

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 выбороопасность, 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 маятниковыми 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 НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЮ НА ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТАХ СТРАТ ЗЕМЛИ 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 судеб 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 среды 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, агрохимического и металлургического комплекса промышленности. В сравнении со способами добычи месторождений твердых ископаемых, для газообразного 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 угленосных массивах. По существу, этот результат является логическим завершением и важнейшим прикладным следствием активно разрабатываемой теории нелинейных упругих волн маятникового типа, включающей в себя многообразие 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 целикомых структур с (трудно или практически) неизвлекаемыми запасами полезных компонентов, традиционно применяемыми технологиями их добычи [15, 16].

Такие целикомые 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 извлеченного 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 полувековой период 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 пласты (2.0–3.5 км) лежит динамическое влияние низкоскоростной (до нескольких метров в секунду) группы волн маятникового типа, индуцируемых виброустановками 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 механоэрозионных 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 механоэрозионных 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 пластах [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 пласты.

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 тепло-массопереноса 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 отдельностей, 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 натуральных 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 знакопеременной 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 (от нано-, 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 геотомографии 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 горючих сланцев. Они в современном мире являются преимущественным энергетическим источником и стратегической минерально-сырьевой базой для горно-металлургической, химико-технологической и агрохимической 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 .

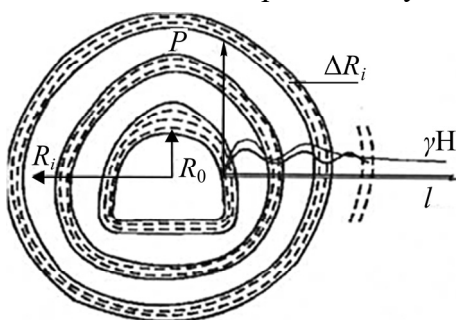


Рис. 1. Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок (схема): γH — уровень метастатического давления, МПа; l — расстояние от контура выработок, м

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.

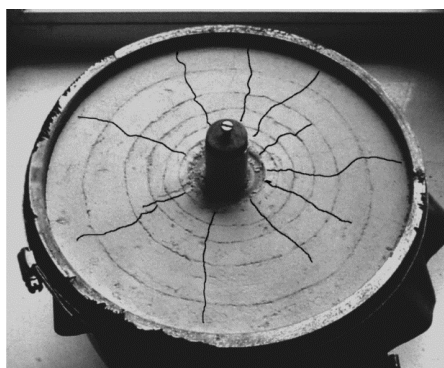


Рис. 2. Виды разрушений геоматериалов при двух вариантах (сжатие, растяжение) нагружения резиновой подушки (по А. П. Бобрякову [28])

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, вмещающих в себя 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.

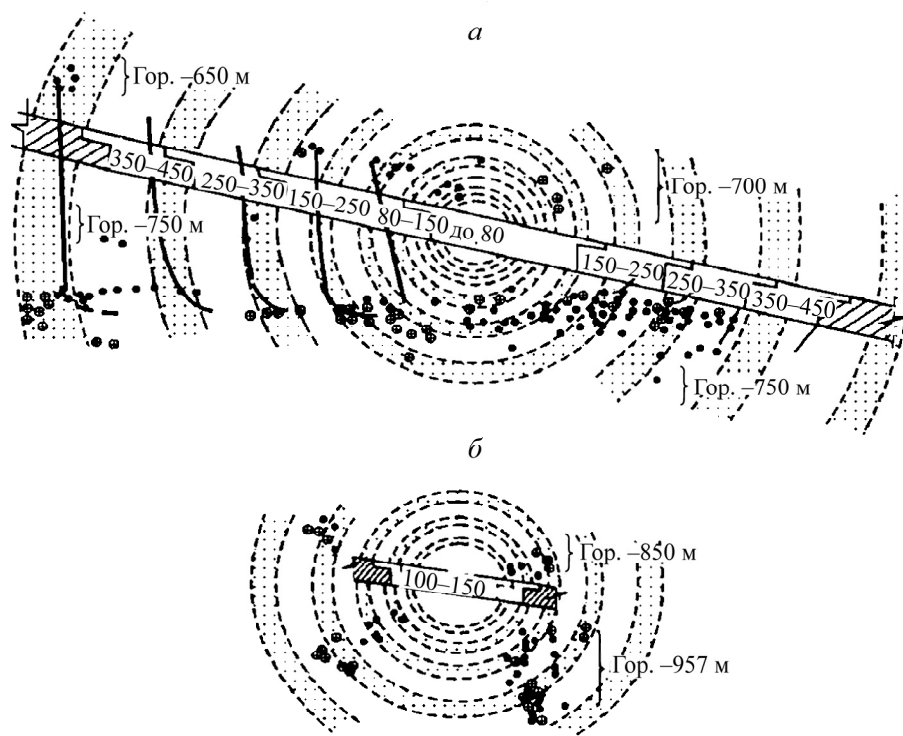


Рис. 3. Корреляционная связь между прогнозной картиной зональной дезинтеграции породных массивов вокруг очистного пространства при различных пролетах отработки рудного пласта и локализацией участков аварийного состояния монолитных железобетонных крепей на руднике “Октябрьский”: а — шахта № 1; б — шахта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

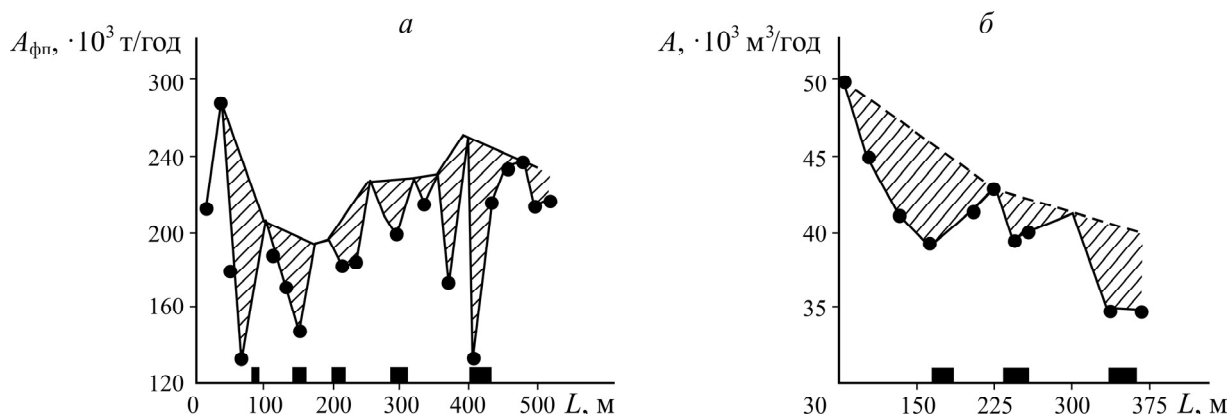


Рис. 4. Изменение среднегодовой производительности флангов панелей с развитием пролета отработки на шахте 1 рудника “Октябрьский” (а) и на руднике “Комсомольский” (б); ■ — положение и ширина зон дезинтеграции по прогнозным теоретическим расчетам В. Н. Опарина [1]

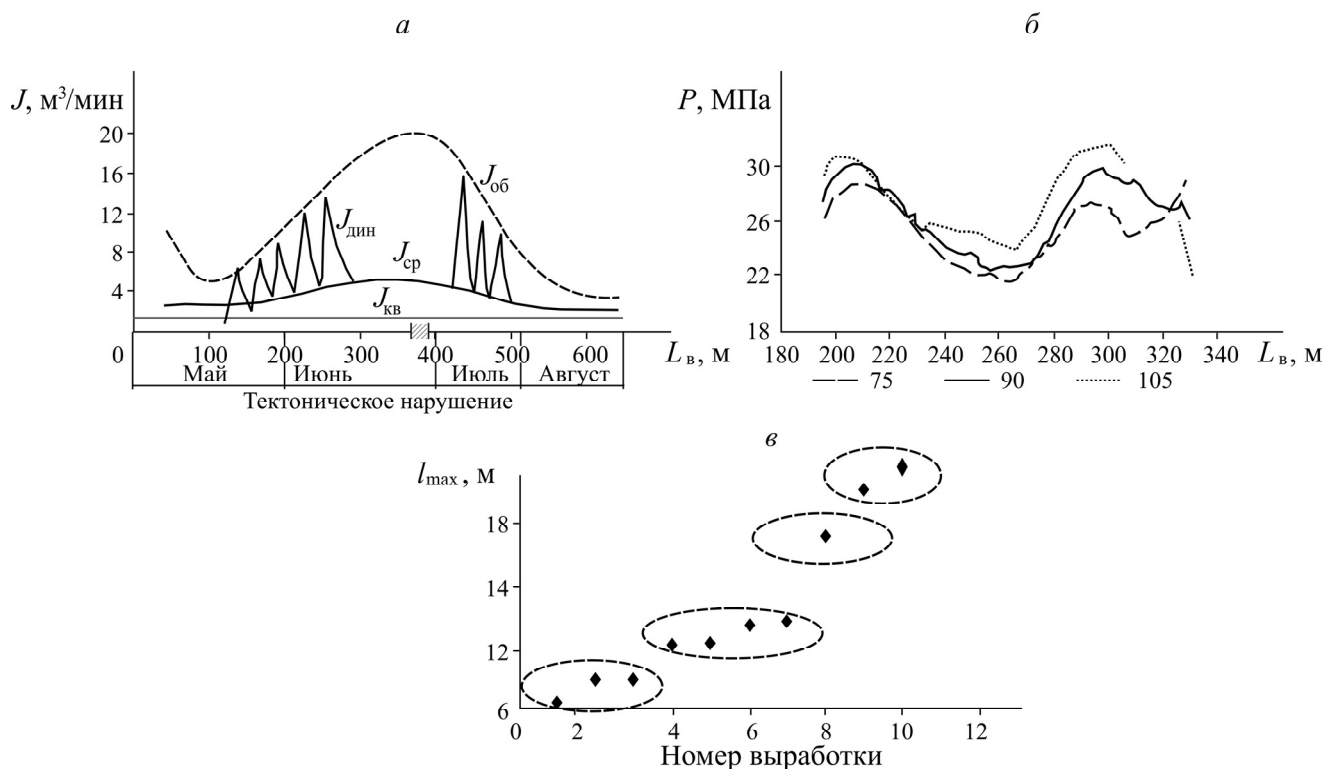


Рис. 5. О видах проявления зонально-дезинтеграционных процессов в углепородных массивах угольных месторождений Кузбасса (по проф. Г. Я. Полевщикову и др. [12]): а — метановыделение в забое штрека, проводимого по верхнему из сближенных пластов IV–V при наличии породного междупластья (Кузбасс); б — изменение 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–Бодде 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].

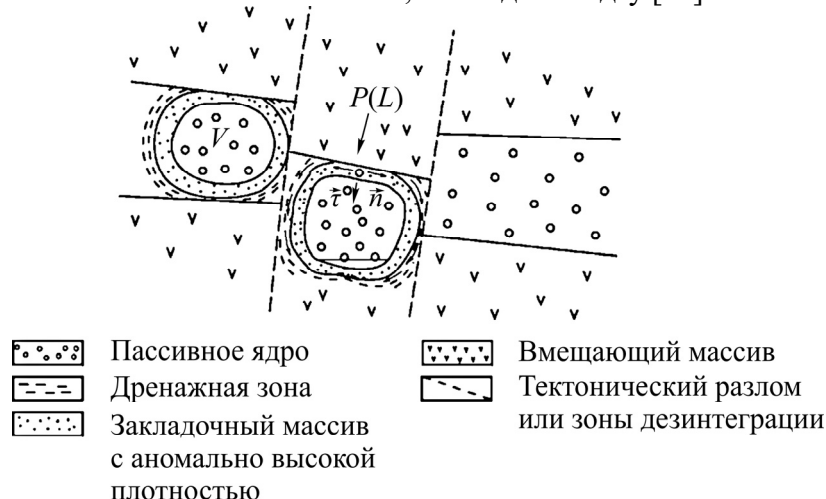


Рис. 6. Эффект “самоорганизации” искусственных массивов с образованием опорных ячеистых структур: $P(L)$ — силовая характеристика от давления налегающих пород для пролета подрабки L ; V — объем пассивного ядра; $\vec{\tau}, \vec{n}$ — касательная и нормальная компоненты тензора напряжений

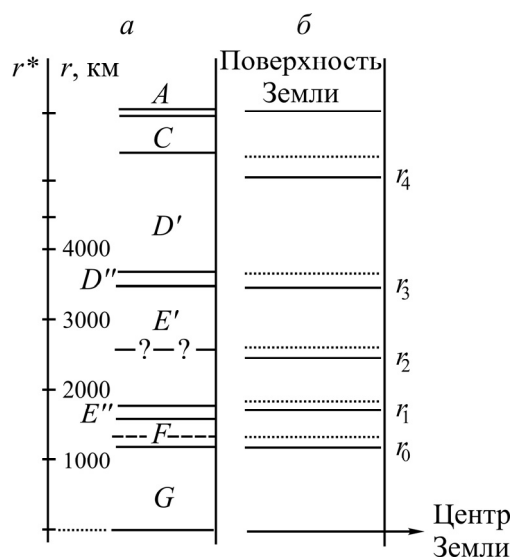


Рис. 7. Слоистая структура Земли по Буллену (а) и параметры зон геодезинтеграции по расчетам В. Н. Опарина (б). Под знаком вопроса — предполагаемое геофизиками существование дополнительной скоростной зоны

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 порообразующих 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 :

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

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 практически важное 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 $\nu[\sigma]$. Согласно [9], в первом приближении для условий сжатия горных пород ее можно представить зависимостью

$$\nu[\sigma] \cong \nu_0 \left(2 - \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} \right), \quad (15)$$

где ν_0 — минимальное значение ν при всестороннем сжатии σ породы до уровня объемной прочности σ_0 , если $\nu_0 \leq \nu \leq 2\nu_0$.

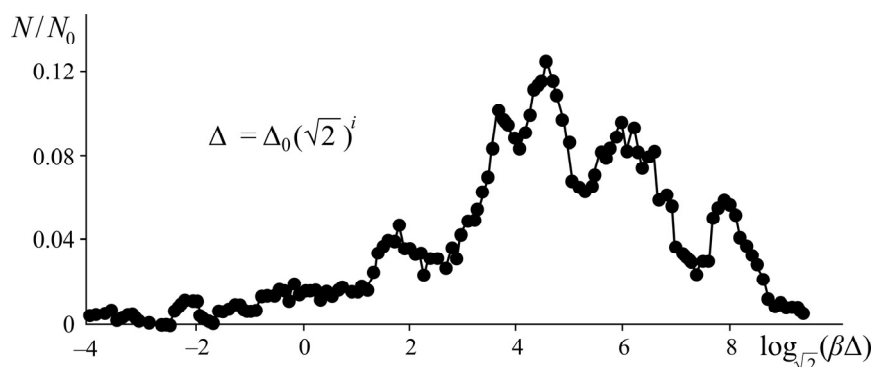


Рис. 9. Распределение блоков по размерам при использовании операции осреднения в безразмерной канонической шкале с базовым членом $\Delta_0 \approx 1.32$ см (ширина окна экспозиции 0.5; шаг сканирования 1/10).

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

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

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

Поскольку в натуральных 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_* : $\nu[\sigma] \in (10^{-1} - 10^{-2}) \mu_{\Delta}(\delta)$.

Представленные в формулах (13)–(16) основные результаты, связанные с открытием явления зональной дезинтеграции горных пород, свидетельствуют о существовании закона макроквантования 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 нередко случаи, когда изменения функции $\delta(\sigma, t)$ приобретает 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) от наноуровня 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 открытий в науках о Земле и горном деле, перспективных для конструктивного применения. Особое внимание уделено 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. 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. — 175 с.
2. Курленя 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 литосферы: 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 сейсμοдеформационного 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., Юшкин 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., Юшкин 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 сейсмэмиссионные 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., Karpov 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 Chanyshv 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., Savaley 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. **Гузов 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