

УДК 550.3 + 551 + 622 + 681: 624.1

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

**В. В. Адушкин<sup>1</sup>, В. Н. Опарин<sup>2, 3</sup>**

<sup>1</sup>*Институт динамики геосфер РАН,  
Ленинский проспект, 38, 119334, г. Москва, Россия*  
<sup>2</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*  
<sup>3</sup>*Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Россия*

Обсуждаются прикладные аспекты современных представлений о блочно-иерархическом строении массивов горных пород, феноменологических основ теории волн маятникового типа применительно к формированию и реализации очаговых зон катастрофических событий в природных и горно-технических геосистемах. Устанавливается формализованная связь между концентрационным критерием прочности твердых тел по С. Н. Журкову, экспериментальным критерием “схлопывания” подземных выработок и канонической структурой спектрального состава волн маятникового типа по В. Н. Опарину, а также факту дальнего действия мощных взрывных воздействий в геосредах по М. А. Садовскому – В. В. Адушкину. Обосновывается необходимость энергетического подхода к описанию процесса трансформации упругой энергии очаговых зон катастрофических событий в кинетическую энергию движения составляющих их структурных элементов. Вводится новое понятие о “сейсмоэмиссионных событиях интерференционного типа”.

*Напряженные геосреды, блочно-иерархическое строение, очаг, катастрофическое событие, критерии прочности, энергетический подход, спектры волн маятникового типа, подземные выработки*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Общей тенденцией развития горнодобывающей промышленности в мире является увеличение объемов добычи полезных ископаемых и проведение горных работ на все более глубоких горизонтах, а также в усложняющихся горно-геологических и горно-технических условиях. В этой связи особую актуальность имеет решение проблемы обеспечения безопасного и эффективного ведения горных работ, освоения подземного пространства.

Следует отметить, что уже в настоящее время техногенная деятельность человека оказывает существенное влияние не только на локальные изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов горных пород в пределах обрабатываемых шахт и рудников, но и

---

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-05-00673а), партнерского интеграционного проекта СО РАН № 100 и проекта ОНЗ РАН-3.1.

провоцирует природные катастрофические события. Так, из данных исследований В. В. Адушкина и др. [1] следует, что потоки сейсмической энергии от взрывных работ в пределах Восточно-Европейской платформы (Россия) на 2–4 порядка выше потоков сейсмической энергии от природных землетрясений, регистрируемых на этой территории. Нередкими и весьма катастрофическими становятся и горно-тектонические удары (Североуральский бокситовый рудник, Кольский п-ов, Урал, Кемеровская обл. и др.) [2, 3].

Сложившиеся обстоятельства требуют комплексного подхода для определения реального воздействия техногенной деятельности человека на окружающую среду, а следовательно, осуществления непрерывного контроля за ее состоянием и эволюцией. Без этого невозможно реализовывать ни актуальные прогнозы, ни обоснованные меры профилактики катастрофических событий (техногенные землетрясения, горные удары, выбросы пород, угля и газа, внезапные обрушения налегающих толщ и др.).

Диагностика уровня критичности в состоянии контролируемых объемов массивов горных пород и прогноз катастрофических событий в горном деле, как показали современные экспериментальные и теоретические исследования, должны основываться прежде всего на учете реально существующего взаимодействия между глобальными геодинамическими и локальными геомеханическими полями в верхней части земной коры блочно-иерархического строения, где влияние от техногенной деятельности особенно значительно [1–3].

Без глубокого понимания механики и физики разрушения горных пород в “стесненных условиях” невозможно адекватно моделировать процесс формирования зон повышенной концентрации упругой энергии в массивах и последующего ее высвобождения в динамическом виде. А это понимание – экспериментальное в своей основе [4–7].

В свою очередь, полезность теоретических моделей оценивается их предсказательной силой, а не только способностью объяснять имеющиеся экспериментальные факты. В современной геомеханике для изучения процессов разрушения горных пород широко применяются геофизические и деформационные методы [8–10]. По известным причинам особая роль принадлежит сейсмическим методам.

Наработанный в течение ряда десятилетий экспериментально-теоретический опыт в “большой” сейсмологии активно используется ныне в современном “количественном мониторинге” на многих рудниках и шахтах России и мира для контроля сейсмоактивности массивов горных пород, индуцированной горными работами. Естественно, что накапливаемый здесь опыт исследований техногенной сейсмичности с опорой на уже функционирующие и все расширяющиеся сети наблюдений по горнодобывающим предприятиям вносит существенный вклад в методологические основы и методические приемы регистрации, обработки и интерпретации сейсмологической информации при геодинамическом районировании поверхности Земли с целью прогноза землетрясений, а также оценки градостроительного риска [1, 11].

В данном случае шахты и рудники рассматриваются как уникальные природные лаборатории, где можно одновременно и изучать, и моделировать ключевые для понимания сути (механизмов) формирующихся и реализуемых катастрофических событий разного энергетического уровня — очаговые зоны концентрации повышенных напряжений по их базовым характеристикам на протяжении полного деформационного цикла: от начала и локализации мест будущих динамических проявлений горного давления → через формирование “ядерной зоны” (начальной очаговой), достижения в ней стадии критичности по уровню напряжений → последующего ее развития во времени и окрестном пространстве → с завершающим этапом “квазиупругого восстановления” исходного напряженного состояния или последствия по всей области нелинейного влияния очаговой зоны произошедшего динамического события. Эти этапы

прослежены в работах [12, 13] в технологической привязке к системам обработки рудников Норильска и Таштагола. Аналогичные результаты получены и при обработке угольных месторождений Кузбасса [14].

Использование сейсмических волн в мониторинговых системах при необходимом качестве регистрируемой информации позволяет количественно описывать источники сейсмособытий, что способствует лучшему пониманию физических процессов, связанных с динамическими деформациями (скорость потери прочности и склонность массивов горных пород к состоянию неустойчивости). Обеспечение повышенной разрешающей способности сейсмического мониторинга дает возможность более точно отслеживать динамику напряженно-деформированного состояния породных массивов вокруг подземных выработок. Этому направлению исследований и технических разработок уделяется особое внимание в России и за рубежом.

Однако, как отмечает А. J. Mendecki [15], часто из-за ограниченного понимания сложности динамического поведения породных массивов и/или неадекватной информации сейсмическая опасность либо неверно оценивается, либо переоценивается время наступления состояния относительной стабильности. К тому же в настоящее время в шахтной “количественной сейсмологии” обычно используются только волновые формы с хорошо развитыми Р- и S-волнами (по их вступлениям) и достаточное отношение сигналов к помехам. При этом происходит слабое комплексирование больших объемов информации по контролируемым объектам и пренебрежение особенностями в развитии сейсмоземиссионных полей в ближней и переходной зонах от источников возмущения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород (взрывы, окрестности очистных забоев и т. п.). В качестве примера А. J. Mendecki отмечает, что на шахте Tau Tona Mine (на глубине ~3 км, ЮАР) используется высокоразрешающая ISS-микросеть из 5 трехкомпонентных акселерометров. При взрывном способе обработки панелей парами взрывов в кровле и почве с задержкой 200 мс и шагом проходки ~ 0.8 м из нескольких тысяч регистрируемых сейсмособытий в течение 5 дней лишь 1086 имели хорошо развитые признаки для идентификации продольных и поперечных волн.

В современных условиях только сейсмические методы позволяют дистанционно контролировать сложный процесс нелинейного изменения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород вокруг подземных выработок при обработке полезных ископаемых с очерчиванием зон возможных проявлений горного давления в деструктивных формах. В этом аспекте шахтный сейсмомониторинг традиционно ориентирован на оперативное получение базовой информации о сейсмособытиях в породном массиве: координаты, время инициирования, количество излученной сейсмической энергии и, нередко, сейсмический момент (как мера неупругого деформирования в “очаге”).

В сейсмологии анализ механизмов произошедших землетрясений ведется обычно в рамках весьма идеализированных представлений об излучении избыточной упругой энергии в виде сейсмических волн механическими диполями. Здесь основная роль принадлежит сдвиговому механизму релаксации упругой энергии в некотором объеме горной породы за счет возникновения “магистральной” трещины со сдвигом вдоль ее берегов либо за счет проскальзывания друг относительно друга берегов уже существующих в массиве трещин в виде, например, тектонических разломов. Эти представления в рамках механики трещин оказались полезными при оценке господствующего вида напряженно-деформированного состояния пород в очаговых зонах землетрясений на основе сейсмических записей по разным направлениям от гипоцентров.

Современный уровень геомеханики на базе теории трещин позволяет по записям сейсмособытий для некоторого объема массива горных пород, фиксируемых по заданной схеме наблюдений и в определенный период времени, оценивать такие важные механические параметры,

как значения сейсмодетформаций и их скоростей, относительные напряжения, сейсмическая жесткость, вязкость, время релаксации напряжений, а также числа Шмидта и Дебора, описывающие статистические свойства сейсмодетформаций [11, 15].

Весьма важные дополнительные возможности для описания процессов трещинообразования в формирующихся зонах повышенных напряжений с энергетических позиций дает кинетическая концепция прочности твердых тел С. Н. Журкова [16]. Со временем она получает широкое распространение, в том числе в геомеханике и геофизике [17, 18].

В данной работе в продолжение [19, 20] также уделяется большое внимание кинетической концепции прочности твердых тел не только потому, что она энергетическая в своей основе, но и потому, что позволяет “перекинуть мостик” к активно развиваемой ныне теории волн маятникового типа с довольно неожиданных позиций применительно к очаговым зонам катастрофических событий: их размерам, условиям формирования и динамического развития [21–23].

Естественно, что достаточно глубокое понимание условий и основных закономерностей формирования очаговых зон будущих катастрофических событий в реальных блочно-иерархического строения массивах горных пород для изменяющихся полей напряжений и деформаций, с учетом характера источников такого изменения, должно лежать в основе создания и функционирования соответствующих мониторинговых систем геомеханико-геодинамической безопасности промышленных объектов и инженерных сооружений [20].

Иными словами, должна существовать многопараметрическая обратная связь между контролируемыми природными объектами повышенного риска и обеспечивающими такой контроль мониторинговыми системами с опорой на главные (“методологические”!) влияющие факторы “самоорганизующихся” природных и техногенных комплексов [2, 3, 24]. Такой учет невозможен без создания нового уровня интеллектуально насыщенных мониторинговых систем, включающих качественный сбор и обработку комплексной горно-геологической, геомеханико-геодинамической и технологической информации по трем базовым геоинформационным слоям [20]: подземному, наземному и надземному. Развитие современных облачных геоинформационных технологий [25] позволяет уже в настоящее время формировать “интеллектуальную оболочку” для самых сложных мониторинговых систем разного назначения, в том числе и экологических, в режиме реального времени.

Таким образом, собственно структура организации и функционирования геоинформационной системы геомеханико-геодинамического мониторинга горнодобывающих предприятий должна учитывать специфику контролируемых объектов геосреды как открытых нелинейных самоорганизующихся природных геосистем с формирующимися определенным образом энергонасыщенными очаговыми зонами.

В современных условиях отмеченные тенденции и потребности изучения фундаментальных физико-механических процессов в очаговых зонах будущих катастрофических событий естественного и техногенного происхождения дали мощный импульс развитию соответствующих разделов нелинейной геомеханики и геофизики [1–3, 7, 26–28]. *По сути дела, акцентными по своей актуальности становятся “генетические” основы формирования очаговых зон разрушения горных пород в массивах сложного геологического строения.*

Несмотря на то что эта проблема в механике разрушения геоматериалов — “вечная” [4–6], важные феноменологические и теоретические предпосылки для ее решения разрабатываются до сих пор. Авторами предпринята попытка представить в систематизированном виде ряд достижений, в том числе полученных сравнительно недавно, для обоснования целесообразности развития нового подхода в решении ключевой проблемы — трансформации упругой энергии очаговых зон катастрофических событий в кинетическую энергию движения их структурных элементов.

С этой целью рассмотрим более подробно некоторые важные следствия существующих ныне представлений о блочно-иерархическом строении объектов геосреды по М. А. Садовскому [29, 30] в каноническом представлении В. Н. Опарина [31–33],\* теории волн маятникового типа [19–23], дальнего действия мощных взрывных воздействий в напряженных геосредах по М. А. Садовскому – В. В. Адушкину [34, 35] и кинетической концепции прочности твердых тел по С. Н. Журкову [16, 17] применительно к описанию механических процессов в очаговых зонах динамических проявлений горного давления и их размерам.

### **ЯВЛЕНИЕ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ РЕАКЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ И КАНОНИЧЕСКИЙ СПЕКТР ВОЛН МАЯТНИКОВОГО ТИПА В НАПРЯЖЕННЫХ ГЕОСРЕДАХ**

Аналитический обзор по открытиям нелинейной геомеханики и геофизики, их прикладной значимости достаточно подробно изложен в работах [19, 20]. В настоящее время они широко известны, а теория волн маятникового типа в последние годы активно развивается как у нас в стране, так и за рубежом. Эти геомеханические открытия в существенной мере опираются на концепцию акад. М. А. Садовского о блочно-иерархическом строении горных пород и их массивов [29, 30]. Для более точного количественного описания иерархического строения геоматериалов и породных массивов разрабатывается кластерный подход, основанный на существовании канонических рядов структурных отдельностей и сопряженных с ними амплитудно-периодных спектров геомеханических (деформационных) и геофизических полей — спектроскопический подход. Обобщение результатов в этом направлении исследований представлено в монографии [33].

Для изложения основного материала отметим лишь необходимые для этого ключевые положения из приведенных работ.

Начнем со структуры горных пород и их массивов (как одном из базовых понятий), количественная оценка которой необходима для динамико-кинематической характеристики любых геомеханико-геодинамических процессов в образах деформационных или геофизических полей.

Так, определить место различных горных пород в иерархически организованных процессах кластеризации геовещества можно, опираясь на достаточно универсальный закон “квантования” структурных отдельностей [33]:

$$\Delta_i = \Delta_0(\sqrt{2})^i, \quad \Delta_0 \cong 2.5 \cdot 10^6 \text{ м}, \quad (1)$$

$i \in N$  — целые положительные и отрицательные числа (порядок размерностей), либо  $\Delta_{i+1} / \Delta_i \cong \sqrt{2} \forall_i$ .

Как отмечено в [33], указанная в (1) связь несет глубокий методологический смысл, заслуживающий дальнейших исследований не только на экспериментально-статистическом уровне, но и с привлечением методов энергетического анализа. Далее будет показано, как использовать это соотношение для обоснования шага квантования сейсмоэнерговыведения, например для целей сейсмического районирования.

*Существенной особенностью знакопеременной реакции горных пород на мощные взрывные воздействия в геосредах явилось экспериментально обнаруженное их “дальнее действие” [34]: локальные механические проявления необратимого характера, как оказалось,*

\*В отличие от обычно используемых в естественных науках логарифмических представлений с основаниями 10, 2 или  $e$ , здесь используются безразмерные представления с применением логарифмов с основанием  $\sqrt{2}$  [33].

происходят до расстояний  $(8-10) \cdot R$ , где  $R$  — радиус зоны взрывного разрушения породы. Иными словами, в результате проведения многочисленных экспериментов установлено, что процесс деформирования массива горных пород имеет ярко выраженный неоднородный характер: деформации локализуются на поверхностях и в областях ослабления массива, а структурные блоки движутся в значительной мере независимо. При этом движение блоков имеет знакопеременный характер по трансляционным и вращательным компонентам.

Обнаружение явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия послужило экспериментальным доказательством того, что значительная доля энергии взрывов не только расходуется на дробление породного массива в очаговой зоне и ее непосредственной окрестности, но и передается в виде кинетической энергии структурным элементам напряженной геосреды [19].

Примечательно, что это фундаментальное направление исследований во многом связано с открытием явления зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок [36, 37], которое свидетельствует о наличии своеобразного закона “квантования геомеханической энергии” при образовании подземных выработок (полостей) в условиях больших глубин с коэффициентами “подобия” относительно их начального радиуса  $r_0$  в виде  $r_0(\sqrt{2})^n$ , где  $n$  — целые числа, а также сопряженного канонического ряда структурных отдельностей (1).

Очень важно и то, что установлена статистически инвариантная связь между “раскрытием” (среднее расстояние между берегами) трещин  $\delta_i$  в горных массивах и диаметрами отделяемых ими геоблоков  $\Delta_i$  различного иерархического уровня  $i$  [38]:

$$\mu_{\Delta}(\delta) = \frac{\delta_i}{\Delta_i} = \left( \frac{1}{2} \div 2 \right) \cdot 10^{-2} \quad \text{для любого } i. \quad (2)$$

Эта характеристика может использоваться для оценки “меры подвижности”  $v_{\Delta}(\delta)$  структурных элементов (блоков) в стесненных условиях массивов горных пород и фактически сопряжена с  $\mu_{\Delta}(\delta)$  [39]:

$$v_{\Delta}(\delta) = (10^{-2} \div 10^{-1}) \cdot \mu_{\Delta}(\delta). \quad (3)$$

Поскольку отделяющие геоблоки трещины всегда частично заполнены газом, жидкостью или более мелким фрагментированным твердым веществом, для реальных массивов горных пород достаточно часто можно использовать упрощенную связь:

$$v_{\Delta}(\delta) \sim 10^{-1} \cdot \mu_{\Delta}(\delta). \quad (4)$$

Следует подчеркнуть, что эмпирические формулы (1)–(4) позволили во многом объяснить количественно открытое в 80–90-е годы минувшего столетия явление знакопеременной реакции горных пород на взрывные (динамические) воздействия, а затем и предсказанные в рамках этого явления волны маятникового типа [19–20].

Существо этого явления заключается в том, что при образовании полостей внутри массивов горных пород посредством мощных взрывов в их окрестностях происходят смещения разных знаков между геоблоками, колебательное движение друг относительно друга, что обусловлено стесненным поворотом и трансляционным движением породных блоков разного иерархического уровня, зависящего от размеров образующихся полостей, горного давления и энергии взрывов [19].

Гипотеза о возможности существования в массивах горных пород нелинейных упругих волн маятникового типа, носителями которых являются не абстрактные математические “элементарные объемы”, а реальные структурные элементы геологического вещества в приближении “абсолютно твердых тел” впервые представлена в работе [21]. Для их регистрации и теоретического анализа в последнее десятилетие ведутся активные исследования и разработки в ряде институтов СО РАН в рамках интеграционных проектов [8 – 10].

Реальные значения структурных характеристик  $\mu_{\Delta}(\delta)$  и  $\nu_{\Delta}(\delta)$  в силу статистической природы (2), (3) зависят от вида напряженно-деформированного состояния горных пород и непосредственно учитываются в кинематическом выражении для волн маятникового типа. Простейшее “одномерное” представление для скорости распространения волн маятникового типа дано в работах [33, 40]:

$$\mathcal{G}_v = \frac{(1 + \nu[\sigma]) \mathcal{G}_\varepsilon \cdot \mathcal{G}_p}{\mathcal{G}_\varepsilon + \nu[\sigma] \mathcal{G}_p}, \tag{5}$$

где  $\mathcal{G}_v$  — скорость распространения маятниковой волны ( $\mu$ -волна);  $\mathcal{G}_p$  — скорость распространения продольной волны в геоблоках-носителях  $\mu$ -волны;  $\mathcal{G}_\varepsilon$  — средняя скорость трансляционного относительного движения “соударяющихся” геоблоков диаметра  $\Delta$ ;  $\nu[\sigma]$  — параметр  $\nu_{\Delta}(\delta)$  из (3), зависящий по  $\delta$  от действующих в массиве горных пород напряжений  $\sigma$ .

Характер такой зависимости на допредельной стадии деформирования горных пород можно аппроксимировать функциями параболического вида, например типа [40]:

$$\nu[\sigma] = \nu_0 \left[ 2 - \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^2 \right], \tag{6}$$

где  $\nu_0$  — минимальное значение параметра  $\nu_{\Delta}[\delta]$  из (3) при всестороннем сжатии до предела объемной прочности  $\sigma_0$ .

В общем случае тензорного аргумента  $\sigma$  выражение (6) приобретает векторный вид, когда проявляются волноводные свойства для маятниковых волн (по [40] — геомеханические волноводы): динамико-кинематические характеристики  $\mu$ -волн становятся зависимыми от направления к источнику излучения и его виду.

На рис. 1 приведена простейшая механическая модель блочной среды (движение кубических блоков одного размера без трения) для расчета скорости распространения маятниковой волны по (5) от силового воздействия  $F(t)$ , а на рис. 2 — расчетные кривые ее изменения в относительных единицах к скорости распространения продольных волн  $\mathcal{G}_p$  (известным образом определяется механическими модулями геоблоков-носителей  $\mu$ -волны) в зависимости от  $\mathcal{G}_\varepsilon$ . Этот скоростной параметр “соударения” геоблоков — вещественных носителей  $\mu$ -волн в приближении абсолютно твердых тел зависит от силовой  $F(t)$  — характеристики источника излучения  $\mu$ -волн.

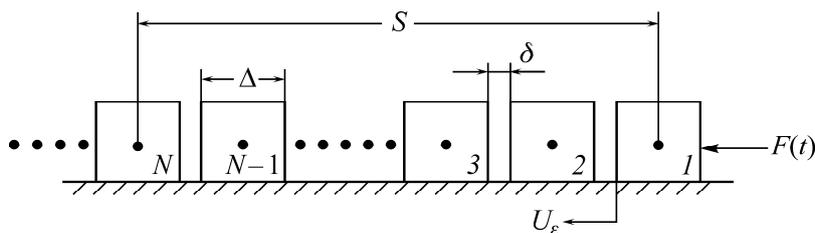


Рис. 1. Механическая модель [40] к расчету скоростной характеристики  $\mathcal{G}_v$  маятниковых волн

С учетом формулы (6) кривые на рис. 2 качественно иллюстрируют влияние напряженного состояния горных пород на скорость распространения маятниковой волны. Уменьшение значений структурного параметра  $\nu$ , которое происходит согласно (5) с ростом напряжений  $\sigma$ , ведет к значительному возрастанию скорости распространения маятниковой волны  $\mathcal{G}_\nu$ , вплоть до значений скорости распространения продольной волны (при  $\nu = 0$  среда с полностью сомкнутыми трещинами). Аналогичная тенденция роста скорости распространения маятниковых волн наблюдается по скоростному параметру  $\mathcal{G}_\varepsilon$ , что означает увеличение значений  $\mathcal{G}_\nu$  с возрастанием мощности источника их излучения (силового воздействия  $F(t)$ , рис. 1).

Экспериментальное доказательство отмеченных закономерностей, предсказанных теоретически в [39, 40], дано В. И. Востриковым методом физического моделирования, а В. Ф. Юшкиным — натурными измерениями в условиях рудника Таштагольский [41, 42].

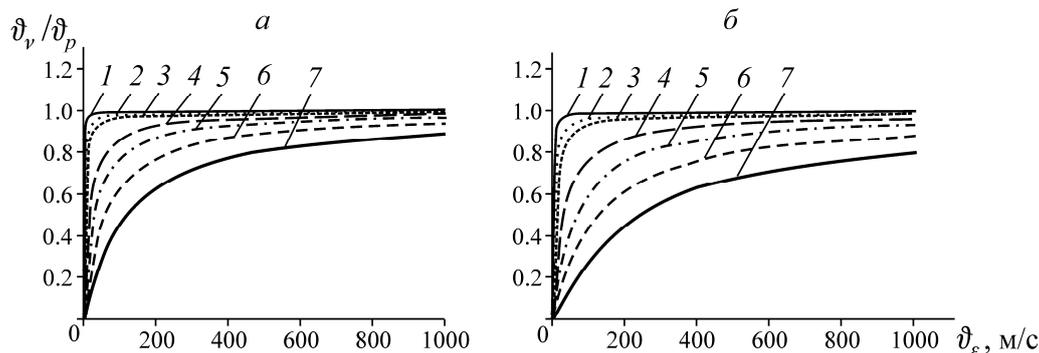


Рис. 2. Изменение скорости маятниковых волн в зависимости от  $\mathcal{G}_\varepsilon$  и скорости продольных волн при  $\mathcal{G}_p = 3000$  м/с (а) и  $\mathcal{G}_p = 6000$  м/с (б): 1 —  $\nu = 10^{-4}$ ; 2 —  $\nu = 5 \cdot 10^{-4}$ ; 3 —  $\nu = 10^{-3}$ ; 4 —  $\nu = 5 \cdot 10^{-3}$ ; 5 —  $\nu = 10^{-2}$ ; 6 —  $\nu = 2 \cdot 10^{-2}$ ; 7 —  $\nu = 4 \cdot 10^{-2}$  [39]

Отмеченные результаты позволяют говорить о следующих основополагающих фактах.

- Возможность поступательного и вращательного осциллирующих движений структурных элементов геоматериалов в стесненных условиях напряженных массивов горных пород (либо искусственно задаваемых напряжений на границах образцов горных пород) и, следовательно, обладания составными фракталами кинетической энергией.

- Существование волн маятникового типа позволяет моделировать их вещественные носители — структурные элементы соответствующего уровня (от субмолекулярного до фракталей, соизмеримых с источниками возмущения) как “соударяющиеся” сосредоточенные нелинейно упруго взаимодействующие массы.

- Спектральный состав упругих волновых пакетов для волн маятникового типа имеет канонический спектр [16, 17]:

$$f_i = (\sqrt{2})^i f_0, \quad i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

$$f_0 = \frac{\mathcal{G}_p}{2\Delta}, \quad (7)$$

$\mathcal{G}_p$  — скорость распространения продольной волны в геоблоке (структурном элементе) диаметром  $\Delta$ .

- Каноническая структура спектра маятниковых волн (7) естественным образом отражает достаточно универсальный закон “квантования” структурных отдельностей горных пород и геоматериалов и подстановка вместо  $\Delta$  в формулу (7) для базовой частоты  $f_0$  канонических размеров  $\Delta_j$  из (1) дает эмпирическое [43, 44] выражение для  $f_i$  из (7).

Это обстоятельство является принципиально значимым. Оно не следует из классической теории распространения продольных и поперечных упругих волн в континуальных средах. В рамках нелинейной теории волн маятникового типа соотношения (1) и (7) имеют важную методологическую основу для конструктивного “препарирования” амплитудно-периодного спектра внешних физических полей на принципе их обратной связи со спектром структурных отделистостей горных пород и геоматериалов. Здесь содержится мощный конструктивный потенциал для создания нетрадиционных технологий управления напряженно-деформированным состоянием горных пород, в том числе и в формирующихся очаговых зонах катастрофических событий. Существенным энергетическим “подспорьем” для этого может служить открытый в работе [45] эффект аномально низкого трения в блочных геосредах.

При анализе причин возникновения волн маятникового типа в [45] отмечен важный эффект достаточно резкого изменения коэффициента трения между взаимодействующими блоками из геоматериалов, находящихся в стесненных условиях, при определенных соотношениях между статическими и динамическими воздействиями на них.

Эксперименты проводились на двух моделях (рис. 3).

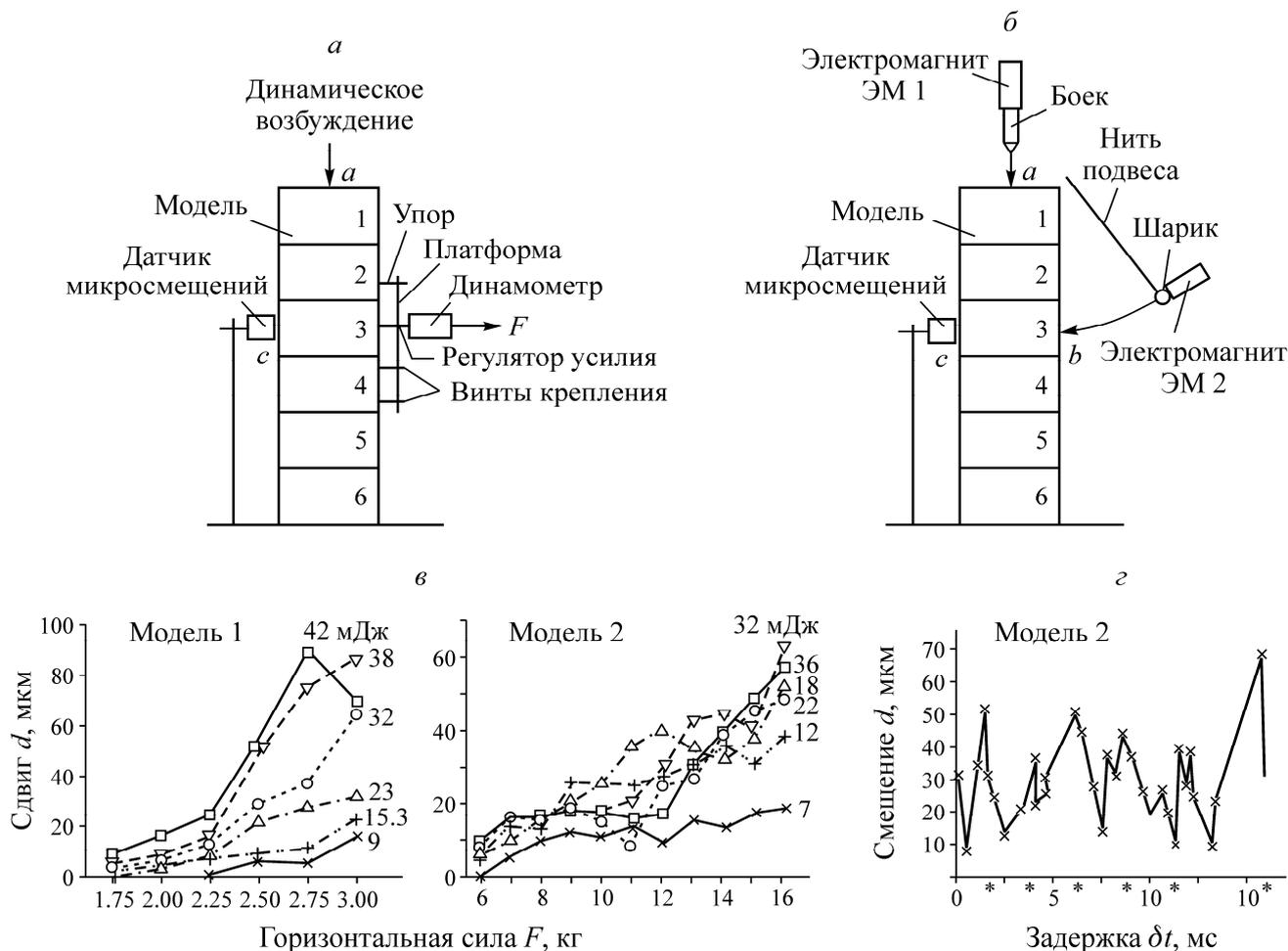


Рис. 3. Эффект аномально низкого трения в блочных средах [45]: пояснения в тексте

**Модель № 1** представляет собой вертикальную систему из шести блоков, выполненных из оргстекла размерами 250×125×85 мм и массой 3.25 кг каждый (рис. 3а).

**Модель № 2** — вертикальная система из шести блоков размерами  $250 \times 125 \times 85$  мм из силикатного кирпича массой 5.43 кг каждый. Скорости распространения продольных волн в блоках из оргстекла и силиката составили соответственно  ${}^1U_p = 2814$  и  ${}^2U_p = 2662$  м/с (рис. 3б).

Эксперименты проводились по двум схемам.

**Схема № 1:** изучение поперечной импульсной реакции блока № 3 в условиях статических горизонтальных усилий на этот блок и вертикального импульсного воздействия на поверхность блока № 1 (рис. 3а). Здесь к блоку № 4 при помощи винтов жестко крепится платформа с динамометром. В блоке № 3 имеется винт, который при помощи регулятора усилия соединяется с динамометром. Этим регулятором создается необходимое горизонтальное усилие для блока № 3 относительно блоков № 2 и № 4. Для исключения движения блока № 2 совместно с блоком № 3 служит упор на платформе. В точке *a* блока № 1 установлен по центру закаленный винт, который служит в качестве “точки” вертикального импульсного возбуждения.

Вертикальное импульсное воздействие осуществляется бойком из закаленной стали массой  $m = 82.71$  кг. Для задания различного уровня энергетического воздействия на блочную систему боек сбрасывался с разных высот по отношению к точке *a* блока № 1. С учетом величины отскока вычисляется доля кинетической энергии, передаваемой от сбрасываемого бойка в блоки.

**Схема № 2:** изучение поперечной импульсной реакции блока № 3 (абсолютные сдвиги) в условиях совместного действия горизонтального импульсного воздействия на блок № 3 (вместо статического горизонтального усилия в схеме № 1) и вертикального импульсного воздействия на поверхность блока № 1 (так же, как в схеме № 1). Схема эксперимента представлена на рис. 3б. В данном случае исключен регулятор усилия с динамометром. Динамическое горизонтальное возбуждение блока № 3 задается стальным шариком с  $m = 226.9$  г, подвешенным на нити подвеса. Меняя угол отклонения шарика, можно изменять очевидным образом энергию импульсного горизонтального возбуждения. В точке *b* блока № 3 установлен такой же винт, что и в блоке № 1, который служит “точкой” горизонтального импульсного возбуждения. Электромагниты ЭМ-1 и ЭМ-2 удерживают боек и стальной шарик в исходном состоянии и управляются специальной схемой временной задержки, которая задает задержку во времени  $\Delta t$  между началом свободного падения бойка и началом движения стального шарика, т. е. между вертикальным и горизонтальным импульсными возбуждениями.

Для примера на рис. 3в представлены зависимости поперечных смещений блока № 3 при совместном действии статического горизонтального усилия  $F$  и вертикального импульса энергией  $W$  для моделей № 1 (оргстекло) и № 2 (силикат), цифры у кривых — энергия удара (мДж). На рис. 3г — зависимости поперечных смещений блока № 3 от интервала задержки вертикальных и горизонтальных импульсных воздействий при  $W_b = 73$  мДж и  $W_r = 106$  мДж.

Выполненные в [45] эксперименты показали:

- При совместном действии статической горизонтальной силы  $F$  на работающий блок и вертикального импульсного воздействия с энергией  $W_b$  на блочную систему, включающую этот блок, горизонтальные (поперечные по отношению к  $W_b$ ) смещения последнего происходят при значениях  $F$ , много меньших  $F^0$  — пороговой величины статической горизонтальной силы по преодолению трения покоя работающего блока в стесненных условиях, и  $W_b = 0$ .

- Общими свойствами для поперечных смещений  $d$  работающих блоков из различных геоматериалов являются:

— практически монотонное возрастание смещений  $d$  по мере увеличения энергии вертикального импульса  $W_B$  при фиксированных горизонтальных усилиях  $F$ ;

— зависимость, близкая к параболической, возрастания сдвиговых значений по  $d$  мере увеличения горизонтальных усилий  $F$  при фиксированных  $W_B$ .

• Имеют место аналогичные отмеченным свойства поперечных смещений  $d$  работающих блоков и для условий совместного действия вертикального (на блочную систему) и горизонтального (на работающий блок) импульсных возбуждений, но при непременном выполнении канонического по модулю  $(\sqrt{2})^i$  соотношения интервалов задержки  $\delta t_i$  между ними:

$$\delta t_i = (\sqrt{2})^i \delta t_0, \quad i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots; \quad \delta t_0 = \frac{\chi \cdot \Delta}{g_p}, \quad \chi = (\sqrt{2})^9 \cong 22.63, \quad (8)$$

где  $\Delta$  — характерный линейный размер работающих блоков;  $g_p$  — скорость распространения продольных волн в геоматериалах блоков  $\Delta$ .

Эксперименты по применению этого эффекта в технических (буровых) системах показали его высокую энергетическую эффективность [46, 47]. Оригинальный подход к использованию эффекта аномально низкого трения в геосредах демонстрируют зарубежные ученые. Например, в работе [48] этот эффект рассматривается как один из ключевых для объяснения катастрофических горных ударов на угольных месторождениях Китая.

Таким образом, рассматривая “физические поля” (в первую очередь нелинейные деформационно-волновые, акустические и электромагнитные) в процессах нагружения горных пород и геоматериалов до разрушения, следует иметь в виду, что они оказываются сопряженными относительно их амплитудно-периодных спектров к иерархии структурных отдельностей геовещества по типу зависимостей (1) и (7). Экспериментально установлено, что на заключительной стадии нагружения образцов горных пород и в очаговых зонах перед их разрушением эти физические поля приобретают квазирезонансный вид [49, 50].

#### О ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОМ КОЭФФИЦИЕНТЕ “АКУСТИЧЕСКОЙ РАДУГИ” И СПЕКТРЕ ВОЛН МАЯТНИКОВОГО ТИПА

В последние годы в связи с активным развитием теории волн маятникового типа в напряженных геосредах блочно-иерархического строения стало формироваться новое направление исследований, относящееся к очаговым зонам катастрофических событий (землетрясений, горных ударов и др.) — “**геомеханическая термодинамика**” [23]. В известном смысле это аналог классической термодинамики, если вместо отдельных молекул вещества геоматериалов будем рассматривать их большие кластеры (от субмолекулярных до макроблоков), учитывая возможность колебательных (поступательных и вращательных) движений последних в приближении абсолютно твердых тел. Этот “постулат” лежит в феноменологических основах теории волн маятникового типа, вещественными носителями которых являются структурные элементы горных пород и их массивов разного иерархического уровня [19–23].

В работе [51] предложена механическая модель “самонапряженных” массивов горных пород, где механические условия взаимодействия между структурными элементами горных пород в стесненных условиях заменены нелинейными “пружинками” разного иерархического уровня по типу вложения одного в другой (согласно концепции М. А. Садовского [29, 30]). Эта механическая модель позволила объяснить наблюдаемые в эксперименте [52] особенности эволюции гармонических акустических сигналов при нагружении блочных сред с цилиндрической плоскостью (моделирующей “концентратор” напряжений или будущую “очаговую” зону), такие как:

— существование устойчивой корреляционной связи между стадиями нагружения среды со структурой и амплитудно-частотными характеристиками гармонических сигналов, регистрируемых в ее составных блоках;

— частоты резонансных акустических колебаний в блоках модели, существенно различающиеся между собой на начальных этапах нагружения, проявляют конвергенцию друг к другу на стадии предразрушения;

— на стадии предразрушения блочной модели геосреды отмечается не только схождение резонансных частот по системе составляющих ее геоблоков, но и усиление амплитуды гармонических сигналов за счет перехода накопленной упругой (потенциальной) энергии структурными элементами в колебательную (кинетическую) энергию излучения акустических волн, с нарушением классического закона затухания гармонических сигналов от источников их излучения.

*Впервые экспериментально установлено, что моделируемая “очаговая зона” будущего разрушения горных пород способна эволюционировать в акустически активную геосреду, работающую на критических уровнях нагружения как автоколебательная или своеобразная “геомеханическая лазерная система”.* В отличие от классических оптических лазерных систем, она не является обязательно монохроматической (!): акустический спектр излучения приобретает дискретно-каноническую форму (7).

Примечательно, что согласно [52] спектральное наполнение упругих волновых пакетов волн маятникового типа связано с базовой частотой  $f_0$  и сопряженными с ней неклассическими инфразвуковыми модами  $\hat{f}_0$  и  $f_\mu$ , определяемыми по формулам

$$\hat{f}_0 = \chi^{-1} \cdot f_0, \quad f_\mu = \chi^{-1} \cdot \hat{f}_0 = \chi^{-2} \cdot f_0, \quad (9)$$

$$\chi = (\sqrt{2})^9 \approx 22.63.$$

Коэффициент  $\chi$  получил название “коэффициента акустической радуги” по аналогии с электромагнитной — с известной последовательностью цветового окраса по длинам волн, но для упругих волн применительно к их акустическому спектру.

В работе [32] подобного рода “радужная структура” обнаружена в натуральных экспериментах по изучению характера распределения по линейным размерам геоблоков обнажений гранитного массива в условиях его разработки в карьерах. В данном случае этот коэффициент характеризует особенности кластеризации структурных элементов массивов горных пород на разных иерархических уровнях.

В [53, 54] обоснована первая простейшая механико-математическая модель для описания условий возникновения канонического спектра акустических волн в предположении о том, что жесткость взаимодействия между структурными блоками (“пружинок”) является функцией параболического типа для их относительных смещений.

#### **КРИТЕРИЙ “СХЛОПЫВАНИЯ” ПОДЗЕМНЫХ ПОЛОСТЕЙ (ВЫРАБОТОК) В НАПРЯЖЕННЫХ БЛОЧНЫХ МАССИВАХ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ДАННЫМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

В работе [55] предложена новая концепция перехода от карт нарушенности массивов горных пород, построенных по данным геофизического каротажа, к прогнозным картам устойчивости подземных выработок. Здесь основополагающей является идея [56] о том, что линейные размеры структурных элементов горного массива, входящих во взаимодействие под влиянием

очистных работ, определяются при заданном уровне горного давления масштабом отработанных пространств. Более конкретно эта идея сформулирована в работе [57], где предполагается, что устойчивость подземных выработок обусловлена именно соотношением линейных размеров (диаметром) “работающих” геоблоков  $\Delta$  массива горных пород, соизмеримых либо меньших характерных размеров подземных полостей, к диаметру  $D$  последних, а также уровнем горного давления  $\gamma H$  и коэффициентом сцепления  $K$  между “работающими” блоками.

Для проверки данной идеи в [55] на примере “плоской” модели выполнен эксперимент по изучению процесса потери устойчивости блочных массивов вокруг горных выработок в зависимости от перечисленных выше факторов влияния ( $D/\Delta$ ,  $\gamma H$ ,  $K$ ). При изготовлении “плоских” моделей использовалась водопесчано-цементная смесь в пропорциях, позволяющих в масштабе 1:100 получить такие характеристики, как прочности образцов на одноосное сжатие, растяжение и на изгиб, соответствующие аналогичным физико-механическим показателям “сплошных” медно-никелевых руд средней степени трещиноватости рудника Октябрьский (г. Норильск).

Моделирование проводилось по известной методике [58]. Контактные условия между структурными элементами (блоками геоматериала) изменялись с помощью оставления “целичков” различных размеров при изготовлении модели. Коэффициент сцепления между блоками измерялся в долях (или процентах) от коэффициента сцепления для используемого геоматериала, который определялся по отношению площади ненарушенного “целичка” между блоками к полной площади.

В эксперименте коэффициент сцепления между блоками изменялся в диапазоне  $(0.10 - 0.25)K_{\text{сц}}$ . Это соответствовало условиям от “плохих” до “средних” относительно сцепления между структурными блоками породного массива с точки зрения его устойчивости вокруг подземных выработок.

Общий вид модели с выработкой прямоугольной формы приведен на рис. 4. Одноосное нагружение модели с боковым подпором осуществлялось с помощью гидравлического насоса и резиновой оболочки, заключенной в металлическую обойму и помещенной на верхний край модели. Фотографированием фиксировались различные стадии нагружения и потери устойчивости блочного массива вокруг выработки, а давление в резиновой оболочке измерялось с помощью манометра. Нагружение выполнялось как ступенями, так и непрерывно с медленной скоростью [55].

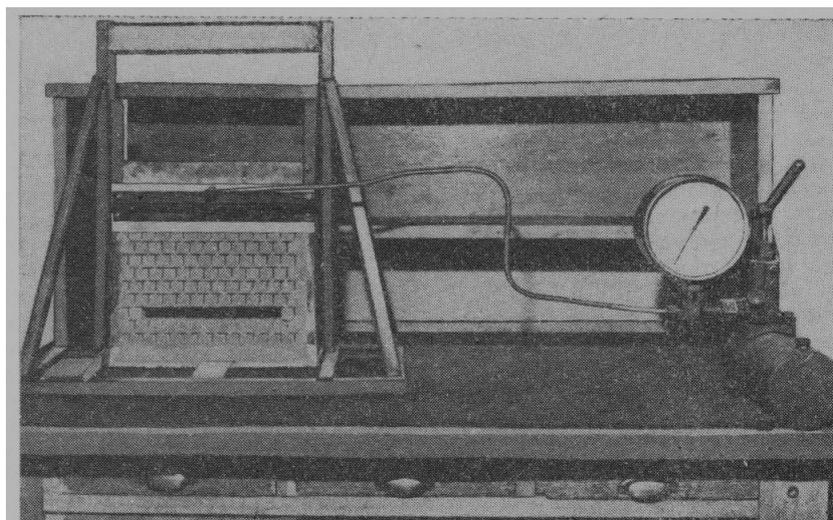


Рис. 4. Общий вид модели блочного массива из эквивалентного материала с фиксированными связями между блоками и выработкой прямоугольного сечения [55]

Изучалась зависимость между соотношением среднего размера  $\Delta$  структурного блока кубической формы (для различных  $\Delta$ ) и поперечного размера  $D$  выработки прямоугольного сечения и механическими параметрами (напряженное состояние, прочность геоматериала, контактные условия на поверхностях взаимодействующих блоков). Результаты такого моделирования представлены на рис. 5.

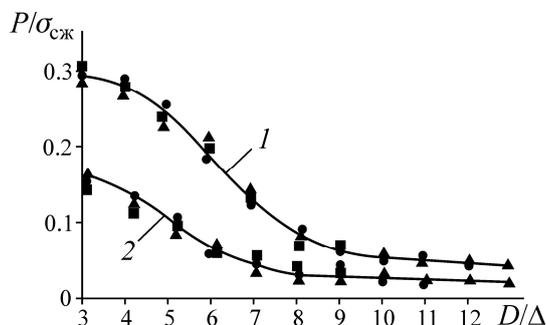


Рис. 5. Изменение разрушающей нагрузки в блочной модели массива в зависимости от соотношения между средним размером структурного блока  $\Delta$  и поперечным размером выработки  $D$  и от коэффициента сцепления между взаимодействующими блоками: 1 —  $K_{сц,б} = 0.25K_{сц,м}$ ; 2 —  $K_{сц,б} = 0.1K_{сц,м}$  [55]

При определенных значениях  $D/\Delta$  разрушающая нагрузка  $P_*$  очень мала: составляет  $\sim 5\%$  от прочности  $\sigma_{сж}$  геоматериала структурных блоков и почти не меняется при увеличении  $D/\Delta$ . На рис. 5 это “граничное” значение  $D/\Delta$  зависит от  $K_{сц}$  между блоками и оценивается величинами порядка 9–10 для  $K_{сц,б} = 0.25K_{сц,м}$  и 7–8 для  $K_{сц,б} = 0.1K_{сц,м}$  ( $K_{сц,б}$  — коэффициент сцепления между структурными блоками,  $K_{сц,м}$  — геоматериал блока).

При этих значениях  $D/\Delta$  зависимости изменяются наиболее интенсивно, что характерно для  $D/\Delta \in 5-8$  при  $K_{сц,б} = 0.25K_{сц,м}$  и  $D/\Delta \in 3-6$  при  $K_{сц,б} = 0.1K_{сц,м}$ . Для случая  $K_{сц,б} = 0.25K_{сц,м}$  можно выделить своеобразную “переходную зону”: при  $D/\Delta \in 3-5$  для процесса “схлопывания” выработки требуются нагрузки  $P_*$  около 30% от предела прочности геоматериала структурного блока  $\sigma_{сж}$ . В данных условиях оказывается, что величина разрушающей модели нагрузки находится в определенной связи с коэффициентом сцепления между структурными блоками:

$$\frac{K_{сц,б}}{K_{сц,м}} \approx \frac{P_*}{\sigma_{сж}}, \quad (10)$$

где  $P_*$  — разрушающая нагрузка.

Общий анализ полученных экспериментальных данных с учетом [55] позволил сделать следующие выводы:

- Условно выделяются три стадии изменения отраженных на рис. 5 зависимостей:
  - стадия “устойчивого состояния” моделируемого блочного массива вокруг выработки — для  $D/\Delta \in 4-5$ ;
  - стадия “средней устойчивости” — для  $D/\Delta \in 6-8$ ;
  - стадия “неустойчивого состояния” блочного массива вокруг выработки (“схлопывания”) — для  $D/\Delta \geq 8-9$ .

• Разрушающая нагрузка  $P_*$  во всех приведенных случаях зависит от контактных условий между взаимодействующими блоками (“работающими”). Для “схлопывания” классифицируемых как “устойчивые выработки” в блочных массивах требуется нагрузка, близкая к прочности геоматериала структурных элементов ( $\sim \sigma_{сж}$ ).

Таким образом, для широкого диапазона практически значимых геомеханических условий образования полостей в напряженных массивах горных пород блочного строения отношение  $D/\Delta$  в диапазоне значений 7–9, согласно рис. 5, может рассматриваться как критериальное по условию их “схлопывания” (разрушения).

Так, в случае, когда диаметр очаговой зоны динамического проявления горного давления примерно равен размеру выработки  $D$ , и используя в качестве оценочного критерия “схлопывания” (а по существу — кратковременного высвобождения значительной доли накопленной упругой энергии) соответствующего очагового объема величину

$$\frac{D}{\Delta} \approx 8, \quad (11)$$

нетрудно оценить размер “работающих” блоков  $\Delta$  — носителей маятниковых волн за счет их относительных поступательных и вращательных движений, в том числе осциллирующего вида

$$\Delta \approx \frac{D}{8}. \quad (11^*)$$

Для многообразия реальных геомеханических условий проведения подземных горных выработок объемный критерий устойчивости следует строить на аналитических  $f$ -зависимостях, типа представленных на рис. 5, например:

$$f\left(\frac{D}{\Delta}, \frac{P}{\sigma_{сж}}, \frac{K_{сц.б}}{K_{сц.м}}\right) \in [\alpha, \beta], \quad (12)$$

где  $1 < \alpha, \beta \leq 9$ ,  $\alpha < \beta$ .

Кроме того, описанный эксперимент дает еще важный количественный прогноз о возможном соотношении между размерами очаговых зон кратковременной релаксации упругой энергии  $\hat{\Delta}$  и окрестной области его “нелинейного” влияния  $\hat{D}$  в объемном представлении. Для этого достаточно заменить в формулах (11), (12)  $D$  на  $\hat{D}$  и  $\Delta$  на  $\hat{\Delta}$ .

В этой связи, наряду с данными о дальнедействии подземных взрывов по М. А. Садовскому–В. В. Адушкину [34, 35], представляет интерес работа [12], посвященная оригинальному методу сканирования шахтной сейсмологической информации на примере ее долговременной регистрации в условиях отработки Таштагольского железорудного месторождения камерными системами с обрушением крупномасштабными технологическими взрывами.

#### **ВЕРИФИКАЦИЯ КРИТЕРИЯ “СХЛОПЫВАНИЯ” ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ ИХ ОБРАЗОВАНИИ КРУПНОМАСШТАБНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ВЗРЫВАМИ ПО ДАННЫМ О НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ**

В работе [12] обобщен опыт натурных геомеханических исследований по Таштагольскому руднику, где отмечено, что по мере увеличения глубины отработки железорудного месторождения, начиная с определенных горизонтов, наблюдаются динамические проявления горного давления по возрастающей энергетической шкале: от слабых стреляний, толчков, микроударов, горных ударов и до техногенных землетрясений. В системах регионального контроля за дест-

руктивными проявлениями горного давления важное место принадлежит шахтным микросейсмическим наблюдениям, которые проводятся на ряде месторождений страны. Главная задача таких наблюдений — прогнозирование удароопасных ситуаций с целью своевременного принятия мер по обеспечению безопасного режима работы рудника. Шахтные микросейсмологические системы во многом копируют опыт организации глобальных сейсмологических наблюдений, но с привязкой к шахтным условиям. В качестве условий могут выступать не только размеры охватываемого наблюдениями объекта (шахтное поле, горизонт и т. п.), но и объем априорной информации о последнем, который, как правило, имеет тенденцию к постоянному возрастанию (например за счет получения дополнительных данных о структуре массива и физико-механических свойствах пород при проходке новых горных выработок, геомеханических измерений и т. д.).

В работе [12] приведены также некоторые результаты применения такого рода данных достаточно общего свойства с целью развития методов геомеханической интерпретации геофизических параметров применительно к шахтным микросейсмологическим системам прогнозирования горных ударов, где им принадлежит ключевая роль.

Для задаваемого (управляемого) просмотра зарегистрированной шахтной микросейсмологической информации (координаты источников динамических проявлений, время, энергия) по шахтному полю Таштагольского месторождения используется функционирующая в соответствующем режиме с 1987 г. сейсмическая станция.

Согласно явлению знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия, большая доля энергии, например взрывов, может передаваться блокам геоматериалов различного иерархического уровня, приводя последние в поступательное и вращательное движение, а также обуславливая появление индуцированной сейсмоактивности блочных сред за счет соударения геоблоков [19, 57]. В результате лоцируемые источники динамических проявлений различного энергетического уровня имеют высокую корреляционную связь с границами соударяемых геоблоков соответствующего ранга. Особенно четко эта связь наблюдается по мере углубления отрабатываемых горизонтов залежей полезных ископаемых — с ростом литостатического давления. Так, для Таштагольского железорудного месторождения с ярко выраженной блочной структурой типа вложения [29, 30, 33], находящегося в Алтае-Саянском регионе повышенной сейсмической активности, динамические проявления наблюдались с глубины 300 м в форме стреляний, а с глубины 600 м и более — в виде толчков, микроударов и горных ударов. При этом большинство (~99%) горных толчков приурочивалось к местоположению известных крупных тектонических нарушений, тектонических трещин, даек, контактов пород и руд.

Отработка запасов руд на месторождении проводилась системой этажно-принудительного обрушения (рис. 6), предусматривающей разделение рудного тела на этажи высотой 70 м, которые делятся на панели шириной 27 м, причем длина панели равна мощности рудного тела. Технологические блоки (средний размер  $27 \times 70 \times 60 \text{ м}^3$ ) обрушают массовыми взрывами с применением пучков сближенных скважинных зарядов взрывчатых веществ (ВВ) на зажимающую среду и компенсационные камеры. На основе микросейсмического, электрометрического методов, а также методов глубинных реперов и дискования керн за период 1988–1992 гг. было установлено, что большое влияние на геомеханическую обстановку на месторождении оказывает производство массовых взрывов (расход ВВ на отбойку блока колеблется от 115 до 300 т, что соответствует взрывам с энергией до  $\sim 10^{12}$  Дж), приводящих к перераспределению напряжений в горном массиве как в масштабе шахтного поля, так и за его пределами.

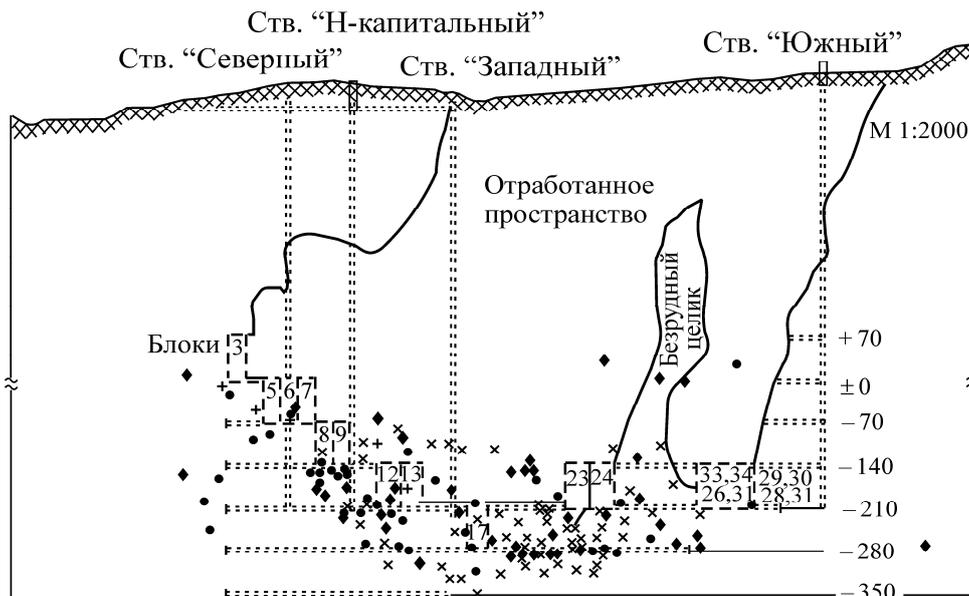


Рис. 6. Вертикальная проекция Таштагольского месторождения и динамические проявления, произошедшие после массовых взрывов по технологическим блокам [12], на начало 90-х годов минувшего века: ♦, ×, ● — очаги динамических явлений

Для контроля за особенностями развития этих процессов и с учетом изложенных геомеханических соображений в качестве сканирующих функций по массиву исходной сейсмической информации использовались следующие выражения:

$$r_E(t, \tau) = \frac{\sum_{i=0}^{N(t, \tau)} r_i E_i}{\Omega(\sum_{i=0}^{N(t, \tau)} E_i)}, \tag{13}$$

$$V_\varepsilon(t, \tau) = \frac{d}{dt} r_E(t, \tau) \text{ в дискретном представлении,} \tag{14}$$

где  $E_i$  — энергия  $i$ -го динамического события, зарегистрированного сейсмостанцией в промежутке времени  $[t - \tau, t]$  после взрывания заданного технологического блока с координатами центра  $(x_0, y_0, z_0)$  в декартовой системе координат в момент  $t_0$  ( $t \geq t_0 + \tau$ );  $N(t, \tau)$  — число зарегистрированных событий за заданный временной интервал  $\tau$ ;  $r_i = [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2]^{1/2}$ ,  $(x_i, y_i, z_i)$  — координаты  $i$ -го динамического события; функция  $\Omega(x)$  определяется соотношением

$$\Omega(x) = \begin{cases} 1, & x = 0, \\ x, & x \neq 0. \end{cases} \tag{15}$$

При достаточно большой выборке статистических данных приведенные формулы можно использовать и по координатно, что позволяет учесть как элементы анизотропии собственных свойств массивов горных пород, так и неизометричность образуемых подземных полостей. Формулы (13) и (14) можно интерпретировать соответственно как положение приведенного центра индуцированного сейсмоэнерговыведения массивов горных пород относительно эпицентра взрывного воздействия на заданный момент времени  $t$  и скорость его смещения (по аналогии центра масс).

Оценка влияния массовых взрывов на динамические проявления горного давления проводилась по записям толчков с энергией  $E \geq 10^2$  Дж сейсмостанцией “Таштагол” в результате отработки ряда блоков центральной, южной и северной частей месторождения в этажах –70–210 м: для центральной части — блоки 112 (сл. 1), 12, 22, 23, 13–113; для южной части — блоки 32 (сл. 1), 32, 27–28, 30–30, 33–34, 31–31 и др.; для северной части — блоки 6, 7, 8, 10. На рис. 6 северный и южный фланги выделены в силу их симметрии относительно осей взрывааемых блоков, ориентированных с запада на восток.

Динамические проявления, индуцированные массовыми взрывами, происходили в основном на расстояниях  $\sim 30$  — 760 м от центров взрывааемых блоков в интервале времен от 1 мин до 128 ч с энергией в пределах  $10^2$ – $10^6$  Дж (преимущественно  $\sim 10^4$  Дж). При этом на северном фланге месторождения после взрывов происходят динамические явления с энергией  $\sim 10^5$ – $10^6$  Дж; а в центральной части и на южном фланге сначала происходят динамические явления с энергией  $\sim 10^2$ – $10^4$  Дж, которые с постепенным во времени нарастанием переходили в толчки с энергией  $\sim 10^4$ – $10^6$  Дж.

На рис. 7а показано характерное изменение во времени  $t$  расстояния очагов динамических проявлений от центра взрывааемых блоков (на примере технологического блока 17, этаж –210 ... –280 м) в соответствии со сканирующей функцией (13) для  $\tau = 5$  ч и шагом дискретизации по  $t$ , равным  $\tau$ . Если построить гистограмму распределения ординат экспериментальных точек сканирующих функций (13) для всех взорванных блоков, то получается полимодальная кривая распределения с практически равноотстоящими на 10 м друг от друга максимумами (рис. 7 б, общая ось ординатных проекций обозначена  $L$ ), что соответствует диаметру “работающих” блоков: наибольших по размеру блоков пород в структурной иерархии рудного массива, преимущественно реагирующих на производимые взрывы. Рис. 7а позволяет выделить главную особенность поствзрывной сейсмоактивности: наличие “возвратно-поступательного” движения сейсмоисточников во времени с двумя преобладающими фазами — удаления от эпицентра взрыва индуцированных толчков до некоторого предельного расстояния и возвращения их к “исходным позициям”.

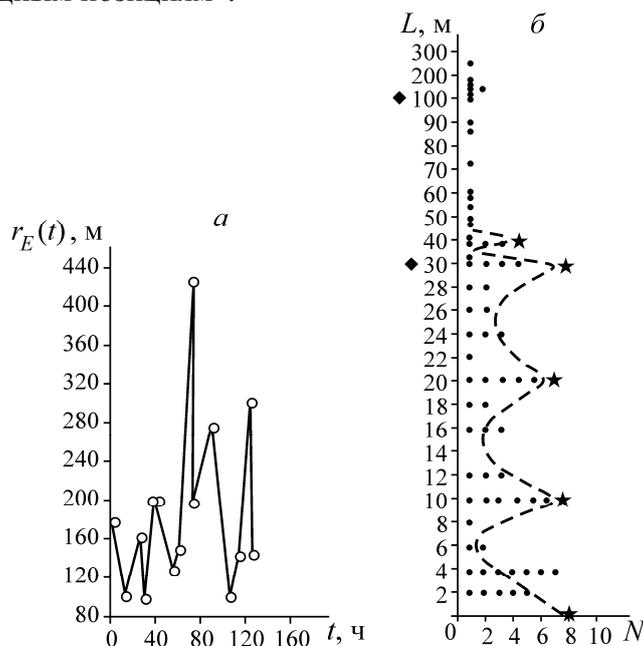


Рис. 7. Характерное изменение во времени расстояния до очагов индуцированных сейсмособытий от центра взрывааемых блоков (а) и гистограмма распределения ординат экспериментальных точек сканирующих функций  $r_E(t, \tau)$  для совокупности взорванных блоков (б) при  $\tau = 5$  ч [12]

Учитывая неоднородность по объему выборки данных о сейсмолочках для различных взорванных блоков, с целью проверки регулярности подмеченных особенностей движения толчков во времени и пространстве построена сканирующая функция (13) для всей совокупности динамических проявлений, зарегистрированных от взорванных блоков, для  $\tau = 15$  ч и шагом дискретизации по  $t$ , равным 5 ч. Результаты представлены на рис. 8, из которого следует не только справедливость гипотезы волнового движения источников индуцированной сейсмичности, но и существование для них “отражающих” горизонтов.

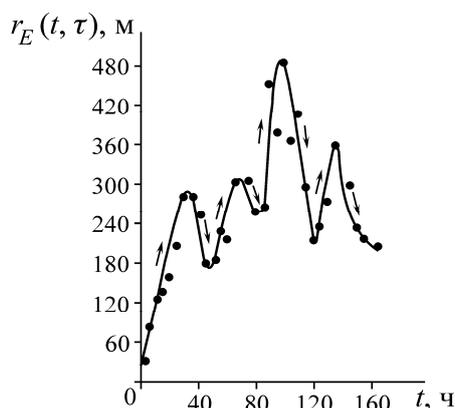


Рис. 8. Траектория движения очагов сейсмозергвыделения во времени от массовых взрывов при обработке Таштагольского месторождения (обобщенный график) при  $\tau = 15$  ч [12]

Данные построения второй сканирующей функции (14) позволили оценить изменение модуля скорости движения сейсмолочков в рассматриваемом временном интервале (рис. 9а) и их скоростную дисперсию (рис. 9б). Как оказалось, среднее значение скорости  $\bar{V}_\varepsilon(t, \tau) \approx 25$  м/ч, что в пересчете на годовую единицу времени составляет примерно 220 км/год. Здесь определенные аналогии просматриваются с известными результатами в области сейсмологии [59–61].

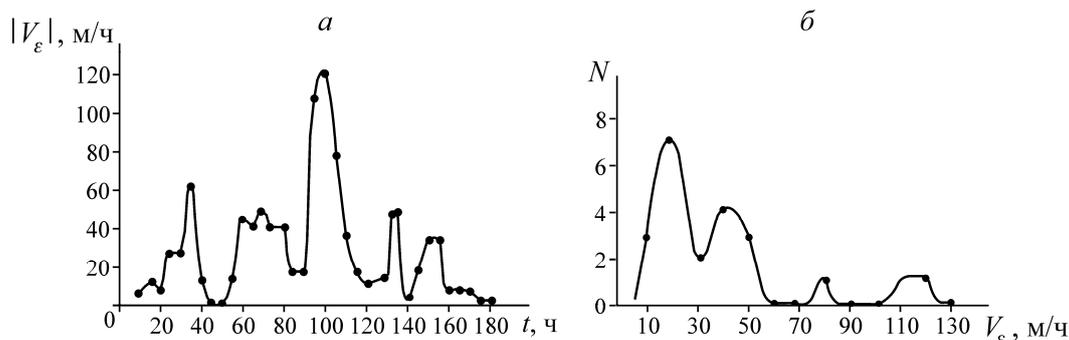


Рис. 9. Изменение модуля скорости движения источников сейсмозергвыделения со временем (а) и ее дисперсия (б) [12]

По-видимому, впервые К. Моги [62], а затем и Ш. А. Губерман [60] обратили внимание на любопытный факт мигрирующих последовательностей землетрясений, сопутствующих крупному землетрясению. В. В. Жадин в ряде своих работ (например, [61]) на основании анализа пространственно-временных соотношений сейсмических процессов, связанных с планетарными землетрясениями, выделил так называемые миграционные циклы, характеризующиеся центробежным распространением круговых фронтов индуцированной сейсмичности от некоторой

начальной точки, называемой полюсом миграционного цикла. Скорость распространения этих фронтов оценивается постоянной величиной в пределах от 185 до 215 км/год. Автор считал, что наблюдаемые закономерности возникновения землетрясений обусловлены некими полиморфными переходами в горных породах за счет их активизации энергией (?), распространяющейся с миграционным фронтом.

Близость полученных в [12] данных и оценок скоростей движения источников индуцированной планетарной сейсмичности [61] позволяет утверждать, что в основе рассматриваемого круга явлений лежит эффект знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия, а уровень излучаемой энергии определяется, с одной стороны, массой геоблоков и скоростью их “соударения”, а с другой — запасенной геоблоками потенциальной энергией, способной достаточно быстро высвободиться при их относительном проскальзывании.

Выражения (13), (15) аналогичны по своему представлению для понятия центра масс в механике. Нетрудно видеть из рис. 7 и 8, что основная часть зарегистрированных сейсмособытий охватывает сферическую зону радиусом  $\hat{D}/2 \approx 300$  м при радиусе “обобщенной” камеры  $\hat{\Delta}/2 \approx 35$  м. Следовательно, имеем  $\hat{D}/\hat{\Delta} \approx 8.6 \approx 9$ . Эта величина практически попадает в диапазон оценки по критерию “схлопывания” подземных полостей (12).

При этом следует отметить, что рис. 8 дает представление не только о размерах зоны нелинейного влияния очага взрывного разрушения породных массивов, но и о длительности процесса “квазиупругого” восстановления пород в его окрестностях (в данном случае полный цикл от возмущения массива до “квазивосстановления исходного состояния” длится не менее 140 ч).

#### **О СВЯЗИ МЕЖДУ КОНЦЕНТРАЦИОННЫМ КРИТЕРИЕМ ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПО С. Н. ЖУРКОВУ, СПЕКТРАЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ВОЛН МАЯТНИКОВОГО ТИПА И КРИТЕРИЕМ “СХЛОПЫВАНИЯ” ПОДЗЕМНЫХ ПОЛОСТЕЙ**

В данном разделе отметим в качестве дополнения к выше отмеченным фактам связь активно развиваемой в последние годы теории волн маятникового типа с некоторыми феноменологическими следствиями кинетической концепции прочности твердых тел по С. Н. Журкову [16, 17]. Речь идет о возможности описания возникновения канонического по [33] спектра волн маятникового типа и введенным в работе [52] понятием “*акустической радуги*”, но уже с иных позиций. Это обстоятельство весьма важно и с проблемно-постановочных позиций, отраженных в [63]: “*К наиболее перспективным ... можно отнести потенциальную способность управлять дезинтеграционными процессами в механически напряженных образцах горных пород внешними электромагнитными, акустическими или комбинированными (акустоэлектромагнитными) воздействиями в виде волновых пакетов, препарированных по амплитудно-периодному спектру и скважности*”.

Очевидно, если в выделенном предложении заменить “образцы горных пород” на “очаговые зоны катастрофических событий”, то появляется конструктивная идея управления напряженно-деформированным состоянием в местах повышенной концентрации напряжений внешними физическими полями на принципе “обратной связи”: использование амплитудно-периодного спектра и скважности эмиссионных физических полей из формирующихся очаговых зон будущих катастрофических событий, но уже в “активном варианте” — по структуре внешних воздействующих физических полей на эти очаговые зоны с целью управления релаксационными процессами. В принципе, это оказывается теоретически возможным, учитывая отмеченный в [49, 50] “квазирезонансный механизм” возникновения волн маятникового типа и разрушения горных пород в очаговых зонах.

Кроме того, с канонической по [33] структурой механических квазирезонансов в напряженных геосредах блочно-иерархического строения связано проявление эффекта аномально низкого трения [45], повышающего роль спектра акустического фона [52].

Рассмотрим теперь обсуждаемую связь между кинетической концепцией прочности твердых тел и теорией волн маятникового типа в количественном отношении, опираясь на развиваемую в [33] концепцию канонически кластерного представления блочно-иерархического строения массивов горных пород, существенно обобщающую соответствующие представления М. А. Садовского [29, 30].

Несмотря на то что концепция М. А. Садовского о блочно-иерархическом строении массивов горных пород получила широкое признание, большинство специалистов-теоретиков в области механики разрушения твердых тел традиционно предпочитают употреблять понятие отдельных трещин. В этой связи представляется справедливым высказывание А. В. Викулина в [64]: *“За этим, по-видимому, все же стоит непонимание того важного обстоятельства, что в блоковой среде напряжения, в основном, перераспределяются не по поверхностям плоскостей (трещин), а в объеме энергонасыщенной геосреды, т. е. в системе взаимодействующих между собой блоков”*.

В данном отношении, по существу, не отличается и кинетическая концепция прочности твердых тел, несмотря на то, что в ней рассматриваются уже ансамбли трещин, “статистически” взаимодействующие между собой. Тем не менее здесь основное внимание уделяется возникновению и развитию новых дефектов, хотя геоматериалы и массивы горных пород “перезаселены” уже имеющимися трещинами разного масштабного уровня, формирующими структуру их отдельностей [57]. Данное обстоятельство весьма важно, поскольку существует статистически инвариантное соотношение  $\mu_{\Delta}(\delta)$  между средними расстояниями между берегами трещин  $\delta_i$  и диаметрами  $\Delta_i$  отделяемых ими структурных элементов (блоков) [38, 40] по (2), (3).

Соотношения (2), (3) определяют в основном меру “подвижности” структурных элементов горных пород в массиве [40], и она известным образом [39] связана с напряженно-деформированным состоянием последнего, например по (6). Это соотношение во многом обуславливает динамико-кинематические характеристики нелинейных упругих волн маятникового типа [39, 40].

Согласно кинетической концепции прочности твердых тел, динамическим явлениям в горных породах предшествует достаточно протяженный во времени процесс деформирования и подготовки разрушения [5, 16, 17, 65], а собственно разрушение твердого тела (или пород в очаге) является конечным результатом кинетического термофлуктуационного процесса: зарождения  $\rightarrow$  накопления  $\rightarrow$  и объединения микродефектов в “магистральную” трещину.

При этом важно подчеркнуть, что имеющиеся экспериментальные данные по процессам накопления трещин в твердых телах, таких как металлы, стекла, полимерные соединения и даже горные породы [65–69], показали (в обозначениях [69]), что по мере достижения объемной концентрации трещин значений, при которых среднее расстояние между соседними дефектами  $\langle L \rangle$  в  $e$  раз больше их среднего размера  $\langle y \rangle$ , последние начинают укрупняться.

Этот критерий, согласно [69], записывается соотношениями

$$\frac{\langle L \rangle}{\langle y \rangle} = \frac{1}{\sqrt[3]{x_c}} \approx e, \quad (16)$$

где  $x_c$  — критическое значение концентрации трещин.

Нетрудно заметить, что с относительным расхождением менее 5% число  $e \approx 2.72$  можно заменить на  $(\sqrt{2})^3 \approx 2.83$ . Этот “переход–поправка” на самом деле оказывается именно тем “мостиком”, который обеспечивает искомую связь между до сих пор “автономно” развивавшимися теорией волн маятникового типа и кинетической концепцией прочности твердых тел (!).

Действительно, с введением поправки (или операции дискретизации), уравнение (16) можно представить в виде

$$\frac{\langle L \rangle}{\langle y \rangle} = \frac{1}{\sqrt[3]{x_c}} \approx (\sqrt{2})^3. \quad (17)$$

Если отмеченный акт “укрупнения” растущих трещин можно интерпретировать как основу процесса формирования структурной иерархии горных пород и их массивов в целом, то из уравнения (17) следует, что в блоках кубической формы объемом  $\langle L \rangle^3$  будет содержаться примерно  $(\sqrt{2})^9$  блоков кубической формы объема  $\langle y \rangle^3$ , или с учетом (9):

$$\frac{\langle L \rangle^3}{\langle y \rangle^3} \approx (\sqrt{2})^9 = \chi \approx 22.63 \approx 23. \quad (18)$$

Для плоского случая, очевидно, имеем соотношение для площадей формирующихся фракталей:

$$\frac{\langle L \rangle^2}{\langle y \rangle^2} \approx (\sqrt{2})^6 = 8. \quad (19)$$

**Таким образом, выражение (18) дает, по существу, ответ о механическом происхождении коэффициента “акустической радуги”  $\chi$ , который был введен феноменологически в рамках развития теории волн маятникового типа [26], а выражение (19) практически совпадает с критерием “схлопывания” подземных полостей в напряженных геосредах блочного строения (11).**

Как показано в работах [22, 39, 43], безразмерные энергетические условия  $\hbar$  возникновения волн маятникового типа и геомеханических квазирезонансов в процессах разрушения горных пород в очаговых зонах землетрясений и взрывов разной мощности статистически совпадают:

$$\hbar = \frac{W}{M \cdot \mathcal{G}_p^2} = \theta \cdot 10^{-9}, \quad \theta \in 1-4, \quad M = \rho V; \quad (20)$$

$$W = \alpha(V)[U_0 + W_k]. \quad (21)$$

Здесь, согласно [39],  $[U_0 + W_k]$  — сумма упругой (потенциальной)  $U_0$  и кинетической  $W_k$  энергии движения структурных элементов горных пород в очаговой зоне;  $\alpha(V)$  — коэффициент сейсмического действия взрывов по М. А. Садовскому [70];  $V$  — объем очаговой зоны;  $\rho$  — плотность горных пород;  $\mathcal{G}_p$  — скорость продольной волны.

В качестве важного следствия развиваемой в [33] концепции о блочно-иерархическом строении массивов горных пород и установленной М. А. Садовским и др. связи между объемом горных пород и излучаемой им сейсмической энергии от землетрясений и взрывов [70] выступает возможность канонического описания энергетических уровней разрушения массивов горных пород, в том числе в процессах сейсмоэнерговыведения из очаговых зон катастрофических событий.

Действительно, по [33, 71] имеют место следующие соотношения для иерархически самоорганизованных структур.

• Структурные отдельности  $\Delta_i$  по своим линейным размерам представимы в виде канонического ряда [33]:

$$\Delta_i = \Delta_0(\sqrt{2})^i, \quad i = 0, 1, \dots, N \quad (\text{целые числа}). \quad (22)$$

• Их объемы в кубическом представлении равны

$$V_i = V_0(\sqrt{2})^{3i}, \quad V_0 = \Delta_0^3 \quad (\Delta_0 \text{ — опорное значение}). \quad (23)$$

• Энергия сейсмособытий (по М. А. Садовскому [70]) пропорциональна объемам их очагов; следовательно, принимая эти объемы пропорциональными  $V_i$ , имеем:

$$W_i = W_0(\sqrt{2})^{3i}, \quad \text{так как } W_i \sim V_i. \quad (24)$$

• В логарифмическом представлении с основанием  $\sqrt{2}$  выражение (24) имеет следующий вид:

$$\log_{\sqrt{2}}\left(\frac{W_i}{W_0}\right) = 3i, \quad \forall i. \quad (25)$$

• Это означает, что  $i$ -й иерархический уровень сейсмозонирования при известном (или заданном!)  $W_0$  определяется формулой

$$i = \frac{1}{3} \log_{\sqrt{2}}\left(\frac{W_i}{W_0}\right). \quad (26)$$

**Таким образом, в качестве критерия отнесения сейсмособытий в  $i$ -й энергетический класс можно использовать соответствующие сейсмозаписи, для которых удовлетворяется условие**

$$i = \left[ \frac{1}{3} \log_{\sqrt{2}}\left(\frac{\tilde{W}}{W_0}\right) \right] \text{ — целое число,} \quad (27)$$

где  $\tilde{W}$  — энергия динамического события по сейсмическим записям.

Результат (27) имеет важное прикладное значение, например при выборе шага квантования для построения карт изолиний сейсмозонирования в формирующихся очаговых зонах землетрясений и горных ударов либо при геодинамическом районировании поверхности Земли. В данном случае устанавливается прямая связь уровней сейсмозонирования с размерами естественных отдельностей массивов горных пород — излучателей избыточной упругой энергии.

#### **ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ УСЛОВИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ ОЧАГОВЫХ ЗОН КАТАСТРОФИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В КИНЕТИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ ДВИЖЕНИЯ ИХ СТРУКТУРНЫХ БЛОКОВ И СЕЙСМОЭМИССИОННЫЕ СОБЫТИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ТИПА**

В заключение рассмотрим важные следствия из энергетического условия возникновения динамических событий в очаговых зонах разрушения массивов горных пород (20), (21). Важнейшее из них — это возможность количественной оценки энергетического вклада геодинамических и геомеханических процессов, индуцированных техногенной деятельностью, в наведен-

ную сейсмичность. В формулах (20), (21) он определяется суммарно — параметром  $W$ , куда равноправно входят как упругий потенциал очаговой зоны  $U_0$ , так и кинетическая энергия движения составляющих ее структурных элементов геоблоков  $W_k$ .

Очевидно, что при весьма медленно (в сравнении с техногенной деятельностью) протекающих тектонических процессах упругий потенциал  $U_0$  на достаточно больших глубинах от поверхности Земли определяется в основном господствующим полем тектонических напряжений, а  $W_k$  — вкладом от техногенной деятельности человека либо “фоном”, например, от удаленных крупных землетрясений.

В более общем случае энергетические параметры  $U_0$  и  $W_k$  можно (условно) представить в виде сумм:

$$U_0 = U_0^T + U_0^G, \quad (28)$$

$$W_k = W_k^T + W_k^G, \quad (29)$$

где верхними индексами отмечены тектоническая ( $T$ ) и геомеханическая ( $G$ ) составляющие полей напряжений и деформаций. Под “геомеханической” составляющей будем понимать “локальный” вклад от техногенной деятельности человека при освоении месторождений полезных ископаемых, при оборонном или гражданском строительстве и т. п.

Как отмечено в работе [50], условие (20) одновременно описывает и энергетический критерий возникновения в объеме горных пород  $V$  геомеханических квазирезонансных явлений, в основе которых лежит переход накопленной упругой энергии от сил горного давления в кинетическую энергию движения геоблоков-носителей маятниковых волн. Все необходимые экспериментально-теоретические предпосылки для этого существуют и достаточно детально отражены в [39].

Остановимся на современных представлениях, касающихся техногенной сейсмичности: классификационных признаках, возможных механизмах ее реализации и некоторых следствиях из формул (20), (21) относительно отмеченных аспектов. Обстоятельный обзор по техногенным процессам в земной коре и связанной с ними сейсмичностью представлен в монографии В. В. Адушкина и С. Б. Турунтаева [72]. В обзоре приводятся и анализируются данные по деформациям земной поверхности и изменениям сейсмического режима, связанным с эксплуатацией месторождений нефти и газа, закачкой жидкости в недра, заполнением водохранилищ, разработкой месторождений твердых полезных ископаемых, а также по афтершоковой активности от крупных подземных взрывов по всему миру.

Сопряженные с отмеченными видами деятельности сейсмические события называют обычно индуцированными. Механизмы их проявления связывают с изменениями напряженно-деформированного состояния, как правило, многофазной геосреды сложного строения в результате “техногенного массообмена” в пределах определенных объемов массивов горных пород. Подобного рода виды деятельности человека, безусловно, связаны и с нарушением исходного поля тектонических напряжений и деформаций массивов горных пород для конкретных регионов Земли.

Согласно [72], для обозначения “техногенной сейсмичности”, многие авторы пользуются разной терминологией: вызванная, наведенная, генерированная, индуцированная, возбужденная и др. Касясь доминирующего механизма подобного рода сейсмоэмиссионных процессов, нередко используются термины “спусковой механизм”, “спусковой крючок”, “триггерный эффект” [73].

По сути дела, энергетические представления (20), (21), (28), (29) описывают все возможные случаи индуцированной сейсмичности и фактически их можно отнести в группу, называемую нами “**сейсмоэмиссионными событиями интерференционного типа**”. Отмеченные энергетические условия в данном случае включают совместное влияние геодинамических (тектонических) и локальных геомеханических (техногенных) полей. Является ли энергетический вклад геомеханических полей значительным по сравнению с господствующим “тектоническим фоном”, естественно, зависит от того, в каком по геодинамической активности районе Земли ведутся горные работы и иные виды техногенной деятельности. Хорошей иллюстрацией для данных положений может служить работа [74], посвященная детальному моделированию особенностей эволюции напряженно-деформированного состояния геоматериалов со структурой по всему циклу их нагружения.

### ВЫВОДЫ

Таким образом, обобщая представленные выше результаты, можно заключить:

- **Наличие сейсмического фона в земной коре от природных и техногенных источников в условиях синфазности его спектра с колебательным спектром структурных элементов формирующейся очаговой зоны концентрации напряжений способствует тому, что при определенных условиях последняя может эволюционировать в акустически активное состояние с переходом накопленной упругой энергии очаговой зоны в кинетическую энергию движения составляющих ее структурных элементов — в виде нелинейных геомеханических квазирезонансов с сопутствующим излучением продольных, поперечных и маятниковых волн. Иногда существенное значение при этом, по-видимому, принадлежит проявлению эффекта аномально низкого трения.**

- Впервые установлена формализованная связь между концентрационным критерием прочности твердых тел по С. Н. Журкову, экспериментальным критерием “схлопывания” подземных выработок и каноническим спектром волн маятникового типа по В. Н. Опарину, а также отношением радиуса локальных механических проявлений необратимого характера к радиусу зоны мощного взрывного разрушения массивов горных пород по М. А. Садовскому – В. В. Адушкину.

- Введено новое понятие “*сейсмоэмиссионных событий интерференционного типа*” с энергетическим условием их возникновения, характеризующим вклад геомеханических и геодинамических процессов.

- Впервые обоснован критерий отнесения сейсмособытий в  $i$ -й энергетический класс, устанавливающий прямую связь уровней сейсмоэнерговыведения с размерами естественных отдельных массивов горных пород в канонической шкале иерархических представлений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Взрывы и землетрясения** на территории Европейской части России / под ред. В. В. Адушкина и А. А. Маловичко. — М.: ГЕОС, 2013.
2. **Деструкция** земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия / Опарин В. Н. и др. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012.
3. **Опарин В. Н., Сашурин А. Д., Кулаков Г. И. и др.** Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.

4. **Соболев Г. А.** Основы прогноза землетрясений. — М.: Наука, 1993.
5. **Мячкин В. И.** Процессы подготовки землетрясений. — М.: Наука, 1978.
6. **Касахара К.** Механика землетрясений / пер. с англ. — М.: Мир, 1985.
7. **Родионов В. Н., Сизов И. А., Цветков В. М.** Основы геомеханики. — М.: Недра, 1986.
8. **Опарин В. Н., Анин Б. Д., Чугуй Ю. В. и др.** Методы и измерительные приборы для моделирования и натурных исследований нелинейных деформационно-волновых процессов в блочных массивах пород. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007.
9. **Опарин В. Н., Багаев С. Н., Маловичко А. А. и др.** Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Т. 1. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009.
10. **Опарин В. Н., Багаев С. Н., Маловичко А. А. и др.** Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Т. 2. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010.
11. **Rockbursts and Seismicity in Mines – RaSiM<sub>5</sub>**, South African Institute of Mining and Metallurgy, 2001.
12. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Еременко А. А.** Об одном методе сканирования шахтной сейсмологической информации // ДАН. — 1993. — Т. 333. — № 6.
13. **Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Востриков В. И. и др.** О возможных причинах увеличения сейсмической активности шахтных полей рудников Октябрьский и Таймырский Норильского месторождения в 2003 г. // ФТПРПИ: Ч. I. — 2004. — № 4; Ч. II. — 2004. — № 5; Ч. III. — 2004. — № 6; Ч. IV. — 2005. — № 1.
14. **Опарин В. Н., Еманов А. Ф., Востриков В. И., Цибизов Л. В.** О кинетических особенностях развития сейсмоэмиссионных процессов при отработке угольных месторождений Кузбасса // ФТПРПИ. — 2013. — № 4.
15. **Mendecki A. J.** Keynote Address: Data-driven understanding of seismic rock mass response to mining, “Dynamic Rock Mass Response to Mining”- The Fifth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines (RaSiM<sub>5</sub>), 17 – 20 Sept. 2001 (Techn. Eds. Dr G. Van Aswegen, Dr R. J. Durrheim, W.D. Orflepp), Johannsburg, 2000.
16. **Журков С. Н.** Кинетическая концепция прочности твердых тел (термофлуктуационный механизм) // Вестн. АН СССР. — 1968 — № 3.
17. **Журков С. Н., Куксенко В. С., Петров В. А.** О прогнозировании разрушения горных пород // Физика Земли. — 1977. — № 6.
18. **Физические основы** прогнозирования разрушения горных пород: материалы I Междунар. школы-семинара (9–15 сент., 2001, г. Красноярск) / отв. ред. проф. В. А. Мансуров. — Красноярск: СибГАУ, 2002.
19. **Адушкин В. В., Опарин В. Н.** От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. I // ФТПРПИ. — 2012. — № 2.
20. **Адушкин В. В., Опарин В. Н.** От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. II // ФТПРПИ. — 2013. — № 2.
21. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И.** О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа  $v_{\mu}$  // ДАН. — 1993. — Т. 333. — № 4.
22. **Опарин В. Н.** Энергетический критерий объемного разрушения горных пород // Труды науч. семинара “Неделя горняка-2009”. — М.: МГТУ, 2009.

23. **Опарин В. Н.** Волны маятникового типа и “геомеханическая температура” // Труды 2-й Рос.-Кит. конф. “Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при обработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах”. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.
24. **Опарин В. Н.** Методологические основы построения многослойных мониторинговых систем геомеханико-геодинамической безопасности для горнодобывающих районов в тектонически активных зонах // Проблемы и пути инновационного развития горнодобывающей промышленности: материалы 6-й Междунар. науч.-практ. конф. (9–11 сентября 2013 г.). — Алматы, 2013.
25. **Бычков И. В., Опарин В. Н., Потапов В. П.** Облачные технологии в решении задач горной геоинформатики // ФТПРПИ. — 2014. — № 1.
26. **Адушкин В. В., Спивак А. А.** Подземные взрывы. — М.: Наука, 2007.
27. **Адушкин В. В., Спивак А. А.** Геомеханика крупномасштабных взрывов. — М.: Недра, 1993.
28. **Кочарян Г. Г., Спивак А. А.** Динамика деформирования блочных массивов горных пород. — М.: Академкнига, 2003.
29. **Садовский М. А.** Естественная кустоватость горной породы // ДАН. — 1979. — Т. 247. — № 4.
30. **Садовский М. А.** О свойстве дискретности горных пород // Физика Земли. — 1982. — № 12.
31. **Курленя М. В., Опарин В. Н.** О масштабном факторе явления зональной дезинтеграции горных пород и канонических рядах атомно-ионных радиусов // ФТПРПИ. — 1996. — № 2.
32. **Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Акинин А. А., Балмашнова Е. Г.** О новой шкале структурно-иерархических представлений как паспортной характеристике объектов геосреды // ФТПРПИ. — 1998. — № 5.
33. **Опарин В. Н., Танайно А. С.** Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. — Новосибирск: Наука, 2011.
34. **Садовский М. А., Адушкин В. В., Спивак А. А.** О размере зон необратимого деформирования при взрыве в блочной среде // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1989. — № 9.
35. **Родионов В. Н., Адушкин В. В., Костюченко В. Н. и др.** Механический эффект подземного взрыва. — М.: Недра, 1971.
36. **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.
37. **Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Розенбаум М. А. и др.** Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
38. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Еременко А. А.** Об отношении линейных размеров блоков горных пород к величинам раскрытия трещин в структурной иерархии массива // ФТПРПИ. — 1993. — № 3.
39. **Опарин В. Н., Симонов Б. Ф.** О нелинейных деформационно-волновых процессах в виброволновых геотехнологиях освоения нефтегазовых месторождений // ФТПРПИ. — 2010. — № 2.
40. **Курленя М. В., Опарин В. Н.** Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. II // ФТПРПИ. — 2000. — № 4.
41. **Итоги научной и научно-организационной деятельности за 2008 год.** — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2009.
42. **Итоги научной, инновационной и научно-организационной деятельности за 2012 год.** — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2013.
43. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И.** Волны маятникового типа. Ч. II: Методика экспериментов и основные результаты физического моделирования // ФТПРПИ. — 1996. — № 4.
44. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И.** Волны маятникового типа. Ч. III: Данные натуральных измерений // ФТПРПИ. — 1996. — № 5.

45. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Об эффекте аномально низкого трения в блочных средах // ФТПРПИ. — 1997. — № 1.
46. Востриков В. И., Опарин В. Н., Червов В. В. О некоторых особенностях движения твердых тел при комбинированных виброволновом и статическом воздействиях // ФТПРПИ. — 2000. — № 6.
47. Тищенко И. В., Червов В. В., Горелов А. И. Влияние дополнительного вибровозбудителя и комбинации виброударных устройств на скорость внедрения трубы в грунт при прокалывании // ФТПРПИ. — 2013. — № 3.
48. Li li-ping. Theoretical analysis of rock burst induced by anomalously low friction effect in deep block media mass, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Sino-Russian Joint Scientific-Technical Forum on Deep-level Rock Mechanics and Engineering, China, Nanjing, July, 2013.
49. Яковицкая Г. Е. Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии / под. ред. В. Н. Опарина. — Новосибирск: Параллель, 2008.
50. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. О геомеханических условиях возникновения квазирезонансов в геоматериалах и блочных средах // ФТПРПИ. — 1998. — № 5.
51. Курленя М. В., Опарин В. Н., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И. О некоторых особенностях реакции горных пород на взрывные воздействия в ближней зоне // ДАН. — 1987. — Т. 293. — № 1.
52. Курленя М. В., Опарин В. Н., Юшкин В. Ф. и др. О некоторых особенностях эволюции гармонических акустических сигналов при нагружении блочных сред с цилиндрической полостью // ФТПРПИ. — 1999. — № 6.
53. Курленя М. В., Опарин В. Н., Балмашнова Е. Г., Востриков В. И. О динамическом поведении “самонапряженных” блочных сред. Ч. I: Одномерная механико-математическая модель // ФТПРПИ. — 2001. — № 1.
54. Опарин В. Н., Балмашнова Е. Г., Востриков В. И. О динамическом поведении напряженных блочных сред. Ч. II: Сравнение теоретических и экспериментальных данных // ФТПРПИ. — 2001. — № 3.
55. Курленя М. В., Опарин В. Н., Матасова Г. Г., Морозов П. Ф., Тапсиев А. П., Тапсиев Г. А., Федоренко Б. В. О методике построения карт нарушенности массивов горных пород по данным геофизического каротажа. Ч. IV: некоторые практические приложения // ФТПРПИ. — 1992. — № 2.
56. Опарин В. Н. К основам скважинной геофизической дефектоскопии. Ч. I: Спектральный анализ и меры дефектности // ФТПРПИ. — 1982. — № 6.
57. Курленя М. В., Опарин В. Н. О явлении знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия // ФТПРПИ. — 1990. — № 4.
58. Методические указания по исследованию проявлений горного давления на моделях из эквивалентных материалов / под ред. Ф. П. Глушихина. — Л.: ВНИМИ, 1976.
59. Гольдин С. В., Юшин В. И., Ружич В. В., Смекалин О. П. Медленные движения — миф или реальность? // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород. — Красноярск: СибГАУ, 2002.
60. Губерман Ш. А. Д-волны и землетрясения. Теория и анализ сейсмологических наблюдений // Вычисл. сейсмология. — М.: Наука, 1979. — Вып. 12.
61. Жадин В. В. Пространственно-временные связи сильных землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1984. — № 1.
62. Mogi K. Bull Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo, 1968, Vol. 46.

63. **Опарин В. Н., Яковицкая Г. Е., Вострецов А. Г., Серяков В. М., Кривецкий А. В.** О коэффициенте механо-электромагнитных преобразований при разрушении образцов горных пород // ФТПРПИ. — 2013. — № 3.
64. **Викулин А. В.** XX Всероссийская научная конференция “Геодинамика и напряженное состояние недр Земли” // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. — 2013. — № 2. — Вып. 22.
65. **Куксенко В. С., Манжиков Б. Ц., Мансуров В. А.** Закономерности развития микроочага разрушения // Физика Земли. — 1985. — № 7.
66. **Kuksenko V. S. et al.** Nucleation of submicroscopic cracks in stressed Solids, Int. Journ. of Fracture Mechanics, 1975. Vol. 11, No. 4.
67. **Тамуж В. П., Куксенко В. С.** Микромеханика разрушения полимерных материалов. — Рига: Зинатне, 1978.
68. **Петров В. А., Башкарев А. Я., Веттегрень В. И.** Физические основы прогнозирования разрушения конструкционных материалов. — СПб.: Политехника, 1993.
69. **Веттегрень В. И., Куксенко В. С., Светлов В. Н., Крючков М. А.** Кинетика и иерархия процесса разрушения нагруженных материалов // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: материалы I Междунар. школы-семинара (9–15 сент., 2001, г. Красноярск). — Красноярск: СибГАУ, 2002.
70. **Садовский М. А., Кедров О. К., Пасечник И. П.** О сейсмической энергии и объеме очагов при коровых землетрясениях и подземных взрывах // ДАН. — 1985. — Т. 283. — № 5.
71. **Курленя М. В., Опарин В. Н.** Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. I // ФТПРПИ. — 1999. — № 3.
72. **Адушкин В. В., Турунтаев С. Б.** Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). — М.: ИНЭК, 2005.
73. **Триггерные эффекты** в геосистемах: материалы второго Всерос. семинара-совещания / Ин-т динамики геосфер РАН / под ред. А. А. Адушкина, Г. Г. Кочаряна. — М.: ГЕОС, 2013.
74. **Опарин В. Н., Усольцева О. М., Семенов В. Н., Цой П. А.** О некоторых особенностях эволюции напряженно-деформированного состояния образцов горных пород со структурой при одноосном нагружении // ФТПРПИ. — 2013. — № 5.

*Поступила в редакцию 21/VI 2014*