

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 550 + 551 + 622

ОБ АКТУАЛЬНОЙ ПРОБЛЕМЕ РАЗРАБОТКИ НАУЧНЫХ ОСНОВ И ОБЩЕЙ ТЕОРИИ БЕЗОПАСНОГО ОСВОЕНИЯ ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТОВ ЗЕМЛИ С МЕСТОРОЖДЕНИЯМИ УГЛЕВОДОРОДНОГО РЯДА (ОБЗОР)

В. Н. Опарин

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: coalmetan@mail.ru, ул. Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Рассматриваются вопросы обоснования и постановки проблемы безопасного недропользования Земли в усложняющихся горно-геологических и природно-климатических условиях, роста глубины и масштабов разрабатываемых месторождений. Показано, что в современных условиях развития фундаментальных и прикладных исследований созданы предпосылки для успешного ее решения. В России они связаны с установлением энергетической основы для 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 геосистем в тектоническом поле напряжений и деформаций. С использованием современных достижений нелинейной геомеханики и геофизики, облачных Big Data информационных технологий развивается новый методологический подход, а также технические средства, программные комплексы для формирования многослойной геоинформационно-мониторинговой системы диагностики, контроля и прогнозирования промышленной и экологической безопасности горнодобывающих регионов России.

Особое внимание уделено научно-геотехнологическому потенциалу, связанному с масштабным фактором явления зональной дезинтеграции многофазных массивов горных пород блочно-иерархической структуры, а также его ключевой роли в описании квазистатических процессов самоорганизации массивов при образовании подземных полостей различного целевого назначения.

Экспериментально-теоретические исследования, физика и геомеханика формирования очаговых зон разрушения горных пород, пожаро- и выбросоопасность, геомеханико-геофизические энергоэмиссионные события, комплексная геоинформационно-мониторинговая система, инструментальные измерения, дистанционное зондирование Земли, диагностика, прогнозирование, профилактика, безопасность, напряженно-деформированное состояние, месторождения углеводородного ряда

DOI: 10.15372/FTPRPI20240201

EDN: PAGFCE

В XXI в. проблема экологически безопасного и энергоэффективного недропользования Земли в усложняющихся горно-геологических, геодинамико-геомеханических и природно-климатических условиях, роста глубины и масштабов разрабатываемых месторождений полезных ископаемых становится все более обостряющейся в России. Однако накапливаемый на протяжении длительного времени опыт развития фундаментальных и прикладных исследований в горном деле и общем недропользовании Земли создавал необходимые предпосылки для решения обозначенной комплексной проблемы, но уже с опорой на современные научные открытия в науках о Земле: геологии, геотектонике, нелинейной геомеханике и геофизике, прорывных достижениях в развитии геоинформационных систем и аэрокосмических технологий.

Данная проблема отражает как ее актуальность, так и необходимость активной разработки экспериментально-аналитических основ общей теории количественного описания детерминированных связей между нелинейными физико-химическими массогазообменными процессами в многофазных напряженных геосредах при нарушении их термодинамического состояния, обусловленного добычей полезных ископаемых, с органо-минеральным наполнением продуктивных толщ массивов горных пород по мере роста глубин их залегания от поверхности Земли. Необходим учет их многофазности и специфических условий отработки полезных ископаемых в Сибири.

Для России — это гигантская по площади территория Евразийского континента за Уралом, с великим разнообразием и богатством минерально-сырьевых ресурсов ее недр. Однако для осваиваемых месторождений Западной и Восточной Сибири необходим учет наличия повышенного сейсмического фона от землетрясений и массовых технологических взрывов, а также негативных проявлений горного давления, геотермического градиента и геоструктурного фактора с ростом глубины ведения горных работ. Эти обстоятельства и ряд других определяют не только уровень геомеханико-геодинамической и геоэкологической безопасности объектов крупномасштабного недропользования данного региона России, но и устойчивость функционирования горнодобывающих предприятий, энергоэффективность ведения горных работ на длительную перспективу.

Основное внимание уделяется фундаментальным результатам по установлению главных механизмов формирования и особенностей развития очаговых зон повышенной концентрации напряжений, деструкции массивов горных пород и геоматериалов, обладающих блочно-иерархической структурой (по акад. М. А. Садовскому), многофазностью и проявляющих свойства энергетически открытых “самоорганизующихся” геосистем, находящихся в тектоническом поле напряжений и деформаций.

В теоретическом аспекте важна конструктивная роль таких геомеханических открытий, как явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок; явление знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия; существование широкой скоростной гаммы нелинейных упругих волн маятникового типа в напряженных многофазных геосредах с внутренней иерархической структурой и неоднородностью физико-механических свойств массивов горных пород; эффект аномально низкого трения в геосредах; поршневой механизм индуцирования маятниковых волнами энергоэмиссионных событий из импульсных волновых пакетов акустических и электромагнитных полей, а также сопутствующих (сопряженных с ними) физико-химических и нелинейных массогазообменных процессов. Достижение обозначенных результатов в разных своих аспектах описаны в серии монографических работ больших коллективов ученых [1 – 13].

Несмотря на то, что эти открытия были сделаны для месторождений твердых полезных ископаемых Сибири (при добыче железных и полиметаллических руд), а также угольных месторождений, их значение для понимания особенностей геомеханического поведения многофазных пластов в процессах разработки является принципиальным. Далее кратко, в системном виде применительно к месторождениям углеводородного ряда выделяется важнейший феноменологический набор геомеханических эффектов и формульный конструктор для их аналитического описания.

Следует также отметить, что поршневой механизм возникновения и протекания нелинейных физико-химических и массогазообменных процессов, индуцируемых волновыми пакетами нелинейных упругих волн маятникового типа, объясняет так называемый эффект аномально высокой тензочувствительности электрических полей [14]. Он обобщен и на другие физические поля: электромагнитные, акустические и комбинированные энергоэмиссионные, сопряженные с нелинейными деформационно-волновыми процессами, индуцируемыми внутренними или внешними их источниками. Для получения такого результата рассмотрены массивы горных пород с динамично изменяющимися параметрами дефектной структуры геовещества Земли по всей ее иерархической последовательности: от надмолекулярно-кристаллического и до планетарно-геоблокового масштабных уровней [9–13].

Достигнутый фундаментальный экспериментально-теоретический задел позволяет выделить уже новые системообразующие научные направления в науках о Земле и горной геомеханике, в частности в [13, 15–17] они обозначены как:

- основы нелинейной геотомографии на волнах маятникового типа;
- начала геомеханической термодинамики на волнах маятникового типа;
- новые методы и информационные технологии в экспериментальной геомеханике;
- комплексные геомеханико-геотехнические мониторинговые системы контроля энергоэффективности буровых систем.

О СОВРЕМЕННЫХ “ВЫЗОВАХ ПРИРОДЫ” КРУПНОМАСШТАБНОМУ ГОРНОМУ НEDROPOLЬZOWANIЮ НА ГЛУБOKИХ ГORIZONTAХ CTRAT ZEMLI И ПУТЯХ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

В современную эпоху крупномасштабного развития горнодобывающей промышленности и общего недропользования Земли, с неуклонным ростом народонаселения и необходимых материальных потребностей, обеспечиваемых минерально-сырьевыми запасами нашей планеты, сложилась опасная ситуация для судьб не только грядущих, но и ныне живущих поколений. Ее следовало бы обозначить как “вызов природы” из-за грубого нарушения баланса ответственности человечества за состояние самой природы, чуткого отношения к братьям нашим меньшим — в лице многообразных представителей растительного и животного мира, а также среди их обитания, всего того, что принято называть “ноосферой” (по В. И. Вернадскому) и экосистемой Земли в целом.

Естественно возникает вопрос: достаточны ли наши познания о природе и механизмах проявления этих сил природы? Очевидно, что уровень таких познаний имеет самое непосредственное отношение и к обеспечению техногенной безопасности при добыче полезных ископаемых и надежности подземного строительства. Они одинаково важны для обеспечения безопасности и в направлении “Противодействие техногенным, биогенным, социокультурным угрозам, терроризму и идеологическому экстремизму, а также киберугрозам и иным источникам опасности для общества, экономики и государства” — в части, касающейся повышения

защищенности горнодобывающей отрасли промышленного производства от природно-техногенных аварий и снижения тяжести их последствий. От этого, конечно, зависят перспективы и устойчивость развития любых государств мира.

В настоящей работе обращается особое внимание именно на природные факторы влияния, недостаточный интерес к которым со стороны естествоиспытателей приводит к природно-техногенным катастрофическим событиям на нашей планете. Реальная значимость этих факторов природного влияния в процессах познания и освоения “подземного космоса” рассматривается далее применительно к проблеме на месторождениях углеводородного ряда: угольных, нефтегазовых, горючих сланцев. Они формируют как энергетическую минерально-сырьевую базу, так и важнейшую составную часть для химико-технологического, агрономического и металлургического комплекса промышленности. В сравнении со способами добычи месторождений твердых ископаемых, для газожидкого углеводородного сырья имеется весьма значительное геотехнологическое ограничение. Оно связано с практической невозможностью прямого доступа механизированных комплексов и геотехнического оборудования к применению для отработки продуктивных горизонтов нефтегазовых и сланцевых месторождений.

Факторы влияния — это по существу современные “вызовы природы” научному сообществу с требованием более глубокого изучения проявления фундаментальных законов эволюции, закономерностей изменения физических свойств геовещества Земли для бесконфликтного пользования богатствами ее недр, но с опорой на них, при создании соответствующих геотехнологий горного недропользования, основанных на геоинформационном принципе обратной связи.

Как основные факторы природного влияния, они проявляют себя комплексно и требуют для своего анализа соответствующего универсального методологического подхода — с их приведением к физически понятному и обоснованному общему знаменателю. В настоящее время в качестве таковых рассматриваются: иерархичность внутреннего строения, многофазность, минералогическая неоднородность и комплексность влияния структурно-геологических, геомеханико-геотектонических, природно-климатических факторов на техногенные процессы при разработке месторождений полезных ископаемых в экстремальных условиях роста глубин осваиваемых продуктивных горизонтов страт Земли. А в качестве общего знаменателя — известная универсальная связь между массой любого вещества и полной для него энергией через скорость света ($Mc^2 = W$).

Накопленный в горном деле фактический опыт свидетельствует о том, что необходимые к практическому применению геотехнологии в современных условиях крупномасштабного недропользования Земли требуют особого внимания к опережающему развитию научных основ для них: энергоэффективных, геомеханико-геодинамически и геоэкологически безопасных в освоении месторождений углеводородного ряда в условиях роста глубин отрабатываемых продуктивных горизонтов, а также уровня горного давления и температуры, изменений структуры и фазового состояния геовещества в различных горно-геологических и природно-климатических условиях. В этом направлении научных исследований и прикладных геотехнологических разработок велика роль фундаментальных представлений, описываемых в рамках общей теории взаимодействия между нелинейными геомеханическими и физико-химическими массогазообменными процессами при отработке месторождений углеводородного ряда, с опорой на опыт разработки рудных месторождений.

Необходимость ее создания очевидна также и для осуществления комплексного мониторингового контроля возможных негативных последствий реализуемых технологических процессов на объектах крупномасштабного недропользования Земли с позиций профилактики негативного техногенного влияния на среду обитания животного и растительного мира, геоэкологию в целом.

Решение обозначенной проблемы для разрабатываемых месторождений требует и соответствующей научной методологии, позволяющей объединить в себе многообразие по качеству и количеству используемых в практике ведения горных работ значимых параметров для контроля эффективности осуществляемого горного производства. Без привлечения возможностей аэрокосмических методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в увязке с традиционными методами геомеханических исследований на объектах горного недропользования с применением наземных и подземных измерений, а следовательно, разработки новой методологии их совместного анализа на базе облачных геоинформационных технологий Big Data, решение подобного уровня возникших проблем становится практически невозможным. Большие перспективы также видятся в развитии и применении единого энергетического (методологического) подхода к созданию мирового уровня комплексных систем аэрокосмического дистанционного и традиционного геомеханического (многопараметрического) наземного и подземного мониторинга для изучения этапов формирования очаговых зон природно-техногенных катастрофических событий (горные удары, взрывы, подземные пожары) на крупномасштабных объектах горного недропользования Сибири — с особым акцентом на угольные и нефтегазовые месторождения.

Это предполагает использование большого накопленного в горном деле научно-методического и геотехнологического задела за минувший период научных исследований и технико-технологических разработок не только угольных и нефтегазовых, но также и крупнейших рудных месторождений Сибири (Норильское, Таштагольское и др.).

Конкретная постановка обозначенной проблемы с подробным описанием истории возникновения, фундаментальной научной значимости, актуальности решения и уже имеющимся необходимым научным заделом для ее успешной реализации описана в работах [12 – 14]. Постановка и пути ее решения даны в [14], а с позиций необходимости учета геоэкологических последствий недропользования — в [12, 13]. Важное значение уделяется также геоэкологическому аспекту на базе разрабатываемой теории — последствий функционирования объектов крупномасштабного недропользования Сибири. Этот аспект перспективных исследований и разработок, как существенно прикладной по ожидаемым результатам фундаментальных исследований, является своевременным и конструктивным относительно реализации Указа Президента РФ от 08.02.2021 года № 76.

Таким образом, фундаментальная научная значимость и актуальность сформулированной проблемы, возможные пути ее решения во многом определяются современными научными достижениями и открытиями, особенно последних лет, в нелинейной геомеханике и геофизике, связанными с исследованиями процессов формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных геосистемах. Эти достижения научных исследований и разработок обобщены в опубликованной в 2018 – 2021 годах двухтомной монографии международного коллектива ведущих ученых [12], а также в монографии [13]. К числу важнейших достижений последних лет отнесены также такие по значимости результаты, как открытие поршневого механизма протекания массогазообменных процессов в многофазных напряженных геосредах блочно-иерархического строения при нарушении их равновесного термодинамического состояния и его детерминированная связь с нелинейными упругими волнами маятникового типа, индуцируемыми из очаговых зон разрушения массивов горных пород и геоматериалов в результате землетрясений, горных ударов и технологических взрывов.

Открытие поршневого механизма действия маятниковых волн на инициирование таких процессов позволило заключить, что появились достаточные основания для постановки и решения комплексной проблемы по разработке основ общей теории взаимодействия нелинейных

геомеханических и физико-химических массогазообменных процессов в многофазных напряженных нефтегазовых и углепородных массивах. По существу, этот результат является логическим завершением и важнейшим прикладным следствием активно разрабатываемой теории нелинейных упругих волн маятникового типа, включающей в себя многообразия своих феноменологических проявлений в науках о Земле и горном деле, в частности обусловленные блочно-иерархическим строением массивов горных пород и их геоматериалов.

Мировой опыт эксплуатации нефтегазовых и угольных месторождений по процессам интенсификации дебета нефти и газов в разрабатываемых продуктивных толщах углеводородного сырья, включая дегазацию угленосных толщ различной стадии их метаморфизма, свидетельствует о принципиально важном заключении: широко применяемые геотехнологии флюидогидрорасчленения породных массивов в результате приводят к практически неконтролируемому общему процессу — переформированию исходного по структуре месторождения в очень сложную многосвязную область геосреды с возникновением замкнутых целиковых структур с (трудно или практически) неизвлекаемыми запасами полезных компонентов, традиционно применяемыми технологиями их добычи [15, 16].

Такие целиковые структуры качественно меняют топологические свойства проницаемости газовых и флюидных компонент в продуктивных слоях и вмещающих породных массивах угольных и нефтегазовых месторождений. Это приводит к утрате значительных объемов неизвлеченного полезного ископаемого как по экономическим причинам, так и из-за возникновения неконтролируемых геомеханических процессов, сопряженных с катастрофическими событиями: внезапными выбросами угля и газа, горных ударов, неожиданными обрушениями налегающих и подстилающих массивов пород, возникновения очагов подземных пожаров — при разработке угольных месторождений; несоответствия объемов потенциальных запасов углеводородного сырья реально извлекаемым их объемам из разрабатываемых нефтегазовых или сланцевых месторождений — по несоответствию используемых геотехнологий реально необходимым [15, 16].

В [15–18] впервые экспериментально и теоретически доказано, что на базе применения особых свойств нелинейных упругих волн маятникового типа имеются конкретные возможности для решения обозначенных выше задач, составляющих очень сложную геотехнологическую проблему: энергоэффективного и геомеханико-геоэкологически безопасного извлечения углеводородного сырья из многофазных породных массивов в различных горно-геологических, геотектонических и природно-климатических условиях огромной части Евразийского континента, занимаемого Россией. Здесь достаточно полно проанализированы за более чем полутора тысячелетия этапы развития и достигнутый уровень исследований и экспериментально-теоретических разработок, а также традиционно применяемых геотехнологий в нашей стране и за рубежом в освоении угольных и нефтегазовых месторождений, особенно с позиций безопасного недропользования Земли и господствующих ныне теоретических представлений в обозначенных выше аспектах.

- Применительно к нефтегазовым месторождениям с так называемыми трудноизвлекаемыми нефтью и газом в [15] изложены и верифицированы в натурных экспериментах новые геомеханические и технологические основы увеличения нефтеотдачи пластов с применением виброволновых технологий воздействия с поверхности Земли низкочастотными (до 8 Гц) мощными установками. Комплекс исследований показал, что в основе такого геотехнологического влияния на глубокозалегающие продуктивные пласти (2.0–3.5 км) лежит динамическое влияние низкоскоростной (до нескольких метров в секунду) группы волн маятникового типа, индуцируемыхвиброустановками специальной конструкции.

- Для угольных месторождений аналогичный комплекс исследований начат сравнительно недавно для Кузбасса в [16–24]. Здесь доказано, но уже на примере источников динамического воздействия в виде мощных горно-тектонических ударов и технологических взрывов (а ранее [12, 18] — для рудных месторождений Норильска и Таштагола) существенное влияние индуцируемых низкочастотных и низкоскоростных групп волн маятникового типа на изменение напряженно-деформированного состояния углепородных массивов, их газодинамическую активность, пожаро- и искровзрывоопасность, интенсивность протекания механоэрзационных процессов при открытой разработке угольных месторождений (составляют до 60 % для Кузбасса).

Приведенные результаты свидетельствуют о принципиальной значимости флюидо-газовой компоненты и внутренней структуры продуктивных пластов, а также вмещающих породных массивов на качество прогнозирования их флюидо-газодинамической реакции при различного вида внешних геомеханических воздействиях. Учет их термодинамического и напряженно-деформированного состояний, многофазности, блочно-иерархического строения и энергетических параметров источников индуцирования нелинейных деформационно-волновых процессов (волн маятникового типа) приобретает фундаментальную значимость. Именно данный аспект изучался на примере влияния крупных природно-техногенных землетрясений и мощных технологических взрывов на газодинамическую активность угольных шахт, а также интенсивность протекания механоэрзационных процессов в бортах карьеров Кузбасса — с позиций применимости для объяснения их механизма действия теории нелинейных упругих волн маятникового типа, лежащей в основе динамического взаимодействия между геомеханическими (деформационно-волновыми) и физико-химическими массогазообменными процессами в угольных пластиах [15, 16].

Доказано, что аналитической основой для описания установленных детерминированных связей между существующими нелинейными геомеханическими и физико-химическими массогазообменными процессами в напряженных угленосных массивах под влиянием изменяющегося напряженно-деформированного и термодинамического их состояний, а также природно-техногенных землетрясений, взрывов и других динамических источников может служить операторное соответствие между физико-химическим уравнением И. Ленгмюра и кинематическим уравнением В. Н. Опарина для волн маятникового типа.

О МАСШТАБНОМ ФАКТОРЕ ЯВЛЕНИЯ ЗОНАЛЬНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ МНОГОФАЗНЫХ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД БЛОЧНО-ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И ЕГО КЛЮЧЕВОЙ РОЛИ В ОПИСАНИИ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИХ САМООРГАНИЗАЦИИ

В конце 70-х годов XX в. особое внимание на важность блочно-иерархического строения массивов горных пород и их геоматериалов (от пылинок и до планетных тел) обратил в своих научных трудах академик М. А. Садовский [25, 26]. Обобщая соответствующие экспериментальные данные широкого спектра наук о Земле, им дана ориентировочная оценка коэффициенту иерархического вложения выделяемых структурных отдельностей $\lambda \in 2-5$ (по типу “матрешки”).

Однако более детальные оценки значения этого коэффициента были установлены лишь с открытием явления зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок для больших глубин их заложения [5]. Рассмотрим далее ключевую геометрическую характеристику этого геомеханического явления, обозначенную масштабным фактором зональной дезинтеграции горных пород как “модуля самоорганизующихся геосистем”. Эта характеристика оказалась важным связующим звеном между макро- и микроквантованием физико-механических свойств практически любого вещества, охватывая собой чрезвычайно широкий диапазон линейных размеров от планетарных до атомно-ионных радиусов.

О современных представлениях влияния структуры твердой матрицы геовещества в описании миграции содержащихся в ней жидкостей и газов. На протяжении длительного периода времени в мире активно развивались механико-математические методы для описания фильтрационных процессов в многофазных геосредах со структурой для прогнозирования эволюции напряженно-деформированного состояния, проницаемости трещинно-пористого геовещества продуктивного пласта для жидкостей и газов в изменяющихся полях напряжений, деформаций и температур от различных источников возмущения. В значительной мере они ориентированы на оценку дебета воды, нефти и газа при бурении скважин или проходке выработок, а также объема запасов полезных ископаемых [9, 18].

Этот цикл экспериментальных и теоретических исследований отнесен в [18] к квазистатическому направлению, где матричная структура геовещества и ее топологические особенности либо фиксированы во времени, либо слабо изменяются (в линейно-упругом приближении) за счет влияния напряженно-деформированного состояния массивов горных пород, вмещающих продуктивные пласти.

Для описания процессов миграции содержащихся в твердой матрице жидкостей и газов по системе пор и трещин принимаются упрощающие гипотезы, позволяющие в рамках континуальных моделей механики сплошной среды использовать численные решения соответствующих систем дифференциальных и/или интегральных уравнений с заданными начальными и граничными условиями, учитывающими в том числе и характер (вид) источников возмущения. Такое моделирование позволяет описывать сложный эволюционный процесс тепломассопереноса и массогазообмена, но при этом реальная структура и фазовый состав геоматериалов заменяются эффективными характеристиками по проницаемости, теплопроводности, упругим модулям и др.

Как показали многочисленные эксперименты и натурные наблюдения, такое структурно-фазовое обезличивание (осреднение) физико-механических свойств геоматериалов нередко приводит к утрате способности в рамках соответствующих подходов описывать реально наблюдаемые геомеханические, физико-химические и массогазообменные эффекты в массивах горных пород при осуществлении технологических операций по управлению их механическими свойствами и добыче углеводородного сырья. Помимо широко известных катастрофических природно-техногенных событий, связанных с внезапностью проявления землетрясений, горных ударов, выбросов угля и газа, подземных пожаров, обрушения обнажений в горных выработках, оползней в бортах карьеров, большое внимание уделено особенностям нелинейной реакции продуктивных толщ углеводородного сырья (углей, нефти и газа) и водных горизонтов на землетрясения, мощные технологические (включая ядерные) взрывы и вибровоздействия с поверхности Земли энергетически достаточно мощными виброустановками [19, 20].

С открытием явления знакопеременной реакции горных пород на динамические (взрывные) воздействия в напряженных массивах горных пород блочно-иерархической структуры и обусловленных им возникновением нелинейных упругих волн маятникового типа [20] обнаружилась проблематичность в использовании модельных представлений о статичности матричной структуры геовещества и, соответственно, применения аппарата механики сплошных сред в решении возникшего круга новых задач.

Однако в рамках нелинейной теории упругих волн маятникового типа появилась возможность описывать осциллирующий режим движения их материальных носителей — конкретных по размеру структурных единиц, иерархически слагающих массивы горных пород в стесненных условиях действующих полей напряжений и деформаций [12].

Из этой теории следует, что амплитудно-периодный спектр господствующего сейсмологического фона при определенном уровне горного давления (и виде напряженно-деформированного состояния породного массива) начинает существенно влиять на исходную структуру геовещества через квазирезонансный механизм трансформации накопленной потенциальной упругой энергии массивов в кинетическую энергию движения его структурных элементов, и наоборот [9, 21, 22]. Он сопряжен также с проявлением в геоматериалах эффекта аномально низкого трения между такими структурными элементами. Последний обычно и лежит в основе внезапности проявления катастрофических событий (!).

Начиная с 50-х годов XX в. исследователями большое внимание уделялось развитию основ теории распространения упругих волн во флюидонасыщенных пористых средах, основы которой описаны в классической работе М. Био [23]. С тех пор не было значимых попыток “автономизировать” движение структурных отдельностей геоматериалов с наличием в их трещинно-поровом пространстве многофазного заполнителя (газ, жидкость, мелкие твердотельные фракции) при теоретическом анализе динамико-кинематических характеристик регистрируемых в натурных условиях (широкополосного диапазона по амплитудам и частотам) сейсмических волн от динамических источников разного вида.

С доказательством существования нелинейных упругих волн маятникового типа, как следствия явления закопеременной реакции горных пород, положено начало исследованиям и разработкам (Россия, Китай, Израиль и др.) по механико-математическому моделированию энергетических условий возникновения и распространения в реальных массивах горных пород и в соответствующих им геоматериалах динамико-кинематических характеристик этой группы волн в зависимости от расстояния до источников излучения, их энергии, а также напряженно-деформированного состояния блочно-иерархически построенной геосреды. Как оказалось, эти волны существенно отличаются от классических линейных продольных P и поперечных S упругих волн по своим динамико-кинематическим характеристикам, спектральному наполнению и, соответственно, уровню переносимой ими энергии: он как минимум на порядок больше энергетического уровня воздействий, переносимых P - и S - волнами [9, 20]. В таких случаях прочная матричная структура геовещества уже не может считаться геометрически неизменной, а также фиксированной по своим физико-механическим свойствам.

Этот важный цикл экспериментальных и теоретических исследований условно отнесен к динамическому направлению, где матричная структура геовещества и ее топологические особенности (существенно влияющие на флюидо-газопроницаемость!) не являются фиксированными, но способны изменяться во времени и пространстве осциллирующим образом [18]. В данных обстоятельствах ключевым является установленное в экспериментах инвариантное энергетическое условие возникновения и распространения волн маятникового типа, а также квазирезонансного механизма разрушения и проявления катастрофических событий в очаговых зонах концентрации упругой энергии напряженных многофазных массивов горных пород блочно-иерархического строения [16, 18, 19, 24]. Это практически актуальный и стратегически важный комплекс экспериментально-аналитических исследований ориентирован преимущественно на территориально сопряженные крупномасштабные объекты горного недропользования рудного и угольного Кузбасса. Здесь необходимо иметь фенологические данные об осциллирующих движениях геоблоков различного иерархического уровня (отnano-, микро- и много выше) в действующих геотектонических условиях: в маятниковом приближении поведения структурных неоднородностей продуктивных толщ и вмещающих их породных массивов различного минералогического состава и стадии метаморфизма в детерминированной их сопряженности с эмиссионными геомеханико-геофизическими полями (сейсмоакустическими, электромагнитно-тепловыми, деформационными и др.) [13, 24].

В этом аспекте сделан фундаментальный научный задел в работах, посвященных развитию основ нелинейной геомеханики на волнах маятникового типа и началам геомеханической термодинамики [12, 15, 16, 20]. В цитируемых работах фундаментальная роль принадлежит учету именно иерархического строения массивов горных пород от надмолекулярного до крупномасштабного уровня, обладающих определенной степенью внутренней подвижности в стесненных условиях господствующих полей напряжений и деформаций в конкретных горно-геологических условиях мониторинговой поверхности Земли. В решении подобного уровня и сложности задач необходимы конкретные аналитические зависимости, описывающие такие важнейшие характеристики внутреннего строения породных массивов, как размеры и форма структурных неоднородностей, условия их механической сопряженности между собой по всей иерархии учитываемых линейных размеров. По существу, конструктивная основа для подобного рода количественных оценок, как показали натурные исследования, связана с масштабным фактором явления зональной дезинтеграции горных пород.

Рассмотрим далее современные открытия в нелинейной геомеханике и их конструктивный геотехнологический потенциал в горном деле, с опорой на этот масштабный фактор. Основное внимание обратим именно на те научные открытия и фундаментальные результаты экспериментально-теоретических исследований в области нелинейной геомеханики и геофизики, которые обладают важным конструктивным потенциалом для ответа на “вызовы природы” в конкретном их геотехнологическом воплощении: построении общей теории безопасного освоения глубоких горизонтов Земли с месторождениями углеводородного ряда — угольными, нефтегазовыми и горючими сланцами. Они в современном мире являются преимущественным энергетическим источником и стратегической минерально-сырьевой базой для горно-металлургической, химико-технологической и агрономической отраслей промышленности, с перспективой попутного извлечения редкоземельных элементов химической таблицы Д. И. Менделеева для их применения и в других сферах высокотехнологического производства.

С целью построения основ такой теории необходимо обладать возможностями описывать количественно (через соответствующие аналитические соотношения) связи между нелинейными физико-химическими и массогазообменными процессами в многофазных геосредах при нарушении их напряженно-деформированного и термодинамического состояния в продуктивных толщах и вмещающих их породных массивах, обусловленных добычей полезных ископаемых. Исследования последних лет показали, что между выделенной группой месторождений полезных ископаемых с органической основой и рудными месторождениями полезных ископаемых магматического происхождения существует тесная генетическая связь, ранее не учитываемая как по уровню их сопряженности территориально, так и по геотектоническим условиям и геохронологическим периодам возникновения [12, 13].

Явления зональной дезинтеграции и знакопеременной реакции горных пород существенно дополняют друг друга, характеризуя, с одной стороны, количественно внутреннюю структуру геовещества объектов недропользования с позиций размеров их структурных отдельностей [2], а с другой — динамико-кинематические характеристики осуществляемых ими нелинейных геомеханико-геофизических волновых процессов, включая физико-химические и массогазообменные.

Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок и квазистатические процессы “самоорганизации” их многофазных массивов на разных масштабных уровнях. Здесь выделены важнейшие следствия явления зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок [5, 10]. Существо этого открытия [27] заключается в том, что вокруг подземных полостей при их образовании в многофазных массивах горных пород

на глубинах, где достигаются условия близости или превышения господствующего уровня горного давления относительно предельно прочностных свойств горных пород, происходит образование кольцеобразных чередующихся зон ненарушенных и разрушенных зон по каноническому закону (рис. 1):

$$R_i = (\sqrt{2})^i R_0, \Delta R_i \in (0.05 - 0.11) R_i, \quad (1)$$

где R_0 — начальный радиус цилиндрической выработки; R_i — расстояние от центра поперечного сечения выработки до начала i -й зоны дезинтеграции в глубине массива шириной ΔR_i .

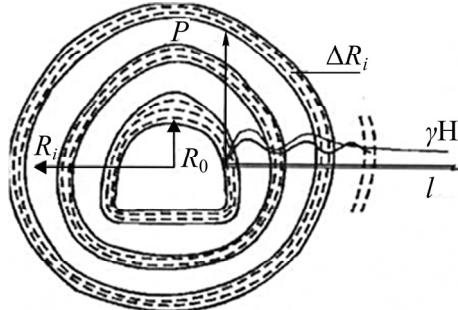


Рис. 1. Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок (схема): γH — уровень метастатического давления, МПа; l — расстояние от контура выработок, м

В условиях растяжения, по А. П. Бобрякову [28] (например, на начальном этапе действия взрывов при формировании проектного контура выработки), вначале могут формироваться около десятка магистральных радиальных трещин (рис. 2). Эти условия естественным образом зависят от тектонического поля напряжений и деформаций в районах локализации образуемых подземных полостей разного назначения.

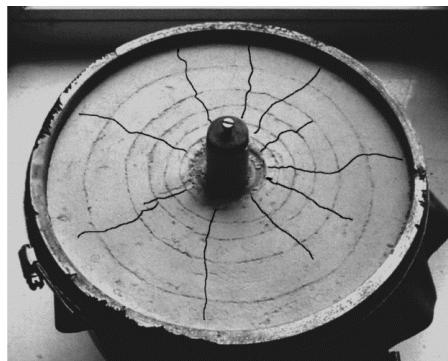


Рис. 2. Виды разрушений геоматериалов при двух вариантах (сжатие, растяжение) нагружения резиновой подложки (по А. П. Бобрякову [28])

Масштабный фактор $\sqrt{2}$ явления зональной дезинтеграции горных пород для соответствующих горно-геологических условий в своем аналитическом представлении (1) в виде числового ряда по i следует рассматривать как обобщенный модуль “самоорганизующихся” геосистем, который эффективен в своих практических приложениях. По нему можно количественно оценивать как размеры областей нелинейного влияния окрестного массива при образовании подземных полостей (горных выработок), так и линейные размеры работающих [2] структурных неоднородностей внутри породных массивов, определяющих их устойчивость. Важно, что канонический спектр по $(\sqrt{2})^i$ структурных отдельностей внутри породных массивов непосред-

ственно переходит на надмолекулярные уровни по их энергетическим спектрам — в канонические ряды атомно-ионных радиусов [5].

Необходимо отметить, что это явление было обнаружено экспериментально на рудных месторождениях [5]. Однако в дальнейших научных исследованиях его наличие установлено и для осадочных горных пород, содержащих в себе угольные месторождения органической природы. О том, что его проявление возможно и в процессах отработки практически всех месторождений углеводородного ряда (включая нефтегазовые и горючих сланцев), показано в работах [1, 9, 10, 12], посвященных экспериментальным исследованиям особенностей развития нелинейных геомеханических процессов, особенно на примерах взаимодействия породных и многофазных закладочных массивов при отработке пластовых рудных залежей полиметаллических руд Норильского месторождения [1].

Геотехнологии ведения горных работ на достаточно больших глубинах предусматривают формирование закладочных массивов в образуемых подземных полостях при отработке мощных пластовых залежей медно-никелевых руд для управления процессами сдвижения вмещающих породных массивов. Применяемая для этих целей твердеющая смесь из геоматериалов вполне адекватно моделирует многофазную геосреду с длительным набором прочности для низкомарочных бетонов на протяжении нескольких лет (!). Иллюстрации по конструктивному использованию формулы (1) для масштабного фактора явления зональной дезинтеграции применительно к рудникам Норильска и угольным шахтам Кузбасса приведены на рис. 3 – 6.

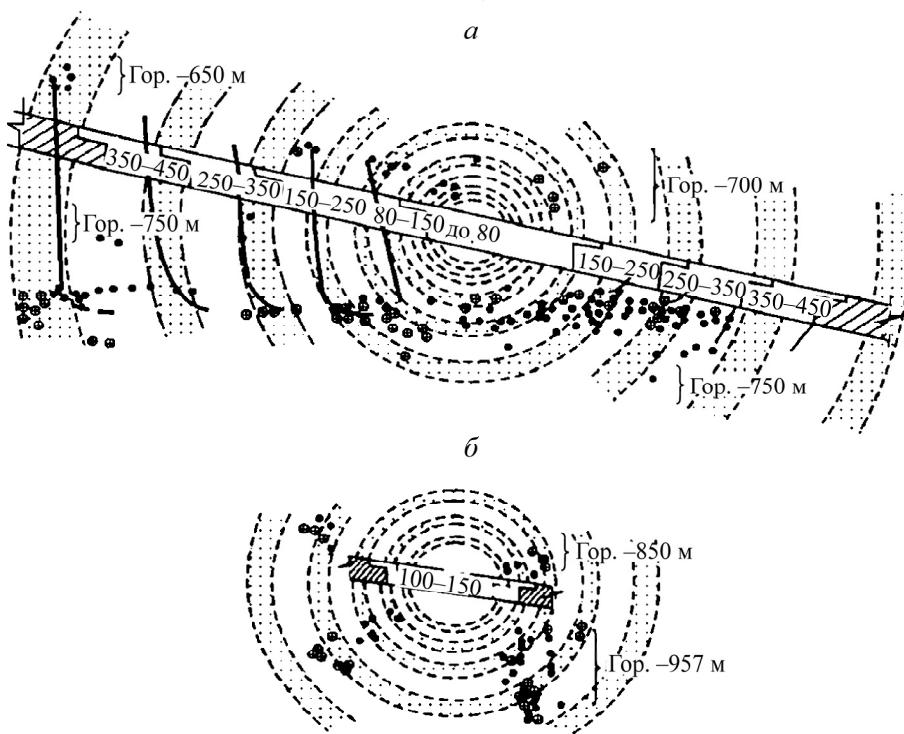


Рис. 3. Корреляционная связь между прогнозной картиной зональной дезинтеграции породных массивов вокруг очистного пространства при различных пролетах отработки рудного пласта и локализацией участков аварийного состояния монолитных железобетонных крепей на руднике “Октябрьский”: *a* — шахта № 1; *б* — шахта № 2

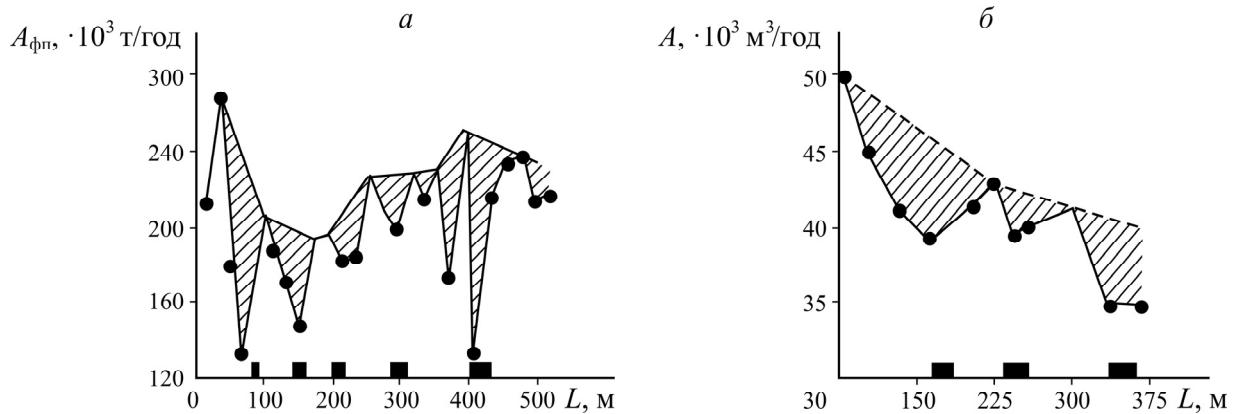


Рис. 4. Изменение среднегодовой производительности флангов панелей с развитием пролета отработки на шахте 1 рудника “Октябрьский” (а) и на руднике “Комсомольский” (б); ■ — положение и ширина зон дезинтеграции по прогнозным теоретическим расчетам В. Н. Опарина [1]

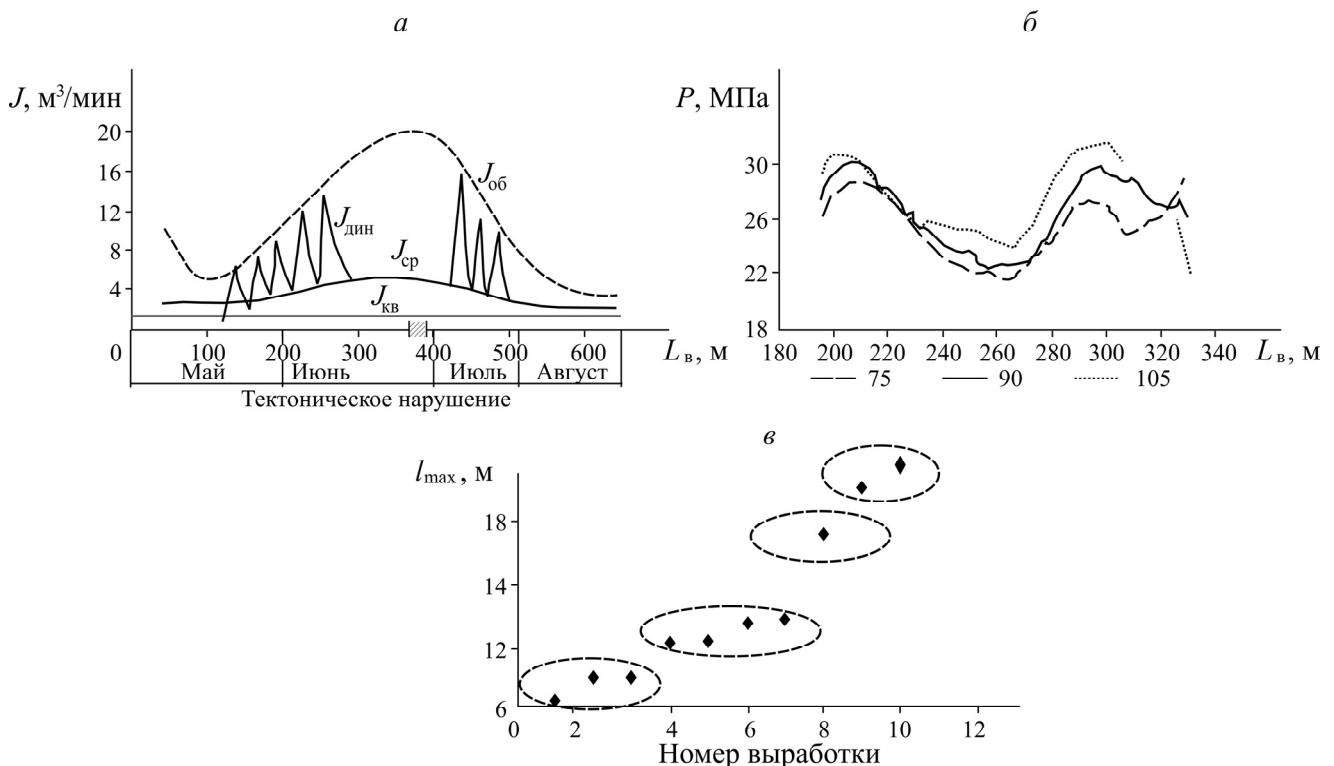


Рис. 5. О видах проявления зонально-дезинтеграционных процессов в углепородных массивах угольных месторождений Кузбасса (по проф. Г. Я. Полевщикому и др. [12]): а — метановыделение в забое штрека, проводимого по верхнему из сближенных пластов IV – V при наличии подрочного междупластия (Кузбасс); б — изменение давления в стойках механизированной крепи по оси выемочного столба на расстоянии от конвейерного штрека 75, 90 и 105 м при длине лавы 180 м; в — данные расчета ширины зоны газового дренирования выработкой пласта

Однако с позиций учета многофазности геовещества применение формулы (1) позволило впервые количественно описать и планетарные процессы “самоорганизации” для их геоматериалов, включая протопланетное вещество Солнечной системы. На рис. 7, 8 такие процессы проиллюстрированы для количественного описания возникновения скоростной структуры Земли по Гутенбергу, ее слоистой структуры по Буллену, а также зональной структуры (по скоростям сейсми-

ческих волн) недр Луны. При этом удалось доказать, что известное в астрономии “эмпирическое правило” Тициуса–Боде не является случайным, как принято считать, а количественно описывается формулой (1). В данном случае оно относится уже к масштабам планет Солнечной системы: применительно к современным их орбитам движения и процессам агломерации протопланетного вещества в виде гигантского облака планетезималей, по акад. Шмидту [10].

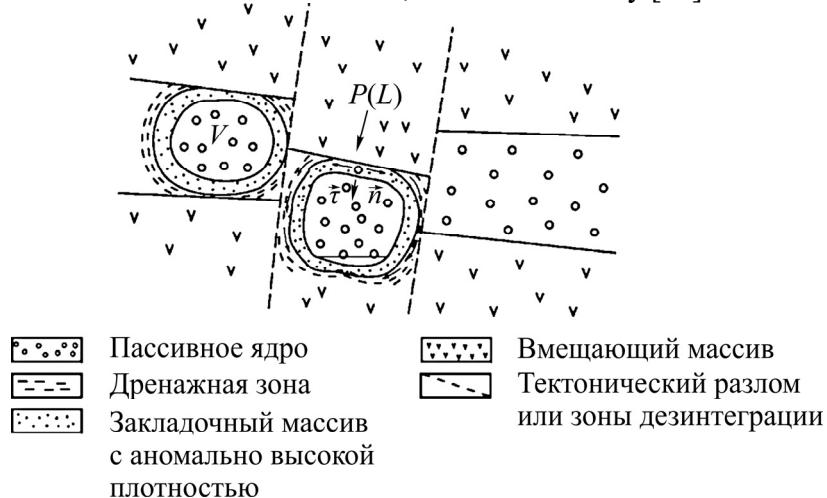


Рис. 6. Эффект “самоорганизации” искусственных массивов с образованием опорных ячеистых структур: $P(L)$ — силовая характеристика от давления налегающих пород для пролета подработки L ; V — объем пассивного ядра; $\bar{\tau}, \bar{n}$ — касательная и нормальная компоненты тензора напряжений

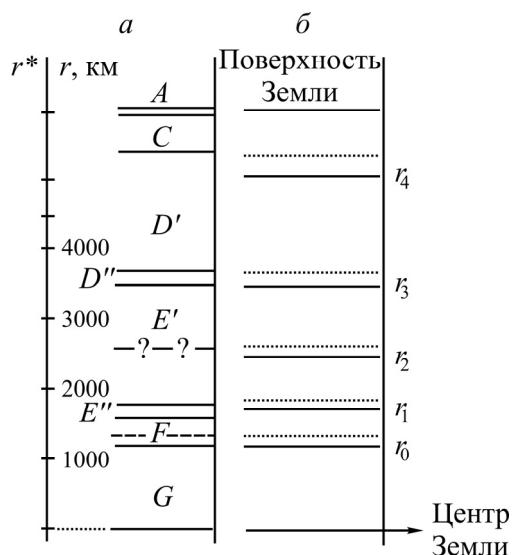


Рис. 7. Слоистая структура Земли по Буллену (а) и параметры зон геодезинтеграции по расчетам В. Н. Опарина (б). Под знаком вопроса — предполагаемое геофизиками существование дополнительной скоростной зоны

Возможные способы и основы технологии прогнозирования подобного вида процессов внутренней “самоорганизации” породных массивов при освоении нефтегазовых месторождений, ведущих к неучитываемому переформированию разрабатываемых месторождений с образуемыми целиковыми структурами, трудно или практически неизвлекаемыми углеводородами, впервые отражены в [20]. В результате приведенные примеры конструктивного использования

закономерности (1) для проявления масштабного фактора явления зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок привели к необходимости введения новой шкалы иерархических представлений физической информации для горного породоведения.



Рис. 8. Зональная дезинтеграция недр Луны

Каноническая шкала иерархических представлений для горного породоведения введена в работе [10]. В этой монографии предложен новый, достаточно универсальный метод оценки потенциальной сопротивляемости горных пород их разрушению безразмерным показателем (F):

$$F = J_{\sigma} + J_z + J_p + J_Q + J_T = 2.885[L_n(\sigma_s) + L_n(d_z) + L_n(P) + L_n(S) + L_n(\Delta)] + 14.7. \quad (2)$$

Он основан на канонической зависимости типа (1), учитывающей такие свойства горных пород, как σ_s — предел прочности породы на сжатие, МПа; d_z — средний диаметр ее зерна, мм; P — пористость, %; S — приведенная твердость породообразующих минералов, слагающих конкретную породу, по отношению к кварцу, ед.; Δ — средний размер естественной отдельности в массиве, см.

Данный метод позволил дать универсальную классификацию потенциальной сопротивляемости горных пород разрушению в канонической шкале структурно-иерархических представлений В. Н. Опарина и вывести аналитическую зависимость между классами пород по сопротивляемости разрушению J_R и показателем F :

$$J_R = 2.885L_n F - 3.543; \quad 4 \leq F \leq 64; \quad F = 3.414\exp(0.3466J_R). \quad (3)$$

С использованием этих формул в дальнейшем удалось получить следующие важные практические результаты.

- Установлена формализованная универсальная связь существующих классификаций горных пород по прочностным показателям в канонической шкале структурно-иерархических представлений:

$$Z_{\min J} = \frac{Z_N}{(\mu^*)^{N-1}}, \quad (4)$$

$$Z_{\max J} = (\mu^*) Z_{\min J}, \quad (5)$$

где Z_N — классифицируемый показатель в N -м классе соответствующей классификации ($1 < N < M$), M — номер максимального класса; $\mu^* = \sqrt{2}$; $Z_{\min J}$, $Z_{\max J}$ — минимальный и максимальный пределы прочностных свойств в J -м классе прочности соответствующей классификации. Принадлежность породы к J -му классу прочности в этой шкале при заданном показателе прочности Z определяется согласно зависимостям:

$$J = 2.885[L_n(Z) - L_n(\alpha)] = \frac{4}{16}, \quad (6)$$

$$\alpha = 0.5[Z_{\min}(M) + Z_{\max}(M)]. \quad (7)$$

Сравнительный анализ показал, что известные шкалы существующих классификаций горных пород по прочностным показателям обладают определенной общностью, несмотря на то, что получены они экспериментальными методами с применением различающихся по виду механических воздействий.

- Получена зависимость принципа для “квантования” геомеханических показателей в существующих классификациях от классов прочности горных пород:

$$Z_{\min J} = b \exp(kJ), \quad Z_{\max J} = (\mu^*) Z_{\min J}, \quad (8)$$

$$\mu = Z_{\min J} + \frac{1}{Z_{\min J}} = Z_{\max J} + Z_{\max J}, \quad (9)$$

$$k = 2 \frac{Z_{\max J} - Z_{\min J}}{Z_{\max J}} + Z_{\min J}, \quad (10)$$

$$b = \frac{Z_{\min J}}{\exp(k)}. \quad (11)$$

Здесь $Z_{\min M}$, $Z_{\max M}$ — соответственно минимальный и максимальный пределы прочностных свойств в последнем классе прочности. Принадлежность породы к J -му классу прочности определяется согласно зависимости

$$J = \frac{L_n(Z) - L_n(b)}{k}, \quad (12)$$

где Z — прочностной показатель. Адекватность выражений (4) и (5) показывает, что установленное по формулам (6)–(12) единообразие представлений в канонической шкале структурно-иерархических распределений размеров геоблоков в горном массиве и структурных элементов геоматериалов, с одной стороны, а также классификаций горных пород по прочностным показателям — с другой, свидетельствуют о фундаментальной связи между физико-механическими свойствами горных пород и массивов с их структурно-иерархическим строением.

В канонической шкале иерархических представлений В. Н. Опарина [10] впервые введен и успешно верифицирован А. С. Танайно обобщенный показатель количественного описания петрографических свойств углей, с использованием которого дана классификация и описано распределение петрографических групп угольных пластов Кузбасса. Это имеет практическое значение не только для картирования участков шахтных полей при выделении потенциально опасных зон по выбросам угля, пород и газа, но и для геотехнологического зонирования.

Комплекс экспериментальных натурных исследований для объектов горного недропользования, систематизированный и обобщенный по своим результатам в монографиях [5, 10], связан с определением масштабного фактора явления зональной дезинтеграции горных пород по формуле (1). Он показал, что существует статистически инвариантная связь между раскрытием (среднее расстояние между берегами) трещин любого иерархического уровня (δ_i) в массивах горных пород и средними диаметрами (Δ_i) отделяемых ими структурных отдельностей (рис. 9) и получил название структурный геомеханический инвариант:

$$\mu_{\Delta}(\delta) = \frac{\delta_i}{\Delta_i} \in \left(\frac{1}{2} - 2 \right) 10^{-2}, \quad \forall_i, \quad (13)$$

где i — индекс иерархического уровня структурных отдельностей, отраженный в шкале (1), но для канонических рядов геоблоков, определяемых по формуле:

$$\Delta_i = \Delta_0 (\sqrt{2})^i, \quad \Delta_0 \cong 2.5 \cdot 10^6. \quad (14)$$

Здесь $i \in N$ — целые (с соответствующим знаком) числа; Δ_0 — диаметр “жидкого” ядра Земли. Очевидно, что $\Delta_{i+1} / \Delta_i = \sqrt{2} \forall_i$. Для учета влияния на δ_i напряженного состояния породных массивов вводится сопряженная с $\mu_\Delta(\delta)$ характеристика $v[\sigma]$. Согласно [9], в первом приближении для условий сжатия горных пород ее можно представить зависимостью

$$v[\sigma] \equiv v_0 \left(2 - \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} \right), \quad (15)$$

где v_0 — минимальное значение v при всестороннем сжатии σ породы до уровня объемной прочности σ_0 , если $v_0 \leq v \leq 2v_0$.

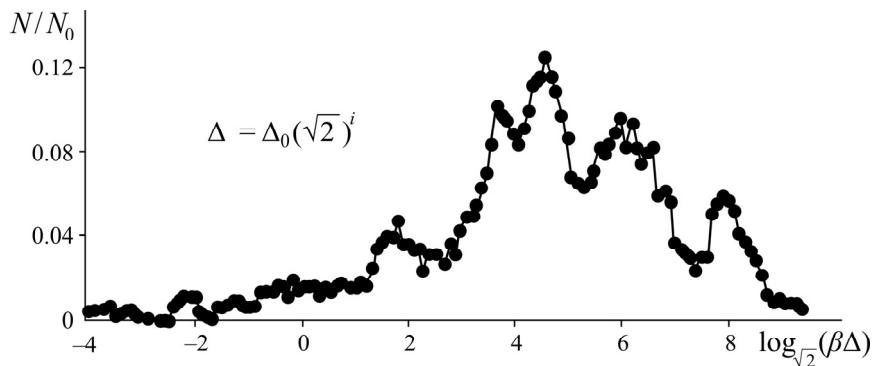


Рис. 9. Распределение блоков по размерам при использовании операции осреднения в безразмерной канонической шкале с базовым членом $\Delta_0 \approx 1.32$ см (ширина окна экспозиции 0.5; шаг сканирования 1/10).

Для широкого диапазона изменения характеристики v выражение (15) можно представить более общей параболической зависимостью с учитываемыми параметрами, более точно аппроксимирующими диаграмму “напряжения – деформации”. Характеристика v в (15) определяет степень реального раскрытия трещин, например в направлении фронта движения маятниковой волны [19]:

$$\nu = \frac{\delta_*}{\Lambda} , \quad (16)$$

δ_* — реальное раскрытие трещин, отделяющих геоблоки диаметром Δ .

Поскольку в натурных условиях трещины обычно шероховаты и заполнены более мелкими фракциями, содержат жидкости и газы, то среднее расстояние δ между берегами трещин к диаметру отделяемых ими геоблоков Δ обычно на 1–2 порядка больше, чем δ_* : $v[\sigma] \in (10^{-1} - 10^{-2})\mu_\Delta(\delta)$.

Представленные в формулах (13)–(16) основные результаты, связанные с открытием явления зональной дезинтеграции горных пород, свидетельствуют о существовании закона макроприватования упругой энергии вокруг образующихся подземных полостей в условиях высоких напряжений в многофазных массивах горных пород, обладающих сложной внутренней структурой, описываемой новой канонической шкалой иерархических представлений как по размерам структурных отдельностей, так и сопряженных с ними параметров физико-механических свойств, используемых в классификациях горного породоведения [10]. Установленные при этом сопряженные структурные геомеханические инварианты $\mu_\Delta(\delta)$ и $\nu[\sigma]$ позволяют оценить объем трещинно-порового пространства в напряженных породных массивах, способного включать в себя жидкости и газы для продуктивных горизонтов месторождений углеводородного ряда для соответствующих стадий метаморфизма и фазового состояния.

Метод такой оценки подробно описан в [1] на примере обезвоживания закладочных массивов при длительном наборе их проектной прочности до уровня строительных бетонов в подземных условиях отработки медно-никелевых руд Норильского месторождения. В данной ситуации параметр δ , характеризующий раскрытие пор и трещин в режиме набора прочности массивов и восприятия ими нагрузки от веса налегающих пород, является монотонно убывающей функцией, зависящей от действующих напряжений σ и времени t : $\delta = \delta(\sigma, t)$.

Однако нередки случаи, когда изменения функции $\delta(\sigma, t)$ приобретают осциллирующий знакопеременный вид. Условия для такого характера поведения параметра δ (следовательно, $\mu_\Delta(\delta)$) при $\Delta = \text{const}$ для \forall_i — иерархического уровня структурных отдельностей) являются следствием знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия, т. е. волн маятникового типа.

Важную роль играет структурный фактор геовещества. Он связан с механизмом проявления разного рода дефектов не только в виде трещин или пор, разного иерархического уровня процессов самоорганизации породных массивов по типу зонально-дезинтеграционных процессов от надмолекулярного и до космического (планетарного), но и в возникновении энергетических условий для распространения волн маятникового типа.

Для породных массивов во всем их многообразии минералого-петрографических и физико-механических свойств речь идет о дефектах горных пород и их массивов, связанных с контактными зонами нарушения сплошности, очерчивающих в пространстве размеры и форму объемных границ их структурных отдельностей (неоднородностей) отnanoуровня и до планетарных размеров. В [5] доказано экспериментально-теоретически, что несмотря на чрезвычайно широкое разнообразие в природных проявлениях таких характеристик геовещества и его породных массивов, тем не менее существует вполне определенный (в статистическом смысле!) геомеханический инвариант $\mu_\Delta(\delta)$ [5, 10], ограничивающий физически допустимый круг моделей для теоретического описания реально наблюдаемых в природе нелинейных геомеханико-геофизических процессов (!). Здесь заключен своего рода феноменологический водораздел между физикой и математикой — “формальной логикой и реальной феноменологией”, определяющих адекватность постановки механико-математических задач для описания регистрируемых физических эффектов инструментальными методами измерения или контроля, а также прогнозирования их развития во времени и пространстве.

Геоструктурный геомеханический инвариант $\mu_\Delta(\delta)$ оказался весьма важным и конструктивным не только для введения канонической шкалы иерархических представлений физико-механических экспериментальных данных в горном породоведении [10], но и для разработки теоретических основ явления зональной дезинтеграции горных пород [5], а также нелинейных

упругих волн маятникового типа [9] с их практическими приложениями для горного дела. Здесь использовалось в основном важнейшее следствие существования такого структурно-иерархического геомеханического инварианта, которое свидетельствует о нарушении классического условия совместности деформаций по Сен-Венану для реальных геосред. Оно обычно используется в механико-математическом моделировании напряженно-деформированного состояния горных пород, описании развития нелинейных геомеханико-геофизических процессов в недрах Земли.

На это обстоятельство обратили особое внимание и конструктивно применили в экспериментально-теоретических исследованиях академики М. А. Гузев, В. П. Мясников, Цянь Циху, профессора Пань Ишань, В. В. Макаров и др. [29 – 33]. Для преодоления известных трудностей в описании реально наблюдаемых нелинейных геомеханических процессов “самоорганизации” породных массивов по типу зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок М. А. Гузевым впервые была предложена неевклидова механико-математическая модель поведения упругопластических геоматериалов, обладающих дефектной внутренней структурой [34], получившая затем широкое признание и дальнейшее развитие в первую очередь в Китае — под руководством акад. Цянь Циху и проф. Пань Ишаня.

ВЫВОДЫ

Приведен экспериментально-аналитический обзор современного уровня исследований и достижений в области освоения месторождений полезных ископаемых, представляющих минерально-сырьевую базу для энергетического комплекса мировой промышленности. Обосновывается актуальность решения сформулированной проблемы, связанной с последствиями крупномасштабного горного недропользования Земли с доминирующей тенденцией роста глубин разработки месторождений углеводородного ряда — угольных, нефтегазовых и горючих сланцев. Формулируются новые задачи по решению этой проблемы, с обозначением фундаментальных научных достижений и открытый в науках о Земле и горном деле, перспективных для конструктивного применения. Особое внимание удалено научно-геотехнологическому потенциалу, связанному с масштабным фактором явления зональной дезинтеграции многофазных массивов горных пород блочно-иерархической структуры (по акад. Садовскому М. А.) вокруг образуемых подземных полостей различного целевого назначения. Он рассматривается как ключевой фактор для аналитического описания процессов пространственной “самоорганизации” горных пород и их массивов при разработке месторождений разного вида и фазового состояния.

Даны общие представления о смысловой “нагрузке” геомеханического инварианта $\mu_\Lambda(\delta)$, с привлечением обширного экспериментального материала по стратегически важным объектам горного недропользования России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курлена 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. — 175 с.
2. Курлена М. В., Опарин В. Н. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород. — Новосибирск: Наука, 1999. — 335 с.
3. Мировой опыт автоматизации горных работ на подземных рудниках / Опарин В.Н. и др. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. — 99 с.

4. **Методы и измерительные приборы для моделирования и натурных исследований нелинейных деформационно-волновых процессов в блочных массивах горных пород / Опарин В.Н. и др.** — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. — 320 с.
5. **Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок / Опарин В. Н. и др.; под ред. М. А. Гузева.** — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. — 278 с.
6. **Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосфера: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования / Опарин В. Н. и др.** — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. — 449 с.
7. **Современное состояние, проблемы и стратегия развития горного производства на рудниках Норильска / Опарин В. Н. и др.** — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. — 372 с.
8. **Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. В 2-х томах / Опарин В.Н. и др.** — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. — Том 1. — 304 с.; 2010. — Том 2. — 261 с.
9. **Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях / Опарин В.Н. и др.** — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. — 404 с.
10. **Опарин В. Н., Танайно А. С.** Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. — Новосибирск: Наука, 2011. — 264 с.
11. **Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия / Опарин В.Н. и др.** — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. — 632 с.
12. **Опарин В. Н., Адушкин В. В., Барях А. А., Потапов В. П., Киряева Т. А. и др.** Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах / под ред. Н. Н. Мельникова. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. — Т. 1. — 549 с.; 2019. — Т. 2. — 546 с.
13. **Опарин В. Н., Киряева Т. А., Потапов В. П., Юшкун В. Ф.** Новые методы и информационные технологии в экспериментальной геомеханике. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2021. — 292 с.
14. **Челидзе Т. Л.** Об аномально высокой тензочувствительности электропроводности неоднородных сред // ЖЭТФ. — 1984. — Т. 87. — Вып. 218.
15. **Опарин В. Н., Адушкин В. В., Востриков В. И., Усольцева О. М., Мулев С. Н., Юшкун В. Ф., Киряева Т. А., Потапов В. П.** Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии // ГИАБ. Ч. I: Формулировка и обоснование задачи исследований. — 2019. — № 1. — С. 5–25; Ч. II: Динамико-кинематические характеристики волн маятникового типа в напряженных геосредах и сейсмоэмиссионные процессы. — 2019. — № 11. — С. 5–26; Ч. III: Перспективные системы контроля деформационно-волновых процессов в подземных и наземных условиях ведения горных работ. — 2019. — № 12. — С. 5–29.
16. **Oparin V. N.** Pendulum waves and basics of “geomechanical thermodynamics”, Geohazard Mechanics, 2022, No. 1. — P. 38–52.
17. **Oparin V. N., Karпов V. N., Timonin V. V., and Konurin A.I.** Evaluation of the energy efficiency of rotary percussive drilling using dimensionless energy index, J. Rock Mech. and Geotech. Eng., 2022, No. 14. — 1486–1500.
18. **Oparin V. N.** Theoretical fundamentals to describe interaction of geomechanical and physicochemical processes in coal seams, J. Min. Sci., 2017, Vol. 53, No. 2. — P. 201–215.
19. **Опарин В. Н., Симонов В. Ф.** О нелинейных деформационно-волновых процессах в виброволновых технологиях освоения нефтегазовых месторождений // ФТПРПИ. — 2010. — № 2. — С. 3–25.

20. **Adushkin V. V. and Oparin V. N.** From the Alternating-Sign Explosion Response of Rocks to the Pendulum Waves in Stressed Media, J. Min. Sci., P. I: 2012, Vol. 48, No. 2. — P. 203–222; P. II: 2013, Vol. 49, No. 2. — P. 175–209; P. III: 2014, Vol. 50, No. 4. — P. 623–645; P. IV: 2016, Vol. 52, No. 1. — P. 1–35.
21. **Wang K. X., Aleksandrova N. I., Pan Y. S., Oparin V. N., Dou L. M., and Chanyshев A. I.** Effect of block medium parameters on energy dissipation, J. Applied Mech. and Technical Physics, 2019, Vol. 60, No 5. — P. 926–934.
22. **Wang Kaixing, Pan Yishan, Oparin V. N., and Dou Linming.** Energy transfer in block-rock mass during propagation of pendulum-type waves, Chinese J. Geotech. Eng., 2016, Vol. 38, No 12. — P. 2309–2314.
23. **Biot M. A.** Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range, J. Acoustical Soc. Am., 1956, Vol. 28, No. 2. — P. 179–191.
24. **Oparin V. N. and Kiryaeva T. A.** Operator of Connection Between the Langmuir Equation and Oparin's Kinematic Equation for Pendulum-Type Waves. Part I. In: Solovev D. B., Savalev V. V., Bekker A. T., Petukhov V.I. (eds), Proc. Int. Sci. and Technology Conf. "Far East Con 2021". Smart Innovation, Systems and Technologies, 2022, Vol. 275. Springer, Singapore.
25. **Садовский М. А.** Естественная кусковатость горной породы // ДАН. — 1979. — Т. 247. — № 4. — С. 829–831.
26. **Садовский М. А.** О свойстве дискретности горных пород // Физика Земли. — 1982. — № 12. — С. 3–18.
27. **Шемякин Е. И., Фисенко Г. Л., Курленя М. В., Опарин В. Н. и др.** Эффект зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок // ДАН. — 1986. — Т. 289. — № 5. — С. 1088–1094.
28. **Бобряков А. П.** Сети трещин в геоматериалах и их физические моделирования // ФТПРПИ. — 2004. — № 5. — С. 26–37.
29. **Qian Qihu and Zhou Xiaoping.** Non-Euclidean Continuum Model of the Zonal Disintegration of Surrounding Rocks around Deep Circular Tunnel in a Non-Hydrostatic Pressure State, J. Min. Sci., 2011, Vol. 47, No 1. — P. 37–46.
30. **Гузев М. А., Макаров В. В.** Деформирование и разрушение сильно сжатых горных пород вокруг выработок / Под ред. В.Н. Опарина. – Владивосток: Дальнаука, 2007. — 232 с.
31. **Han Y., Wang J., Dong Y., Hou Q., and Pan J.** The role of structure defects in the deformation of anthracite and their influence on the macromolecular structure, Fuel, 2017, Vol. 206. — P. 1–9.
32. **Pan Yishan, Tang Xin, and Li Yingjie.** Study on zonal disintegration, J. Rock Mech. and Eng., 2007, Vol. 26, No. 1. — P. 3335–33414.
33. **Мясников В. П.** Избранные труды: в 3 т. Общие проблемы механики сплошной среды. Том I. — Владивосток: Дальнаука, 2006.
34. **Mikhail Guzev.** Non-Euclidean Models of Elastoplastic Materials with structure Defects. — LAP Lambert Academic Publishing, 2010.

Поступила в редакцию 06/II 2024

После доработки 01/III 2024

Принята к публикации 14/III 2024