

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 544 + 550.3 + 551 + 622 + 681:624.1

ОТ ЯВЛЕНИЯ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ РЕАКЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ — К ВОЛНАМ МАЯТНИКОВОГО ТИПА В НАПРЯЖЕННЫХ ГЕОСРЕДАХ. Ч. IV

В. В. Адушкин¹, В. Н. Опарин^{2,3}

¹Институт динамики геосфер РАН,

Ленинский проспект, 38, 119334, г. Москва, Россия

²Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: oparin@misd.nsc.ru,

Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный университет,

ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Россия

Представлен экспертно-аналитический обзор важнейших достижений в области нелинейной геомеханики и геофизики, геомониторинговых систем, а также современных информационных технологий для развития научных основ “Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера”, относимой ныне к числу “критических технологий” для Российской Федерации. К актуальным направлениям исследований и разработок по реализации этого проекта относятся фундаментальные научные исследования по физике и геомеханике формирования и развития очаговых зон разрушения горных пород в природных и горно-технических системах, а также научные и технико-технологические разработки по созданию многослойной геоинформационно-мониторинговой системы геомеханико-геодинамической безопасности России. Авторы полагают, что отмеченные направления исследований и разработок могли бы быть положены в основу международного мегапроекта по наукам о Земле междисциплинарного характера “Разработка и создание многослойной геоинформационно-мониторинговой системы геомеханико-геодинамической и экологической безопасности в мире”.

Нелинейные геомеханические и геофизические процессы, разрушение горных пород, природные и техногенные катастрофические события, очаговые зоны, многослойные геоинформационно-мониторинговые системы, прогноз и предотвращение, геоэкология, фундаментальные и прикладные задачи актуальных научных исследований, а также технико-технологических разработок

В заключительной части работы, посвященной экспертно-аналитическому обзору и научному обобщению важнейших результатов фундаментальных исследований в области нелинейной геомеханики и геофизики за последние почти 50 лет, а также технико-технологических разработок на их основе в горном деле [1], авторы посчитали логичным и необходимым отразить свое видение дальнейшего развития направления исследований и перспективных практических приложений, отраженного в названии настоящей статьи.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-05-00573а) и проекта ОНЗ РАН-3.1 (В. Н. Опарин), а также Российского научного фонда, проект № 16-17-00095 (В. В. Адушкин).

Наиболее важные тематические обобщения результатов, в том числе и интеграционных исследований, опубликованы в ряде крупных монографических работ [2–23]. Заинтересованный читатель по их прочтении сможет составить общие и более глубокие представления по обсуждаемому предмету, чего, естественно, невозможно сделать в отдельной, даже большой по объему, статье.

Затрагиваемый ниже круг проблем и задач для перспективных исследований и разработок ограничен в основном проблемами обеспечения безопасности и эффективности недропользования, с учетом доминирующей ныне тенденции освоения месторождений полезных ископаемых на возрастающих по глубине горизонтах. Увеличение масштабов горного производства в России и в мире сопряжено с необходимостью учета сложности геологического строения, геодинамической активности и “экстремальности” природно-климатических условий при разработке месторождений полезных ископаемых, повышении экологических требований.

Таким образом, с учетом данных обобщения важнейших достижений в области нелинейной геомеханики и геофизики, развития теории волн маятникового типа (изложенных в основном в предыдущих частях статьи) и современных информационных технологий формулируются современные проблемы и актуальные задачи фундаментальных исследований в области физики и геомеханики разрушения горных пород в природных и горно-технических системах. На основании многолетнего опыта руководимых авторами ряда интеграционных проектов РАН и СО РАН с участием специалистов из многих академических институтов и университетов, в том числе зарубежных, обосновывается необходимость организации в качестве одного из международных мегапроектов в области наук о Земле междисциплинарного характера, обозначенного как **“Разработка и создание многослойной геоинформационно-мониторинговой системы геомеханико-геодинамической и экологической безопасности в мире”**. Его реализация, по мнению авторов, имеет стратегическое значение в плане обеспечения безопасного и устойчивого развития горнодобывающих стран-лидеров мировой экономики, а также в направлении общего природопользования.

1. О “ТЕХНОЛОГИИ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ И ЛИКВИДАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРА” И НАПРАВЛЕНИЯХ СОЗДАНИЯ НЕОБХОДИМОГО НАУЧНОГО ЗАДЕЛА ДЛЯ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ В ОБЛАСТИ НАУК О ЗЕМЛЕ

Надо особо подчеркнуть, что отмеченные в [1] достижения во многом — одновременно и богатый опыт совместных исследований и разработок больших коллективов ученых и инженеров ведущих в России институтов естественно-научного профиля, проводимых в течение более десяти последних лет в рамках крупных интеграционных проектов РАН, ее региональных отделений и научных центров в направлении наук о Земле [1, 16, 18–20, 23]. Такой опыт для горных наук в современных условиях является уникальным и чрезвычайно полезным для организации и реализации крупных и суперкрупных научно-технических и технологических проектов общегосударственной значимости.

Как известно, именно результаты фундаментальных научных исследований обычно закладываются в основу реализации крупномасштабных проектов для решения важных прикладных проблем государственной значимости, в том числе и так называемых “критических технологий”.

В России в качестве одной из них в последние годы рассматривается **“Технология предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера”**. К важнейшим направлениям исследований здесь отнесены (в редакции [24]):

- (1) разработка методов диагностики состояния природных и опасных техногенных систем;
- (2) разработка методов оценки и снижения риска потерь для населения, объектов экономики и территорий от техногенных катастроф и стихийных бедствий и разработка мер по уменьшению ущерба от них;

- (3) разработка методов неразрушающего контроля;
- (4) разработка комплексов оперативно-диспетчерского управления и различных средств ведения спасательных работ и ликвидаций последствий чрезвычайных ситуаций;
- (5) моделирование (разработка) эффективных сценариев реагирования, обеспечения устойчивости и сейсмостойкости зданий и сооружений при воздействии природных и техногенных катастроф;
- (6) разработка методов прогноза природных и техногенных катастроф и их последствий на основе данных наблюдений и современных знаний о процессах возникновения и развития указанных катастроф;
- (7) разработка и актуализация баз данных по природным и техногенным катастрофам, текущим наблюдениям за состоянием атмосферы, сейсмическими и географическими полями;
- (8) разработка новых и развитие существующих сетей сейсмических и геофизических наблюдений;
- (9) развитие методов дистанционного мониторинга при помощи космических спутниковых систем;
- (10) разработка баз данных по дизъюнктивным нарушениям различного масштаба;
- (11) разработка системы мониторинга напряжений по данным натуральных индикаторов в верхних горизонтах земной коры в густонаселенных регионах, в местах строительства сложных технических сооружений и районах интенсивной техногенной деятельности (местах строительства атомных электростанций, захоронения радиоактивных отходов, заполнения искусственных водохранилищ, добычи углеводородов, строительства подземных сооружений);
- (12) разработка системы раннего обнаружения условий, способствующих формированию экстремальных экологических ситуаций природного и техногенного характера;
- (13) разработка технологий прогноза геокатастроф природного (землетрясения, наводнения, пожары, оползни, сели, лавины, тропические и внетропические циклоны, цунами) и техногенного характера (горные удары, взрывы и подземные пожары в условиях освоения подземного пространства, аварии на магистральных трубопроводах, атомных электростанциях, мостах и в тоннелях);
- (14) разработка средств мониторинга, контроля риска возникновения, а также уменьшения последствий чрезвычайного и природного характера для здоровья человека и окружающей среды;
- (15) разработка технологии сбора, обработки и распространения данных о состоянии и местоположении подвижных и стационарных опасных объектов (грузов) с использованием отечественных космических систем (средств);
- (16) разработка космических информационно-навигационных технологий мониторинга дорожных покрытий и инженерных коммуникаций.

Авторы настоящей статьи не намерены обсуждать качество приведенного списка “технологических задач” (1)–(16) ни с позиций их полноты и логической последовательности, “равновеликости” или дублирования отдельных пунктов, ни с позиций их соответствия внутреннему единству обозначенной “Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера”. Во многом такие оценки очевидны, за исключением, пожалуй, “внутреннего единства”. Однако именно этот аспект существенно определяет успешность достижения заданной цели.

Относясь с пониманием к тому, что “Технология предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций...” должна лежать в основе управления и функционирования МЧС России, тем не менее не следует забывать о том, что в основе “чрезвычайных ситуаций” лежат разнородные “катастрофические события”. В этом смысле перечисленные по [24] задачи (1)–(16) очевидно

разнородны по источникам катастроф (природные, техногенные) и, следовательно, единой *Технологии* для отмеченных целей не существует. По этой причине в статье основное внимание будет уделено катастрофическим событиям “природно-техногенного” характера, где велика роль взаимодействия между “подземной стихией” и человеком. Такое “взаимодействие” наиболее ярко выражено в горнодобывающем комплексе стран-лидеров мировой экономики и в иных видах природопользования, а также строительства крупных инженерных объектов различного назначения. Этот же вид хозяйственной деятельности существенно влияет на экологическую обстановку в мире.

2. ФИЗИКА И ГЕОМЕХАНИКА ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ОЧАГОВЫХ ЗОН РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ПРИРОДНЫХ И ГОРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В условиях доминирующей ныне тенденции в мире перехода к освоению минерально-сырьевых ресурсов на возрастающих по глубине горизонтах, увеличивающихся объемов горных работ и сопутствующих этому негативных воздействий на экологическую обстановку для среды обитания это направление исследований и разработок имеет самое непосредственное отношение к обеспечению стратегии устойчивого развития современной цивилизации. Накопленный опыт решения весьма сложных задач больших коллективов естествоиспытателей позволяет уже в недалеком будущем сформулировать *в качестве одного из международных мегапроектов* в области наук о Земле междисциплинарного характера **“Разработку и создание многослойной геoinформационно-мониторинговой системы геомеханико-геодинамической и экологической безопасности в мире”**.

Вне всякого сомнения, его реализация способна внести большой вклад в обеспечение безопасности, ускорение экономического роста и решение социальных проблем развития горнодобывающих комплексов России, Китая, США, Канады и других ведущих стран мира, а значит, и стратегически устойчивого развития этих стран в нарастающей конкурентной среде международного разделения труда и миропорядка.

Как известно [1, 23], в настоящее время техногенная деятельность человека оказывает существенное влияние не только на локальные изменения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород в пределах отрабатываемых шахт и рудников, но и провоцирует природные катастрофические события (особенно в регионах России, приуроченных к геодинамически активным областям). Так, из данных исследований акад. В. В. Адушкина, чл.-корр. РАН А. А. Маловичко и др. [7] следует, что потоки сейсмической энергии от взрывных работ в пределах Восточно-Европейской платформы на 2–4 порядка выше потоков сейсмической энергии от природных землетрясений, регистрируемых на этой территории. Не редкими становятся и горно-тектонические удары (СУБР, Кольский п-ов, Урал, Кемеровская обл. и др.).

Сложившиеся обстоятельства требуют комплексного подхода в определении реального воздействия техногенной деятельности человека на окружающую среду, а следовательно, осуществления непрерывного контроля за ее состоянием и эволюцией. Без этого невозможно реализовывать ни актуальных прогнозов, ни обоснованных мер профилактики катастрофических событий (техногенные землетрясения, горные удары, внезапные выбросы пород, угля и газа, обрушения налегающих и выдавливание подстилающих породных толщ и др.), ни выбора и обоснования оптимальных технологических схем безопасного освоения полезных ископаемых и подземного пространства, в том числе ведения буровых и взрывных работ.

Диагностика уровня “критичности” в состоянии контролируемых объемов массивов пород в процессах их разрушения и прогнозирование катастрофических событий в горном деле, как показали современные экспериментальные и теоретические исследования, должны основываться на учете реально существующего взаимодействия между глобальными геодинамиче-

скими (тектоническими) и локальными геомеханическими (техногенными) полями в верхней части земной коры блочно-иерархического строения [1]. На базе этих знаний, очевидно, должны разрабатываться и современные мониторинговые системы контроля напряженно-деформированного состояния породных массивов на горнодобывающих предприятиях и их методическое наполнение, приборно-измерительное оснащение, а также осуществление базовых в горном деле энергосберегающих технологических процессов разрушения пород, особенно при направленном и сверхглубоком бурении породных массивов, в том числе для осуществления буровзрывных работ [25, 26].

В современных условиях акцентными по своей актуальности становятся “генетические” основы формирования очаговых зон разрушения горных пород в их напряженных массивах сложного геологического строения, во многом связанные с механизмами трансформации упругой энергии в кинетическую энергию движения их структурных элементов [1]. Такая информация должна использоваться как “априорная” при проектировании и формулировке технических требований к современным мониторинговым системам геомеханико-геодинамической и экологической безопасности на крупнейших горнодобывающих предприятиях России и мира.

В качестве необходимого научного задела, отвечающего мировому уровню исследований, в целях реализации выдвинутой авторами программы, следует отметить следующие крупные достижения, представленные в развернутом виде в работах [1 – 23].

Важнейшим итогом выполненных геомеханико-геодинамических исследований стало обнаружение тесной взаимосвязи между глобальными геодинамическими и локальными геомеханическими процессами, обусловленными ведением горных работ, особенно в тектонически активных зонах. Не менее крупным результатом таких исследований явились также представления о фундаментальной роли блочно-иерархического строения массивов горных пород по акад. М. А. Садовскому [27, 28] для объяснения существования широкой гаммы нелинейных геомеханических самоорганизующихся геосистем. Иерархическая структура характерна для многих таких систем, особенно для литосферы Земли, где геофизики выделяют более 30 иерархических уровней — от тектонических плит протяженностью в тысячи километров до отдельных минеральных зерен миллиметрового размера. Земная кора не является сплошной средой и как любая синергетическая система обладает свойствами иерархичности и “самоподобия” [5, 6].

Крупномасштабное воздействие горнодобывающей промышленности на верхнюю часть литосферы не ограничивается только изъятием из земных недр и перемещением больших объемов горной массы, нефти, газа и воды. В результате техногенного воздействия инициируются огромные потоки энергии в геофизической среде. Возникающие при этом диссипативные структуры обуславливают появление неустойчивых состояний в породных массивах, которые реализуются в виде различного рода катастроф, среди которых наиболее опасны горные удары и техногенные землетрясения, выбросы пород и газа, подземные пожары при отработке угольных месторождений. Следует особо отметить, что в современных условиях высоких темпов роста и объемов добычи и потребления минерального сырья в странах-лидерах мировой экономики долговременная стратегия развития горнодобывающей промышленности должна строиться с учетом роста техногенной нагрузки на экосистемы. Поэтому актуальность решения проблемы сохранения среды обитания в районах с высокой техногенной нагрузкой с годами будет только возрастать [13, 29].

Сопутствующие этой жизненно важной для человечества деятельности по недропользованию последствия нередко связаны с деструктивным началом для геоэкологии не только в пределах разрабатываемых горных отводов и горно-обогатительных комплексов, но и далеко за их

пределами. *Во многом это “деструктивное начало” обусловлено “модуляцией” геоэкологических процессов геомеханико-геодинамическими процессами как внутри, так и на поверхности Земли из-за ведения горных работ и индуцируемых ими движениями структурных отдельностей самой верхней части земной коры, соразмерных образующимся подземным и наземным полостям при извлечении полезных ископаемых [1].*

В этом аспекте развитие методологических основ и их методического наполнения для осуществления комплексного крупномасштабного геомеханико-геодинамического и геоэкологического мониторинга является не только важной задачей успешного развития горнодобывающих регионов России и в других странах мира, но и *необходимой предпосылкой для облагораживания поверхности Земли* после завершения ведения горных работ на конкретных территориях [29].

Следовательно, рассматривая шахты и рудники как уникальные природные лаборатории, широко представленные по поверхности континентов земного шара, где можно детально исследовать во взаимосвязи геомеханические, геофизические, геоэкологические и геодинамические процессы инструментальными горно-геофизическими и спутниковыми геодезическими методами, естественной представляется идея “синхронизации” геомеханической и геотехнологической информации с глобальной сейсмологической, спутниковой геофизической и геодезической [1]. В России она в значительной мере представлена “Федеральной системой сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений”, находящейся под эгидой Геофизической службы РАН и МЧС России [30].

С активным развитием спутниковой геодезии и геофизики, облачных геоинформационных технологий [31] в последние десятилетия появились реальные возможности для включенности и этих слоев атмосферной и приповерхностной информации в будущую глобальную систему геомеханико-геодинамической и экологической безопасности России. Для этой объединяющей идеи имеются веские основания в виде наработанного к настоящему времени большого объема фактического материала разноплановых экспериментальных исследований, теоретических разработок и обобщений в области геоинформатики, геомеханики, геофизики и геотектоники [31–47; и др.].

К важнейшим методологическим результатам этих исследований следует отнести отмеченные в [1]:

— *основными свойствами геосреды являются ее блочно-иерархическое строение и постоянные колебательные движения структурных элементов горного массива;*

— *подвижность земной коры и ее проницаемость для жидкости и газов обусловлены наличием трещин, соразмерных отделяемым ими геоблокам соответствующего иерархического уровня;*

— *основными энергетическими источниками движения структурных элементов геосреды и ее геосфер в целом являются эндогенная активность Земли, порождающая тектонические силы, лунно-солнечные приливы, инерционные силы неравномерного вращения Земли, атмосферное давление и техногенная деятельность человека.*

Отмеченная “триада” есть неперемное условие, обеспечивающее взаимосвязь энерго- и массообменных процессов между геосферами Земли, а также космическим пространством, определяя сложные процессы самоорганизации в породных массивах [1].

К настоящему времени разработан достаточный комплекс приборов и оборудования для диагностики напряженно-деформированного состояния горных пород, контроля геомеханических процессов (механические, спутниковые геодезические, горно-геофизические). Из группы горно-геофизических наибольшее развитие и применение в геомеханических системах мониторинга получили сейсмические и электрометрические приборы. Шахтными сейсмологическими станциями с наземными и подземными павильонами в необходимой мере обеспечены и про-

должают успешно оснащаться горнодобывающие предприятия в нашей стране и в мире. Активное внедрение в последнее десятилетие получают деформационно-волновые измерительные комплексы [16, 18–20, 23].

Наметилась четкая тенденция по сближению и активному взаимодействию специалистов, разрабатывающих измерительные системы мониторинга и приборные комплексы горно-геофизического, геомеханического и геоэкологического направлений. Основными факторами, способствующими такому сближению, являлись фундаментальные открытия в области нелинейной геомеханики и геофизики, связанные с блочно-иерархическим строением массивов горных пород и геоматериалов, выделением групп медленных волн деформаций (волны маятникового типа), динамико-кинематические характеристики которых содержат информацию о структуре, напряженно-деформированном состоянии породных массивов и энергетических параметрах источников их излучения [1].

К современным достижениям в области экспериментальной и теоретической геомеханики и геофизики следует отнести следующие.

- В [1] впервые установлена формализованная связь между концентрационным критерием прочности твердых тел по С. Н. Журкову, экспериментальным критерием “схлопывания” подземных выработок (полостей) и канонической структурой спектрального состава волн маятникового типа по В. Н. Опарину, а также фактору дальнего действия мощных взрывных воздействий в геосредах по М. А. Садовскому–В. В. Адушкину. Обоснована необходимость нового — энергетического — подхода к описанию процесса трансформации упругой энергии очаговых зон катастрофических событий в кинетическую энергию движения составляющих их структурных элементов. В этой связи В. В. Адушкиным и В. Н. Опариним введено новое понятие о “сейсмоземиссионных событиях интерференционного типа”, сформулировано энергетическое условие их возникновения.

Эти результаты позволили выдвинуть им в [1] принципиально важное предположение о том, что постоянно присутствующий сейсмический фон при синфазности его спектра с колебательным спектром структур формирующейся очаговой зоны направит ее развитие в акустически активное состояние с переходом накопленной упругой энергии в кинетическую в виде излучения сейсмических объемных волн. Существенное значение при этом, по-видимому, принадлежит проявлению эффекта аномально низкого трения в напряженных блочных геосредах. Есть основания полагать, что это в равной мере относится и к сопутствующим эмиссионным акустическим и электромагнитным полям.

- В работе [48] комплексный анализ обширных данных натуральных исследований, а также геомеханического и термохимического поведения образцов углей различных стадий метаморфизма по угленосным районам Кузбасса позволил заключить о существовании генетической связи между выбросо- и пожароопасностью угольных пластов. Следовательно, в отличие от доминирующих ныне подходов к моделированию процессов формирования очаговых зон катастрофических событий в массивах горных пород неорганической природы, адекватное решение проблем выбросо- и пожароопасности угольных месторождений должно основываться на учете реально существующей тесной связи между геомеханическими и физико-химическими массообменными процессами в многофазных угольных пластах разной стадии метаморфизма. При этом экспериментально доказано:

- ✓ ИК-радиометрия позволяет дистанционно и оперативно контролировать изменение напряженно-деформированного состояния угольных образцов при их нагружении в реальном масштабе времени;

✓ отмечается рост внутренней удельной поверхности частиц отбитого угля, связанной с силой внезапных выбросов угля и газа отработываемых угольных пластов и соответственно с внутренней энергией релаксации углеметана;

✓ существует “единая зависимость” потери массы Δm угольных образцов при изменении их температуры с выделением преимущественно двух диапазонов: примерно от 40 до 60°C (T_1) и 480–500°C (T_2). Изменение массы образцов угля в диапазоне температур T_2 связано также с внутренней энергией релаксации метаноносности продуктивных пластов;

✓ удаление летучих форм в некоторых образцах угля при их равномерном нагревании сопровождается эндозффектами, т. е. понижением температуры самих образцов. Этот эффект может являться следствием десорбции летучих компонентов;

✓ со временем хранения образцов угля после их извлечения из продуктивных пластов наблюдается ослабление связи газовой компоненты в углеметановом веществе (в том числе связи метана с веществом угля);

✓ экспериментально-теоретически обоснован обобщенный многопараметрический показатель количественного описания петрографических свойств углей Кузбасса с использованием канонической шкалы структурно-иерархических представлений, что позволило ввести новую количественную классификацию и построить распределение петрографических групп пластов разной стадии метаморфизма по угленосным районам Кузбасса.

• В [49] проведенный комплекс экспериментальных исследований по анализу связей между тепловыми и деформационно-волновыми процессами, возникающими в угольных образцах разного марочного состава (месторождения Кузбасса) при одноосном жестком нагружении до разрушения, позволил установить:

✓ практически с самого начала нагружения (со скоростью $\sim 3.3 \cdot 10^{-6}$ м/с) в угольных образцах возникают низкочастотные процессы внутреннего микродеформирования, обусловленные движениями структурных элементов по типу колебания связанных между собою “физических маятников”. При этом амплитуда таких колебаний возрастает с увеличением уровня напряжений;

✓ отмечается статистически значимая связь между возрастанием температуры угольных образцов и их прочностными свойствами, выходом летучих веществ и внутренней энергией релаксации метаноносности соответствующих угольных пластов;

✓ распределение индуцируемого температурного поля в нагружаемых образцах угля весьма неоднородно. Однако при этом имеется подобие картин распределения температуры и микродеформаций, обусловленное внутренним строением испытанных образцов угля различных стадий метаморфизма (линейными размерами “механических” неоднородностей).

Установленные закономерности позволяют особо отметить, что при отработке угольных месторождений углеметановые пласты способны при определенных геомеханических и термофизических условиях сформировать газодинамический возмущающий импульс от внутренних напряжений, достаточный для развития процессов их саморазрушения с сопутствующими выбросами угля и газа.

В последующих исследованиях следует акцентировать особое внимание на изучение отмеченных связей между относительными приращениями температуры в более широком диапазоне значений абсолютных температур.

• В [31] разработан новый подход к реализации современной геоинформационной среды для решения геомеханико-геодинамических, геоэкологических и иных задач, базирующийся на облачных технологиях. Отмечено, что особенностями современного этапа развития горной геоинформатики в России являются:

✓ накопление значительного количества разнообразных баз данных по отдельным направлениям горных наук;

- ✓ создание специализированных геомониторинговых систем;
- ✓ широкое использование систем автоматизированного проектирования на основе различных моделей горнопромышленных комплексов;
- ✓ использование классических геоинформационных систем для описания свойств и процессов массива горных пород, подвергаемого техногенному воздействию;
- ✓ создание и применение информационных баз данных от приборов нового класса, которые осуществляют комплексные замеры геомеханико-геодинамических, геоэкологических и газодинамических характеристик и генерируют большие массивы цифровых данных;
- ✓ использование данных систем дистанционного зондирования Земли, которые позволяют проводить оценку геодинамико-геомеханического и геоэкологического воздействия горных предприятий на больших площадях, а не по отдельным точкам замера;
- ✓ разработка сложных программно-вычислительных комплексов для решения широкого класса задач геомеханики, аэрогазодинамики, гидродинамики в разнообразных горнотехнологических условиях.

Активно формируются новые направления применения и развития горной информатики.

Предлагаемый в [31] подход к созданию современных систем горной информатики позволяет на единой методологической основе разрабатывать универсальные распределенные информационно-вычислительные комплексы для решения разнообразных задач горного производства. При этом не регламентируются сами подходы к их решению и те информационные модели, которые необходимы для создания как прикладной, так и вычислительной среды.

Рассматриваемый подход не является всеобъемлющим, однако он позволяет существенно упростить работу с геопространственными данными, что и демонстрируется на примерах решения ряда конкретных геомеханико-геодинамических и геоэкологических задач Кузбасса в [31–34, 40–47].

О разрушении горных пород в процессах бурения скважин

Особо подчеркнем, что детальные и глубокие познания по физике и геомеханике разрушения многофазных гетерогенных геосред в областях концентрации напряжений чрезвычайно важны также в случаях, когда последние формируются в результате взаимодействия породоразрушающих органов горных машин и оборудования с породными массивами (особенно при сверхглубоком бурении скважин и осуществлении буровзрывных работ).

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН — единственный из академических институтов горного профиля России, где активно развивается научное направление “Горное и строительное машиноведение”. В этом направлении особое место занимают машины для бурения скважин в породном массиве. В области создания этих технических средств получен ряд основополагающих результатов, позволивших определить на многие годы тенденции их развития в России и за рубежом. Все серийно выпускаемые на заводах России буровые машины ударного действия погружного типа разработаны и защищены десятками российских и зарубежных патентов. Авторский коллектив сотрудников ИГД СО РАН за создание комплекса буровой техники для высокопроизводительного бурения глубоких взрывных скважин при добыче железной руды — станка НКР-100 и погружных пневмоударников — отмечен в СССР Ленинской премией [25, 26].

ИГД СО РАН более 30 лет известен как один из мировых лидеров в области создания машин и комплексов оборудования для реализации технологии бестраншейной прокладки подземных коммуникаций, связанной с проходкой протяженных подземных скважин в грунтовых массивах. Наиболее известными машинами, разработанными в ИГД СО РАН для этих целей, являются автономно движущиеся ударные устройства — пневмопробойники. Главные досто-

инства этих машин — высокая надежность, прочность, безотказность в работе и долговечность. Именно они и всесторонняя патентная защита обеспечили пневмопробойникам хорошую конкурентоспособность, способствовали продаже лицензий фирмам США, ФРГ, Франции и Великобритании, экспорту более чем в 30 зарубежных стран [25, 26].

Дальнейшее прорывное развитие этого фундаментального технико-технологического направления — бурения скважин в грунтовых и скальных массивах — связывается с использованием “тонких” геомеханических процессов взаимодействия между рабочими органами буровых установок и породными массивами до их разрушения.

Таким образом, реализованный к настоящему времени объем научных исследований и технических разработок является крупным вкладом в развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геомеханики и геофизики, создавая соответствующие предпосылки для построения новых (прежде всего сейсмодеформационно-электромагнитных) систем комплексного мониторинга экологического состояния геосреды, горных ударов и техногенных землетрясений на рудниках и шахтах России и за рубежом. Обеспечение их ***геоинформационной сопряженности и совместимости с действующей Федеральной системой сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений России [50] и ее аналогов в странах мира*** — залог успешного решения сформулированной ниже “программы” фундаментальных исследований, позволяющей включить мощный конструктивный потенциал для укрепления научно-практического взаимодействия между геофизиками, геомеханиками, горняками и экологами при переходе на глубокие горизонты разработки полезных ископаемых.

Как показали современные экспериментальные и теоретические исследования, диагностика уровня “критичности” в состоянии контролируемых объемов массивов пород в процессах разрушения и прогнозирования катастрофических событий в горном деле должна основываться на учете реально существующего взаимодействия между глобальными геодинамическими (тектоническими) и локальными геомеханическими (техногенными) полями в верхней части земной коры блочно-иерархического строения. На базе этих знаний должны разрабатываться и современные мониторинговые системы контроля напряженно-деформированного состояния породных массивов и экологического состояния на горнодобывающих предприятиях ведущих стран мира, их методологическая основа, собственно методическое наполнение, приборно-измерительное оснащение, а также осуществление базовых в горном деле энергосберегающих технологических процессов разрушения пород, особенно при бурении породных массивов (для осуществления буровзрывных работ и особенно — сверхглубокого бурения).

Еще раз подчеркнем, что в современных условиях акцентными по своей актуальности становятся “генетические” основы формирования очаговых зон разрушения горных пород в их напряженных массивах сложного геологического строения, во многом связанные с механизмами трансформации упругой энергии в формирующихся зонах катастрофических событий и технологического разрушения в кинетическую энергию движения их структурных элементов. Такая информация должна использоваться как “априорная” при проектировании и формулировке технических требований к современным мониторинговым системам геомеханико-геодинамической и экологической безопасности на крупнейших горнодобывающих предприятиях России и мира, а также при проектировании сложных буровых установок.

Опираясь на фундаментальные достижения в области наук о Земле, нелинейной геомеханики и геофизики [1–23; и др.] как необходимый научный задел, в качестве основных направлений перспективных фундаментальных научных исследований и прорывных технологических разработок нами видятся:

(I). Установление главных механизмов формирования и особенностей развития очаговых зон повышенной концентрации напряжений и деструкции массивов горных пород и геоматериалов, обладающих блочно-иерархической структурой, многофазностью и проявляющих свойства открытых самоорганизующихся систем, находящихся в тектоническом поле напряжений и подверженных высоким техногенным нагрузкам в процессах добычи полезных ископаемых.

(II). На основе комплексного анализа и теоретического обобщения современных достижений в области нелинейной геомеханики, геофизики, облачных геоинформационных технологий и с учетом ожидаемых результатов по п. (I) — разработка методологических основ, методов, технических и информационных средств для формирования многослойной геоинформационно-мониторинговой системы геомеханико-геодинамической и экологической безопасности стратегически важных горнодобывающих регионов России и мира.

(III). На основе использования современных критериев объемного разрушения горных пород, открытия эффекта аномально низкого трения в блочных геосредах [51], а также с учетом ожидаемых результатов по п. (I) и частично по п. (II) — дать геомеханическое и технико-технологическое обоснование для развития нового перспективного энергосберегающего направленного бурения глубоких и сверхглубоких скважин, построенного на принципе обратной связи с физико-механическими свойствами подсекаемых напряженных породных толщ, с элементами геофизической навигации.

Актуальные направления и задачи фундаментальных исследований

Необходимое “покрытие” отмеченных (I–III) основных направлений фундаментальных и прикладных исследований по достижению соответствующих им целей предполагается *решением следующих важных задач*, список которых, безусловно, может и должен быть дополнен. Помимо особо выделенных выше крупных научных проблем, к таким задачам можно отнести следующие.

По направлению I:

✓ Существенное расширение представлений о породном массиве как среды блочно-иерархического строения, обладающей нелинейными свойствами (самоорганизации), а также еще не изученными в достаточной степени механизмами трансформации накапливаемой в очаговых зонах катастрофических событий потенциальной упругой энергии в кинетическую энергию движения ее составных структурных элементов.

✓ Выполнение натурных исследований напряженно-деформированного состояния массива горных пород на крупнейших месторождениях полезных ископаемых; разработка феноменологических основ и механико-математических методов описания условий формирования очаговых зон повышенной концентрации напряжений и деформаций в массивах горных пород и механизмов их высвобождения, в особенности с использованием энергетического подхода.

✓ Исследование особенностей геодинамических движений и их влияние на состояние инженерных сооружений объектов недропользования; определение параметров и выявление закономерностей проявления современных геодинамических движений в массиве горных пород, включая распределение их во времени и пространстве по отношению к тектоническим нарушениям, а также во взаимосвязи с подземными горными выработками и сооружениями.

✓ Выбор и обоснование наиболее информативных параметров и физических показателей оценки критических состояний породной среды.

✓ Развитие методов интерпретации данных измерений параметров геомеханических полей посредством решения прямых и обратных задач для определения напряжений и деформационно-прочностных характеристик породных массивов; верификация новых моделей, описывающих до- и запредельное деформирование пород, на основе решения задач об устойчивости элементов подземных конструкций; создание соответствующих программных продуктов.

✓ Развитие основ теории взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в многофазных угольных пластах различной стадии метаморфизма при их отработке на различных глубинах при изменяющемся температурном фоне.

✓ Совершенствование существующих и создание новых технических средств комплексного контроля напряжений и деформаций в породном массиве.

По направлению II:

✓ Развитие экспериментально-теоретических и геоинформационных основ контроля напряженно-деформированного состояния массива горных пород при отработке месторождений полезных ископаемых в экстремальных горно-геологических и природно-климатических условиях.

✓ Разработка методологических основ комплексирования информационных данных для оценки сейсмической опасности в районах крупного техногенного воздействия на земную кору, вскрытие закономерностей и механизмов кластеризации динамических явлений (горных ударов, техногенных и природных землетрясений) во времени и пространстве при подготовке катастрофических событий, получение динамических характеристик горных пород, связанных с неупругими процессами вязкоупругого, а также микро- и макропластического характера.

✓ Развитие облачных геоинформационных технологий и систем искусственного интеллекта в рамках геопорталов, обеспечивающих интеграцию разнородных данных и вычислительных манипуляций с ними; создание систем вычислений, основанных на сложных математических моделях с привлечением картографической информации для задания начальных и граничных условий, параметров расчета с последующим наглядным отображением результатов.

✓ Построение на основе данных дистанционного зондирования Земли и горнотехнологических объектов алгоритмов обработки информации в режиме представления услуг геосервиса, включая конкретные геоэкологические, газодинамические и геодинамико-геомеханические расчеты в режиме облачных вычислений, реализуемых как краудсорсинг.

✓ Создание основ построения комплексных геомеханико-геодинамических, геоэкологических и геофизических систем мониторинга движений породной среды, ориентированных на решение вопросов прогноза катастрофических событий и их профилактики при добыче полезных ископаемых, с элементами геоэкологической оценки горнодобывающих районов и регионов в целом.

✓ *Формулирование технических требований и создание международных геодинамических полигонов для исследования природы и признаков нарастания активности геофизических полей в недрах Земли, верификации широкого спектра методов и технических средств контроля за состоянием геосреды и ее эволюцией, прогнозирования катастрофических событий.*

По направлению III:

✓ *Оптимизация и повышение эффективности работы буровых машин, предназначенных для проходки в породном массиве глубоких и сверхглубоких направленных скважин для реализации технологий будущего — геотехнологий реакторного типа, дегазации угольных пластов, облагораживания поверхности Земли в районах интенсивной добычи полезных ископаемых, технологий выполнения спасательных работ на горных предприятиях и специальных работ в подземном строительстве, а также для установки регистрирующей аппаратуры с целью прогнозирования таких опасных явлений, как горные удары, возникновение очагов самовозгорания и горения угля и др.*

✓ Установление физических закономерностей разрушающего взаимодействия рабочих органов машин ударного и вибрационного действия с породным массивом с целью укрепления научной базы, обеспечивающей разработку перспективного поколения горных машин и оборудования для их практической реализации.

✓ Создание физических моделей, математических методов и программных средств для описания деструктивных процессов, инициированных ударными и вибрационными нагрузками, в частности моделей, позволяющих достоверно оценивать энергетические и эксплуатационные характеристики создаваемых машин, прогнозировать их ресурс, обеспечивать рациональные геометрические формы и размеры деталей машин и формулировать соответствующие требования к конструкционным материалам.

✓ Изучение динамики машин для разрушения горных пород при бурении скважин, установление их рациональных функциональных режимов, поиск способов повышения эффективности воздействия рабочих органов горных машин на породный массив при ограничениях на потребление энергоносителя.

✓ Определение условий развития пластического течения в деталях импульсных машин и зарождения трещин в них при механическом и термическом воздействиях, разработка методики прогнозирования долговечности деталей и рекомендаций по выбору материала деталей и режимов их дополнительной обработки. Обоснование критериев подбора конструкционных материалов и разработка эффективных технологий их упрочнения для повышения надежности и долговечности бурового оборудования.

✓ Определение условий разрушения геоматериалов, установление обеспечивающих эти условия параметров инструмента и их сочетания с необходимым энергетическим воздействием. Обоснование и экспериментальная проверка новых принципов перемещения проходческого устройства в породном массиве с широким диапазоном физико-механических свойств и утилизации разрушенной породы.

✓ *Обоснование условий возникновения эффекта аномально низкого трения в геосредах и его использования для повышения эффективности механического способа разрушения породного массива при увеличении скорости проходки скважин с одновременным обеспечением их устойчивости к обрушению.*

✓ Увеличение ресурса основных деталей привода и породоразрушающего инструмента и решение проблемы определения местоположения технического устройства в массиве и управления траекторией его движения.

✓ Разработка способов изменения траектории движения проходческих устройств в породном массиве при ударно-вращательном бурении, учитывающих условия формирования отклоняющего воздействия при динамическом характере разрушения забоя, и средств дистанционной передачи команд на привод системы управления проходческим устройством.

✓ Разработка интеллектуальных устройств навигации движущихся в породном массиве буровых проходческих комплексов, способных с требуемой точностью отслеживать их отклонение от заданного курса с учетом физико-механических, геомеханических, акустических и электромагнитных свойств геосреды (использование принципа обратной связи).

Ниже дадим необходимые комментарии к основным (II – III) направлениям фундаментальных и прикладных исследований и “покрывающему” их кругу актуальных задач.

3. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ГЕОМЕХАНИКО-ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РОССИИ

Среди основных направлений исследований, научных задач и прикладных разработок, отмеченных выше, в этом разделе более подробно остановимся на формировании методологических основ, разработке современных методов, перспективных контрольно-измерительных системах и геоинформационных алгоритмах обработки данных для объединения их в единую ин-

интеллектуальную оболочку с управляющими функциями принятия решений. Последние должны быть организованы на принципах “обучаемости” и “обратной связи” с контролируруемыми объектами по набору важнейших параметров недропользования.

Однако эти принципы далеко не всегда реализуются даже на функционирующих системах геомеханико-геодинамического контроля крупнейших горнодобывающих предприятий России, не говоря уже о наличии объединяющей их по стране интеллектуально насыщенной “информационной оболочки”. При этом экологическая функция работы подобного рода информационных систем практически отсутствует и реализуется в рамках автономно действующих систем экологического контроля.

Таким образом, без наличия такой оболочки практически невозможно осуществлять комплексные управляющие функции по разным их видам. В равной мере это касается и учета геодинамической (тектонической) информационной составляющей, которая рассматривается обычно в мониторинговом режиме Геофизической службой РАН и соответствующими подведомственными службами МЧС России, опираясь во многом на данные о сейсмичности территорий нашей страны.

Неучет особенностей влияния изменений во времени и пространстве глобальной “геодинамической составляющей” на характер изменений локальных геомеханических (техногенных) полей является противоестественным: это существенно сказывается на корректности выбора начальных и граничных условий, качестве задаваемых вещественных и структурных параметров и других важных характеристик механико-математических моделей, формируемых для сценарно-прогнозных оценок поведения объектов недропользования при заданных видах техногенной деятельности (источника возмущения геомеханических и иных полей).

На протяжении длительного периода времени проблема прогнозирования катастрофических событий в геофизике и горном деле решалась с доминированием следующего методологического подхода (или последовательности “приоритетов”): в первую очередь — это экспериментальный поиск предвестников катастрофических событий; затем — физическое их осмысление и механико-математическое моделирование; на заключительных этапах — обозначение некоторых критериальных параметров, их испытание в лабораторных и натуральных экспериментах с позиции оценки “удачности” прогнозных оценок на примере реальных или моделируемых катастрофических событий, а также с активным применением ретроспективного анализа уже произошедших динамических событий.

Накопленный к настоящему времени опыт экспериментальных и теоретических исследований в геомеханике и геофизике свидетельствует о том, что необходима смена отмеченной выше “парадигмы” последовательности “приоритетов” в построении теории прогнозирования и предотвращения катастрофических событий. Без фундаментальных знаний по физике и геомеханике очаговых зон динамического или квазистатического проявления горного давления (а по существу — механизмов перехода потенциальной энергии геоблоков в кинетическую энергию движения составляющих их фракталей) выделение надежных с практической точки зрения критериев прогнозирования катастрофических событий не удастся получить.

В сложившихся условиях дефицита необходимых знаний по физике и геомеханике формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в сложных (обычно многофазных) природных и горно-технических системах ученым, инженерам и персоналу, вовлеченному в горное производство, необходимо осознать, что техногенные катастрофы в горном деле — это не всегда нарушение “правил техники безопасности”, но неотвратимая реальность “подземной стихии”, которую надо внимательно и основательно изучать по мере освоения новых горизонтов продуктивных толщ.

Роль же современных геоинформационных систем фактически сводится к тому, чтобы “сгладить” существующее несоответствие между растущими потребностями горно-го производства, недостаточностью фундаментальных естественнонаучных знаний и технологических возможностей для обеспечения условий безопасного и устойчивого развития горно-промышленного комплекса. Подобного рода “компромисс” как у нас в стране, так и за рубежом в значительной мере обеспечивается пока весьма упрощенным подходом к использованию мониторинговой информации.

Он сводится обычно к выявлению “энергонасыщенных зон” геосреды (повышенных напряжений и деформаций) по разрабатываемым горизонтам и последующим применением технологических операций по разгрузке “проблемных” участков. Понятно, что при функционировании сложной горно-технической системы временное достижение положительного результата в отдельном составляющем ее блоке не есть гарантия для обеспечения безопасного и устойчивого функционирования такой системы в целом. Ярким примером тому могут служить наиболее крупные техногенные катастрофические события при отработке полезных ископаемых типа горно-тектонических ударов (рудники Кольского п-ва, СУБРа, Таштагола, Дальнего Востока, Кузбасса, Норильска и др.).

Особенности развития сложных деформационно-волновых процессов при ведении горных работ во многом определяются не только физико-механическими свойствами, структурным строением продуктивных толщ и вмещающих их породных массивов, но и используемыми при этом технологическими схемами и режимом ведения горных работ (видами источников возмущения как “нетронутого”, так и постоянно эволюционирующего напряженно-деформированного состояния). Этот набор информации является по существу базовым для *“подземного информационного слоя”* [1]. За его наполнение несут ответственность службы горнодобывающих предприятий, что предполагает их надлежащее техническое оснащение (например, наличие шахтных систем геомеханического и сейсмического контроля) и, следовательно, привлечение для их разработки профильных научно-исследовательских институтов, а также разработчиков необходимого оборудования. Современный опыт формирования и практического использования *“подземного информационного слоя”* для России представлен в [18, 23].

О взаимодействии между локальными геомеханическими и глобальными геодинамическими процессами и о новых требованиях к мониторинговым системам

Как уже отмечалось, одним из важнейших результатов совместных экспериментальных исследований последних десятилетий геомехаников и геофизиков явилось обнаружение тесной взаимосвязи между глобальными геодинамическими и локальными геомеханическими процессами, обусловленными ведением горных работ, особенно в тектонически активных зонах. Не менее крупным результатом таких исследований явилось также заключение о фундаментальной роли блочно-иерархического строения горных пород и их массивов для объяснения существования широкой гаммы нелинейных геомеханических эффектов и возникновения сложных самоорганизующихся геосистем [1, 22, 52, 53].

В настоящее время, несмотря на достаточно высокую техническую оснащенность (наземные и космические станции наблюдения, специально созданные высокопроизводительные суперкомпьютеры, спутниковые каналы передачи данных с большой пропускной способностью), в метеорологии, например, получен удручающий результат: надежный среднесрочный прогноз (2–3 недели) не удается получить. Подобное положение наблюдается и в сейсмологии (разделе геофизики, родственном по проблематике геомеханическому мониторингу). Традиционно для нашей страны геомеханико-геодинамический мониторинг разворачивается на базе сейсмостанций, действующих на контролируемых объектах. В состав базы данных и “знаний” геомонито-

ринга, как правило, включается обработка сейсмической информации. В мире функционирует несколько тысяч сеймостанций. Сотни из них объединяются в “сейсмические сети”. И тем не менее нетрудно привести солидный список произошедших землетрясений, которые не удалось предсказать, и это повлекло за собой большие жертвы и разрушения.

Немногом отличается ситуация и с качеством прогнозирования горных ударов, а также иных катастрофических событий в горном деле. Как полагаем, в научном сообществе, связанном с обсуждаемой проблематикой, несколько затянулся период, по-видимому, наивной веры в достижимость достоверного прогноза за счет получения “полного” спектра сведений о породном массиве и объектов недропользования, а объективная причина якобы кроется в отсутствии адекватных технических средств телеобработки и в связи с этим — в отсутствии достаточного практического опыта эксплуатации удовлетворительных прототипов полноценного мониторинга. Однако следует отметить, что для реализации геомониторинга по таким параметрам, как быстроедействие и пропускная способность сети измерительных каналов, достижение максимальной устойчивости мониторинга, его необходимого быстрогодействия, ограничений по факторам задержки, помехозащищенности и “живучести”, технических ограничений практически не существует.

Проблема возможности реализации геомеханико-геодинамического мониторинга (прежде всего в отношении задачи прогнозирования опасного состояния контролируемых объектов) на самом деле кроется в особенностях поведения породного массива, имеющего блочную иерархическую структуру, геомеханические процессы в котором, как правило, имеют существенно нелинейный характер. Особым свойством нелинейных систем является наличие “горизонта прогноза”, за который заглянуть “детерминировано” принципиально невозможно. Динамика таких систем не предполагает полной (однозначной) предсказуемости. Здесь проявление “случайности” или “непредсказуемости” в поведении системы не есть порождение несовершенства наблюдений (это устойчивое заблуждение), а “бифуркационные” следствия проявлений фундаментальных законов природы при формировании и развитии очаговых зон катастрофических событий.

С целью существенного уменьшения многообразия теоретически возможных сценариев развития нелинейных геомеханических процессов и с учетом возможного многообразия действующих при этом “законов и закономерностей” нам хотелось бы обратить особое внимание на наиболее важный из них — **закон сохранения энергии для консервативных систем** — и в силу его универсальности (фундаментальности), и в силу реального конструктивизма. В данном случае его конструктивность для консервативных геомеханических систем связана с достаточно ясным пониманием возможного реального механизма трансформации упругой энергии в очаговой зоне повышенной концентрации напряжений в кинетическую энергию движения составляющих ее структурных элементов на критической стадии накопления упругой энергии и последующей реализации катастрофического события или разрушения пород очаговой зоны [1, 16, 17]. **Следовательно, принципиально значим вопрос: является ли контролируемая геомеханическая система консервативной или “квазиконсервативной”? В работе [54] высказана гипотеза о том, что очаговая зона катастрофического события при достижении критической стадии ее формирования на определенный период времени становится геомеханической системой консервативного типа.** В данном контексте, по существу, лежит и ответ на практически важный вопрос — о масштабности охвата геоинформационным полем контролируемого события (зреющего очага) в зависимости от его возможного энергетического состояния.

Считаем, что экспериментаторам и теоретикам в области нелинейной геомеханики и геофизики следовало бы обратить пристальное внимание на проверку этой гипотезы как одной из ключевых по механике и физике формирования и реализации очаговых зон катастрофических событий, а также имеющей непосредственное отношение к формулированию информационных

и технических требований для соответствующих мониторинговых систем геомеханико-геодинамической безопасности горнодобывающих предприятий и стратегически важных объектов России (*методологической в своей основе*).

Сравнительный анализ ряда исследовательских и промышленных систем подобного класса, работающих в США, ЮАР, странах Западной Европы и Японии, показывает необходимость: совмещения наблюдений за множеством процессов различной физической природы, непосредственно и косвенно характеризующих состояние в том числе и окружающей среды с оценкой степени техногенного воздействия; интегрирование в рамках методологического наполнения моделей различной математической природы; разворачивание широкой сети согласованно работающих станций наблюдения и т. п. Описания особенностей их конструктивного построения и работы, как правило, недоступны в открытой печати. Системы имеют высокую стоимость, а их логическая структура привязана к особенностям конкретных объектов и, в силу этого, не может быть заимствована. Существуют также прикладные геоинформационные системы, позволяющие вести анализ геомеханических процессов. Однако они не позволяют комплексировать различные методы и модели в единое целое, актуализировать соответствующую информацию с учетом ее пространственной и качественной неоднородности.

Судя по опубликованным данным, существует возможность получать представления об архитектуре и, частично, методологической основе ряда действующих систем геомониторинга в мире. Среди них — микросейсмическая система контроля на свинцово-цинковом руднике “Галина” фирмы АСАРСО (штат Айдахо, США), на южно-африканской глубокой золотодобывающей шахте Вестерн Дип Лэвэлс, на шведском руднике Луоссаваара в г. Кируна, система на испытательном полигоне в Неваде (США), ряд разработок немецкой фирмы Lennarts (MARS-88, РСМ-5800, SAS-5800) и др. Однако установить общие тенденции в подходах к проектированию систем геомониторинга, используемых в зарубежных фирмах, весьма затруднительно из-за отсутствия в открытой печати подробных сведений.

При этом прослеживается существенная зависимость качества инструментального контроля от числа точек наблюдения, достигающих в ряде систем нескольких сотен. Здесь основной упор делается на получение качественной шахтной сейсмологической информации. Хорошего уровня разработки в отмеченных направлениях ведутся, например, в Институте шахтной сейсмологии (Institute of Mine Seismology (IMS) для ряда городов и стран, в частности в г. Хобарт (Австралия), в г. Стелленбош (ЮАР). В сфере интересов данной организации плановый сейсмологический мониторинг на горнодобывающих предприятиях, который дает возможность количественно оценить сейсмичность и решать задачи предотвращения, контроля и прогнозирования потенциальных неустойчивостей породного массива, способных привести к горным ударам [55–57].

К лидерам в области разработки систем мониторинга за рубежом можно отнести ESRI USA Redlands, Clark labs Clark University USA Worcester, а также международный университет в г. Сэдбери, Канада (Universite Laurentienne Laurentian University). Среди отечественных разработок выделяются работы ОАО Научно-исследовательского института горной геомеханики и маркшейдерского дела — Межотраслевого научного центра ВНИМИ [59, 60], ГоИ КНЦ РАН, ГИ УрО РАН, ИГД УрО РАН, ИДГ РАН, ИГД СО РАН и некоторых других [1, 23]. Так, например, под методическим руководством ВНИМИ созданы системы сейсмического мониторинга GITS на шахтах “Комсомольская” и “Северная” ОАО “Воркутауголь”, на шахте № 1–5 рудника Баренцбург (арх. Шпицберген) ФГУП треста “Арктикуголь”, в ОАО “Шахта Полысаевская”, а также на рудниках Норильского горно-металлургического комбината [58–60].

Зарубежные и отечественные разработки в ряде случаев обладают существенными недостатками: отсутствует системный подход и методологическая обоснованность технических решений на стадии проектирования; не предусмотрена возможность непрерывной автоматиче-

ской регистрации информации о состоянии массива во множестве распределенных по его объему точек; не обеспечивается согласование данных, зарегистрированных различными измерительными средствами, с целью получения достаточно полного описания поведения массива.

Следовательно, необходимы: разработка адаптируемых или достаточно гибких систем геомониторинга в отношении использования существующих и перспективных измерительных станций, ориентированных на исследование различных физических процессов в массиве; обеспечение возможности учета конкретной технологической обстановки (расположение выработок и календарный план ведения горных работ, уровень технологического шума и электромагнитных помех, интенсивность информационной нагрузки); разработка и использование новых методов экспресс-обработки, ретроспективного анализа и интерпретации данных; обеспечение совместимости с ныне действующей Федеральной системой сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений России [1, 50] и мира.

Использование в такого рода комплексных мониторинговых системах записей мировой сети наземных сейсмических станций по мощным взрывам, землетрясениям и другим крупным динамическим воздействиям способствует разделению влияния в изучаемых процессах глобального геодинамического “фона” и техногенных воздействий на разрабатываемые месторождения полезных ископаемых. Наряду с экспериментальными данными по геодезическому нивелированию поверхности Земли в районах подработки от осваиваемых месторождений в данном случае речь идет о необходимости целенаправленного формирования второго — *“наземного информационного слоя” комплексной мониторинговой системы* [1].

О геомеханико-геоэкологической безопасности и формировании “надземного геоинформационного слоя”. Роль горнодобывающего комплекса России как “минерально-сырьевой житницы” для практически всей промышленности не только нашей страны общеизвестна, в том числе и на обозримую перспективу по таким направлениям, как стратегическая безопасность, устойчивое развитие и ускорение экономического роста, решение социальных проблем и т. д. Поэтому, как обоснованно подчеркивается в [61], от его долговременных конкурентных на мировом уровне преимуществ во многом зависят как ширина спектра возможных практических приложений уже наработанного потенциала науки и технологий в целом, так и их достижения в будущем.

С другой стороны, в связи с возрастающими объемами извлечения полезных ископаемых из недр Земли на ее поверхность, с годами обостряются экологические проблемы — вплоть до их катастрофических проявлений. В эпоху глобализации и бурного индустриального развития многих стран с “сырьевой направленностью” окружающая среда становится все более уязвимой в связи с ростом техногенной нагрузки не только из-за загрязнения речной сети (и увеличивающимся, следовательно, дефицитом качественной воды), но и деградации ее экосистем в районах активного недропользования, с сопутствующей утратой или существенного изменения биоразнообразия.

Поскольку, как отмечалось выше, имеет место “модуляция” деформационно-волновыми процессами (от изменяющихся и совместно действующих геомеханических и геодинамических полей) экологических процессов, то это может конструктивно использоваться при прогнозировании и оценке влияния их на среду обитания растительного и животного мира. Крупномасштабные и сравнительно локальные на поверхности Земли деформационно-волновые процессы и обусловленные ими изменения других физических характеристик (поглощающая способность по электромагнитному спектру, температура, влажность и проч.), в том числе и в атмосферных слоях, в современных условиях с достаточной надежностью можно контролировать спутниковыми технологиями дистанционного зондирования Земли [44–47]. Это, согласно [1], — *“над-*

земный информационный слой”. Следовательно, через деформационно-волновые процессы он оказывается сопряженным по времени и пространству с двумя предыдущими геоинформационными слоями — **“подземным” и “наземным”**.

Таким образом, в качестве методологической основы для “сшивания” между собой обозначенных выше трех базовых геоинформационных слоев (подземного, наземного и надземного) может послужить активно развиваемая ныне теория нелинейных волн маятникового типа [1, 16, 23; и др.], лежащая в основе описания развития деформационно-волновых процессов в напряженных геосредах блочно-иерархического строения. Применительно к горнодобывающим районам с большими объемами извлекаемых полезных ископаемых, кроме того, как показано в [28], при формировании региональных блоков глобальной многослойной системы геомеханико-геодинамической безопасности России необходимо опираться также на “априорную” феноменологическую информацию по возможному развитию крупномасштабных квазистатических зонально-дезинтеграционных процессов [17, 22].

4. О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ РАЗВИТИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБЛАЧНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

При формулировании и обосновании методологических основ построения комплексных геомониторинговых систем необходимо учитывать современный уровень научных знаний о свойствах контролируемых объектов и закономерностях их эволюции под влиянием техногенной деятельности. В данном случае нами рассматривается *Система* в виде иерархически структурированного, геоинформационного в своей основе, кластера региональных мониторинговых подсистем, совместимого с ныне действующей “Федеральной системой сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений России”. Как отмечалось в [1], современными достижениями в области нелинейной геомеханики и геофизики, а также бурным развитием геоинформатики на протяжении минувшего десятилетия положено начало созданию фундаментального научно-технологического задела для формирования многослойной мониторинговой **“Системы геомеханико-геодинамической безопасности России”**, состоящей из трех базовых геоинформационных слоев: **подземного, наземного и надземного**.

В качестве основы “подземного геоинформационного слоя” в настоящее время могут рассматриваться шахты и рудники — как уникальные природные лаборатории, широко представленные по поверхности Земли на различных ее континентах. Системообразующими для формирования и наполнения “наземного” и “надземного” геоинформационных слоев уже фактически являются геомеханические, горно-геофизические, маркшейдерские методы, планетарная сеть сейсмологических станций, а также методы спутниковой геодезии и геофизики.

Говоря о “подземном геоинформационном слое” надо иметь в виду его “стратифицированную” структуру, представленную комплексом данных о геолого-структурных, минералогическо-петрографических, исходных физико-механических свойствах горных пород, их глубине и элементах залегания, фазовом состоянии, температурном поле и др., а также (что особенно важно) **календарными планами ведения горных работ по полному циклу освоения месторождений полезных ископаемых во времени и пространстве**. А вот включающая эти основные информационные слои “интеллектуальная оболочка” должна содержать также и комплексный критерий разделения динамических событий (горные удары, землетрясения и т. д.) по признакам их причинно-следственных связей. В этом смысле все катастрофические события, связанные с изменениями вида напряженно-деформированного состояния массивов горных пород, условно можно разделить на три основных класса источников, отличающихся по их происхождению: природные, техногенные и “интерференционного типа” — природно-техногенные [1].

В настоящее время большое развитие и достаточно широкое распространение получили результаты геоинформационных исследований и разработок, связанных с “облачными технологиями” [31] — распределенными вычислениями на основе виртуализированных динамически перераспределяемых вычислительных ресурсов, предоставляемых внешним пользователям через Интернет по их запросу. Это дает качественно новые возможности для выполнения крупномасштабных междисциплинарных исследований в области наук о Земле, где необходимо задействовать мощности суперкомпьютеров. Однако их применение сопряжено с высокой стоимостью для пользователей такими системами. Высокие затраты необходимы и на содержание их инфраструктуры.

Обсуждаемый нами проект, безусловно, предполагает развитие основ для формирования распределенных облачных вычислений по комплексированию информационных баз данных, относящихся к экологической безопасности, а также сейсмической активности регионов с высокой техногенной нагрузкой. Ключевыми направлениями исследований и прикладных разработок здесь являются: методы описания взаимодействия разнородных виртуальных сервисов и приложений в облачных средах, а также алгоритмы хранения, обработки и анализа больших по объему массивов данных; способы организации крупномасштабных облачных вычислений с использованием различных вычислительных ресурсов; сценарно-вариантные расчеты в распределенной вычислительной среде. Так, большой задел по отмеченным направлениям имеется в институтах СО РАН. В [30–34, 41–47] отражены первые результаты использования облачных геоинформационных технологий для геомеханико-геодинамического и геоэкологического контроля горнодобывающих районов Кузбасса.

Таким образом, необходимо создание на основе данных дистанционного зондирования Земли и мониторинга горнотехнологических объектов оригинальных алгоритмов и программ обработки пространственной информации в режиме представления услуг геосервиса, включая конкретные газодинамические и геомеханические расчеты с использованием технологии облачных вычислений, реализуемых как краудсорсинг [31].

Как справедливо отмечалось в [48], современные знания о физико-механических свойствах продуктивных пластов каменного угля, калийно-магниевых и других солей, рудных и нефтегазовых месторождений, несмотря на их существенное различие, тем не менее указывают на наличие общих закономерностей в развитии крупномасштабных геомеханических процессов. Именно такого уровня знания с учетом существенных особенностей протекания геомеханических процессов на конкретных, по существу — многофазных, месторождениях полезных ископаемых могут служить “априорной основой” для построения надежных систем геомеханико-геодинамической и геоэкологической безопасности горных предприятий, работающих в условиях повышенного риска по катастрофическим событиям. В известном смысле они обеспечивают “инвариантное” методологическое ядро для разного вида месторождений полезных ископаемых при построении достаточно универсальных мониторинговых систем.

В этой связи возникает естественный вопрос — какого рода крупномасштабные и иные известные геомеханические процессы отвечают в достаточной мере требованиям универсальности, а значит, могут в дальнейшем учитываться в виде “методологических составляющих” для построения перспективных мониторинговых систем в качестве априорной информации? Подобного рода априорная информация, в силу нелинейности геомеханической системы, должна относиться к оценке возможных сценариев формирования и развития очаговых зон концентрации напряжений в пределах отрабатываемых шахтных полей, налегающих и подстилающих породных толщ, для продуктивных пластов и тел месторождений разного вида. Ниже более подробно рассмотрим подобного рода процессы, условно подразделяемые на квазистатические и динамические.

4.1. Нелинейные квазистатические процессы самоорганизации горных пород при образовании подземных полостей и выработок

В [17] представлены основные достижения в области исследования особенностей формирования напряженно-деформированного состояния горных пород вокруг подземных выработок при отработке месторождений твердых полезных ископаемых на больших глубинах, в первую очередь на примере полиметаллических рудников Талнахско-Октябрьского месторождения (г. Норильск, Россия). Ключевая роль в понимании этих, нелинейных в своей основе, процессов принадлежит явлению зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок, зарегистрированному в начале 90-х годов минувшего века в СССР как научное открытие № 400 СССР [62].

По существу, речь идет об открытии своеобразного *“эффекта макроквантования упругой энергии”* вокруг подземных полостей при их образовании на глубинах, где достигаются условия близости или превышения действующего уровня горного давления относительно предельно-прочностных свойств горных пород. Открытие этого явления дало мощный импульс исследованиям в этом направлении для широкого спектра горно-геологических условий отработки месторождений полезных ископаемых не только рудных, но и нерудных, в том числе угольных [63–65] и нефтегазовых [21]. Большой шаг сделан в развитии теоретических основ описания явления зональной дезинтеграции [17, 66], что само по себе имеет принципиальную значимость. Особо в этом аспекте следует отметить цикл исследований, выполненных зарубежными учеными [67, 68; и др.].

Как известно, уголь имеет особую ценность в развитии энергетического и химико-технологического комплекса современной цивилизации. В этом отношении Кузбасс играет исключительно большую роль благодаря большим запасам высококачественных углей. За более чем вековую историю освоения в этом регионе угольных запасов в настоящее время все более актуальными становятся проблемы не только безопасности ведения горных работ на возрастающих по глубине горизонтах залегания высокого качества углей, но и экологические проблемы из-за изменения гидрологического режима в районах ведения горных работ открытым и подземным способами.

Все явственнее проявляют себя крупномасштабные деформационные процессы, развивающиеся на протяжении многих десятилетий вокруг отработанных шахтных полей в подземных условиях либо *“законсервированных”* на неопределенное время из-за убыточности отработки угольных шахт региона в современных экономических условиях ведения хозяйства в стране. Выход на поверхность земли зон локализации деформаций от сдвижения подработанных толщ массивов горных пород приводит в результате к трудно контролируемым ныне процессам самовозгорания и последующего горения угля, в том числе и оставляемых по разным причинам неизвлекаемых больших запасов угля.

Нередкими и все учащающимися становятся случаи выхода глубинного метана по формирующимся зонам локализации деформаций от ведения подземных горных работ на поверхность земли, сопровождающиеся возникновением, пока локального, возгорания метана в пределах некоторых поселений Кемеровской области. Поскольку Кузнецкий угольный бассейн находится в тектонически активной зоне Алтае-Саянской складчатой области, то длительные процессы самоорганизации массивов в пределах многочисленных шахтных полей этого бассейна приводят в результате к возникновению нового типа волноводных структур (геомеханических волноводов для маятниковых волн [1]) при распространении сейсмических волн от землетрясений и технологических взрывов на карьерах, нередко трудно различимых по своему генезису.

В этой связи хотелось бы особо отметить большой цикл экспериментально-теоретических исследований, проведенных на угольных месторождениях под руководством проф. Г. Я. Полевщикова [64; и др.]. На примере отработки угольных шахт Кузбасса экспериментально установлена количественная связь между развитием крупномасштабных зонально-дезинтеграционных

процессов в продуктивных пластах и вмещающих породных массивах и пространственной локализацией сопутствующих газодинамических событий (рис. 1). Ключевая роль в количественном описании установленной связи принадлежит масштабному фактору явления зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок по В.Н.Опарину: $r_n / r_{n-1} = \sqrt{2}$, n — целые числа (0, 1, 2, ...); для угольных пластов r_i — длина выработанного пространства при отработке выемочных столбов, сопряженных с положением i -й зоны дезинтеграции массивов. Аналогичная связь установлена и в виде соответствующей “периодичности” возникновения зон концентрации повышенного и пониженного давления в стойках механизированных крепей при отработке угольных пластов Кузбасса.

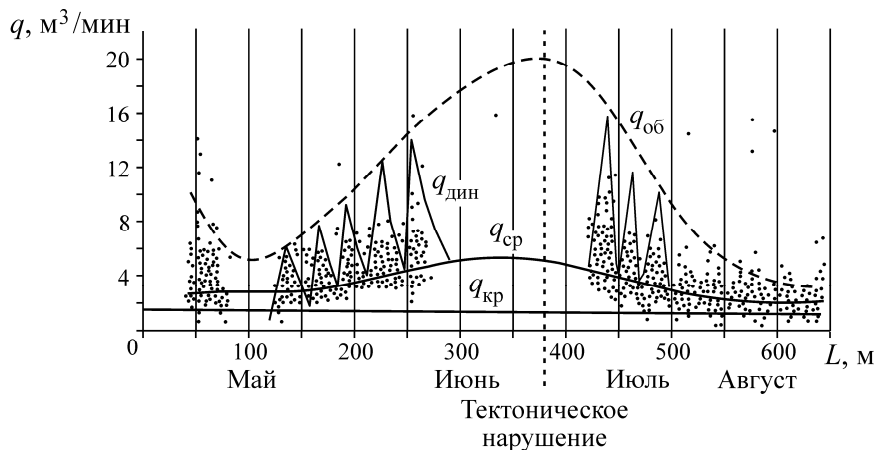


Рис. 1. Связь зональной дезинтеграции разрабатываемого массива горных пород с пространственной локализацией газодинамических проявлений на шахтах Кузбасса (по [64])

Такие крупномасштабные процессы самоорганизации рудных и угольных массивов горных пород являются принципиально значимыми для комплексной интерпретации геомеханических, геофизических и иных данных в перспективных мониторинговых системах геомеханико-геодинамической и экологической безопасности горнодобывающих предприятий. Возможность их количественного (канонического [22]) описания в рамках развития зонально-дезинтеграционных процессов различного масштабного уровня дает важный “инструментарий”, конструктивный как для ретроспективного анализа имеющейся разноплановой информации, так и для построения прогнозных сценарных оценок развития сложных нелинейных геомеханических процессов. Здесь ключевая роль принадлежит масштабному фактору явления зональной дезинтеграции для массивов горных пород вокруг обрабатываемых пространств [69].

Как важное дополнение, можно отметить публикацию [70], где представлены результаты мониторинга процесса сдвижения от подземных горных работ комплексом геодезических и геофизических методов на примере Высокогорского железорудного месторождения (рис. 2). В данной работе [70] сделано заключение, что “обрушение поверхности над изолированным участком Восточно-Ревдинских залежей Высокогорского месторождения произошло под воздействием геодинамической подвижки, которая создала в массиве зону запредельного деформирования в соответствии с явлением зональной дезинтеграции...”. Приводимый ниже методологический подход по существу является обобщением описанного в [17] при определении влияния крупномасштабных зонально-дезинтеграционных процессов на общую производительность ведения горных работ на рудниках Талнахско-Октябрьского месторождения полиметаллов по мере роста пролетов отработки пластовых залежей, а также технического состояния капитальных крепей (рис. 3), но применительно уже к освоению нефтегазовых месторождений [21].

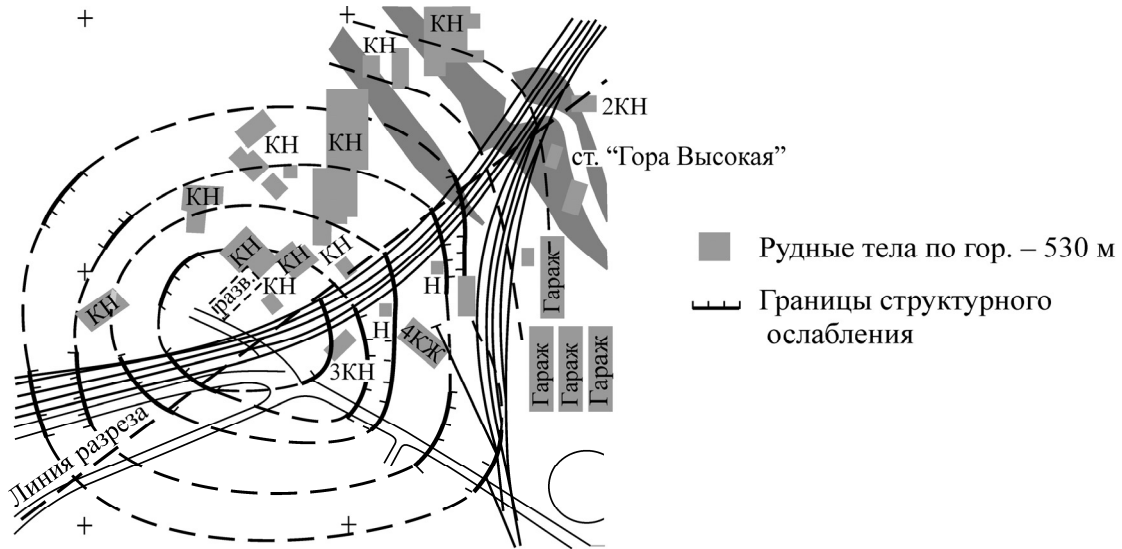


Рис. 2. Контуры структурных нарушений горного массива, зафиксированного после геодинамической подвижки 01.10.2009 на примере Высокогорского железорудного месторождения (по [70])

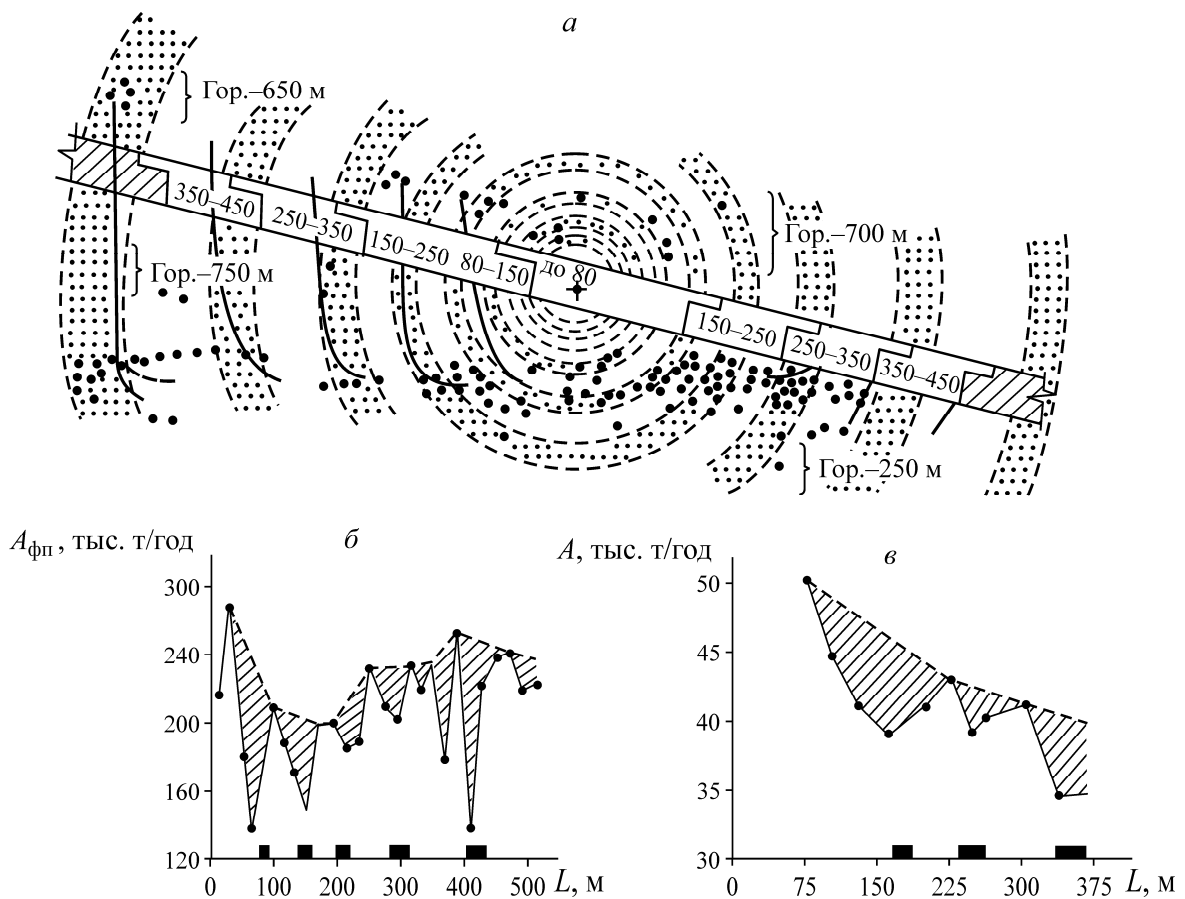


Рис. 3. Проявление зональной дезинтеграции массивов горных пород на рудниках Норильска: а — локализация мест разрушения капитальной крепи выработок вокруг выработанного пространства по мере увеличения его пролета на шахте № 1 рудника “Октябрьский”; б — изменение производительности фланга панели с развитием пролета на шахте № 1 рудника “Октябрьский” и в — на северо-восточном участке рудника “Комсомольский” (■ — положение и размеры (ширина) теоретически прогнозируемых зон дезинтеграции согласно их масштабному фактору)

4.2. Методологические основы контроля нелинейных геомеханических процессов при извлечении углеводородов на базе масштабного фактора явления зональной дезинтеграции горных пород

В основу этой методологии положен принцип степени соответствия теоретически прогнозируемой объемной картины аномального поведения контролируемой группы технических, эксплуатационных и промысловых параметров фактической картине объемного распределения “аномальных” характеристик этих параметров по разрабатываемому нефтегазовому месторождению [21]. Его существо заключается в следующем.

На основании имеющихся геолого-геофизических данных по глубине залегания H и мощности продуктивного пласта ΔH в месте расположения промысловой группы скважин для начальной стадии освоения нефтегазового месторождения выбираются геометрический центр $O(x_0, y_0, z_0)$ и эффективный радиус r_0 зоны декомпрессии углеводородов (в качестве первого приближения задаются: $r_0 = \Delta H / 2$, $z_0 = H + r_0$, x_0 и y_0 — среднеарифметические значения x и y координат начальной группы промысловых скважин).

Затем проводится пространственное разбиение объема массива горных пород, содержащего месторождение, на концентрические с центром $O(x_0, y_0, z_0)$ чередующиеся объемные зоны D_i и ΔD_i , определяемые по формулам:

$$D_i = \{r(x, y, z) \mid r_i + \Delta r_i < r < r_{i+1}\}, \quad \Delta D_i = \{r(x, y, z) \mid r_i \leq r \leq r_i + \Delta r_i\},$$

где $r_i = r_0 (\sqrt{2})^i$; $\Delta r_i = \theta \cdot r_i$, $0.05 \leq \theta \leq 0.13$, $i = 0, 1, 2, \dots, N$; N зависит от объема месторождения.

Прогнозные зоны аномального поведения контрольной группы параметров по месторождению соотносятся с зонами $\Delta D_i(x, y, z)$. Контрольная группа параметров $G_j(x, y, z)$, $j = 1, 2, \dots, k$, представлена в декартовой системе координат с центром в точке $O(x_0, y_0, z_0)$ в виде набора соответствующих механических, гидродинамических, промысловых, геолого-геофизических характеристик и технического состояния обсадных колонн как по глубине скважин (по оси z), так и в интегральном представлении. В последнем случае координата $z = \text{const}$. Функция технического состояния, например обсадных колонн, $f(x, y, z)$ принимает два значения (по данным технической экспертизы: 1 — удовлетворительное; 0 — неудовлетворительное), т. е. $f(x, y, z) = (0 \text{ или } 1)$. Далее вводится оператор R — трансформации натурального банка данных разнородной по виду представления информации (в том числе качественной) в трехмерное множество однородных точек (с координатами (x_l, y_l, z_l) , $l = 1, 2, \dots, L$) аномальных значений контрольной группы параметров $G_j(x, y, z)$ по используемой выборке скважин. Трансформация параметров $G_j(x, y, z)$ оператором R осуществляется на данном этапе экспертно: если параметр G в точке (x, y, z) имеет “нормативное” значение, то соответствующей координате приписывается значение 1, в противном случае — 0.

Это позволяет разработать программу сканирования информационного банка данных в R -трансформации для ретроспективного анализа, касающегося наличия формализованной (по масштабному фактору явления зональной дезинтеграции горных пород) связи в группировании координат контрольной группы параметров $G_i(x_l, y_l, z_l)$ с их аномальными значениями в зонах $\Delta D_i(x, y, z)$. В основе программы сканирования должны лежать операции: а) задание значений характеристик θ , $r_0(x_0, y_0, z_0)$ и расчета по ним пространственного положения областей D_i и ΔD_i ; б) определение числа точек и соответствующих им координат для контрольной группы параметров G_i с аномальными значениями; в) определение процентного отношения числа этих точек, попавших в области D_i и ΔD_i соответственно.

Гипотеза о наличии или существовании детерминированной связи между зонально-дезинтеграционным процессом породных массивов вокруг начальной области декомпрессии нефтегазового месторождения может считаться справедливой, если, например, более 70 % точек G попадают в объединение областей ΔD_i . Оценку работоспособности предложенной методологии построения информационного банка данных контрольных параметров по любому месторождению и соответствующей программы сканирования можно проводить на основе имеющихся натуральных материалов. Подобного рода исследования авторы рассматривают как весьма перспективные и их, безусловно, следует провести. В данном случае становится почти очевидным и способ прогнозирования мест локализации последующих событий в процессах перспективного развития горных работ или расширения подземных полостей.

4.3. Динамические процессы с позиций нелинейной сейсмики и энергетические основы формирования очаговых зон разрушения горных пород в массивах сложного геологического строения

Обоснованию необходимости развития энергетического подхода к решению этой фундаментальной проблемы с выделением соответствующего методического “инструментария” посвящены в значительной мере предыдущие три части настоящей статьи [1]. Далее более подробно остановимся лишь на наиболее крупных проблемных позициях, относящихся к методологической составляющей обсуждаемого проекта, связанного с учетом нелинейных физических процессов в формирующихся зонах готовящихся катастрофических событий. Эта “априорная информация” также необходима при организации любых комплексных мониторинговых систем или локальных подсистем горнодобывающих предприятий.

Речь идет *о необходимости детального изучения “квазирезонансного механизма” трансформации накапливаемой упругой энергии очаговых зон разрушения горных пород в кинетическую энергию движения составляющих их структурных элементов* [1]. Об этом свидетельствуют, например, следующие экспериментальные результаты.

Отметим особо работу [71], где экспериментально методами физического моделирования доказано, что на стадиях предразрушения очаговые зоны землетрясений, горных ударов и других динамических форм проявления горного давления уподобляются своеобразной “геомеханической лазерной системе”, т. е. акустически активной среде, способной к когерентному излучению сейсмической энергии [1].

Вопросы о возможной согласованности формирования акустических сигналов в структурных элементах блочных сред как по частотному спектру, так и по фазовой составляющей являются ключевыми [1]. В существующих подходах к анализу механизмов формирования очаговых зон динамических форм проявления горного давления, как правило, пренебрегается тем обстоятельством, что квазистатические процессы накопления упругой энергии в формирующихся очаговых зонах всегда идут на акустическом фоне (от естественных микросейсм и до сложных волновых явлений, сопровождающих импульсные сейсмические воздействия от удаленных землетрясений, взрывов и т. п.). Учитывая открытый в ИГД СО РАН эффект аномально низкого трения в блочных средах [51], вид напряженно-деформированного состояния в геоблоках и амплитудно-периодные характеристики “сейсмического фона” могут иметь решающее значение для возникновения динамического события.

В реализованных в [71] экспериментах очаговая зона моделируется совокупностью однородных блоков с концентратором напряжений в виде цилиндрической полости (“плоская” модель), а квазистатический процесс внешнего нагружения — одноосным давлением от прессы со слабым боковым отпором (рис. 4а). Причем “акустический фон” задается на периферийном блоке ГБ модели в монохроматическом режиме. Данная модель имеет прямое отношение и к проблеме акустического контроля предельных состояний пород вокруг подземных выработок.

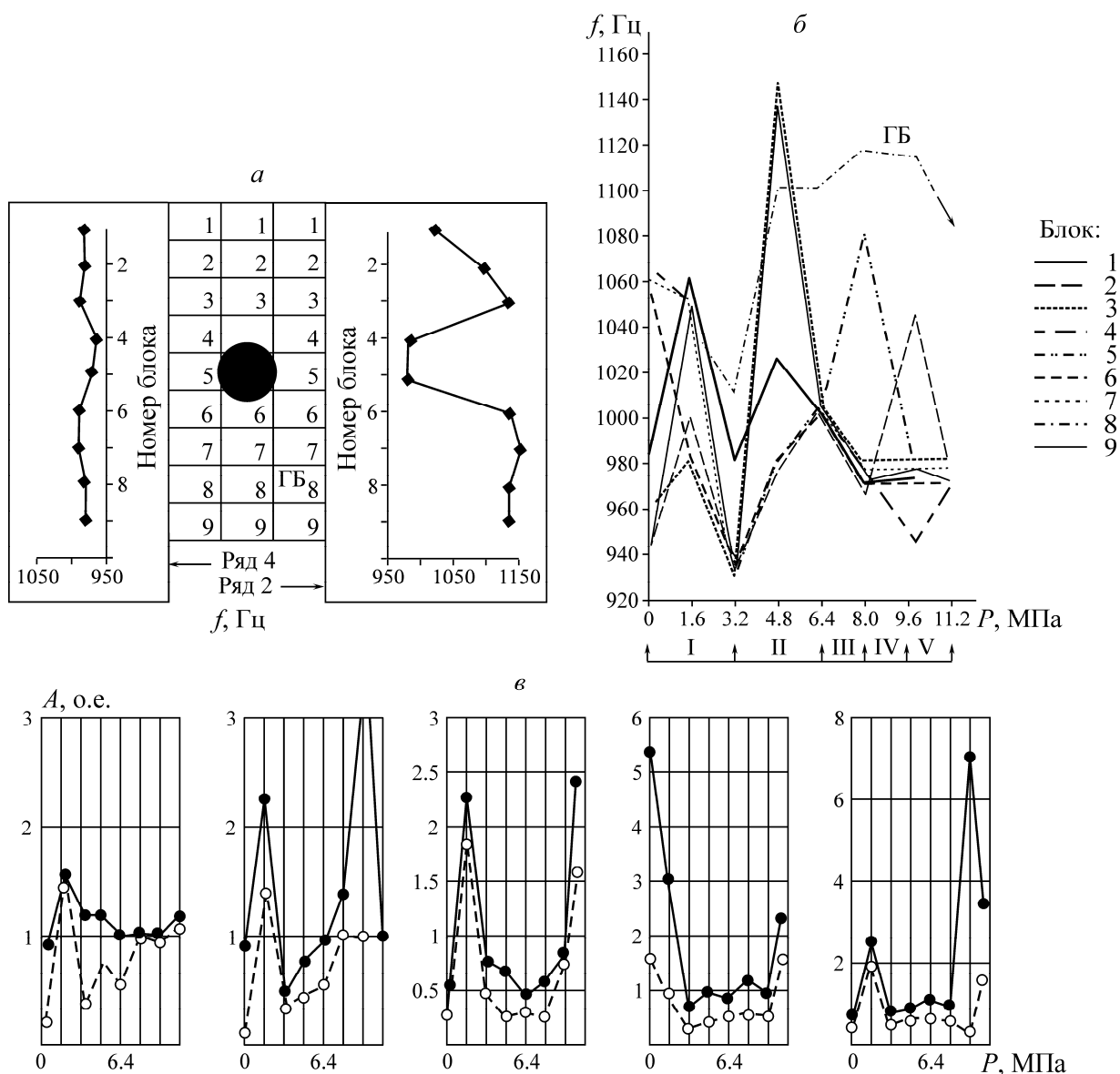


Рис. 4. Эволюция гармонических акустических сигналов от их генераторной установки (ГБ-источник) в моделях блочных сред в процессе их нагружения до разрушения: 1, 2, ..., 9 — номера блоков; f — частота; P — одноосное давление (со слабым боковым отпором модели); I–V — выделенные стадии нагружения; A — относительная к задающей на генераторной установке амплитуда сигналов, регистрируемых в контролируемых блоках на их резонансных частотах: *а* — блочная модель с концентратором напряжений в виде цилиндрической полости с распределением резонансных частот в контролируемых блоках; *б* — изменение резонансных частот по системе блоков с их конвергенцией на этапе предразрушения модели (V); *в* — изменение относительной амплитуды акустических сигналов на резонансных частотах блоков модели с ростом уровня ее нагружения до разрушения

Комплексный анализ проведенного эксперимента с использованием амплитудно-частотных параметров гармонических акустических сигналов и деформационных характеристик модели в увязке с поэтапным ее нагружением до разрушения позволил заключить:

а) существует устойчивая корреляционная связь между стадиями нагружения среды с деформационной и амплитудно-частотными характеристиками гармонических сигналов, регистрируемых в блоках модели геосреды;

б) резонансные частоты акустических колебаний в блоках модели, существенно различающиеся между собой на начальных этапах нагружения, проявляют конвергенцию на стадии предразрушения (рис. 4б);

в) на стадии предразрушения модели имеет место не только схождение резонансных частот по системе блоков, но и усиление амплитуды гармонических сигналов (рис. 4в) за счет перехода накопленной упругой энергии структурных элементов в энергию акустических сигналов. При этом нарушается классический закон затухания гармонических сигналов от источника излучения, а модель из геоматериалов превращается в акустически активную среду, работающую на этапе разрушения как автоколебательная система (т. е. своеобразная “геомеханическая лазерная система”).

В работах [72, 73] доказано, что подобную эволюцию проявляют эмиссионные спектры электромагнитных и акустических волн при нагружении до разрушения как образцов разных горных пород, так и из породных массивов, регистрируемых в условиях подземных выработок в периоды формирования очагов горных ударов и их реализации. В [20] подобного рода “квазирезонансная” структура излучения “медленных” деформационных (маятникового типа) волн из очаговых зон землетрясений в районе оз. Байкал зарегистрирована прецизионными длиннобазовыми лазерными деформографами конструкции ИЛФ СО РАН.

В недавних публикациях [74, 75] в пользу “квазирезонансного” механизма формирования очаговых зон концентрации напряжений с последующим их разрушением свидетельствуют непосредственные спектрометрические измерения, касающиеся изучения условий возникновения “медленных” деформационно-волновых процессов в нагружаемых до разрушения образцах горных пород и геоматериалов широкого диапазона по физико-механическим свойствам, в том числе угольных и из силикатных композитов. Здесь же впервые доказана фундаментальная роль возникающих на определенной стадии нагружения геоматериалов колебательных движений их структурных элементов и неоднородностей в “маятниковом приближении”. Эта стадия нагружения непосредственно связана и с началом активного развития объемных газо-массообменных процессов в угольных пластах, ранее не учитываемых при теоретическом моделировании.

Как полагаем, развитие этого направления теоретических исследований для многофазных геосред явится одним из важнейших для широкого спектра технологических приложений как в горном деле, так и нефтегазодобывающей отрасли [21]. Достаточно очевидны и горизонты возможных приложений этой “теории будущего” в материаловедении для создания “необычных” по своим физико-механическим свойствам композитных материалов [76].

Таким образом, можно сделать принципиально важное заключение об определяющей роли “низкочастотных” деформационно-волновых процессов в маятниковом приближении движения структурных отдельных геоматериалов и массивов горных пород при формировании амплитудно-периодного спектра сопряженных с ними сейсмо-электромагнитно-эмиссионных процессов в зонах концентрации напряжений с последующим их разрушением (очаговые зоны катастрофических событий). Иными словами, речь идет о механическом “модулирующем начале” квазистатических и динамических деформационных процессов сопутствующих им сейсмо-акустических и электромагнитных эмиссионных процессов. В работе [1] дано количественное обоснование соответствующей связи спектров сопряженных между собой механических и физических полей с позиций блочно-иерархического строения горных пород и их массивов, а также кинетической концепции прочности твердых тел по С. Н. Журкову.

4.4. О взаимодействии крупномасштабных квазистатических и динамических процессов, триггерная сейсмичность Кузбасса

В работе [1] приведено безразмерное энергетическое условие, описывающее возможные случаи индуцированной сейсмичности, относимой в обобщенную группу, названную нами “сейсмоэмиссионными событиями интерференционного типа”. Это условие включает совместное влияние геодинамических (тектонических) и локальных геомеханических (техногенных)

полей, относительный вклад которых может существенно отличаться в зависимости от уровня геодинамической активности и, соответственно, напряженно-деформированного состояния регионов Земли, где ведутся горные работы или иные виды недропользования. В [1] впервые введен и обоснован количественный критерий отнесения сейсмособытий в i -й энергетический класс (i — целые числа), устанавливающий прямую связь уровней сейсмозэнерговыделения с размерами естественных отдельностей массива горных пород в канонической шкале иерархических представлений [22].

Таким образом, развитие энергетического подхода к анализу процессов формирования, развития и реализации природно-техногенных катастрофических событий с целью их прогнозирования и профилактики позволяет количественно и совместно (в их взаимодействии) рассматривать и описывать вклад крупномасштабных квазистатических и динамических процессов по длительному циклу освоения месторождений полезных ископаемых в различных по тектонической и техногенной активности регионах мира. Одновременно такой подход можно рассматривать и как единую методологическую базу для построения геомониторинговых систем сложной иерархической структуры, в том числе и с их “региональными составляющими”. Последние, с необходимостью, должны включать в себя регионы мира (если говорить о международной глобальной *Системе*) активного недропользования.

В России к одному из таких регионов, безусловно, относится Кузбасс. Как известно [77], Кузбасс включает в себя Кемеровскую область, находится на юго-востоке Западно-Сибирской равнины в Кузнецкой котловине между горными сооружениями Кузнецкого Алатау на востоке и Салаирским кряжем на западе, протянувшимся от г. Новосибирска до Алтайских гор. На рис. 5 показана обзорная карта региона, на которой выделены территория Кузбасса, где происходит интенсивная добыча угля, и территория Горной Шории на юге Кемеровской области, где расположены железорудные месторождения Таштагола и Шерегеша. В целом регион ограничен географическими координатами $52–56^\circ$ северной широты, $85–89^\circ$ восточной долготы и при размерах с севера на юг примерно 500 км и с запада на восток около 300 км занимает площадь свыше 150 тыс. км².

Крупные залежи каменного угля на территории Кемеровской области открыты в 1721 г. Широкое освоение Кузнецкого угольного бассейна началось в 1930 г. Общие геологические запасы угля оцениваются в 600–700 млрд т. Примерно половина угля — антрациты, пригодные для коксования. Угольное месторождение расположено в приповерхностных слоях земной коры до глубины 1800–2000 м в виде 120 продуктивных пластов среди осадочных пород, представленных перемежающимися слоями песчаников, алевролитов и аргеллитов.

С точки зрения возникновения и развития техногенной сейсмичности важно оценить уровень и интенсивность техногенной нагрузки на земную кору, которая в Кузбассе характеризуется крупномасштабным ведением горных и взрывных работ. За длительный (более 80-летний) период добычи извлечено порядка 10 млрд т угля и перемещена примерно такого же порядка масса вскрышных пород. Добыча угля в настоящее время приближается к 300 млн т в год. Разработка месторождения ведется подземным способом на более 60 крупных шахтах глубиной до 500 м и открытым способом на 52 угольных разрезах с применением массовых взрывов в сотни и тысячи тонн ВВ. Буровзрывные работы и механизированные системы добычи с применением угледобывающих комбайнов, экскаваторов и погрузо-разгрузочных механизмов оказывают интенсивное (в том числе вибрационное) воздействие на породный массив. Важно отметить рекордное для России потребление ВВ в Кузнецком регионе, которое в настоящее время составляет около 600 тыс. т в год, что создает поток сейсмической энергии в земной коре порядка $10^{13}–10^{14}$ Дж/год и мощностью не менее 1.5 МВт.

Существенный вклад в усиление техногенного воздействия на земную кору Кузбасса внесло и массовое затопление свыше 20 “нерентабельных” шахт в период 1996–2005 гг. Затопление выработанного подземного пространства шахтных полей — более трещиноватого и разуплот-

ненного, чем исходный массив — изменяет гидродинамический режим за счет активной передачи гидравлического давления на структурные неоднородности и тектонические разломы, увеличивая поровое давление в тектонических нарушениях. Поступление воды снижает прочность горных пород и контактов между блочными структурами в разломных зонах. В результате в породном массиве происходит изменение напряженно-деформированного состояния, которое сопровождается развитием сейсмических событий разного масштабного уровня. Техногенная нагрузка на территории Кузбасса связана также с промышленными источниками воздействия, которые представлены рядом крупнейших металлургических комбинатов (Кузнецкий, Беловский цинковый, Новокузнецкий алюминиевый и др.), химическими комбинатами, а также разветвленной сетью железных и автомобильных дорог с крупнотоннажными перевозками угля, железных и цветных руд.

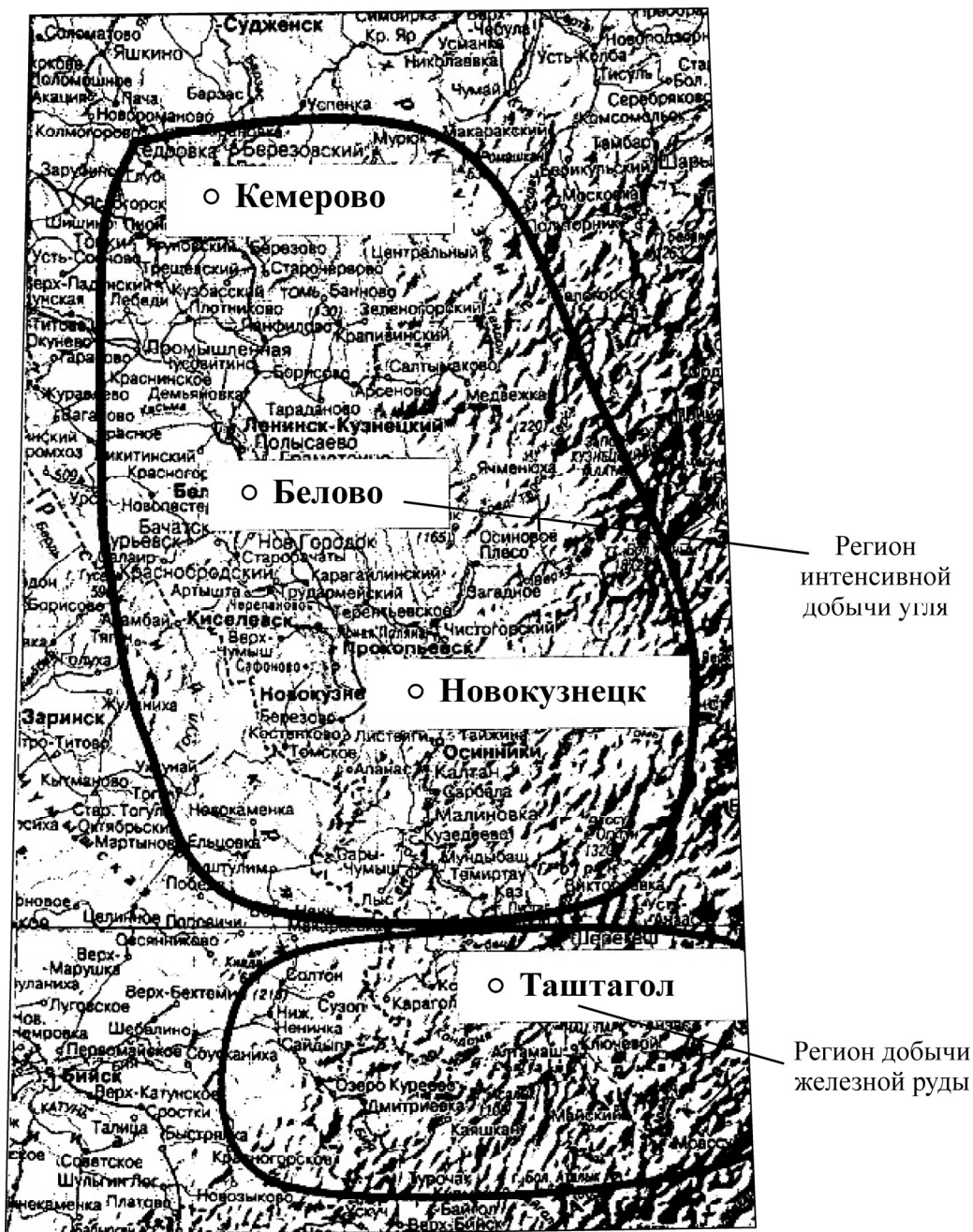


Рис. 5. Основные регионы добычи каменного угля и железной руды в Кузбассе

В свою очередь породные массивы Кузбасса характеризуются собственной энергонасыщенностью, о чем свидетельствует природная сейсмоактивность региона, отмеченная еще до начала разработки месторождения. Так, в работе [78] приведены сведения о происходивших здесь землетрясениях начиная с 1875 г. Засвидетельствованы, в частности, сильные землетрясения ($M \approx 6$) в районе Новокузнецка в период 1900–1915 гг. Подробная сеймотектоническая характеристика региона представлена в работе [79], в которой по результатам полевых сеймотектонических и палеосейсмологических исследований в районе г. Польшаево отмечена связь образования провалов и разрывов дневной поверхности с наблюдаемой сейсмической активностью и интенсивными разработками угольного месторождения. Упомянуты также сильные землетрясения с интенсивностью 7–8 баллов, произошедшие в доиндустриальное время (Кузнецкие землетрясения 19.06.1898, $M_s = 5.7$ и 03.12.1903, $M_s = 6.1$). Отмечено, что в сеймотектоническом отношении территория Кузнецкого угольного бассейна является переходной между низкоактивной в сейсмическом отношении Западно-Сибирской платформой и высокоактивной Алтае-Саянской сеймотектонической провинцией.

Территория бассейна имеет развитую систему глубинных тектонических разломов северо-западного простирания с преобладанием сдвиговой составляющей и субширотного простирания с преобладанием взбросовых и надвиговых структур [80]. С периодической активизацией этих тектонических структур и разломов связаны исторические землетрясения и происходящие техногенно наведенные события. Так, в [58] отмечается приуроченность гипоцентров сильных горно-тектонических ударов к системам глубинных разломов меридионального и субширотного простирания и почти вертикального падения. В целом природная сейсмичность Кузбасса, согласно картам сейсмического районирования ОСР-97, составляет 7 баллов в северной части региона и 8–9 баллов в центральной и южной [77].

Наличие природной сейсмичности и естественных сеймотектонических процессов в сочетании с техногенной нагрузкой в виде длительной и возрастающей добычи угля с участием взрывных работ создали в данном регионе сложную сейсмическую обстановку, так как возникающие сейсмические события складываются из природных землетрясений, техногенно наведенной сейсмичности и сейсмических колебаний от проведения массовых взрывов на разрезах и шахтах. Из анализа исторического каталога за 1734–1966 гг., каталогов Алтае-Саянского региона 1962–1989 гг. и 1999–2005 гг. в работе [58] отмечено, что на территории Кузбасса, начиная с 60-х годов прошлого века, когда наступил период инструментальных наблюдений, происходил постоянный рост сейсмической активности. С конца 1980-х годов наряду с ростом общего числа сейсмических событий стала увеличиваться интенсивность техногенных землетрясений, включая сильные горные и горно-тектонические удары. При этом число техногенно наведенных событий превысило число природных землетрясений.

Все разнообразие техногенно наведенной сейсмичности можно охарактеризовать возникновением сейсмических событий двух типов.

Первый тип связан с появлением сейсмических толчков низкого энергетического уровня, роевых потоков сейсмических событий и слабых землетрясений на глубине добычи в разрезах 0.2–0.5 км и в шахтах 0.5–1 км, а также более сильных динамических проявлений, происходящих на глубине до 1.5–2.5 км в районе проведения горных работ. Подобного рода индуцированные землетрясения невысокого энергетического класса ($1 \leq K \leq 7-8$) регистрируются ежесуточно (до 20–30 толчков).

Второй тип техногенной сейсмичности представлен относительно редкими появлениями сильных (триггерных) землетрясений энергетического класса $K \geq 8-9$ вплоть до $K = 11-12$ с глубиной очагов свыше 2–5 км. Они напрямую не связаны со временем, а зачастую и с местом горных и взрывных работ. Основным механизмом образования таких землетрясений с очагами тектонической природы является изменение существующих в массиве естественных (ква-

зистатических) геодинамических и гидродинамических режимов под воздействием комплекса техногенных нагрузок за длительный период времени. В результате в массиве происходят изменения напряженно-деформированного состояния, которые сопровождаются концентрацией напряжений на различного вида неоднородностях и разломах вплоть до критического уровня. Релаксация напряжений в очагах их концентрации сопровождается образованием сильных землетрясений, сейсмическая энергия которых на 3–5 порядков превышает энергию массовых взрывов. Гипоцентры подобных землетрясений обычно концентрируются вдоль границ блочных структур и крупных разломных зон, возникающие сейсмические толчки носят катастрофический характер, сопровождаясь обрушениями подземных выработок, сотрясениями поверхности, колебаниями зданий и жалобами населения. В работе [58] подобные динамические события энергетического класса $K \geq 8-9$ названы природно-техногенными землетрясениями. По материалам очищенных от взрывов каталогов Алтае-Саянского региона 1962–1989 гг. и 1999–2005 гг. в [77] выделен ряд периодов их усиления и установлено распределение по группам энергетического класса от $K > 8.5$ до $K > 11.5$ (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Периоды усиления и количество природно-техногенных землетрясений [77]

Период	$K > 8.5$	$K > 9.5$	$K > 10.5$	$K > 11.5$	Всего
1963 – 1969	12	6	1	1	20
1975 – 1979	12	5	1	—	18
1987 – 1995	38	7	2	1	48
1998 – 2005	16	15	5	1	37

В данной работе и ранее [9] сильные техногенно наведенные сейсмические события такого типа определены как техногенно-тектонические землетрясения триггерного характера, подразумевая техногенную причину их возникновения и тектоническую природу энергии в очаге. Из табл. 1 следует, что заметная активизация таких событий произошла в Кузбассе во второй половине 80-х годов, когда общее число сейсмических событий с $K > 8.5$ практически увеличилось в 1.5–3 раза. В частности, заметно выросло количество сильных землетрясений энергетического класса $K > 9.5$ и $K > 10.5$, при этом сохранилось количество редко происходящих землетрясений с $K > 11.5$ (одно землетрясение с $K = 12$ зафиксировано в 1966 г.). Показателем увеличения интенсивности техногенно-тектонических событий явилось землетрясение 14 сентября 1995 г. энергетического класса $K > 11.5$ (сейсмическая энергия $E = 3.6 \cdot 10^{11}$ Дж) около г. Прокопьевска. По данным бюллетеня ISC, землетрясение произошло в 11 ч 24 мин местного времени (4 ч 24 мин UTC), имело региональную магнитуду $m_b = 4.5-5.0$, глубину очага от 0.2 до 31.6 км (по данным различных сейсмологических центров) и координаты $53^{\circ}8'N$ и $86^{\circ}8'E$.

Активизация техногенно-тектонической сейсмичности в период 1998–2005 гг. проявилась двумя сильными землетрясениями в центральной части Кемеровской области: 16 апреля 1998 г. с магнитудой $m_b = 3.8$ ($K > 9.5$) и 13 мая 1998 г. с магнитудой $m_b = 4.1$ ($K > 10.5$). Затем 14 мая 2000 г. в районе Краснобродского разреза севернее г. Киселевска произошло техногенно-тектоническое землетрясение с магнитудой $m_b = 4.0-4.1$ ($K = 10.5-11$) и глубиной очага 10 км. Особо следует отметить сильное техногенно-тектоническое землетрясение 6 марта 2002 г. в районе г. Осинники, которое, по данным Международного центра данных (IDC), характеризовалось магнитудой $m_b = 4.6$ ($K > 11.5$). По данным ГС РАН, этому землетрясению предшествовало достаточно сильное землетрясение 1 марта 2002 г. в районе г. Прокопьевска с магнитудой $m_b = 4.3$ ($K > 10.5$). После него произошло землетрясение 6 апреля 2002 г. с магнитудой $m_b = 3.5-4.0$ ($K > 9.5$) в районе г. Белово. Завершен этот период сейсмической активизации в 2005 г. серией из 3 техногенно-тектонических землетрясений с магнитудами в диапазоне $m_b = 3.2-3.6$ ($K > 9.5$) и одного более сильного 13 сентября 2005 г. с магнитудой $m_b = 4.2$ ($K > 10.5$) также в районе г. Белово.

Поскольку данные табл. 1 ограничены 2005 г., к исследованиям современной сильной сейсмичности на территории Кузбасса привлечены данные каталога Международного сейсмологического центра (ISC), который включает результаты регистрации сейсмических сетей отдельных стран и их объединений по всему миру. По материалам каталога ISC составлена табл. 2, в которой представлено ежегодное количество сильных сейсмических событий на территории Кузбасса, ограниченной координатами $53-56^{\circ}\text{N}$ и $85-89^{\circ}\text{E}$, за период времени с 1998 г. по 2014 г. в виде четырех групп с магнитудами: $m_b \geq 3$ ($K \geq 9.3$), $m_b \geq 3.5$ ($K \geq 10$), $m_b \geq 4.0$ ($K \geq 10.5$) и $m_b \geq 4.5$ ($K \geq 11.5$). В последнем столбце табл. 2 приведена масса ежегодно потребляемых ВВ.

Видно, что в течение всего рассматриваемого периода происходил постоянный рост потребления ВВ практически на 10–20 % ежегодно. Если в 1998–2000 гг. при потреблении 100–150 тыс. т/год рост составлял примерно 20 тыс. т/год и в 2001–2009 гг. при потреблении ВВ 200–400 тыс. т/год рост составлял 30–40 тыс. т/год, то уже в 2010–2012 гг. накануне Бачатского землетрясения при потреблении на уровне 400–500 тыс. т/год рост достиг примерно 70–80 тыс. т/год. В результате объем потребления ВВ в 2012 г. вырос до 583 тыс. т/год, т. е. в 5 раз по сравнению с 1998 г. и в 1.6 раз по сравнению с 2007 г. В целом цифры потребления ВВ свидетельствуют о существенном темпе роста масштабов добычи угля и интенсивном техногенном воздействии на земную кору Кузбасса.

Представленные в табл. 2 сведения о развитии сильных ($m_b > 3$) сейсмических событий и росте потребления ВВ за 17-летний период позволяют, во-первых, сравнить результаты работы [58] за 1998–2005 гг. с материалами каталога ISC, во-вторых, выяснить, с какого времени в каталоге ISC началась полноценная публикация сведений о параметрах сейсмических событий Кузбасса и, наконец, оценить влияние постоянно увеличивающегося потребления ВВ на развитие техногенной сейсмичности.

ТАБЛИЦА 2. Ежегодное количество сильных сейсмических событий ($m_b \geq 3$) на территории Кузбасса за период 1998–2014 гг. [77]

Год	$m_b \geq 3, K \geq 9.5$	$m_b \geq 3.5, K \geq 10$	$m_b \geq 4, K \geq 10.5$	$m_b \geq 4.5, K \geq 11.5$	Потребление ВВ, тыс. т/год
1998	2 (5)	2 (3)	1	—	~ 110
1999	(4)	(3)	—	—	~ 130
2000	1	1 (2)	1 (1)	—	~ 150
2001	(3)	—	—	—	180
2002	16	14 (2)	3	1	~ 220
2003	8 (4)	8 (2)	3	—	~ 240
2004	4	3 (3)	1 (1)	—	~ 257
2005	4	3	1	—	~ 310
2006	40	32	4	—	337
2007	299	94	10	—	368
2008	339	111	12	3	404
2009	340	148	20	—	388
2010	545	180	22	—	429
2011	457	151	17	2	512
2012	502	168	14	1	583
2013	609	230	15	1	572
2014	570	160	7	—	533
Всего	3736	1305	131	8	~ 6 млн т

Сравнение данных о количестве землетрясений из каталога ISC за период 1998–2005 гг. и данных из работы [58], которые приведены в скобках в верхней части табл. 2, показывает, что в первые четыре года в каталоге ISC пропущены 9 событий в диапазоне $m_b \geq 3$ ($K \geq 9$), 5 событий в диапазоне $m_b \geq 3.5$ ($K \geq 10$), отсутствуют события 1999 и 2001 гг. Очевидно, что в эти годы Международная сейсмическая сеть практически не регистрировала динамические события на территории Кузбасса. Начиная с 2002 г. данные каталога ISC выглядят более полными, показав подъем сейсмичности во всех диапазонах, в том числе в диапазоне $m_b \geq 4$ ($K \geq 10.5$). В 2004 г. данные каталога ISC почти полностью совпали с результатами работы [58]. Из данных табл. 2 следует, что в период 2002–2005 гг. Международная сейсмическая сеть стала лучше регистрировать сильные события в Кузбассе. Причем в 2006 г. число регистрируемых ею сейсмособытий с $m_b \geq 3$ и $m_b \geq 3.5$ выросло на порядок, что свидетельствует о существенном повышении качества регистрации таких событий. В результате на территории Кузбасса за период 1998–2006 гг. к выделенным ранее примерно 40 природно-техногенным землетрясениям из работы [58] можно добавить еще не менее 20 подобных техногенно-тектонических землетрясений с магнитудами $m_b \geq 3.5$ ($K \geq 10$) из каталога ISC.

Начиная с 2007 г., как показывают данные табл. 2, на территории Кузбасса произошел значительный рост ежегодного количества сильных сейсмических событий с $m_b \geq 3$. **Такое увеличение потока сейсмических событий может быть связано как с развитием международной сети сейсмических станций, так и с существенным ростом потребления ВВ добывающими предприятиями Кузбасса, которое в период 2007–2009 гг. выросло до 400 тыс. т/год и практически в 3 раза превысило уровень потребления прошлых лет.** В результате в этот период во всех диапазонах магнитуд произошло значительное увеличение количества ежегодных сейсмических событий, составив, например, более 300 в год в диапазоне $m_b \geq 3$. Вероятнее всего, наибольший вклад в такой подъем сейсмической активности внесли взрывные работы за счет увеличения их числа и мощности. Возможно также, что определенный вклад в поток сейсмичности вносит наведенная техногенная сейсмичность, включая триггерные техногенно-тектонические землетрясения, число которых могло возрасти в связи с постоянным увеличением интенсивности и объемов горнодобывающих работ.

Основанием для этого могут служить кривые, приведенные на рис. 6, характеризующие корреляционную связь между суммарным объемом добычи железной руды и угля в Кузбассе с сейсмичностью (динамические события в шахтах и рудниках и землетрясения) в период 1950–2007 гг. Если сопоставить ежегодные кумулятивные значения перемещенной горной массы с количеством учтенных динамических событий и землетрясений, то обнаружится довольно устойчивая корреляционная зависимость с теснотой связи $R \sim 0.87–0.93$.

О существенном подъеме техногенной сейсмичности в 2008 г. свидетельствует регистрация следующих трех сильных триггерных техногенно-тектонических землетрясений энергетического класса $K \geq 11.5$ в восточной части Кемеровской области:

- 11 января 2008 г. в 16 ч 40 мин местного времени с магнитудой $m_b = 4.4–4.5$ и координатами $53^\circ 6'N$ и $88^\circ 3'E$;
- 1 апреля 2008 г. в 2 ч 31 мин местного времени с магнитудой $m_b = 4.1–4.6$ и координатами $54^\circ 0'N$ и $88^\circ 1'E$;
- 13 октября 2008 г. в 13 ч 17 мин местного времени с магнитудой $m_b = 4.6$ и координатами $53^\circ 86'N$ и $85^\circ 9'E$. Глубина очагов этих землетрясений составила $h = 8–18.5$ км.

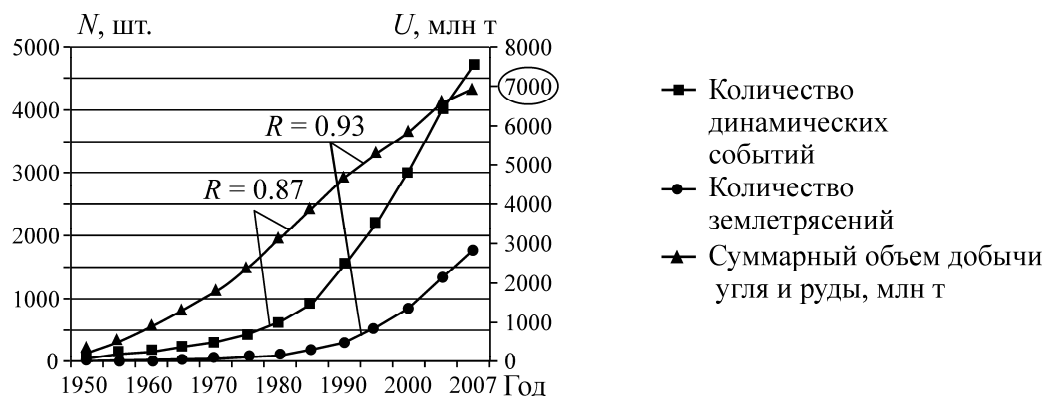


Рис. 6. Корреляционная связь между суммарным объемом добычи полезных ископаемых U (уголь + руда) и количеством динамических событий N за период 1950–2007 гг. в Кузбассе

Очередной подъем сейсмической активности, как видно из табл. 2, произошел в период 2010–2013 гг. Отмечается увеличение потока сейсмических событий примерно в 1.5 раза во всех диапазонах магнитуд, в том числе до 500–600 событий в год с $m_b \geq 3$. Этот период подъема сейсмической активности также происходил в условиях возрастающей техногенной нагрузки, что следует из продолжавшегося роста потребления ВВ. Так, потребление ВВ увеличилось в те же 1.5 раза по сравнению с периодом 2007–2009 гг. и достигло в среднем 530 тыс. т/год. Если учесть, что 1 кг ВВ разрушает примерно 2 м³ горной породы, получим, что в период 2010–2013 гг. объемы разрушения и перемещения горной массы достигали около 10⁹ м³ в год.

Анализ каталога ISC показывает, что на территории Кузбасса в этот период проводилось от 2 до 20 массовых взрывов в день, создававших сейсмические события в диапазоне магнитуд от $m_b = 2.5$ до $m_b = 3.7$, что соответствует величине отдельных массовых взрывов на уровне примерно 100–500 т. Более крупные массовые взрывы с зарядами ВВ на уровне 1000 т, создающие сейсмические события с магнитудами в диапазоне от $m_b = 3.8$ до $m_b = 4.5$, проводились существенно реже, приблизительно 20–30 взрывов в год.

Отсюда можно заключить, что отмеченное в период 2010–2013 гг. увеличение ежегодного количества сейсмических событий в диапазоне магнитуд $m_b \geq 3$ произошло в основном за счет увеличения ежегодного числа взрывных работ. В то же время в диапазоне магнитуд $m_b \geq 3.5$ заметного увеличения количества сейсмических событий не отмечено. Следовательно, ежегодное количество крупных взрывов заметно не возросло и их вклад в сейсмический поток остался практически на прежнем уровне.

Период подъема сейсмической активности был связан с тем, что 19 июня 2013 г. в 6 ч утра местного времени (18 июня 2013 г. 23 ч 06 мин UTC) на территории Кузнецкого угольного бассейна (Кузбасс) произошло катастрофическое Бачатское землетрясение, которое, по данным Международного сейсмологического центра (ISC), характеризовалось региональной магнитудой $m_b = 5.8–6.1$ и глубиной очага в диапазоне $h = 2–14$ км. Эпицентр землетрясения располагался практически в центре Кемеровской области, вблизи г. Белово на территории Бачатского угольного разреза — одного из крупнейших угледобывающих предприятий Кузбасса (рис. 7).

В эпицентральной зоне интенсивность колебаний составила $I_0 = 7$ баллов и множество зданий было разрушено. В 5-балльную зону попали города Белово и Гурьевск, в 4-балльную — Прокопьевск, Киселевск, Новокузнецк, в 2-балльную — Новосибирск и Барнаул, находящиеся на расстоянии около 200 км. Расположение эпицентра на территории Бачатского разреза и сравнительно небольшая глубина очага, а также приведенный анализ свидетельствуют в пользу

техногенно-тектонической природы этого землетрясения, “триггером” возникновения которого явилась интенсивная добыча каменного угля в этом районе. Оно возникло на фоне природной и активно развивающейся техногенной сейсмичности, а также интенсивных сейсмических воздействий от промышленных взрывов.

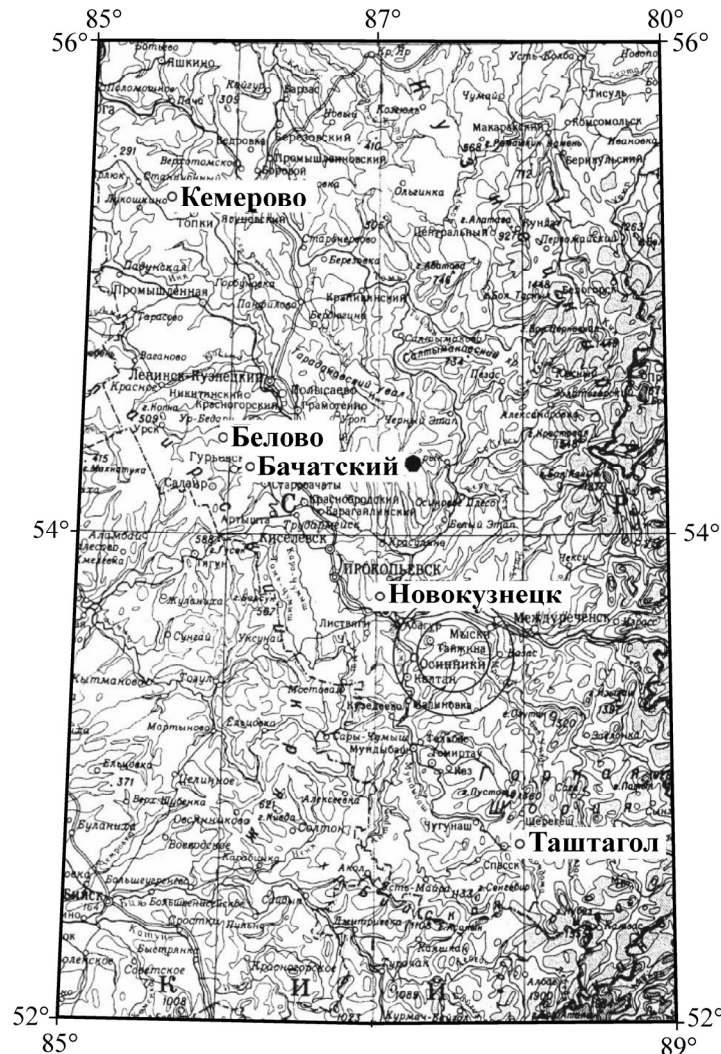


Рис. 7. Месторасположение Бачатского землетрясения на территории Кемеровской области

Для выделения триггерных техногенно-тектонических землетрясений в потоке сейсмических событий, который после 2007 г. в диапазоне магнитуд $m_b \geq 3$ ($K \geq 9$) составлял 300–600 событий в год, воспользуемся требованиями соблюдения правил сейсмической безопасности при проведении взрывных работ. Известно, что для обеспечения сейсмической безопасности объектов окружающей среды, включая промышленные объекты, оборудование, административные и жилые здания, применяют схемы короткозамедленного взрывания, чтобы уменьшить амплитуду сейсмических колебаний и, соответственно, величину магнитуды. Поэтому магнитуда сейсмических событий от взрывов не должна превышать определенную максимально возможную величину.

Так, за длительный период наблюдений сейсмических событий в Кузбассе установлено, что энергетические классы массовых взрывов составляют $K = 6–10$ [81], что соответствует диапазону магнитуд $m_b = 1–3.5$. В другой работе [82] отмечено, что сейсмическая энергия

массовых взрывов в Кузбассе соответствует диапазону локальных магнитуд $M_L = 1 - 4.0$. Известен также многолетний опыт обеспечения сейсмической безопасности при проведении массовых взрывов в Курско-Белгородском регионе, на Кольском полуострове, в Карелии [7]. При взрывных работах на Лебединском ГОКе, на котором применяют самые крупные в нашей стране массовые взрывы до 2500 т, значение максимально возможной магнитуды не превышает $m_b = 3.7$ [83]. Учитывая опыт наблюдений в Кузбассе и на Лебединском ГОКе, прием в качестве максимально возможной магнитуду $m_b = 4.0$. Чтобы выделить события, магнитуда которых превышает указанное значение m_b , данные каталога ISC были распределены по четырем диапазонам магнитуд, и ежегодное количество событий в каждом выделенном диапазоне представлено в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Количество ежегодных событий по диапазонам магнитуд, энергетических классов и веса ВВ (q , в тоннах) за период 2002–2014 гг. [77]

Год	$3 \leq m_b \leq 3.4,$ $9.0 < K < 10,$ $100 < q < 500$	$3.5 \leq m_b \leq 3.9,$ $10 \leq K \leq 10.5,$ $500 < q < 1000$	$4 \leq m_b \leq 4.4,$ $10.5 \leq K \leq 11,$ $1000 < q < 2000$	$m_b \geq 4.5,$ $K \geq 11.5,$ $q > 2000$
2002	2	11	2	1
2003	—	5	3	—
2004	1	2	1	—
2005	1	2	1	—
2006	8	28	4	—
2007	205	84	10	—
2008	228	99	9	3
2009	192	128	20	—
2010	365	158	22	—
2011	306	134	15	2
2012	333	154	13	1
2013	378	215	14	1
2014	410	153	7	—
Всего	2431	1178	121	8

В табл. 3 показаны диапазоны региональных магнитуд и энергетического класса от $K \geq 9$ до $K \geq 11.5$. События при $K > 12$ возникают очень редко, а при $K > 13$ становятся катастрофическими. Приведены также соответствующие магнитудам диапазоны энергии взрывов в тоннах ВВ ($1 \text{ т ВВ} = 4.19 \cdot 10^9 \text{ Дж}$), максимальные значения которых могут реализовываться при одновременном подрыве зарядов массового взрыва. В хронологическом порядке от 2002 до 2014 г. по данным каталога ISC указано число ежегодных сейсмических событий в каждом диапазоне.

Принимая во внимание указанное выше максимально возможное для массовых взрывов значение магнитуды $m_b = 4.0$, следует считать, что две правые колонки табл. 3 представляют количество сильных триггерных техногенно-тектонических землетрясений. Видно, что ежегодное количество подобных землетрясений с магнитудами $m_b \geq 4.0$ увеличивалось по мере роста масштабов горных работ и соответствующего потребления ВВ. Так, в период до 2006 г., когда потребление ВВ составляло примерно 200–300 тыс. т/год, число таких землетрясений составляло 1–4 в год. Общее количество триггерных техногенно-тектонических землетрясений в этот период составило около 60. В последующий период 2007–2014 гг., когда потребление ВВ увеличилось в 1.5–2 раза (от 368 до 583 тыс. т/год), количество таких землетрясений возросло до 10–20 в год. Всего на территории Кузбасса за этот период, в соответствии с данными каталога ISC, про-

изошло 121 подобное землетрясение с магнитудами $m_b \geq 4.0$ ($K \geq 10.5$, $E \geq 6 \cdot 10^{10}$ Дж). К этим событиям следует добавить еще 8 более сильных техногенно-тектонических землетрясений из последней колонки табл. 3 с магнитудами $m_b \geq 4.5$ ($K \geq 11.5$, $E \geq 6 \cdot 10^{11}$ Дж), в число которых входит и Бачатское катастрофическое землетрясение.

Опубликованные в каталоге ISC координаты сильных землетрясений с магнитудами $m_b \geq 4.0$ свидетельствуют о том, что их эпицентры расположены на территории юго-восточной части Кемеровской области, протянувшейся от региона городов Полысаево и Белово, в центральной части Кузнецкой котловины в отрогах восточного склона Салаирского кряжа, до региона городов Новокузнецка, Осинники и Междуреченска, прилегающего к предгорьям Кузнецкого Алатау. Именно на этой территории размещено наибольшее число угольных разрезов, на которых производится интенсивная добыча каменного угля с применением крупномасштабных массовых взрывов, и шахт, на которых происходит отработка угольных пластов подземным способом на разных горизонтах в интервале глубин до 500 м.

Очевидно, сочетание интенсивной угледобычи с природной сейсмичностью и активной тектоникой создают на территории этой части Кемеровской области все необходимые условия для возникновения сильных техногенных землетрясений триггерного характера с очагами тектонической энергии, образующихся в результате “вынужденного” перераспределения естественного напряженного состояния земной коры. Конкретные примеры 17 таких сильных ($m_b \geq 4.0$) сейсмических событий, произошедших на этой территории в период 2007–2011 гг., представлены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Примеры сильных сейсмических событий из диапазона магнитуд $m_b \geq 4.0$ на территории Кемеровской области за период 2006 – 2011 гг. [77]

Дата	Время UTC, ч. мин	Магнитуда	Координаты, град. мин	
		m_b	N	E
08.08.2006	05.02	4.0–4.3	53.77	87.81
22.02.2007	09.13	4.4	53.55	87.80
19.11.2007	01.22	4.0–4.2	53.62	88.04
17.01.2008	10.11	3.6–4.0	53.48	87.60
26.08.2008	08.10	3.6–4.2	54.27	86.83
20.11.2008	04.50	3.7–4.0	54.10	86.27
07.03.2009	09.16	3.8–4.3	54.29	86.11
09.07.2009	10.19	3.7–4.1	54.30	85.76
08.10.2009	10.42	3.8–4.2	54.41	86.50
31.01.2010	08.10	3.7–4.1	54.45	86.89
09.02.2010	04.24	3.5–4.1	54.89	86.76
30.03.2010	10.04	3.9–4.2	53.56	87.96
31.03.2010	23.57	3.6–4.2	53.59	87.99
27.12.2010	07.33	3.8–4.3	53.76	87.96
12.02.2011	00.55	3.5–4.2	53.43	87.50
17.04.2011	23.07	3.8–4.5	53.39	87.45
19.06.2011	11.49	3.9–4.4	53.43	87.41

Обращает на себя внимание, что 12 сильных сейсмических событий из 17 произошли в дневное время суток в интервале от 11 до 18 ч местного времени (местное время на 7 ч больше UTC), в котором могут быть проведены взрывные работы (*при организации комплексных мониторинговых систем такая информация должна обязательно учитываться!*).

Распространяя эту оценку на все количество сейсмических событий в диапазоне магнитуд $4 \leq m_b \leq 4.4$, получим, что примерно 70% таких событий могут быть результатом проведения крупных массовых взрывов с зарядами ВВ на уровне 1000 т. Остальная часть событий, время возникновения которых относится к интервалу времени после 18 ч предыдущего и до 11 ч следующего дня, может принадлежать техногенно-тектоническим землетрясениям. В результате общее количество сильных триггерных техногенно-тектонических землетрясений с магнитудой $m_b \geq 4.0$ за период 2006–2011 гг. составит около 40 событий.

Очевидно, что критерий выделения таких землетрясений по времени в очаге не является надежным, в лучшем случае его можно считать просто оценкой. Для более аккуратного обнаружения техногенно-тектонических землетрясений необходимо привлекать материалы инструментальной регистрации [1, 19, 20]. Следует признать также, что способ выделения подобных землетрясений по описанным выше условиям сейсмической безопасности на основе максимально возможной магнитуды $m_b = 4.0$ в условиях Кузбасса неприменим, поскольку значение такой магнитуды при взрывных работах достигает иногда $m_b = 4.5$.

Ситуация с выделением техногенно-тектонических землетрясений в двух других диапазонах $3 \leq m_b \leq 3.4$ и $3.5 \leq m_b \leq 3.9$ также осложнена значительным содержанием сейсмических событий, создаваемых взрывными работами. При этом соотношение между сейсмическими событиями от массовых взрывов и техногенно наведенных землетрясений в указанных диапазонах магнитуд может быть различным. Так, в диапазоне $3 \leq m_b \leq 3.4$, содержащем в 2010–2014 гг. от 300 до 400 событий в год, подавляющее их большинство обусловлено многочисленными массовыми взрывами сравнительно небольшого масштаба — на уровне 100–500 т. В диапазоне $3.5 \leq m_b \leq 3.9$, в котором количество сейсмических событий вдвое меньше (в среднем 150–200 событий в год), относительное число техногенно-тектонических землетрясений может быть несколько больше, поскольку в этот диапазон магнитуд могут попасть только события, создаваемые массовыми взрывами свыше 500 т, которые проводятся существенно реже. В табл. 5 приведена выборка из 17 сейсмических событий этого диапазона магнитуд.

ТАБЛИЦА 5. Примеры сейсмических событий в Кузбассе из диапазона $3.5 \leq m_b \leq 4.0$

Дата	Время UTC, ч. мин	Магнитуда	Координаты, град. мин	
		m_b	N	E
15.05.2007	16.32	3.4 – 4.2	53.77	88.38
12.09.2007	07.53	3.6 – 3.7	53.46	87.57
31.10.2007	05.29	3.3 – 4.1	54.67	86.69
09.06.2008	08.29	3.7 – 3.9	53.57	87.74
16.06.2008	07.36	3.7 – 3.9	53.51	87.70
15.09.2008	08.38	3.6 – 3.8	53.61	87.89
14.03.2009	11.29	3.2 – 3.6	54.25	86.22
22.12.2009	07.45	3.2 – 3.7	54.29	86.15
10.03.2010	01.06	3.8 – 4.0	53.53	87.47
12.08.2010	08.04	3.3 – 3.8	54.27	86.12
15.09.2010	10.27	3.6 – 4.0	53.42	87.85
02.12.2010	09.35	3.5 – 3.6	54.17	87.17
26.01.2011.	10.22	3.8 – 4.0	53.44	87.38
08.05.2011	00.25	3.7 – 3.9	53.61	88.07
18.05.2011	12.44	3.6 – 4.0	54.20	88.27
06.06.2011	05.12	3.6 – 3.7	54.14	86.51

Из данных табл. 5 следует, что время возникновения лишь 4 событий из 17 приходится на темное время суток после 18 ч местного времени (11ч UTC) до 11 ч (4 ч UTC) утра следующего дня. Поэтому только эти 4 события по признаку времени возникновения можно отнести к числу техногенно-тектонических землетрясений, а остальные события могут быть вызваны взрывными работами. Очевидно, что без организации соответствующих инструментальных наблюдений надежная дискриминация сейсмических событий невозможна.

Следует отметить, что в связи со сложной сейсмической обстановкой на территории Кузбасса в настоящее время проводятся сейсмические мониторинговые наблюдения с использованием в том числе мобильных сейсмических сетей [58, 81–86]. Такие наблюдения необходимы для оценки сейсмической обстановки, определения параметров возникающих событий, координат их эпицентров, частотного состава излучаемых сейсмических волн. Они позволяют выявить сейсмически опасные территории, контролировать особенности развития сейсмического режима в различных частях региона, в том числе на территории угледобывающих предприятий. Подобные инструментальные наблюдения были проведены в 2011–2013 гг. в районе крупнейшего в Кузбассе Бачатского угольного разреза, достигающего в длину 10 км, в ширину 2.2 км и в глубину 320 м, расположенного между городами Белово и Киселевск. В работе [82] приведены результаты наблюдений следующих трех наиболее интенсивных техногенно-тектонических землетрясений, произошедших на территории Бачатского разреза:

— 9 февраля 2012 г. в 13 ч 24 мин по UTC (20 ч 24 мин местного времени) с локальной магнитудой $M_L = 4.3$, энергетическим классом $K = 10.4$ (сейсмическая энергия $E = 6 \cdot 10^{10}$ Дж), глубиной очага $h = 7$ км и координатами эпицентра $54^\circ 28' N$ и $86^\circ 15' E$;

— 4 марта 2013 г. в 17 ч 30 мин UTC (5 марта в 0 ч 30 мин местного времени) с локальной магнитудой $M_L = 3.9$ ($K = 10$, $E = 10^{10}$ Дж), магнитудой по поверхностной волне $M_s = 3.1 - 3.9$, глубиной очага $h = 8$ км и координатами эпицентра $54^\circ 3' N$ и $86^\circ 13' E$;

— 18 июня 2013 г. в 23 ч 02 мин по UTC (19 июня в 6 ч 02 мин местного времени) произошло землетрясение. Оно имело локальную магнитуду $M_L = 6.1$, глубину очага $h = 4$ км и координаты эпицентра $54^\circ 29' N$ и $86^\circ 17' E$, практически совпадающие с координатами отмеченного выше землетрясения 9 февраля 2012 г. По данным ГС РАН, землетрясение имело региональную магнитуду $m_b = 5.8$, магнитуду по поверхностной волне $M_s = 5.0$ и глубину очага $h = 14$ км и было зарегистрировано всеми станциями Международной сейсмической сети. Оно характеризовалось региональной магнитудой $m_b = 5.2 - 6.1$, энергетическим классом $K = 13.9$ ($E = 6.5 \cdot 10^{13}$ Дж) и глубиной очага от $h = 2$ км до $h = 11.8$ км. **Интересно отметить, что излученная Бачатским землетрясением сейсмическая энергия $E = 6.5 \cdot 10^{13}$ Дж примерно равна сейсмической энергии, которая поступила в земную кору от взрывных работ с годовым потреблением ВВ около 500 тыс. т** (оценка выполнена при условии, что при взрыве в твердой породе излучаемая сейсмическая энергия составляет примерно 2% полной энергии взрыва [83]).

Бачатское землетрясение сопровождалось афтершоковой эмиссией до 30–50 толчков в сутки. Через 35 мин после основного удара произошел сильный афтершок с локальной магнитудой $M_L = 4.0$ и региональной магнитудой $m_b = 3.4$. Через несколько суток афтершоковая активность упала до 10 толчков в сутки. Как отмечено в работе [82], Бачатское землетрясение оказалось крупнейшим в мире техногенным землетрясением при разработке твердых полезных ископаемых.

Результаты регистрации описанных землетрясений сейсмическими сетями разных стран по данным каталога ISC представлены в табл. 6.

Из данных табл. 6 видно, что землетрясения происходили в самое разное время суток и глубина их очагов существенно превышала глубину горных и взрывных работ, изменяясь в диапазоне от 2 до 14 км, что характерно для триггерных техногенно-тектонических землетря-

сений. Соответствующий анализ с приведенных выше энергетических позиций техногенно-тектонических землетрясений Таштагола и Шерегеша для рудных месторождений достаточно полно дан в работе [77].

ТАБЛИЦА 6. Параметры сильных техногенно-тектонических землетрясений на территории Кузбасса в 2012 – 2013 гг.

Сейсмическая служба	09.02.2012, 13 ч 24 мин UTC				04.03.2013, 17 ч 30 мин UTC				18.06.2013, 24 ч 02 мин UTC			
	φ° , N	λ° , E	m_b	h , км	φ° , N	λ° , E	m_b	h , км	φ° , N	λ° , E	m_b	h , км
MOS									54.18	86.15	5.8	14
ISC	54.33	85.49	4.0	10 f	54.3	86.12	3.9	10 f	54.35	86.27	5.3	10
IDC	54.35	86.22	4.2	0.0 f	54.22	86.47	3.9	0.0 f	54.30	86.25	5.3	2.0
NEIC	54.36	86.12	4.4	5.0 f	54.95	86.17	3.4	5.0 f	54.26	86.17	5.6	9.9
NNC	54.17	85.41	4.5	0.0	54.3	86.12	4.4	0.0	54.41	86.01	6.1	11.8
ВЛ	54.06	35.58	4.3	7.0	54.29	86.13	3.9	8.0	54.28	86.01	5.2	11.0

Примечание. MOS — Геофизическая служба РАН, Обнинск; ISC — International Seismological Centre; IDC — International Date Centre; NEIC — National Earthquake Information Centre; NNC — Казахстанский национальный центр данных; ВЛ — Китайский центр данных; символ “f” означает, что расчет координат проведен при фиксированной глубине очага.

Таким образом, можно особо отметить, что обычно очаги техногенно-тектонических землетрясений образуются в верхних слоях земной коры, поэтому такие землетрясения, будучи мелкофокусными, характеризуются высокой интенсивностью колебаний дневной поверхности. При этом время возникновения землетрясения и место расположения очага, на первый взгляд, не имеют непосредственной связи со временем и местом техногенных воздействий. Скрытый “саморегулируемый” механизм подготовки таких техногенно-тектонических землетрясений при одновременном участии природной энергонасыщенности массива и энергетических потоков от внешних техногенных источников воздействия существенно осложняет процесс выяснения причин образования очагов и изучения механизмов их появления.

Наиболее эффективным направлением решения этой задачи, а также других задач современной геодинамики на территории Кузбасса, в том числе контроля за дальнейшим развитием геодинамических процессов под воздействием природных потоков энергии и техногенных источников, является организация комплексных наблюдений с привлечением методов структурной геологии на основе блочно-иерархических представлений о строении земной коры, методов сейсмо-тектонических, геодезических и геомеханических исследований [1, 79]. Первоначальным делом в этом направлении должна быть организация инструментальных сейсмических наблюдений в режиме мониторинга с применением сейсмических групп и современных методов анализа в целях идентификации сейсмических сигналов по характеру их происхождения [82, 87].

Идентификация сейсмособытий позволит установить составные части сейсмического потока, образованного природными, техногенными, техногенно-тектоническими источниками и взрывными работами, определить количественный и энергетический вклад этих источников в различных диапазонах интенсивности событий, выяснить расположение очагов природных и техногенно наведенных землетрясений, а также активных сейсмотектонических зон.

Такая информация совместно с материалами о геологическом и тектоническом строении массивов позволит решать задачи о величине и распределении полей деформации и напряже-

ний с учетом расположения крупных разломов, контактов блочных структур и слоистости земной коры, а также оценивать риски возникновения сильных землетрясений на территории наиболее ответственных предприятий Кузбасса и Горной Шории.

5. О ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ПРОБЛЕМЕ “СВЕРХГЛУБОКОГО БУРЕНИЯ” КАК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ ДЛЯ ПРОРЫВНЫХ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ БУДУЩЕГО

В завершающем разделе кратко рассмотрим третье (III) основное направление исследований и разработок, отмеченное выше. По существу, оно инновационное в своей основе и также органично связано с двумя предыдущими. Без фундаментальных знаний о физике и механике взаимодействия между геоматериалами и рабочими органами горных машин и оборудования в процессах разрушения при бурении скважин невозможно научно обоснованно формулировать идеи и реализовывать проекты прорывных геотехнологий по комплексному изучению физико-механических и технологических свойств горных пород, а также энергосберегающему освоению месторождений полезных ископаемых на “больших и сверхбольших глубинах” (10 км и более от поверхности твердой оболочки Земли). Для этого необходимы соответствующие системы мониторинга физико-механических, геохимических свойств подсекаемых породных толщ и навигации технических средств бурения скважин в труднопрогнозируемых ныне условиях “подземной стихии”. На этих знаниях должны строиться управляющие системы технологическим процессом бурения. Без опоры на принцип “обратной связи” возникает большой риск для осуществления любых дорогостоящих проектных решений. К их числу, в качестве примера, можно отнести известный проект сверхглубокого бурения скважин на Кольском полуострове [88].

Как представляется нам, конструктивное осуществление принципа “обратной связи” может строиться на проверке и реализации фундаментальных идей, опубликованных в работах [1, 76, 89]. Соответствующие идеи опираются в первую очередь на современные достижения по развитию теории волн маятникового типа, а также каноническую связь между динамико-кинематическими характеристиками физических полей, индуцируемых в процессах разрушения напряженных массивов горных пород с их блочно-иерархическим строением и физико-механическими свойствами (спектроскопический подход [14]), а также безразмерное энергетическое условие объемного разрушения горных пород и возникновения геомеханических квази-резонансов [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в современных условиях высоких темпов роста объемов добычи и потребления минерального сырья в странах-лидерах мировой экономики долговременная стратегия развития горнодобывающей промышленности должна строиться с учетом техногенной нагрузки на экосистемы. Поэтому актуальность решения проблемы сохранения среды обитания растительного и животного мира с высокой техногенной нагрузкой будет только возрастать. В [29] ставится более общая проблема: не только сохранения этой среды обитания, но и “*облагораживания*” — придания ей более высоких “потребительских” качеств после завершения ведения горных работ на соответствующих территориях. На современном этапе интенсивное развитие горнодобывающего комплекса в мире по недропользованию нередко связано с деструктивным началом для экосистем и геоэкологии в целом не только в пределах разрабатываемых горных отводов и горно-обогачительных комплексов, но и далеко за их пределами [12, 13, 23].

В отмеченных аспектах развитие методологических основ и создание соответствующего им методического наполнения, включая набор алгоритмов автоматизированной обработки экспериментальных данных, а также соответствующих технических средств измерения для осуществ-

вления комплексного крупномасштабного геоэкологического мониторинга, должны осуществляться с конструктивным учетом того, что: “Во многом это “деструктивное начало” обусловлено “модуляцией” геоэкологических процессов геомеханико-геодинамическими как внутри, так и на поверхности Земли из-за ведения горных работ и индуцированных ими движений структурных отдельностей самой верхней части земной коры, соразмерных образующимся подземным и наземным полостям при извлечении полезных ископаемых” [46]. Доказательством тому могут служить долговременные комплексные исследования, представленные в обобщающих работах [18, 23].

В свою очередь, современные открытия в области нелинейной геомеханики и геофизики [1, 52, 53], связанные с квазистатическими и динамическими процессами “самоорганизации” напряженных блочных геосред, уже составляют собой важную априорную информацию для формирования необходимых требований к построению *Систем*, адекватных объектам мониторингового контроля (в первую очередь — формирующихся очаговых зон катастрофических событий: землетрясений, горных ударов, подземных пожаров, выбросов породы, угля, газа, провалов на земной поверхности, обрушения рельефных форм и др.). Такая “априорная информация” принципиально важна с позиций описания сценарно ожидаемых результатов обработки комплексной информации и работы *Мониторинговой системы*, а также ретроспективного анализа разноплановой информации, накопленной к началу функционирования такой *Системы*.

Примеры использования (с отмеченных позиций) явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия и теории волн маятникового типа, а также явления зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок (подземных полостей) даны в работах [15, 17, 21, 22, 90], в том числе и применительно к крупномасштабным природным и горно-техническим системам.

ВЫВОДЫ

- На основании обобщения важнейших достижений нелинейной геомеханики, геофизики и геотектоники, развития теории волн маятникового типа, а также облачных информационных технологий авторами формулируются современные проблемы и актуальные задачи фундаментальных и прикладных исследований и разработок в области физики и геомеханики разрушения горных пород в природных и горнотехнических системах. В частности, обосновывается необходимость разработки энергетического подхода к анализу процессов формирования и развития очаговых зон катастрофических событий (землетрясений, горных ударов, выбросов угля и газа), а также взаимодействия горных машин и их породоразрушающих инструментов с породным массивом при бурении “сверхглубоких” скважин на принципе обратной связи с физико-механическими свойствами подсекаемых породных толщ.

- Современные достижения экспериментальных исследований по нелинейной сейсмике дали мощный импульс теоретическим разработкам по созданию основ теории волн маятникового типа, имеющей важный методологический потенциал для развития основ “пассивной” сейсмотомографии. **В настоящее время очевидную актуальность приобретают исследования по проблемам синтеза достижений динамической теории упругости в механике сплошных сред и динамического поведения фрагментированных геосред с нелинейно связанными между собой “абсолютно твердыми телами” в стесненных условиях — в виде механически сопряженных “физических маятников”, иерархически вложенных друг в друга.**

- Выдвигается и обосновывается идея о целесообразности разработки и создания многослойной геоинформационно-мониторинговой системы геомеханико-геодинамической и экологической безопасности горнодобывающих регионов России с высокой техногенной нагрузкой —

как основы для возможного международного мегапроекта в области наук о Земле междисциплинарного характера, обозначенного авторами как **“Разработка и создание многослойной геoinформационно-мониторинговой системы геомеханико-геодинамической и экологической безопасности в мире”**.

Авторы выражают большую благодарность академикам Н. Н. Мельникову (Россия) и Цянь-Циху (КНР), профессорам В. П. Потапову, Б. Н. Смоляницкому, А. В. Леонтьеву (Россия), Пан-Ишану (КНР) и многим другим коллегам за заинтересованное обсуждение выдвинутых в данной работе идей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах // ФТПРПИ. — Ч. I, 2012. — № 2; Ч. II, 2013. — № 2; Ч. III, 2014. — № 4.
2. Родионов В. Н., Адушкин В. В., Костюченко В. Н. и др. Механический эффект подземного взрыва. — М.: Недра, 1971.
3. Адушкин В. В., Костюченко В. Н., Николаевский В. Н., Цветков В. М. Механика подземного взрыва. — М.: ВИНТИ, 1973.
4. Адушкин В. В., Спивак А. А. Геомеханика крупномасштабных взрывов. — М.: Недра, 1993.
5. Кочарян Г. Г., Спивак А. А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. — М.: ИКЦ Академкнига, 2003.
6. Адушкин В. В., Спивак А. А. Подземные взрывы. — М.: Наука, 2007.
7. Взрывы и землетрясения на территории Европейской части России / под ред. В. В. Адушкина и А. А. Маловичко. — М.: ГЕОС, 2013.
8. Адушкин В. В., Турунтаев С. Б. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). — М.: ИНЭК, 2005.
9. Адушкин В. В., Турунтаев С. Б. Техногенная сейсмичность — индуцированная и триггерная. — М.: ИДГ РАН, 2015.
10. Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика: в 2 ч. / под ред. Н. Н. Мельникова. — Апатиты: ГоИ КНЦ РАН, 2004.
11. Мельников Н. Н., Епимахов Ю. А., Абрамов Н. Н. Научные основы интенсификации возведения большепролетных сооружений в скальном массиве. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2008.
12. Мельников Н. Н., Калашников А. И. Шельфовые нефтегазовые разработки: геомеханические аспекты. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2009.
13. Мельников Н. Н., Конухин В. П., Наумов В. А. и др. Научные и инженерные аспекты хранения и захоронения радиационно опасных материалов на Европейском Севере России. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2010.
14. Курленя М. В., Опарин В. Н. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород. — Новосибирск: Наука, 1999.
15. Курленя М. В., Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Аршавский В. В. Геомеханические процессы взаимодействия породных и закладочных массивов при отработке пластовых рудных залежей. — Новосибирск: Наука, 1997.
16. Опарин В. Н., Аннин Б. Д., Чугуй Ю. В. и др. Методы и измерительные приборы для моделирования и натурных исследований нелинейных деформационно-волновых процессов в блочных массивах горных пород. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007.

17. **Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Розенбаум М. А., Рева В. Н., Бадтиев Б. П., Тропп Э. А., Чанышев А. И.** Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
18. **Опарин В. Н., Сашурин А. Д., Кулаков Г. И. и др.** Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
19. **Опарин В. Н., Багаев С. Н., Маловичко А. А. и др.** Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Т. 1. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009.
20. **Опарин В. Н., Багаев С. Н., Маловичко А. А. и др.** Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Т. 2. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010.
21. **Опарин В. Н., Симонов Б. Ф., Юшкин В. Ф., Востриков В. И., Погарский Ю. В., Назаров Л. А.** Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. — Новосибирск: Наука, 2010.
22. **Опарин В. Н., Танайно А. С.** Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. — Новосибирск: Наука, 2011.
23. **Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия** / [Опарин В. Н. и др.]; отв. ред. Н. Н. Мельников. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012.
24. **Постановление** Правительства РФ от 24.12.2008 г. № 988.
25. **Oparin V. N., Smolyanitsky V. N.** Promote efficiency of drilling equipments in tunneling and drilling rock, *Journal of Liaoning Technical University (National Science)*, 2009, Vol. 28, No. 3.
26. **Смоляницкий Б. Н.** Повышение эффективности и долговечности импульсных машин для сооружения протяженных скважин в породных массивах. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. (Интеграционные проекты СО РАН, вып. 43).
27. **Садовский М. А.** Естественная кусковатость горной породы // ДАН. — 1979. — Т. 247. — № 4.
28. **Садовский М. А.** О свойстве дискретности горных пород // *Физика Земли*. — 1982. — № 12.
29. **Опарин В. Н.** Фундаментальные проблемы облагораживания поверхности Земли в условиях высокой техногенной нагрузки // Сб. докл. Всерос. научн.-техн. конф. с международным участием “Глубокие карьеры” (18–22 июня 2012 г.). — Апатиты; СПб., 2012.
30. **Опарин В. Н.** Методологические основы построения многослойных мониторинговых систем геомеханико-геодинамической безопасности для горнодобывающих районов в тектонически активных зонах // Проблемы и пути инновационного развития горнодобывающей промышленности: материалы 6-й Междунар. науч.-практ. конф. (9–11 сентября 2013 г.). — Апатиты, 2013.
31. **Бычков И. В., Опарин В. Н., Потапов В. П.** Облачные технологии в решении задач горной геоинформатики // ФТПРПИ. — 2014. — № 1.
32. **Опарин В. Н., Потапов В. П., Попов С. Е., Замараев Р. Ю., Харлампенков И. Е.** Разработка распределенных ГИС-средств мониторинга миграций сейсмических проявлений // ФТПРПИ. — 2010. — № 6.
33. **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.
34. **Потапов В. П.** Математическое и информационное моделирование геосистем угольных предприятий. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.
35. **Raymond Yee.** ProWeb 2.0 Mashups: Remixing data and Web service, Ed. Matthew Moodie, Springer-Verlag, New-York, 2008.

36. **April J. Wells.** Grid Applications System Design, Aerbach Publications, New York, 2008.
37. **Fayez Gebali.** Algorithm and Parallel Computing, A. John Willey & Sons, Inc., Publition, New Jersy, 2011.
38. **Massino Cafaro, Giovanui Alliso** (Eds). Grids, Clouds and Virtualization, Springer, London, New York, 2011.
39. **On Line Maps with AP and Web Service.** Ed. Prof. Michael Peterson, Springer, New York, Heidelberg, 2012.
40. **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.
41. **Опарин В. Н., Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л., Харламповцев И. Е.** Фрактальный анализ траекторий миграции геодинамических событий в Кузбассе // ФТПРПИ. — 2012. — № 3.
42. **Потапов В. П., Опарин В. Н., Гиниятуллина О. Л., Харламповцев И. Е.** Разработка сервиса облачных вычислений и обработки данных о сейсмособытиях в геомеханико-геодинамически активных угледобывающих районах Кузбасса // ФТПРПИ. — 2015. — № 3.
43. **Потапов В. П., Опарин В. Н., Гиниятуллина О. Л., Харламповцев И. Е.** Облачный сервис обработки сейсмособытий на основе диаграмм Вороного с использованием технологии GOOGLE APP ENGINE // ФТПРПИ. — 2015. — № 5.
44. **Опарин В. Н., Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л., Счастливец Е. Л.** Исследование процесса зарастания отвалов предприятий горного производства по данным дистанционного зондирования // ФТПРПИ. — 2013. — № 6.
45. **Опарин В. Н., Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л., Андреева Н. В.** Мониторинг загрязнений водного бассейна районов активной угледобычи с использованием данных дистанционного зондирования // ФТПРПИ. — 2012. — № 5.
46. **Опарин В. Н., Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л.** О комплексной оценке состояния окружающей среды по данным дистанционного зондирования Земли в регионах с высокой техногенной нагрузкой // ФТПРПИ. — 2014. — № 6.
47. **Опарин В. Н., Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л., Андреева Н. В., Счастливец Е. Л., Быков А. А.** Оценка пылевого загрязнения атмосферы угледобывающих районов Кузбасса в зимний период по данным дистанционного зондирования Земли // ФТПРПИ. — 2014. — № 3.
48. **Oparin V. N., Kiryaeva T. A., Gavrillov V. Yu., Shutilov R. A., Kovchavtsev A. P., Tanaino A. S., Efimov V. P., Astrakhantsev L. E., Grenev I. V.** Interaction of geomechanical and physicochemical processes in Kuzbass coal, Journal of Mining Science, 2014, Vol. 50, No. 2.
49. **Опарин В. Н., Киряева Т. А., Усольцева О. М., Цой П. А., Семенов В. Н.** Об особенностях развития нелинейных деформационно-волновых процессов в угольных образцах различной стадии метаморфизма при нагружении до разрушения в изменяющемся поле температур // ФТПРПИ. — 2015. — № 4.
50. **Федеральная система** сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений // Информ. анализ. бюл. Спец. вып. — М.: МЧС России, 1999. — № 1.
51. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И.** Об эффекте аномально низкого трения в блочных средах // ФТПРПИ. — 1997. — № 1.
52. **Курленя М. В., Опарин В. Н.** Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. I // ФТПРПИ. — 1999. — № 3.
53. **Курленя М. В., Опарин В. Н.** Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. II // ФТПРПИ. — 2000. — № 4.
54. **Опарин В. Н.** К проблеме формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах: энергетический подход // Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли — формирование нового мировоззрения в освоении природных ресурсов: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. с участием иностранных специалистов, 13–15 октября 2014 г. — В 2 т. / ГоИ КНЦ РАН. — Т. 1. — Апатиты; СПб., 2014.

55. **Александр Медецкий.** Характеристики сейсмической опасности в рудниках и шахтах // Труды 8-го Междунар. симпозиума по сейсмологии и горным ударам в рудниках и шахтах (RaSiM8). — СПб.; М., 2013.
56. **Ив Потвин.** Повышение качества управления сейсмическим риском в шахтах, сложенных крепкими породами // Труды 8-го Междунар. симпозиума по сейсмологии и горным ударам в рудниках и шахтах (RaSiM8). — СПб.; М., 2013.
57. **Герхард ванн Асвехен.** Судебная механика горных пород, сдвиги Орлеппа и другие индуцированные горными работами структуры // Труды 8-го Междунар. симпозиума по сейсмологии и горным ударам в рудниках и шахтах (RaSiM8). — СПб.; М., 2013.
58. **Яковлев Д. В., Лазаревич Т. Н., Цирель С. В.** Природно-техногенная сейсмоактивность Кузбасса // ФТПРПИ. — 2013. — № 6.
59. **Лазаревич Т. И., Поляков А. Н.** Горный мониторинг сейсмической и геодинамической безопасности Кузбасса // Горная геомеханика и маркшейдерское дело. — СПб.: ВНИМИ, 2009.
60. **Мулев С. Н., Бондарев А. В., Панин С. Ф.** Опыт внедрения систем сейсмического мониторинга на шахтах и рудниках России // Тр. Междунар. конф. “Геодинамика и напряженное состояние недр Земли”. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2013.
61. **Прогноз** научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года / <http://government.ru/news/9800>.
62. **Открытие № 400 СССР.** Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок / Е. И. Шемякин, М. В. Курленя, В. Н. Опарин, В. Н. Рева, М. А. Розенбаум // Оpubл. в БИ. — 1992. — № 1.
63. **Бригида В. С., Зинченко Н. Н.** Особенности метановыделения из дегазационных скважин впереди очистного забоя // ФТПРПИ. — 2014. — № 1.
64. **Полевщиков Г. Я.** “Деформационно-волновые” процессы в массиве горных пород при движении очистного забоя в угольных пластах // ФТПРПИ. — 2013. — № 5.
65. **Ройтер М., Крах М., Кислинг У., Векслер Ю.** Зональная дезинтеграция горных пород вокруг очистных выработок // ФТПРПИ. — 2015. — № 2.
66. **Гузев М. А., Макаров В. В.** Деформирование и разрушение сильно сжатых горных пород вокруг выработок. — Владивосток: Дальнаука, 2007.
67. **Циху Цян, Чжу Ксяопин, Кси Еньшин.** Влияние горизонтальных напряжений на явление зональной дезинтеграции горных пород в массиве с выработкой круглого сечения // ФТПРПИ. — 2012. — № 2.
68. **Ван Ксю-бин, Пан И-Шан, Чжан Чжи-хуэй.** Численное моделирование механизма пространственной локализации деформации в процессе зональной дезинтеграции // ФТПРПИ. — 2013. — № 3.
69. **Курленя М. В., Опарин В. Н.** О масштабном факторе явления зональной дезинтеграции горных пород и канонических рядах атомноионных радиусов // ФТПРПИ. — 1996. — № 2.
70. **Усанов С. В., Мельник В. В., Замятин А. Л.** Мониторинг трансформации структуры горного массива под влиянием процесса сдвижения // ФТПРПИ. — 2013. — № 6.
71. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Юшкин В. Ф. и др.** О некоторых особенностях эволюции гармонических акустических сигналов при нагружении блочных сред с цилиндрической полостью // ФТПРПИ. — 1999. — № 6.
72. **Курленя М. В., Сбоев В. М.** Особенности протекания динамических процессов в напряженно-деформированном массиве горных пород блочной структуры // Геофизические методы контроля напряжений в горных породах. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1980.
73. **Яковицкая Г. Е.** Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии. — Новосибирск: Параллель, 2008.

74. Опарин В. Н., Усольцева О. М., Семенов В. Н., Цой П. А. О некоторых особенностях эволюции напряженно-деформированного состояния образцов горных пород со структурой при их одноосном нагружении // ФТПРПИ. — 2013. — № 5.
75. Опарин В. Н., Востриков В. И., Усольцева О. М., Цой П. А., Семенов В. Н. Измерительная система и испытательный стенд для контроля эволюции акусто-деформационных и тепловых полей, индуцированных в процессах флюидоразрушения твердых тел // ФТПРПИ. — 2015. — № 3.
76. Опарин В. Н., Яковицкая Г. Е., Вострецов А. Г., Серяков В. М., Кривецкий А. В. О коэффициенте механо-электромагнитных преобразований при разрушении образцов горных пород // ФТПРПИ. — 2013. — № 3.
77. Адушкин В. В. Триггерная сейсмичность Кузбасса // Триггерные эффекты в геосистемах: материалы 3-го Всерос. семинара (М., ИДГ РАН, 15–19 июня 2015 г.) / под ред. В. В. Адушкина, Г. Г. Кочаряна. — М.: ГЕОС, 2015.
78. Лутиков А. И., Донцова Г. Ю., Юнга С. Л. Сейсмические аспекты землетрясения на Горном Алтае 27.09.2003, $M_s = 7.3$ (результаты предварительного анализа) // Вестн. Отделения наук о Земле РАН: электр. науч.-информ. журн. — 2003. — № 1 (21).
79. Овсюченко А. Н., Рогожин Е. А., Новиков С. С., Мараханов А. В., Ларьков А. С. Природа массового разрывообразования при сейсмической активизации в Центральном Кузбассе // Вопр. инж. сейсмологии. — 2010. — 37 (4).
80. Геолого-промышленная карта Кузнецкого бассейна (масштаб 1:100000). — Новосибирск: СНИИГГиМС, 2000.
81. Землетрясения России в 2005 году. — Обнинск: ГС РАН, 2007.
82. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Лескова Е. В., Шевкунова Е. В., Подкорытова В. Г. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатское землетрясение 18 июня 2013 г.) // ФТПРПИ. — 2014. — № 2.
83. Адушкин В. В. Сейсмичность взрывных работ на территории Европейской части России // Физика Земли. — 2013. — № 2.
84. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Лескова Е. В., Колесников Ю. И. Промышленные взрывы и техногенная сейсмичность // Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
85. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Лескова Е. В., Фатеев А. В., Семин А. Ю. Сейсмические активации при разработке угля в Кузбассе // Физ. мезомеханика. — 2009. — Т. 12. — № 1.
86. Брыксин А. А., Селезнев В. С. Влияние техногенных факторов на сейсмичность районов Кузбасса и озера Байкал // Геология и геофизика. — 2012. — Т. 53. — № 3.
87. Sanina I., Gabsatarova I., Chernykh O., Riznichenko O., Volosov S., Nesterkina M., Konstantinovskaya N., J. Seismol, 2011, Vol. 15.
88. Сверхглубокие скважины России и сопредельных регионов. — СПб.: ВСЕГЕИ, 1995.
89. Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Пороховский Н. Н., Гришин А. Н., Кулинич Н. А., Рублев Д. Е., Юшкин А. В. О влиянии массового взрыва в карьере строительного камня на формирование спектра сейсмических волн // ФТПРПИ. — 2014. — № 5.
90. Полевщиков Г. Я., Киряева Т. А., Плаксин М. С. Геодинамические следствия зональной дезинтеграции угольных пластов // Геодинамика и напряженное состояние недр: тр. конф. с участием иностр. ученых. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2011.

Поступила в редакцию 11/1 2016