иметь конкретную меру энергонасыщенности проблемных территорий с требуемым разрешением в пространственно-временных параметрах, аппроксимирующих ее информационное покрытие. В качестве такой меры для энергетического контроля катастрофических событий, контролируемых деформационно-волновыми, электромагнитными и сейсмическими методами, в рамках теории нелинейных упругих волн маятникового типа и наличия детерминированной связи с ними геофизических эмиссионных процессов (с учетом коэффициента сейсмического действия землетрясений и взрывов по М. А. Садовскому) представляется обоснованным введение понятия геомеханической температуры [15] как обобщения ее классического представления на напряженные блочно-иерархически построенные геосреды.

Для удобства изложения дальнейшего теоретического материала очаговую зону формирующегося катастрофического события с окрестными зонами нелинейного его влияния обозначим обобщенным понятием геомеханическая система.

• *О начальном фоновом состоянии геомеханической системы на период T_0 .* Рассмотрим очаговую зону формирующегося катастрофического события вместе с его окрестностями нелинейного влияния в пределах заданной области $D(x, y, z)$ массива горных пород на некоторый достаточно длительный период времени T_0 и находящейся в определенных горно-технических и/или геолого-геодинамических условиях как по геоблоковому строению, вещественному наполнению, так и по господствующему (геотектоническому) полю напряжений и деформаций.

По своим размерам и расположению в пространстве области $D(x, y, z)$ для отрабатываемых месторождений полезных ископаемых обычно представляют как горные отводы, шахтные поля или их составные элементы по реализуемым геотехнологическим циклам — от начала и до завершения освоения данного месторождения. В случае землетрясений размеры таких областей определяются по магнитудам ожидаемых сейсмособытий, их графиками повторяемости и тяготению к границам геодинамически активных геоблоковых структур или линеamentным структурам на поверхности Земли [1, 2].

Временные периоды T_0 для выделения очаговых зон горных ударов при отработке месторождений полезных ископаемых и природных землетрясений зависят от магнитуды или энергетических классов сейсмособытий, расцениваемых как катастрофические, опасные или по другим классификационным признакам. В определенной мере этот опыт используется горняками для геодинамического и структурно-геологического районирования в горнодобывающих областях [1]. Однако при этом необходимо учитывать обстоятельство, принципиально важное для спецификации периода T_0 , следующее из [15].

Колебательные движения геоблоков в структурной иерархии породного массива в пределах $D(x, y, z)$ для центров масс по своему характеру должны быть аналогичными молекулярному броуновскому движению в термодинамически равновесной системе. Характер такого вида движения молекул принято называть хаотическим по их динамико-кинематическим характери-

кам и энергетически равноценным — по направлениям (степеням свободы) в пространстве [18]. Понятие хаотичности в теории вероятностей и математической статистике по коэффициентам корреляции и доверительным интервалам является формализованным и используется при определении уровней детерминированности связей между оцениваемыми физическими процессами, или их параметрами [19, 20].

Однако с ростом температуры обычно возрастает и кинетическая энергия молекулярных, а затем и надмолекулярных соединений геовещества. С позиций нелинейной геомеханической термодинамики на волнах маятникового типа это означает, что в качестве объективной количественной меры начального фонового состояния на период T_0 для геомеханической системы в пределах $D(x, y, z)$ можно использовать кинетическую энергию движения ее геоблоков [16, 17]. Меры внутренней хаотичности или упорядоченности классических термодинамических систем определяются соответствующими аналитическими выражениями для энтропии или энтальпии. В нашем случае их аналоги можно рассматривать как уровни детерминированности контролируемых процессов.

Современный уровень развития инструментальных разработок в области научного приборостроения, в том числе с использованием спутниковых систем дистанционного зондирования Земли [1, 21], позволяет количественно определять не только линейные размеры геоблоков в структуре массивов горных пород и их геоматериалов, но и скоростные характеристики их структурных отдельностей широкого диапазона геометрических форм как абсолютно твердых тел. Важные результаты подобного рода динамико-кинематических оценок для структурных отдельностей Уральского региона достигнуты, например, в ИГД УрО РАН под руководством проф. А. Д. Сашурина [21]. Для Норильского горно-металлургического комбината, а также угленосных толщ Кузбасса соответствующие результаты получены в [1, 21, 22] при корреляционной увязке динамико-кинематических характеристик низкоскоростных групп маятниковых волн с кинетикой развития энерго-сейсмодиссипационных процессов и сдвижения подрабатываемых породных толщ при отработке шахтных полей с продуктивными горизонтами пластовых залежей медно-никелевых руд и угля.

Таким образом, при наличии детерминированных связей между колебательными движениями структурных геоблоков как эмиттеров акусто-электромагнитных волновых пакетов с энергией, определяемой через соответствующие коэффициенты механо-акустических и механо-электромагнитных преобразований [1], в качестве косвенных энергетических показателей для начального фонового состояния геомеханической системы на период T_0 могут использоваться соответствующие данные мониторинговых измерений контролируемых геофизических полей.

При описании сложных геомеханико-геофизических процессов в данном случае можно применять методы сканирования и осреднения регистрируемой (вычисляемой) информации по эмиссионному или деформационно-волновому энерговыделению в пределах заданных областей $D(x, y, z)$ для временных периодов T_0 , используемые в классической термодинамике. Но при этом необходимо будет применять такие специфицирующие данное состояние геомеханической системы на период T_0 условия, как броуновский вид движения центров масс работающих геоблоков для стесненных условий их расположения в контролируемом геомеханическом пространстве; отсутствие значимой корреляционной связи между динамико-кинематическими характеристиками сопутствующих эмиссионных физических сигналов в пределах контролируемой области $D(x, y, z)$.

• **Геомеханическая температура.** Обозначим геомеханическую температуру геоблока Δ_i i -го иерархического уровня величиной $Gt(\Delta_i)$, пропорциональной кинетической энергии $W_k(\Delta_i)$ возможных колебательных движений геоблоков в условиях напряженных массивов горных пород [17]. Вводя калибровочный коэффициент $\hat{\lambda}$ как аналог для классических видов температур молекулярных движений по шкале Цельсия или Кельвина, определяем ее значения для $\Delta_i \in D$ в виде

$$Gt(\Delta_i | D) = \hat{\lambda} W_k(\Delta_i), \quad (2)$$

где i — целые числа; $\hat{\lambda} = \text{const}$.

Следовательно, для контролируемой области породного массива $D(x, y, z)$ в качестве температурного показателя геомеханической системы начального фоновое периода T_0 можно использовать соответственно осредненное значение (2) по составляющим ее структурным отдельностям i -го иерархического уровня:

$$Gt(D) = \hat{\lambda} \frac{1}{N} \sum_j Gt_j(\Delta_i | D). \quad (3)$$

Здесь N — количество составляющих без пересечения объем области $D(x, y, z)$ геоблоков i -го иерархического уровня Δ_i , $j \in 1, \dots, N$: последовательность Δ_i , покрывающая D .

Выбор калибровочного коэффициента $\hat{\lambda}$ в (2) будет зависеть от качества и технических возможностей применяемых мониторинговых систем по необходимым для расчетов $W_k(\Delta_i)$ параметрам: измерению динамико-кинематических характеристик, размеров и формы структурных элементов, а также плотности пород контролируемых областей горных массивов. Современные возможности в данных аспектах достаточно полно отражены в [1, 17] и свидетельствуют о наличии необходимого научно-методического и приборно-измерительного потенциала для реализации идей, отмеченных выше. При этом необходимо выделить следующие особенности в применении современных достижений.

Так, если при использовании абсолютных методов деформационно-волнового контроля можно непосредственно оценивать значения $W_k(\Delta_i)$ для расчетов по (2) в определенном интервале иерархических размеров структурных отдельностей (Δ_i), то для косвенных — эмиссионных сейсмоакустических или электромагнитных импульсных процессов необходимо учитывать также соответствующие им коэффициенты механо-акустических и механо-электромагнитных преобразований [1].

Для общих случаев важно отметить их перспективный потенциал возможностей комплексного применения:

- по количественной оценке скрытых процессов кластеризации структурных элементов массивов горных пород, связанных с возникновением зон локализации в пределах (или за пределами) $D(x, y, z)$ в изменяющемся на период T_Σ поле напряжений и деформаций, а также ее окрестностей повышенных напряжений и деформаций (локализованный рост $Gt(\Delta_i)$);
- по количественной оценке уровней энергонасыщенности и их изменения в выделенных зонах локализации напряжений и деформаций — вплоть до предельных уровней значений.

В [23] впервые доказано экспериментально, что для коэффициента механо-электромагнитных преобразований при разрушении образцов горных пород разного минералогического состава существует аналог безразмерного энергетического критерия В. Н. Опарина k [17] сейсмо-акустического излучения для маятниковых волн на критической стадии разрушения в очаговых зонах концентрации упругой энергии.

Свидетельства о наличии фоновых периодов T_0 и T_* в состоянии геомеханической системы по специфицируемым признакам, а также для остальных периодов (T_+ , $\Delta T_{\pm}$, T_-) подробно рассмотрены в [1, 21, 22] для рудников и угольных шахт Норильска и Кузбасса на примерах их сейсмозмиссионной активности с энергетических позиций. Однако количественная привязка к температурному фактору не осуществлялась.

Подводя итог изложенному, можно заключить следующее. Введенное понятие геомеханической температуры, а также использование выражений (3) и “формульного конструктора” для волн маятникового типа позволяют на базе соответствующих потоков экспериментальных данных мониторингового контроля по абсолютным значениям деформационно-волновых процессов и/или косвенных геофизических эмиссионных процессов осуществлять количественную спецификацию контролируемых массивов горных пород в заданной области $D(x, y, z)$ по выделенным временным периодам и условиям энергетического существования геомеханической системы — $T_i (i \in 0, +, \pm, -, *)$.

Важно подчеркнуть, что обозначенные как фоновые периоды (T_0 и T_*) характеризуются основным признаком — хаотичности в геомеханическом состоянии этой системы в термодинамическом представлении: по пространственно-временным координатам колебательных движений составляющих область $D(x, y, z)$ работающих геоблоков диаметрами Δ_i в их иерархической последовательности (по индексу i).

В отличие от характеристики начального фонового периода T_0 , фоновый период T_* устанавливается по завершению катастрофического или крупного динамического разрушительного события в пределах $D(x, y, z)$ за этапом T_- : релаксации избыточной энергии в очаге и квазиупругого восстановления в окрестных зонах его нелинейного влияния. На данном фоновом периоде T_* энергетическое состояние геомеханической системы в пределах области $D(x, y, z)$ может существенно различаться с начальным фоновым периодом T_0 в основных значениях $Gt(D)$ по (3). Здесь предшествующий и граничащий с T_* этап T_- зависит не только от степени релаксации накопленной ранее упругой энергии в очаговой зоне разрушения горных пород, но и в его окрестных зонах нелинейного влияния. В данной ситуации возможны существенные структурные изменения в состоянии ранее (на этапе T_0) нетронутого массива в области $D(x, y, z)$. Следовательно, значения $Gt(D)$ по (3) могут значительно различаться для сравниваемых фоновых этапов в энергетическом состоянии системы для T_{Σ} (1). Это приводит к необходимости их формальной спецификации в обозначениях: $Gt(D|T_0)$ и $Gt(D|T_*)$ соответственно. Эти спецификации в обозначенных энергетических состояниях системы будем использовать и для других выделенных энергетических этапов $T_i (i \in +, \pm, -)$: $Gt(D|T_i)$ в области D для T_{Σ} (1).

Однако на этапах T_+ , $\Delta T_{\pm}$ и T_- рассматриваемая механическая система обретает новое качество: она выходит из состояния термодинамической хаотичности. Возникновение на этапе T_+ очаговой зоны концентрации напряжений и деформаций в контролируемой области $D(x, y, z)$ означает начало жизненного цикла этой системы — аналога процесса подключения теплового источника к определенному месту локализации его в массиве горных пород в пределах формирующейся очаговой зоны будущего катастрофического события. Следовательно, возникает необходимость в количественном описании составляющей такого теплового источника.

С позиций нелинейной геомеханической термодинамики [15] для аналитического описания такой тепловой функции необходимы соответствующие по начальным и граничным условиям решения нестационарных уравнений теплопроводности с учетом фазовых переходов в про-

странстве $Q = \{(x, y, z, t) | (x, y, z) \in D; \in T_{\Sigma}\}$. Аналогом в постановке и численном решении подобного рода задач являются примеры моделирования зональной деструкции горных пород в устьевых частях подземных сооружений в криолитозоне Якутии при значительных знакопеременных циклических температурных воздействиях, а также канонического вида зависимости изменения прочностных свойств горных пород. Большой объем фундаментальных исследований в этом направлении осуществлен в ИГДС СО РАН под руководством А. С. Курилко [1].

Применительно к задачам нелинейной геомеханической термодинамики [15] понятие фазовых переходов связано с необходимостью учета в качестве такого перехода условия возникновения геомеханических квазирезонансов в очаговой зоне разрушения горных пород $\hbar$, описываемого соответствующими уравнениями в [17]. По-существу, с энергетических позиций они отражают роль блочно-иерархического строения самонапряженных массивов горных пород, связанных с нарушением классических условий совместности деформаций по Сен-Венану [17]. Так, в [25, 26] проведен комплекс экспериментальных и теоретических исследований по изучению влияния нарушения условий совместности деформаций по Сен-Венану в блочно-иерархически построенных напряженных геосредах на динамико-кинематические характеристики развития в них нелинейных деформационных процессов от источников импульсного силового воздействия, моделирующих землетрясения, горные удары и взрывы.

Установлено, что индуцируемые нелинейные упругие волны маятникового типа сопровождаются последовательным переходом накопленной потенциальной энергии структурных элементов породного массива в кинетическую, и наоборот. При этом период трансформации энергий определяется межблоковой жесткостью взаимодействия и массой блоков, увеличиваясь с уменьшением межслоевой жесткости и возрастанием массы блоков. Диссипация энергии в блочной геосреде зависит от вязкости и жесткости межблокового взаимодействия, приобретая зональный характер с удалением от источника излучения маятниковых волн.

Из приведенных аналогий и экспериментальных фактов следуют прогнозные заключения относительно эволюции геомеханической системы на основных энергетических периодах ее существования T_i ($i \in +, \pm, -$) в рамках нелинейной геомеханической термодинамики [15]. По сути дела, они уже описаны и проиллюстрированы в корреляционной увязке с данными физического моделирования поведения геоматериалов в условиях их объемного нагружения до разрушения с выделением трех основных стадий деформирования — линейной, нелинейной и предельной. Очаговой зоной в данном случае можно считать собственно образцы испытываемых горных пород.

В сейсмологии они четко коррелируют с временными интервалами, обозначаемыми соответственно как “форшоковый $\rightarrow$ сейсмического затишья $\rightarrow$ землетрясение $\rightarrow$ афтершоковый”. Этапы “сейсмическое затишье $\rightarrow$ землетрясение” нами пока объединены как подэтапы в одном периоде ΔT_+ , характеризующемся достижением геомеханической системой состояния квазиконсервативности по энергетическому условию возникновения геомеханических квазирезонансов $\hbar$ [17]. Он требует к себе особого внимания как существенно зависящий не только от объемной прочности породного массива в очаговой зоне, но и от скорости нарастания упругой энергии в ней.

Временные градации T_i в формировании катастрофических событий зависят от того, каков полный период жизни геомеханической системы T_{Σ} . С учетом напряженности, структурно-минералогической неоднородности любых геосистем, разномасштабности зон разрушения

в породных массивах для оценки T_{Σ} сложной геомеханической системы (очага) в современных условиях, вероятно, можно опираться на кинетическую концепцию прочности твердых тел по С. Н. Журкову. В [16] эта концепция конструктивно использовалась для установления количественных связей с теорией волн маятникового типа, в том числе и по оценке соотношения радиусов очаговых зон разрушения горных пород r_0 и зон их нелинейного влияния R_0 в зависимости от энергии произошедшего сейсмического события (W).

ВЫВОДЫ

Обоснован и описан новый методологический подход к созданию информационного блока современных комплексных систем геодинамико-геомеханического и геоэкологического мониторинга, основанный на мультимодальности экспериментальных данных и технологиях цифровых фабрик. Он позволяет достаточно просто и быстро вести их разработку с ориентацией на различные профильные прикладные горно-технологические задачи с учетом перехода на обработку и анализ больших потоков данных. Продемонстрирована эффективность его работы на различных примерах крупномасштабного недропользования в Сибири, а также выделены актуальные направления развития разрабатываемой геоинформационной системы применительно к решению фундаментальных научных задач нелинейной геомеханики.

Информационная архитектура такой системы становится более гибкой и дает возможность адаптивно настраивать необходимые конфигурации, динамически изменяя способы сбора информации, методики и алгоритмы обработки пространственных данных, включая новые и известные математические модели с соответствующими комплексами программ. Показано, что системы оценки геомеханических свойств массивов горных пород можно представить как набор различных модальностей, каждая из которых связана с определенными средствами измерений их физических свойств. Описываются основные элементы геоинформационной системы с обозначением соответствующих им связей, реализуемых через системы оркестрации контейнеров. Организованы адаптированные к ним технологии сбора и передачи информации с использованием Интернета вещей, с последующими этапами хранения, обработки и систематизации с учетом уже имеющейся профильной информации по объектам недропользования. Показано, что дальнейшая аналитическая обработка и комплексная интерпретация экспериментальных данных так же может осуществляться на их цифровых фабриках.

Результаты тестирования разрабатываемой информационной системы в различных режимах ее функционирования иллюстрируются на примере решения ряда практически важных задач по Кузбассу и Норильскому горно-промышленному комплексу. Для совместной обработки нелинейных деформационно-волновых и индуцируемых ими сейсмозмиссионных процессов предлагается новый энергетический подход к комплексному анализу в рамках теории волн маятникового типа применительно к термодинамическим периодам $T_i (i \in 0, +, \pm, -, *)$. Последние специфицируют этапы возникновения и формирования очаговых зон деструктивных (до катастрофических) проявлений горного давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Геомеханические поля и процессы:** экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горно-технических и природных системах / под ред. Н. Н. Мельникова. — Новосибирск: Изд-во СО РАН. — Т. 1. — 2018. — 549 с.; Т. 2. — 2019. — 546 с.

2. **Потапов В. П., Опарин В. Н., Миков Л. С., Попов С. Е.** Развитие и применение современных информационных технологий в решении задач нелинейной геомеханики. Ч. I: Спутниковые данные дистанционного анализа деформационно-волновых процессов // ФТПРПИ. — 2022. — № 3. — 157–176.
3. **Multimodal scene understanding.** Algorithms, Applications and deep learning. Edited by Michael Ying Yang, Bodo Rosenhahn, Vittorio Murino, London, Academic Press is an imprint of Elsevier, 2019. — 406 p.
4. **Math for the digital factory,** Luca Ghezzi, Dietmar H. Romberg, and Chantal Landry (Eds), Springer Int. Publ., AG, 2017. — 348 p.
5. **Эдриен Моуэт.** Использование Docker. Разработка и внедрение программного обеспечения при помощи технологии контейнеров. — М.: Изд-во ДМК-Пресс, 2017. — 351 с.
6. **Mohammed O. I., Saeidi V., Pradhan B., and Yusuf Y.** Advanced differential interferometry synthetic aperture radar techniques for deformation monitoring: a review on sensors and recent research development. <http://www.tandfonline.com/loi/tgei20>.
7. **Internet of things for industry 4.0.** Design, Kanagachidambaresan G. R., Anand R., Balasubramanian E., and Mahima V. (Eds), Challenges and Solutions, Springer Nature Switzerland AG 2020. — 258 p.
8. **Bychkov I. V., Oparin V. N., and Potapov V. P.** Cloud technologies in mining geoinformation science, J. Min. Sci., 2014, Vol. 50, No. 1. — P. 142–154.
9. **Опарин В. Н., Потапов В. П., Киряева Т. А., Юшкин В. Ф.** К проблеме разработки методов и геоинформационных средств комплексной оценки влияния нелинейных деформационно-волновых процессов, индуцированных сейсмическими воздействиями, на геомеханическое состояние бортов карьеров и газодинамическую активность угольных шахт Кузбасса // ГИАБ. — 2020. — № 8. — С. 5–39.
10. **Christine W. Park and John Alderman.** Designing across senses, a multimodal approach to product design, Published by o'reilly media, Inc., 1005 Gravenstein, 2018. — 331 p.
11. **Крис Ричардсон.** Микросервисы. Паттерны разработки и рефакторинга. — СПб.: Питер, 2019. — 544 с.
12. **Gigi Sayfan.** Mastering Kubernetes. Automating container deployment and management, Packt Publishing Ltd, Birmingham, UK, 2017. — 397 p.
13. **Bilgin Ibryam and Roland Hus.** Kubernetes patterns, Published by O'Reilly Media, Inc. Sebastopol, CA, 2019. — 246 p.
14. **Fei Tao, Ang Liu, Tianliang Hu, Nee A. Y. C. (Eds),** Digital twin drive and smart design, London, Academic Press is an imprint of Elsevier, 2020. — 340 p.
15. **Опарин В. Н.** Волны маятникового типа и “геомеханическая температура” // Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах: Тр. 2-й Росс.-Кит. науч. конф. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012. — С. 3–19.
16. **Adushkin V. V. and Oparin V. N.** From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed media, J. Min. Sci., Part I: 2012, Vol. 48, No. 2. — P. 203–222; Part II: 2013, Vol. 49, No. 2. — P. 175–209; Part III: 2014, Vol. 50, No. 4. — P. 623–645; Part IV: 2016, Vol. 52, No. 1. — P. 1–35.
17. **Опарин В. Н., Адушкин В. В., Востриков В. И., Юшкин В. Ф., Киряева Т. А. и др.** Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии // ГИАБ. — Ч. I: формулировка и обоснование задачи исследований. — 2019. — № 1. — С. 5–25; Ч. II: динамико-кинематические характеристики волн маятникового типа в напряженных геосредах и сейсмоземиссионные процессы. — 2019. — № 11. — С. 5–26; Ч. III: перспективные системы контроля деформационно-волновых процессов в подземных и наземных условиях ведения горных работ. — 2019. — № 12. — С. 5–29.
18. **Левич В. Г., Вдовин Ю. А., Мямлин В. А.** Курс теоретической физики. Т. II. — М.: Наука, 1971. — 936 с.

19. Бат М. Спектральный анализ в геофизике: пер. с англ. — М.: Недра, 1980. — 535 с.
20. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 3. — М.: Мир, 1976. — 496 с.
21. Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования / под ред. М. Д. Новопашина. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. — 449 с.
22. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия / под ред. Н. Н. Мельникова. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. — 632 с.
23. Oparin V. N., Yakovitskaya G. E., Vostretsov A. G., and Seryakov V. M. Mechanical — electromagnetic transformations in rocks on failure, J. Min. Sci., 2013, Vol. 49, No. 3. — P. 343–356.
24. Опарин В. Н., Танайно А. С. Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. — Новосибирск: Наука, 2011. — 264 с.
25. Wu Hao, Fang Qin, and Yu Dong-xun. Advances in the study on pendulum-type wave phenomenon in the deep block rock mass, Adv. Mech., 2008, 38(5). — P. 601–609.
26. Wang K.-X., Dou L.-M., Pan Y.-S., and Oparin V. N. Experimental study of incompatible dynamic response feature of block rock mass, Rock and Soil Mech., 2020, Vol. 41(4). — P. 1227–1234.
27. Потапов В. П., Опарин В. Н., Логов А. Б., Замараев Р. Ю., Попов С. Е. Геоинформационная система регионального контроля геомеханических ситуаций на основе энтропийного анализа сейсмических событий (на примере Кузбасса) // ФТПРПИ. — 2013. — № 3. — С. 148–156.
28. Логов А. Б., Опарин В. Н., Потапов В. П., Счастливец Е. Л., Юкина Н. И. Энтропийный метод анализа состава техногенных вод горнодобывающего региона // ФТПРПИ. — 2015. — № 1. — С. 168–179.

Поступила в редакцию 15/VI 2022

После доработки 20/VI 2022

Принята к публикации 30/VI 2022