

УДК 622.236: 622.278

В.Н. Опарин

ОПАРИН ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, директор Института горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН (Новосибирск).  
E-mail: oparin@misd.nsc.ru

## О проблеме трансформации упругой энергии очаговых зон катастрофических событий в кинетическую энергию движения их структурных элементов

Рассматривается энергетический подход к описанию механизма формирования и реализации очаговых зон катастрофических событий (землетрясений, горных ударов и других динамических проявлений горного давления) в напряженных геосредах блочно-иерархического строения. В основу положены современные достижения в области развития теории волн маятникового типа, энергетическое условие возникновения геомеханических квазирезонансов и кинетическая концепция прочности твердых тел С.Н. Журкова. Вводится новое понятие – интерференционный механизм возникновения динамических форм проявления горного давления в результате взаимодействия глобальных геодинамических и локальных геомеханических полей при отработке месторождений полезных ископаемых.

*Ключевые слова:* очаговые зоны, энергетический подход, массивы горных пород, маятниковые волны, интерференция полей.

### Введение

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

Следует отметить, что 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 провоцирует природные катастрофические события. Так, по данным недавних исследований В.В. Адушкина с соавторами [5], 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 становятся и горно-тектонические удары (СУБР, Кольский полуостров, Урал, Кемеровская обл. и др.) [32].

Сложившиеся обстоятельства требуют комплексного подхода для определения реального воздействия техногенной деятельности человека на окружающую среду, а следовательно, осу-

---

© Опарин В.Н., 2014

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 13-05-00673а), партнерского интеграционного проекта СО РАН № 100 и проекта ОНЗ РАН-3.1. Эта статья основана на сообщениях и докладах, представленных на 4-й Российско-Китайской научной конференции «Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах», которая состоялась в Дальневосточном федеральном университете (27–31 июля 2014, Владивосток, Россия) при поддержке Инженерной школы ДВФУ, РФФИ и Программы развития ДВФУ. Участники конференции подготовили эти материалы специально для журнала.

ществления непрерывного контроля за ее состоянием и эволюцией. Без этого невозможно реализовывать ни актуальных прогнозов, ни обоснованных мер 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 [31], должны основываться прежде всего на учете реально существующего взаимодействия между глобальными геодинамическими 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.

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 [25–27]. 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.

В данном случае шахты и рудники рассматриваются как уникальные природные лаборатории, где можно одновременно 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 явно прослежены, например, в работах [16, 36] в технологической привязке к системам отработки рудников Норильска и Таштагола. Аналогичные результаты получены и при отработке угольных месторождений Кузбасса [28].

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 способствует более точному отслеживанию динамики в напряженно-деформированном состоянии породных массивов вокруг подземных выработок. Этому направлению исследований и технических разработок уделяется особое внимание в России и за рубежом [48].

Однако, как справедливо отмечает А.Ж. Mendeki [47], часто из-за ограниченного понимания сложности динамического поведения породных массивов и/или неадекватной информации сейсмическая опасность либо неверно оценивается, либо переоценивается время наступления со-

стояния относительной стабильности. К тому же в настоящее время в шахтной «количественной сейсмологии» обычно используются только волновые формы с хорошо развитыми P- и S-волнами (по их вступлениям) и достаточное отношение сигналов к помехам. При этом имеют место 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.Ж. Mendecki отмечает: на шахте Tau Tona Mine (на глубине ~ 3 км, ЮАР) используется высоко разрешающая ISS-микросеть из пяти трехкомпонентных акселерометров. При взрывном способе отработки панелей парами взрывов в кровле и почве с задержкой в 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.

Тем не менее контролировать сложный процесс нелинейного изменения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород вокруг подземных выработок при отработке полезных ископаемых с очерчиванием зон возможных проявлений горного давления в деструктивных формах дистанционно позволяют в современных условиях только сейсмические методы. 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 сейсмодформаций и их скоростей, относительные напряжения, сейсмическая жесткость, вязкость, время релаксации напряжений, а также числа Шмидта и Дебора, описывающие статистические свойства сейсмодформаций [47, 48].

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 [14]. Со временем она получает все более широкое использование, в том числе в геомеханике и геофизике [8].

В данной работе мною уделяется большое внимание кинетической концепции прочности твердых тел не только потому, что она энергетическая в своей основе (это само по себе принципиально важно), но и 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 [14, 22, 25].

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 [1].

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 [1, 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 [1]: подземному, наземному и надземному. Развитие современных облачных геоинформационных технологий [3] позволяет уже в настоящее время формировать по существу «интеллектуальную оболочку» для самых сложных мониторинговых систем разного назначения, в т. ч. и экологических, в режиме реального времени.

Таким образом, собственно структура организации и функционирование 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.

Ниже рассмотрим более подробно некоторые важные следствия существующих ныне представлений о блочно-иерархическом строении объектов геосреды по М.А. Садовскому [41, 42] в каноническом представлении В.Н. Опарина [10, 35, 38], теории волн маятникового типа [1, 14, 22, 25] и кинетической концепции прочности твердых тел по С.Н. Журкову [8, 14] применительно к описанию механических процессов в очаговых зонах динамических проявлений горного давления, их размеров.

#### **Об одном критерии «схлопывания» подземных полостей в напряженных блочных геосредах**

В работе [18] В.Н. Опариным 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, высказанная им в работе [23], о том, что размеры структурных элементов горного массива, входящих во взаимодействие под влиянием очистных работ, определяются при заданном уровне горного давления объемом отработанных пространств. Более конкретно эта идея сформулирована в работе [11], где предполагается, что устойчивость подземных выработок определяется именно соотношением линейных размеров (диаметром) «работающих» геоблоков  $\Delta$  массива горных пород, по величине 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 этой идеи в [18] 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 производилось по известной методике [20]. 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 и определялся как площадь ненарушенного «целичка» между блоками.

В данном эксперименте коэффициент сцепления между блоками варьировался в диапазоне  $(0,10 \div 0,25) K_{\text{сц}}$ , где  $K_{\text{сц}}$  – коэффициент сцепления для используемого материала. Это соответствовало от «плохих» до «средних» условиям относительно сцепления между структурными блоками породного массива с точки зрения его устойчивости вокруг подземных выработок.

Общий вид модели с выработкой прямоугольной формы представлен на рис. 1. Одноосное нагружение модели с боковым подпором производилось с помощью гидравлического насоса и резиновой оболочки, заключенной в металлическую обойму и помещенную на верхний край модели. Фотографированием фиксировались различные стадии нагружения и потери устойчивости блочного массива вокруг выработки, а величина давления в резиновой оболочке измерялась с помощью манометра. Нагружение производилось как ступенями, так и непрерывно с медленной скоростью [18].

Изучалась зависимость между соотношением среднего размера  $\Delta$  структурного блока кубической формы (для различных  $\Delta$ ) и поперечного (на рис. 1) размера  $D$  выработки прямоугольного сечения и механическими параметрами (напряженное состояние, прочность геоматериала, контактные условия на поверхностях взаимодействующих блоков). Результаты такого моделирования представлены на рис. 2.

Как видно из приведенных на рисунке графиков, при определенных значениях  $D/\Delta$  величина разрушающей нагрузки  $P_*$  очень мала: составляет  $\sim 5\%$  от прочности  $\sigma_{сж}$  геоматериала структурных блоков и почти не меняется при увеличении  $D/\Delta$ . На приведенных графиках это «граничное» значение  $D/\Delta$  зависит от  $K_{сц}$  между блоками и оценивается величинами порядка  $9 \div 10$  для  $K_{сц,б} = 0,25 K_{сц,м}$  и  $7 \div 8$  для  $K_{сц,б} = 0,1 K_{сц,м}$  ( $K_{сц,б}$  – коэффициент сцепления между структурными блоками,  $K_{сц,м}$  – соответственно геоматериала блока).

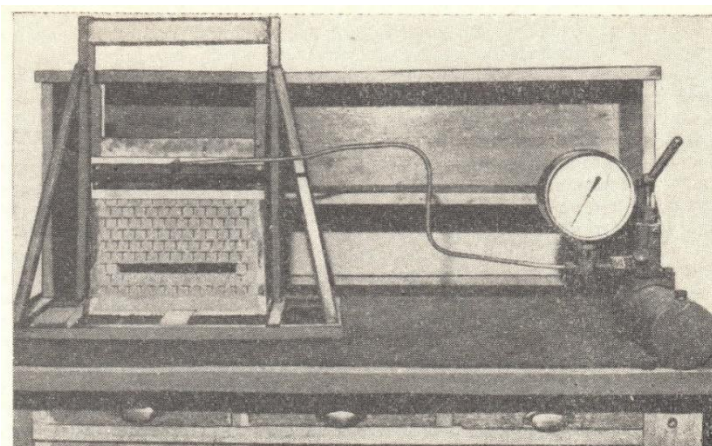


Рис. 1. Общий вид модели блочного массива из эквивалентного материала с фиксированными связями между блоками и выработкой прямоугольного сечения

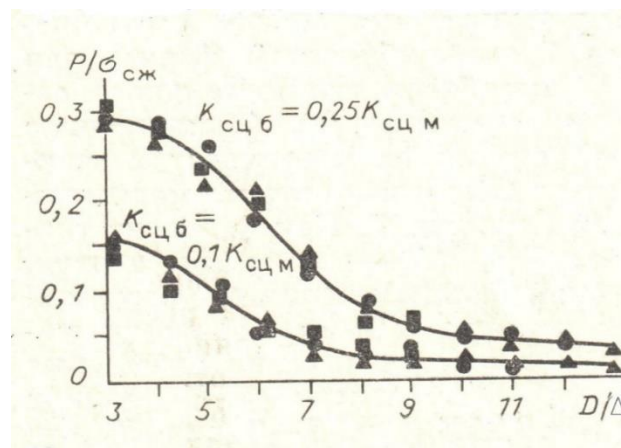


Рис. 2. Изменение величины разрушающей нагрузки в блочной модели массива в зависимости от соотношения между средним размером структурного блока  $\Delta$  и поперечным размером выработки  $D$  и от коэффициента сцепления между взаимодействующими блоками

Для этих значений  $D/\Delta$  приведенные на рис. 2 зависимости изменяются наиболее интенсивно, что характерно для  $D/\Delta \in 5 \div 8$  при  $K_{сц,б} = 0,25 K_{сц,м}$  и  $D/\Delta \in 3 \div 6$  при  $K_{сц,б} = 0,1 K_{сц,м}$ . На графике для случая  $K_{сц,б} = 0,25 K_{сц,м}$  можно выделить и своеобразную «переходную зону»: при  $D/\Delta \in 3 \div 5$  для процесса «схлопывания» выработки требуются нагрузки  $P_*$  порядка 30% от предела прочности геоматериала структурного блока ( $\sigma_{сж}$ ). В данных условиях оказывается, что величина разрушающей модель нагрузки находится в определенной связи с коэффициентом сцепления между структурными блоками:

$$\frac{K_{сц,б}}{K_{сц,м}} \approx \frac{P_*}{\sigma_{сж}}, \quad (1)$$

где  $P_*$  – разрушающая нагрузка.

Общий анализ выполненных в [18] экспериментальных данных позволил сделать следующие выводы.

- Условно выделяются три стадии изменения отраженных на рис. 2 зависимостей:

- (1) стадия «устойчивого состояния» моделируемого блочного массива вокруг выработки – для  $D/\Delta \in$  до  $4 \div 5$ ;
  - (2) стадия «средней устойчивости» – соответственно для  $D/\Delta \in 6 \div 8$ ;
  - (3) стадия «неустойчивого состояния» блочного массива вокруг выработки («схлопывания») – для  $D/\Delta \geq 8 \div 9$ .
- Величина разрушающей нагрузки  $P_*$  во всех случаях ((1)–(3)) зависит от контактных условий между взаимодействующими блоками («работающими»). Для «схлопывания» классифицируемых выше 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  $7 \div 9$ , согласно рис. 2, может рассматриваться как критериальное по условию их «схлопывания» (разрушения).

Следует отметить, что в работе [29] отношение  $D/\Delta = 8$  позволило практически точно объяснить структуру экваториального сечения Земли с соответствующими размерами и последовательностью чередования континентов и океанов (в предположении, что «работающим» блоком является так называемое «жидкое» ее ядро), а также количество литосферных плит с линейными размерами порядка 2 250 км.

Очевидно, если диаметр очаговой зоны динамического проявления горного давления равен  $D$ , то используя в качестве оценочного критерия «схлопывания» (а по существу – кратковременно высвобождения значительной доли накопленной упругой энергии) соответствующего очагового объема величину

$$\frac{D}{\Delta} \approx 8, \quad (2)$$

нетрудно оценить и диаметр «работающих» блоков  $\Delta$  – носителей маятниковых волн за счет их относительных поступательных и вращательных движений, в том числе осциллирующего вида, и наоборот [14]:

$$\Delta \approx \frac{D}{8}. \quad (2^*)$$

Для многообразия реальных геомеханических условий проведения подземных горных выработок объемный критерий их устойчивости следует строить, как представляется, на аналитических  $f$ -зависимостях, типа представленных на рис. 2, например:

$$f(D/\Delta, P/\sigma_{сж}, K_{сц,б}/K_{сц,м}) \in [\alpha, \beta], \quad (3)$$

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

Чем еще интересен описанный эксперимент? Он дает важный количественный прогноз о возможном соотношении между размерами очаговых зон кратковременной релаксации упругой энергии ( $\hat{D}$ ) и окрестной области его «нелинейного» влияния ( $\hat{\Delta}$ ) в объемном представлении. Для этого достаточно заменить в формулах (2)–(3)  $D$  на  $\hat{D}$  и  $\Delta$  на  $\hat{\Delta}$ .

В этой связи представляет особый интерес работа [16], 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.

На рис. 3 приведены сводные результаты отработки сейсмических записей толчков разных энергетических классов в глубине массива, индуцированных технологическими взрывами на Таштагольском руднике вокруг образуемых ими полостей (на рисунке по осям ординат – расстояние от центра «обобщенной» по [16] камеры в сферической системе координат). На рис. 3, а, дано изображение поведения во времени сканирующей функции  $r_E^*(t, \tau)$ , имеющей смысл приведенного расстояния до центра сейсмозонного выделения, мигрирующего от эпицентров взрывов в глубь массива со временем  $t$  (сведены к одному «обобщенному»):

$$r_E^*(t, \tau) = \sum_{i=0}^{N(t, \tau)} r_i E_i / \Omega \left( \sum_{i=0}^{N(t, \tau)} E_i \right), \quad (4)$$

где  $\Omega(x) = \{1, x = 0; x, x \neq 0\}$ ,  $\tau$  – временной сканирующий интервал осреднения индуцированных сейсмособытий энергией  $E_i$  на удалении  $r_i$  от места взрыва,  $N$  – число зарегистрированных сейсмособытий на интервале  $\tau$  ( $\approx 5$  ч). По существу выражение (4) аналогично по своему представлению для понятия центра масс в механике. Нетрудно заметить, что основная масса зарегистрированных сейсмособытий охватывает сферическую зону радиусом  $\frac{\bar{D}}{2} \approx 300$  м при радиусе «обобщенной» камеры  $\frac{\hat{\Delta}}{2} \approx 35$  м. Следовательно, имеем  $\frac{\bar{D}}{\hat{\Delta}} \approx 8,6 \approx 9$ . Эта величина достаточно близка к представленным выше оценкам по критерию «схлопывания» подземных полостей (3).

При этом следует отметить, что рис. 3 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).

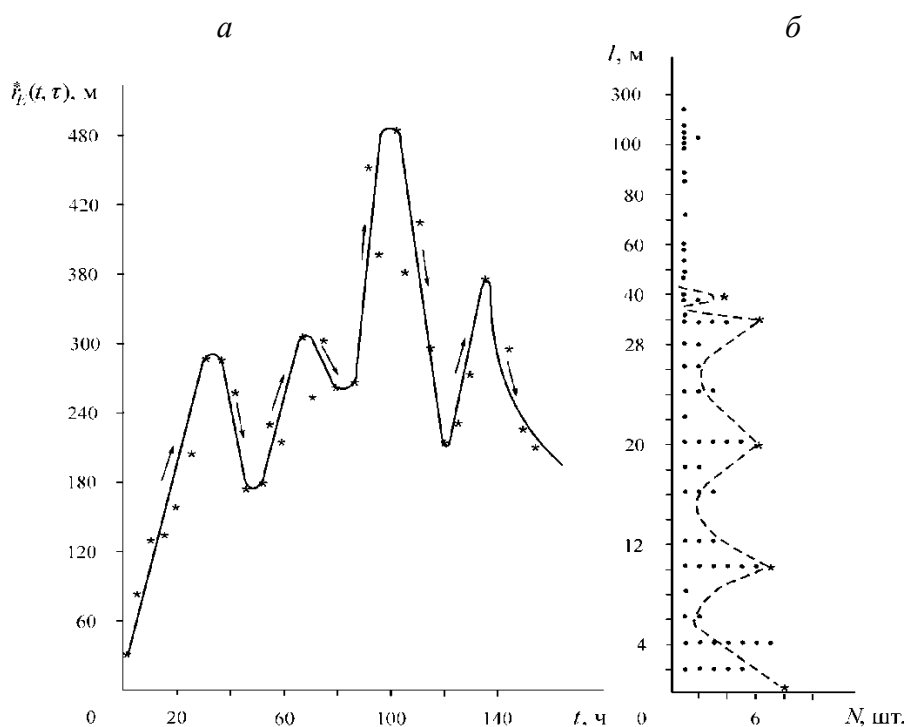


Рис. 3. Траектория движения источников сейсмозэнерговыделения во времени от массовых взрывов при отработке Таштагольского месторождения: а – обобщенный график, б – гистограмма распределения ординат экспериментальных точек сканирующих функций  $r_E^*(t, \tau)$  для совокупности взрывных блоков

### Об иерархических уровнях сейсмозэнерговыделения в блочных массивах горных пород

Важным следствием развиваемой мною в [37] концепции о блочно-иерархическом строении массивов горных пород и установленной М.А. Садовским и другими связи между объемом горных пород и излучаемой им сейсмической энергии от землетрясений и взрывов [43] является возможность канонического описания энергетических уровней разрушения массивов горных пород, в том числе в процессах сейсмозэнерговыделения из очаговых зон катастрофических событий.

Действительно, согласно [37, 43] имеют место следующие соотношения для иерархически самоорганизованных структур.

- Структурные отдельности  $\Delta_i$  по своим линейным размерам представимы в виде канонического ряда [37]:

$$(1) \Delta_i = \Delta_0(\sqrt{2})^i; i = 0, 1, \dots, N \text{ (целые числа).} \quad (5)$$

- Их объемы в кубическом представлении, следовательно, равны:

$$(2) V_i = V_0(\sqrt{2})^{3i}, V_0 = \Delta_0^3 (\Delta_0 - \text{ опорное значение}). \quad (6)$$

- Энергия сейсмособытий (по М.А. Садовскому [32]) пропорциональна объемам их очагов; следовательно, принимая эти объемы пропорциональными  $V_i$ , имеем:

$$(3) W_i = W_0(\sqrt{2})^{3i}, \text{ т.к. } W_i \sim V_i. \quad (7)$$

- В логарифмическом с основанием  $\sqrt{2}$  представлении выражение (7) имеет следующий вид:

$$(4) \log_{\sqrt{2}}\left(\frac{W_i}{W_0}\right) = 3i, \forall i. \quad (8)$$

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

$$(5) i = \frac{1}{3} \log_{\sqrt{2}}\left(\frac{W_i}{W_0}\right). \quad (9)$$

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

$$(6) i = \left[ \frac{1}{3} \log_{\sqrt{2}}\left(\frac{\bar{W}}{W_0}\right) \right] - \text{целое число, } \bar{W} - \text{энергия события} \quad (10)$$

(7) по сейсмическим записям.

Этот «побочный» результат (10) на самом деле 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 по существу прямая связь уровней сейсмозонирования с размерами естественных отдельностей массивов горных пород – излучателей избыточной упругой энергии.

Несмотря на то что концепция М.А. Садовского о блочно-иерархическом строении массивов горных пород получила широкое признание, традиционно большинство специалистов-теоретиков в области механики разрушения твердых тел предпочитают употреблять понятие отдельных трещин. В этой связи мне представляется справедливым высказывание А.В. Викулина в [6]: «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, то есть в системе взаимодействующих между собой блоков».

Надо отметить, что 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 [11]. 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) [13, 17]:

$$\mu_{\Delta}(\delta) = \frac{\delta_i}{\Delta_i} = \theta \cdot 10^{-2} \forall i, \theta \in \frac{1}{2} \div 2. \quad (11)$$

Соотношение (11) определяет в основном меру «подвижности» структурных элементов горных пород в их массиве [17], и она известным образом [33] связана с напряженно-деформированным состоянием последнего. Это соотношение во многом определяет динамико-кинематические характеристики нелинейных упругих волн маятникового типа [17, 33].

### **О связи между основами теории волн маятникового типа и кинетической концепции прочности твердых тел**

С открытием волн маятникового типа [1, 14] и энергетического условия их возникновения [25, 33] появились новые возможности для более основательного анализа механики очаговых процессов будущих катастрофических событий в напряженных геосредах со структурой.

В данном разделе настоящей работы автору хотелось бы отметить в качестве дополнения к выше отмеченным фактам сравнительно недавно обозначенную им, довольно неожиданную, связь активно развиваемой в последние годы теории волн маятникового типа с некоторыми феноменологическими следствиями кинетической концепции прочности твердых тел по С.Н. Журкову [8, 14, 45]. В данном случае речь идет о возможности описания возникновения канонического по [35] спектра волн маятникового типа и введенного мною в работе [19] понятия *«акустической радиуги»*, но уже с иных позиций. Это обстоятельство весьма важно и с проблемно-постановочных позиций, отраженных мною в недавней работе [39]: *«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 [25, 33] «квазирезонансный механизм» возникновения волн маятникового типа и разрушения горных пород в очаговых зонах.

Кроме того, с канонической по [35] структурой механических квазирезонансов в напряженных геосредах блочно-иерархического строения связано проявление очень важного эффекта аномально низкого трения [15], повышающего роль спектра акустического фона [19].

Рассмотрим теперь обсуждаемую связь между кинетической концепцией прочности твердых тел и теорией волн маятникового типа в количественном отношении, опираясь на развиваемую в [37] концепцию канонически кластерного представления блочно-иерархического строения массивов горных пород, существенно обобщающую соответствующие представления М.А. Садовского [41, 42].

С этой целью, так же как в [39], отметим следующие необходимые для последующего описания геомеханические результаты в экспериментальных исследованиях.

**Во-первых**, открытие волн маятникового типа связано с возможностью в определенных границах (11) поступательного и вращательного осциллирующих движений структурных элементов горных пород определенных уровней в стесненных условиях напряженных массивов горных пород блочно-иерархического строения в каноническом представлении [12]:

$$\Delta_j = \Delta_0 (\sqrt{2})^j, \Delta_0 \approx 2,5 \cdot 10^6 \text{ м},$$

$j \in N$  – отрицательные целые числа (порядок отдельностей);

$$\Delta_{j+1}/\Delta_j \approx \sqrt{2}, \forall j. \quad (12)$$

**Во вторых**, спектральный состав упругих волновых пакетов для маятниковых волн имеет канонический спектр [35]:

$$f_j = (\sqrt{2})^j \cdot f_0; j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

$$f_0 = \vartheta_p / (2\Delta), \quad (13)$$

где  $\vartheta_p$  – скорость продольной волны в геоблоке – вещественном носителе маятниковой волны диаметром  $\Delta$ .

Нетрудно убедиться, что подстановка вместо  $\Delta$  в формулу (13) для  $f_0$  канонических размеров  $\Delta_j$  из (12) дает согласованность между размерами вещественных носителей маятниковых волн и их акустическим спектром.

**В-третьих**, как показано в работах [25, 33], 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:

$$\hbar = \frac{W}{M \cdot \vartheta_p^2} = \theta \cdot 10^{-9}, \theta \in 1 \div 4; M = \rho V; \quad (14)$$

$$W = \alpha(V)[U_0 + W_k]. \quad (15)$$

Здесь  $[U_0 + W_k]$  – 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 [43];  $V$  – объем очаговой зоны;  $\rho$  – плотность горных пород;  $\vartheta_p$  – скорость продольной волны.

Согласно кинетической концепции прочности твердых тел, динамическим явлениям в горных породах предшествует достаточно протяженный во времени процесс деформирования и подготовки разрушения [8, 9, 14, 21, 43], а собственно разрушение твердого тела (или пород в очаге) является конечным результатом кинетического термофлуктуационного процесса: зарождения  $\rightarrow$  накопления  $\rightarrow$  объединения микродефектов в «магистральную» трещину.

При этом важно отметить, что имеющиеся экспериментальные данные по процессам накопления трещин в твердых телах, таких как металлы, стекла, полимерные соединения и даже горные породы [4, 9, 40, 44, 46], показали (в обозначениях [4]), 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  $\langle u \rangle$ , последние начинают укрупняться.

Этот критерий согласно [4] записывается в виде соотношений:

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

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», что, собственно, и обеспечивает искомую связь между до сих пор «автономно» развивавшейся теорией волн маятникового типа и кинетической концепцией прочности твердых тел (!).

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

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

Если отмеченный выше 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  $\langle u \rangle^3$ , или:

$$\frac{\langle L \rangle^3}{\langle u \rangle^3} \approx (\sqrt{2})^9 := \chi \approx 22,63 \approx 23. \quad (18)$$

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

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

Таким образом, выражение (18) дает по существу ответ о механическом происхождении коэффициента «акустической радуги»  $\chi$ , который был введен феноменологически в рамках раз-

вития теории волн маятникового типа [19]; а выражение (19) практически совпадает с критерием «схлопывания» подземных полостей в напряженных геосредах блочного строения (2).

### Энергетическое условие трансформации упругой энергии очаговых зон катастрофических событий в кинетическую энергию движения их структурных блоков

В заключение рассмотрим важные следствия из энергетического условия возникновения динамических событий в очаговых зонах разрушения массивов горных пород (14)–(15).

Важнейшее из них – это, пожалуй, возможность количественной оценки энергетического вклада геодинамических полей и геомеханических процессов, индуцированных техногенной деятельностью, в наведенную сейсмичность. В формулах (14)–(15) 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  $W_k$  – в основном 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:

$$U_0 = U_0^T + U_0^G, \quad (20)$$

$$W_k = W_k^T + W_k^G, \quad (21)$$

где верхними индексами отмечены, соответственно, тектоническая (Т) 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 впервые отмечено мною в работе [33], условие (14) 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 монографии [34].

В заключительном разделе настоящей работы автору хотелось бы остановиться на современных представлениях, касающихся техногенной сейсмичности: классификационных признаках, возможных механизмах ее реализации и некоторых следствиях из (14)–(15) касательно 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 [2]. Здесь 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 афтершоковая активность от крупных подземных взрывов практически 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 [2], для обозначения «техногенной сейсмичности» многие авторы пользуются разной терминологией: вызванная, наведенная, генерированная, индуцированная, возбужденная и

др. Касаясь доминирующего механизма подобного рода сейсмоэмиссионных процессов, нередко используются термины «спусковой механизм», «спусковой крючок», «триггерный эффект».

По сути дела, энергетические представления (14), (15), (20), (21) описывают все возможные случаи индуцированной сейсмичности, фактически их можно отнести в группу, называемую мною «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 регионе Земли ведутся горные работы и осуществляются иные виды человеческой деятельности.

Таким образом, обобщая представленные выше результаты, можно заключить следующее. При наличии сейсмического фона в земной коре от искусственных или естественных источников в условиях софазности его спектра с колебательным спектром структурных элементов формирующейся очаговой зоны концентрации напряжений, при определенных условиях (см. (14), (15), (20), (21)), последняя способна переходить 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. Существенное значение при этом, по-видимому, принадлежит проявлению эффекта аномально низкого трения [15].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В.В., Опарин В.Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах // ФТПРПИ. 2012, № 2. С. 3–27; 2013, № 2. С. 3–46.
2. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенные процессы в земной коре [опасности и катастрофы]. М.: ИНЭК, 2005. 252 с.
3. Бычков И.В., Опарин В.Н., Потапов В.П. Облачные технологии в решении задач горной геоинформатики // ФТПРПИ. 2014. № 1. С. 138–151.
4. 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 1-й Междунар. школы-семинара (9–15 сент., 2001, Красноярск). Красноярск: СибГАУ, 2002.
5. Взрывы и землетрясения на территории Европейской части России / под ред. В.В. Адушкина и А.А. Маловичко. М.: ГЕОС, 2013. 384 с.
6. Викулин А.В. XX Всероссийская научная конференция «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. Вып. 22. № 2. С. 243–244.
7. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел (термофлуктуационный механизм) // Вестник АН СССР. 1968. № 3.
8. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. О прогнозировании разрушения горных пород // Физика Земли. 1977. № 6.
9. Куксенко В.С., Манжиков Б.Ц., Мансуров В.А. Закономерности развития микроочага разрушения // Физика Земли. 1985. № 7.
10. Курленя М.В., Опарин В.Н. О масштабном факторе явления зональной дезинтеграции горных пород и канонических рядах атомно-ионных радиусов // ФТПРПИ. 1996. № 2.
11. Курленя М.В., Опарин В.Н. О явлении знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия // ФТПРПИ. 1990. № 4.
12. Курленя М.В., Опарин В.Н. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. 1 // ФТПРПИ. 1999. № 3.
13. Курленя М.В., Опарин В.Н. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. 2 // ФТПРПИ. 2000. № 4.
14. Курленя М.В., Опарин В.Н., Востриков В.И. О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа  $\omega$  // ДАН. 1993. Т. 333, № 4.
15. Курленя М.В., Опарин В.Н., Востриков В.И. Об эффекте аномально низкого трения в блочных средах // ФТПРПИ. 1997. № 1.
16. Курленя М.В., Опарин В.Н., Еременко А.А. Об одном методе сканирования шахтной сейсмологической информации // ДАН. 1993. Т. 333, № 6.

17. 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.
18. 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. 4: Некоторые практические приложения // ФТПРПИ. 1992. № 2.
19. 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.
20. Методические указания по исследованию проявлений горного давления на моделях из эквивалентных материалов / под ред. Ф.П. Глушихина. Л.: ВНИМИ, 1976.
21. Мячкин В.И. Процессы подготовки землетрясений. М.: Наука, 1978.
22. Опарин В.Н. Волны маятникового типа и «геомеханическая температура» / Тр. 2-й Рос.-Кит. конф. «Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах». Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.
23. Опарин В.Н. К основам скважинной геофизической дефектоскопии. Ч. I: Спектральный анализ и меры дефектности // ФТПРПИ. 1982. № 6.
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 сент. 2013). Алматы, 2013.
25. Опарин В.Н. Энергетический критерий объемного разрушения горных пород // Тр. науч. семинара «Неделя горняка». 2009. М.: МГГУ, 2009.
26. Опарин В.Н., Аннин Б.Д., Чугай 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. 320 с. (Интеграционные проекты СО РАН; вып. 13).
27. Опарин В.Н., Багаев С.Н., Маловичко А.А. и др. Методы и системы сейсмодиформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Т. 1. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 304 с. (Интеграционные проекты СО РАН; вып. 24).
28. 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. С. 3–22.
29. Опарин В.Н., Курленя М.В. О скоростном разрезе Земли по Гутенбергу и возможном его геомеханическом объяснении // ФТПРПИ. Ч. 1. 1994, № 2; Ч. 2. 1994, № 3; Ч. 3. 1994, № 4; Ч. 4. 1994, № 6.
30. Опарин В.Н., Маловичко А.А., Анциферов А.В. и др. Методы и системы сейсмодиформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Т. 2. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 261 с. (Интеграционные проекты СО РАН; вып. 25).
31. Опарин В.Н., Сашурин А.Д., Леонтьев А.В. и др. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 632 с.
32. Опарин В.Н., Сашурин А.Д., Леонтьев А.В. и др. Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 450 с.
33. Опарин В.Н., Симонов Б.Ф. О нелинейных деформационно-волновых процессах в виброволновых геотехнологиях освоения нефтегазовых месторождений // ФТПРПИ. 2010. № 2. С. 3–25.
34. Опарин В.Н., Симонов Б.Ф., Юшкин В.Ф., Востриков В.И., Погарский Ю.В., Назаров Л.А. Геомеханические и тектонические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. Новосибирск: Наука, 2010. 404 с.
35. Опарин В.Н., Танайно А.С. Каноническая шкала иерархических представлений в горном поведении. Новосибирск: Наука, 2011. 440 с.
36. 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. 2004, № 4–6; 2005, № 1.
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. 276 с.
38. 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.
39. Опарин В.Н., Яковичкая Г.Е., Вострецов А.Г., Серяков В.М., Кривецкий А.В. О коэффициенте механо-электромагнитных преобразований при разрушении образцов горных пород // ФТПРПИ. 2013. № 3. С. 3–20.

40. Петров В.А., Башкарев А.Я., Веттегрень В.И. Физические основы прогнозирования разрушения конструкционных материалов. СПб.: Политехника, 1993. 475 с.
41. Садовский М.А. Естественная кустоватость горной породы // ДАН СССР. 1979. Т. 247, № 4.
42. Садовский М.А. О свойстве дискретности горных пород // Физика Земли. 1982. № 12.
43. Садовский М.А., Кедров О.К., Пасечник И.П. О сейсмической энергии и объеме очагов при коровых землетрясениях и подземных взрывах // ДАН СССР. 1985. Т. 283, № 5.
44. Тамуж В.П., Куксенко В.С. Микромеханика разрушения полимерных материалов. Рига: Зинатне, 1978.
45. Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: материалы 1-й Междунар. школы-семинара (9–15 сент., 2001, Красноярск) / отв. ред. В.А. Мансуров. Красноярск: СибГАУ, 2002. 348 с.
46. Kuksenko V.S. et al. Nucleation of submicroscopic cracks in stressed Solids, *Int. Journ. of Fracture Mechanics*. 1975;(11)5:829-840.
47. Mendecki A.J. Dynamic rockmass response to mining, *Proceedings of the 5th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines (RaSiM5)*, South African Institute of Mining and Metallurgy, 2000. 17–20 Sept. 2001, techn. eds. G. van Aswegen, R.J. Durrheim, W.D. Orflepp. Johannesburg, 2000.
48. *Rockbursts and Seismicity in Mines – RaSiM5*. South African Institute of Mining and Metallurgy, 2001, p. 479-482.

**THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE**

Oparin V.N.

VIKTOR N. OPARIN, Member-Correspondent, Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Physics, Director, Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, e-mail: oparin@misd.nsc.ru

## Transformation of the elastic energy of the source zones of disastrous events into the kinetic energy of their structural elements

The paper presents the energy approach to the description of the formation and realisation of the source zones of disastrous events (earthquakes, rock bursts, and other dynamic manifestations of rock pressure) in high-stressed rock masses structured as hierarchies of blocks. The basis for the approach are the recent achievements in the field of pendulum wave theory, the energy condition for geomechanical quasi-resonances, and S.N. Zhurkov's kinetic concept of the strength of solids. The author introduces a new notion: the interference mechanism of the origination of different dynamic events as a result of interaction between global geodynamic fields and local geomechanical fields when working in mineral mines.

*Key words:* source zones, rock masses, pendulum wave theory, interference mechanism.

### REFERENCES

1. Adushkin V.V., Oparin V.N. From the phenomenon of alternating reaction of rocks on the dynamic effects – to the waves pendulum in strained geomeidia, FTPrPI, 2012;2:3-27. 2013;2:3-46. (in Russ.). [Adushkin V.V., Oparin V.N. Ot javlenija znakoperemnoj reakcii gornyh porod na dinamicheskie vozdejstvija – k volnam majatnikovogo tipa v naprjazhennyh geosredah // FTPrPI. 2012, № 2. S. 3–27; 2013, № 2. S. 3–46].
2. Adushkin V.V., Turuntaev S.B. Anthropogenic processes in the crust [of danger and disaster]. M., INEC, 2005. 252 p. (in Russ.). [Adushkin V.V., Turuntaev S.B. Tehnogennye processy v zemnoj kore [opasnosti i katastrofy]. M.: INJeK, 2005. 252 s.].
3. Bychkov I.V., Oparin V.N., Potapov V.P. Cloud technology to solve problems of mining Geoinformatics, FTPrPI, 2014;1:138-151. (in Russ.). [Bychkov I.V., Oparin V.N., Potapov V.P. Oblachnye tehnologii v reshenii zadach gornoj geoinformatiki // FTPrPI. 2014. № 1. S. 138-151].
4. Vettegren V.I., Kuksenko V.S., Svetlov V.N., Kryuchkov M.A. Kinetics and hierarchy of process failure loaded materials, Physical basis of forecasting of rock failure: Materials of the 1st Intern. School-Seminar, 9-15 Sept., 2001, Krasnojarsk. Krasnojarsk, SibSAU, 2002. (in Russ.). [Vettegren' V.I., Kuksenko V.S., Svetlov V.N., Krjuchkov M.A. Kinetika i ierarhija processa razrushenija nagruzhennyh materialov // Fizicheskie osnovy prognozirovanija razrushenija gornyh porod: materialy 1-go mezhdunar. shkoly-seminara (9–15 sent., 2001, Krasnojarsk). Krasnojarsk: SibGAU, 2002].
5. Explosions and earthquakes in the European part of Russia, ed. V.V. Adushkin, A.A. Malovichko. M., GEOS, 2013, 384 p. (in Russ.). [Vzryvy i zemletrjasenija na territorii Evropejskoj chasti Rossii / pod red. V.V. Adushkina i A.A. Malovichko. M.: GEOS, 2013. 384 s.].
6. Vikulin A.V. XX All-Russian Scientific Conference "Geodynamics and stress state bowels of the earth" // Herald KRAUNTS. Earth Sciences, 2013;(2)22:243-244. (in Russ.). [Vikulin A.V. XX Vserossijskaja nauchnaja konferencija «Geodinamika i naprjazhenoe sostojanie neдр Zemli» // Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle. 2013. № 2. Vyp. 22. S. 243–244].
7. Zhurkov S.N. Kinetic concept of the strength of solids (thermal-fluctuation mechanism). Journal of the Academy of Sciences of the USSR. 1968;3. (in Russ.). [Zhurkov S.N. Kineticheskaja koncepcija prochnosti tverdyh tel (Termofluktuaconnyj mehanizm) // Vestnik AN SSSR. 1968. № 3].
8. Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Petrov V.A. Predicting fracture rocks. Fiz. 1977;6. (in Russ.). [Zhurkov S.N., Kuksenko V.S. Petrov V.A. O prognozirovanii razrushenija gornyh porod // Fizika Zemli. 1977. № 6].

9. Kuksenko V.S. Manzhikov B.Ts., Mansurov V.A. Patterns of development microcenters destruction, Fiz. 1985; 7. (in Russ.). [Kuksenko V.S., Manzhikov B.C., Mansurov V.A. Zakonomernosti razvitija mikroochaga razrushenija // Fizika Zemli. 1985. № 7].
10. Kurlenya M.V., Oparin V.N. On the scale factor of the phenomenon of zonal disintegration of rocks and canonical series of atomic-ionic radii, FTPRPI, 1996;2. (in Russ.). [Kurlenja M.V., Oparin V.N. O masshtabnom faktore javlenija zonal'noj dezintegracii gornyh porod i kanonicheskijh rjadah atomno-ionnyh radiusov // FTPRPI. 1996. № 2].
11. Kurlenya M.V., Oparin V.N. On the phenomenon of alternating reaction of rocks on the dynamic effects, FTPRPI, 1990;4. (in Russ.). [Kurlenja M.V., Oparin V.N. O javlenii znakoperemnoj reakcii gornyh porod na dinamicheskie vozdejstvija // FTPRPI. 1990. № 4].
12. Kurlenya M.V., Oparin V.N. Problems of nonlinear geomechanics. Part 1, FTPRPI, 1999;3. (in Russ.). [Kurlenja M.V., Oparin V.N. Problemy nelinejnoj geomehaniki. Ch. 1 // FTPRPI. 1999. № 3].
13. Kurlenya M.V., Oparin V.N. Problems of nonlinear geomechanics. Part 2, FTPRPI, 2000;4. (in Russ.). [Kurlenja M.V., Oparin V.N. Problemy nelinejnoj geomehaniki. Ch. 2 // FTPRPI. 2000. № 4].
14. Kurlenya M.V., Oparin V.N., Vostrikov V.I. On the formation of elastic wave packets under pulsed excitation block media. Waves Pendulum  $\nu\mu$ . DAN. 1993;(333)4. (in Russ.). [Kurlenja M.V., Oparin V.N., Vostrikov V.I. O formirovanii uprugih volnovyh paketov pri impul'snom vozbužhdenii blochnyh sred. Volny majatnikovogo tipa  $\nu\mu$  // DAN. 1993. T. 333, № 4].
15. Kurlenya M.V., Oparin V.N., Vostrikov V.I. On the effect of anomalously low friction in block media, FTPRPI, 1997;1. (in Russ.). [Kurlenja M.V., Oparin V.N., Vostrikov V.I. Ob jeffekte anomal'no nizkogo trenija v blochnyh sredah // FTPRPI. 1997. № 1].
16. Kurlenya M.V., Oparin V.N., Eremenko A.A. A method of scanning mine seismological information, DAN, 1993;(333)6. (in Russ.). [Kurlenja M.V., Oparin V.N., Eremenko A.A. Ob odnom metode skanirovanija shahtnoj sejsmologicheskoj informacii // DAN. 1993. T. 333, № 6].
17. Kurlenya M.V., Oparin V.N., Eremenko A.A. On the relation of the linear dimensions of blocks of rock to the values of the cracks in the structural hierarchy array, FTPRPI, 1993;3. (in Russ.). [Kurlenja M.V., Oparin V.N., Eremenko A.A. Ob otnoshenii linejnyh razmerov blokov gornyh porod k velichinam raskrytija treshhin v strukturnoj ierarhii massiva // FTPRPI. 1993. № 3].
18. Kurlenya M.V., Oparin V.N., Matasova G.G., Morozov P.F., Tapsiev A.P., Tapsiev G.A., Fedorenko B.V. On the method of constructing maps of disturbance of rocks according to geophysical logging. Pt 4: Some practical applications, FTPRPI, 1992;2. (in Russ.). [Kurlenja M.V., Oparin V.N., Matasova G.G., Morozov P.F., Tapsiev A.P., Tapsiev G.A., Fedorenko B.V. O metodike postroenija kart narushennosti massivov gornyh porod po dannym geofizicheskogo karotazha. Ch. 4: Nekotorye prakticheskie prilozhenija // FTPRPI. 1992. № 2].
19. Kurlenya M.V., Oparin V.N., Jushkin V.F. et al. On some features of the evolution of harmonic acoustic signals during loading block media with a cylindrical cavity, FTPRPI, 1999;6. (in Russ.). [Kurlenja M.V., Oparin V.N., Jushkin V.F. i dr. O nekotoryh osobennostjah jevoljucii garmonicheskijh akusticheskijh signalov pri nagruženii blochnyh sred s cilindricheskij polost'ju // FTPRPI. 1999. № 6].
20. Guidelines for the study of rock pressure on the models of equivalent materials, ed. F.P. Glushihin, L., VNI-MI, 1976. (in Russ.). [Metodicheskie ukazanija po issledovaniju projavlenij gornogo davlenija na modeljah iz jekvivalentnyh materialov / pod red. F.P. Glushihina. L.: VNIMI, 1976].
21. Myachkin V.I. Earthquake preparation processes. M., Science, 1978. (in Russ.). [Mjachkin V.I. Processy podgotovki zemletrjasenij. M.: Nauka, 1978].
22. Oparin V.N. Pendulum Waves and "geomechanical temperature". Tr. 2nd Ros.-Kit. conf. "Nonlinear geomechanics-geodynamic processes when developing mineral deposits at great depths." Novosibirsk, Institute of Mining SB RAS, 2012. (in Russ.). [Oparin V.N. Volny majatnikovogo tipa i «geomechanicheskaja temperatura» / Tr. 2-j Ros.-Kit. konf. «Nelinejnye geomehaniko-geodinamicheskie processy pri otrabotke mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh na bol'shijh glubinah». Novosibirsk: IGD SO RAN, 2012].
23. Oparin V.N. On the foundations of borehole geophysical inspection. Part I: Spectral analysis and measures of defects, FTPRPI, 1982;6. (in Russ.). [Oparin V.N. K osnovam skvazhinnoj geofizicheskij defektoskopii. Ch. I: Spektral'nyj analiz i mery defektnosti // FTPRPI. 1982. № 6].
24. Oparin V.N. Methodological bases for the construction of multi-layer monitoring systems geomechanics-geodynamic safety for mining areas in tectonically active zones. Problems and innovation mining development: Proceedings of the 6th Intern. scientific-practical conf. (9-11 Sept. 2013). Almaty, 2013. (in Russ.). [Oparin V.N. Metodologicheskie osnovy postroenija mnogoslojnyh monitoringovyh sistem geomehaniko-geodinamicheskij bezopasnosti dlja gornodobyvajushhijh rajonov v tektonicheski aktivnyh zonah // Problemy i

- puti innovacionnogo razvitija gornodobyvajushhej promyshlennosti: materialy 6-j Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. (9–11 sent. 2013). Almaty, 2013].
25. Oparin V.N. Energy criterion surround rock destruction, Tr. scientific. seminar "Week of the miner, 2009, M., MGGU, 2009. (in Russ.). [Oparin V.N. Jenergeticheskiy kriterij ob#emnogo razrushenija gornyh porod // Tr. nauch. seminaru «Nedelja gornjaka. 2009». M.: MGGU, 2009].
  26. Oparin V.N., Annin B.D., Chugaj Y.V. et al. Methods and instrumentation for modeling and field studies of nonlinear processes in deformation and wave processes in block of rock mass, Novosibirsk, Publishing House of SB RAS, 2007, 320 p. (Integration of the SB RAS, vol. 13). (in Russ.). [Oparin V.N., Annin B.D., Chugaj Ju.V. i dr. Metody i izmeritel'nye pribory dlja modelirovanija i naturnyh issledovanij nelinejnyh deformacionno-volnovyh processov v blochnyh massivah porod. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2007. 320 s. (Integracionnye proekty SO RAN; vyp. 13)].
  27. Oparin V.N., Bagaev S.N., Malovichko A.A. et al. Methods and systems for monitoring seismic and deformation technogenic earthquakes and rock bursts. Vol. 1, Novosibirsk, Publishing House of SB RAS, 2009. 304 p. (Integration of the SB RAS, vol. 24). (in Russ.). [Oparin V.N., Bagaev S.N., Malovichko A.A. i dr. Metody i sistemy sejsmodeformacionnogo monitoringa tehnogennyh zemletrjasenij i gornyh udarov. T. 1. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2009. 304 s. (Integracionnye proekty SO RAN; vyp. 24)].
  28. Oparin V.N., Emanov A.F., Vostrikov V.I., Tsibizov L.V. Kinetic features of seismic and emission processes when developing the coal fields of Kuzbass, FTPrPI, 2013;4:3-22. (in Russ.). [Oparin V.N., Emanov A.F., Vostrikov V.I., Cibizov L.V. O kineticheskikh osobennostjakh razvitija sejsmojemiSSIONnyh processov pri otrabotke ugol'nyh mestorozhdenij Kuzbassa // FTPrPI. 2013. № 4. S. 3–22].
  29. Oparin V.N., Kurlenya M.V. On the high-speed section of the Earth by Gutenberg and its possible geomechanical explanation, FTPrPI, Part 1, 1994;2; Part 2, 1994;3; Part 3, 1994;4; Part 4, 1994;6. (in Russ.). [Oparin V.N., Kurlenja M.V. O skorostnom razreze Zemli po Gutenbergu i vozmozhnom ego geomechanicheskom ob#jasnenii // FTPrPI: Ch. 1. 1994, № 2; Ch. 2. 1994, № 3; Ch. 3. 1994, № 4; Ch. 4. 1994, № 6].
  30. Oparin V.N., Malovichko A.A., Antsiferov A.V. et al. Methods and systems for monitoring seismic and deformation of technogenic earthquakes and rock bursts. Vol. 2, Novosibirsk, Publishing House of SB RAS, 2010, 261 p. (Integration of the SB RAS, vol. 25). (in Russ.). [Oparin V.N., Malovichko A.A., Anciferov A.V. i dr. Metody i sistemy sejsmodeformacionnogo monitoringa tehnogennyh zemletrjasenij i gornyh udarov. T. 2. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2010. 261 s. (Integracionnye proekty SO RAN; vyp. 25)].
  31. Oparin V.N., Sashurin A.D., Leont'ev A.V. et al. Destruction of the earth's crust, and processes of self-organization in the areas of strong anthropogenic impact. Novosibirsk, Publishing House of SB RAS, 2012, 632 p. (in Russ.). [Oparin V.N., Sashurin A.D., Leont'ev A.V. i dr. Destrukciya zemnoj kory i processy samoorganizacii v oblastjakh sil'nogo tehnogennogo vozdejstvija. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2012. 632 s.].
  32. Oparin V.N., Sashurin A.D., Leont'ev A.V. et al. Recent geodynamics of the rock mass upper lithosphere: the origins of the parameters, the impact on subsurface objects. Novosibirsk, Publishing House of SB RAS, 2008, 450 p. (in Russ.). [Oparin V.N., Sashurin A.D., Leont'ev A.V. i dr. Sovremennaja geodinamika massiva gornyh porod verhnjej chasti litosfery: istoki, parametry, vozdejstvie na ob#ekty nedropol'zovanija. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2008. 450 s.].
  33. Oparin V.N., Simonov B.F. Nonlinear deformation-wave processes in vibrovolnovyh geotechnologies oil and gas development, FTPrPI, 2010;2:3-25. (in Russ.). [Oparin V.N., Simonov B.F. O nelinejnyh deformacionno-volnovyh processah v vibrovolnovyh geotehnologijah osvoenija neftegazovyh mestorozhdenij // FTPrPI. 2010. № 2. S. 3–25].
  34. Oparin V.N., Simonov B.F., Jushkin V.F., Vostrikov V.I., Pogarsky Y.V., Nazarov L.A. Geomechanical and tectonic foundations of EOR technologies in vibration of waves. Novosibirsk, Nauka, 2010. 404 p. (in Russ.). [Oparin V.N., Simonov B.F., Jushkin V.F., Vostrikov V.I., Pogarskiy Ju.V., Nazarov L.A. Geomechanicheskie i tektonicheskie osnovy uvelichenija nefteotdachi plastov v vibrovolnovyh tehnologijah. Novosibirsk, Nauka, 2010. 404 s.].
  35. Oparin V.N., Tanayno A.S. Canonical scale hierarchical views in the mountain of science of rocks. Novosibirsk, Nauka, 2011, 440 p. (in Russ.). [Oparin V.N., Tanajno A.S. Kanonicheskaja shkala ierarhicheskikh predstavlenij v gornom porodovedenii. Novosibirsk: Nauka, 2011. 440 s.].
  36. Oparin V.N., Tapsiev A.P., Vostrikov V.I. et al. On the possible causes of increasing seismic activity of mine fields and mines the October, Taimyr Norilsk deposit in 2003, FTPrPI, 2004;4-6; 2005;1. (in Russ.). [Oparin V.N., Tapsiev A.P., Vostrikov V.I. i dr. O vozmozhnyh prichinah uvelichenija sejsmicheskoy aktivnosti shahtnyh polej rudnikov Oktjabr'skij i Tajmyrskij Noril'skogo mestorozhdenija v 2003 g. // FTPrPI. 2004. № 4–6; 2005. № 1].
  37. Oparin V.N., Tapsiev A.P., Rosenbaum M.A. et al. Zonal disintegration of rocks and stability of underground workings, Novosibirsk, Publishing House of SB RAS, 2008, 276 p. (in Russ.). [Oparin V.N., Tapsiev A.P.,

- Rozenbaum M.A. i dr. Zonal'naja dezintegracija gornyh porod i ustojchivost' podzemnyh vyrabotok. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2008. 276 s.].
38. Oparin V.N., Jushkin V.F., Akinin A.A., Balmashnova E.G. A new scale structural and hierarchical representations as specifications on objects geomedium, FTPrPI, 1998;5. (in Russ.). [Oparin V.N., Jushkin V.F., Akinin A.A., Balmashnova E.G. O novej shkale strukturno-ierarhicheskikh predstavlenij kak pasportnoj karakteristike ob#ektov geosredy // FTPrPI. 1998. № 5].
  39. Oparin V.N., Yakovitskaya G.E., Vostretsov A.G., Seryakov V.M., Krivetsky A.V. On the coefficient of mechanical and electromagnetic changes in the destruction of rock samples, FTPrPI, 2013;3:3-20. (in Russ.). [Oparin V.N., Jakovickaja G.E., Vostrecov A.G., Serjakov V.M., Kriveckij A.V. O koefefficente mehano-jelektromagnitnyh preobrazovanij pri razrushenii obrazcov gornyh porod // FTPrPI. 2013. № 3. S. 3-20].
  40. Petrov V.A., Bashkarev A.J., Vettegren V.I. Physical basis of fracture prediction of structural materials. S. Petersburg, Polytechnic, 1993, 475 p. (in Russ.). [Petrov V.A., Bashkarev A.Ja., Vettegren' V.I. Fizicheskie osnovy prognozirovanija razrushenija konstrukcionnyh materialov. SPb.: Politehnika, 1993. 475 s.].
  41. Sadovsky M.A. Kustovatost natural rock. DAN. 1979;(247)4. (in Russ.). [Sadovskij M.A. Estestvennaja kustovatost' gornoj porody // DAN. 1979. T. 247, № 4].
  42. Sadovsky M.A. On the properties of discrete rocks, Fiz. 1982;12. (in Russ.). [Sadovskij M.A. O svojstve diskretnosti gornyh porod. Fizika Zemli. 1982. № 12].
  43. Sadovsky M.A., Cedrov O.C., Pasechnik I.P. Seismic energy and volume of foci with crustal earthquakes and underground explosions, DAN. 1985;(283)5. (in Russ.). [Sadovskij M.A., Kedrov O.K., Pasechnik I.P. O sejsmicheskoi jenergii i ob#eme ochagov pri korovyh zemletrjasenijah i podzemnyh vzryvah // DAN. 1985. T. 283, № 5].
  44. Tamuzs V.P., Kuksenko V.S. Micromechanics of fracture of polymeric materials. Riga, Zinatne, 1978. (in Russ.). [Tamuzh V.P., Kuksenko V.S. Mikromehanika razrushenija polimernyh materialov. Riga: Zinatne, 1978].
  45. Physical basis of prediction of rock failure, Proceedings 1st Internat. School-Seminar, 9-15 Sept., 2001, Krasnoyarsk, ed. V.A. Mansurov. Krasnoyarsk, SibSAU, 2002. (in Russ.). [Fizicheskie osnovy prognozirovanija razrushenija gornyh porod: materialy 1-j Mezhdunar. shkoly-seminara (9–15 sent., 2001, Krasnojarsk) / otv. red. V.A. Mansurov. Krasnojarsk: SibGAU, 2002. 348 s.].
  46. Kuksenko V.S. et al. Nucleation of submicroscopic cracks in stressed Solids, Int. Journ. of Fracture Mechanics. 1975;(11)5:829-840.
  47. Mendecki A.J. Dynamic rockmass response to mining, Proceedings of the 5th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines (RaSiM<sub>5</sub>), South African Institute of Mining and Metallurgy, 2000. 17–20 Sept. 2001, techn. eds. G. van Aswegen, R.J. Durrheim, W.D. Orflepp. Johannesburg, 2000.
  48. Rockbursts and Seismicity in Mines – RaSiM<sub>5</sub>, South African Institute of Mining and Metallurgy, 2001, p. 479-482.