

## Об иерархической природе деформации и разрушения твердых тел и сред

П.В. Макаров

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634021, Россия

Представлен краткий обзор экспериментальных и теоретических исследований разрушения хрупких и пластичных тел и сред, включая геоматериалы и геосреды, неопровержимо свидетельствующих об иерархичности и самоподобии процессов их деформации и разрушения. Показано, что принцип универсальной делимости геоматериалов и геосред может быть продолжен на мезо- и микроуровни, на которых сохраняется (а точнее сказать, с которых начинается) самоподобие процесса их деструкции, установленное для макрообъектов. Показано также, что этот принцип может быть распространен и на пластичные материалы и среды. Обсуждается соображение, что альтернативу статистическим методам анализа разрушения и деформации может составить общая теория систем.

### On hierarchical nature of deformation and fracture of solids and media

P.V. Makarov

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, 634021, Russia

We present a brief review of experimental and theoretical investigations of fracture of brittle and plastic solids and media, including geomaterials and geomeia. The investigations irrefutably testify the hierarchy and self-similarity of their deformation and fracture. It is shown that the principle of infinite divisibility of geomaterials and geomeia can extend to meso- and microlevels where self-similarity of their destruction, determined for macroobjects, is preserved (but, more precisely, begins). It is also shown that this principle can be applied to plastic materials and media. The consideration is given to the general theory of systems as an alternative to statistical methods of fracture and deformation analysis.

#### 1. Введение. Цели и задачи исследования

К настоящему времени можно считать установленным, что деформация пластичных твердых тел, как и разрушение хрупких сред, является коллективным многоуровневым иерархическим процессом. Все больше появляется работ, в которых эти процессы изучаются в рамках иерархических представлений и моделей [1–7]. Первые работы в этом направлении связаны с изучением геоматериалов и геологических сред [8–10]. Одним из базовых положений физической мезомеханики также является идея о иерархической организации нагружаемых материалов [1–5].

Процессы эволюции внутренней структуры нагружаемых материалов, ее самоорганизация, образование различных кластеров и субструктур, т.е. коллективные явления при пластической деформации и разрушении материалов и прочных сред также являются объектами пристального внимания. Иерархическая природа деформации и разрушения как раз и отражает коллективность этих процессов.

В работе [7], посвященной фундаментальным проблемам сейсмологии и геодинамики, в связи с методологией и достижениями физической мезомеханики С.В. Гольдин сформулировал три вопроса:

1. Обладает ли процесс деструкции литосферы свойством подобия на различных масштабах?
2. Связаны ли с блочной структурой специфические движения (имеются ввиду так называемые медленные движения), обладающие специфическими временами и скоростями?
3. Каким образом происходит активизация (накопление энергии) в блочных средах?

Он же [7] суммирует эти вопросы как следующую фундаментальную проблему: «Является ли блочная структура геологической среды существенной ее характеристикой?».

Начиная с последнего, более общего вопроса, можно дать следующие ответы.

Блочная структура присуща всем без исключения твердым деформируемым телам и средам, но не как

изначально заданная, а как проявляющаяся в процессах их деформирования и разрушения.

Именно это свойство деформируемых твердых тел (которое уже фактически обосновано накопленными к настоящему времени экспериментальными данными, что и будет продемонстрировано в ходе изложения) является также и свидетельством того, что нет принципиальной разницы между хрупкими и пластичными материалами и средами или между пластичностью, проявляемой нагружаемыми металлами, и разрушением геоматериалов и геосред, если анализировать процессы деструкции с точки зрения иерархических систем и синергетики (что не исключает специфики конкретных физических механизмов).

Термин деструкция объединяет понятия пластической деформации и разрушения, рассматривая их как единый процесс деградации материала под действием приложенных нагрузок, в ходе которого и образуется иерархия блоков.

Любой материал изначально представляет собой сложную, иерархически организованную систему (но не обязательно блочную). Реагируя на нагружение, эта система эволюционирует по законам синергетики, образуя иерархию элементов разных масштабов или блоков [2]. Этот процесс самоорганизации на начальных этапах нагружения приводит к локализации деформации и повреждений, дальнейшая эволюция системы приводит к образованию системы консолидированных блоков и неконсолидированных блочных систем.

Ключевым здесь является понятие материала как системы. В подавляющем большинстве работ разрушение анализируется на основе статистических представлений. Так, универсальному критерию укрупнения трещин [11, 12] придается статистический смысл.

Представление нагружаемого материала как эволюционирующей под действием приложенных нагрузок системы является альтернативой статистическому подходу [13, 14].

Системы определяются с помощью определенных отношений вход-выход, причем существенной чертой поведения систем, во-первых, является возможность нескольких выходов для заданного входа, что связано с наличием различного рода бифуркаций, и, во-вторых, запрет на некоторые реализации пар вход-выход [13–17].

Базовым методом описания систем является ее декомпозиция, т.е. представление системы в виде каким-либо образом организованного множества взаимодействующих объектов. Сами эти объекты также являются системами [13–15]. Наибольшее распространение в различных приложениях нашли иерархические многоуровневые декомпозиции, когда элементы системы распределяются по пространственно-временным масштабам, образуя пространственно-временные иерархии [14–17]. В этом ряду блочная иерархическая система организа-

ции деформируемого материала является типичным и не самым сложным примером иерархических многоуровневых систем.

То, что блочное строение геоматериалов, геологических сред и твердой оболочки Земли в целом является их фундаментальным свойством, можно считать общепризнанным [6–10]. В настоящее время ведется интенсивное изучение реального строения элементов земной коры на разных масштабах. Базовые элементы геологических сред — блоки — выделяются на основе изучения нарушений сплошности массивов. Масштабы этих нарушений установлены в широком диапазоне и варьируются от размеров дефектов кристаллической решетки геоматериалов ( $10^{-8}$  м) до размеров крупных тектонических разрывов порядка  $10^7$  м и более, т.е. на 15–16 порядков. Выбор диапазона исследований диктуется соответствующими целями и задачами приложений: глобальные и региональные геофизические проблемы, тектоника, проблемы горной механики, разработка полезных ископаемых, задачи разрушения и измельчения геоматериалов и т.д. По-видимому, можно уже говорить, что в науках о Земле в последнее десятилетие получили развитие идеи о блочном строении элементов земной коры не как о некоторой сложившейся к настоящему времени иерархической структуре, а как о динамической, эволюционирующей в поле сил иерархической системе [6, 7, 9]. Таким образом, элементы земной коры и геоматериалы рассматриваются как синергетические дискретные системы, которые обладают свойствами иерархичности и самоподобия (т.е. являются фрактальными системами) [6, 7, 18].

Сказанное выше можно в полной мере отнести ко всем без исключения прочным материалам и средам, в том числе и пластичным.

Методическая концепция мезомеханики и понятие мезоуровня как ключевого в ряду исследуемой иерархии масштабов оказалась чрезвычайно плодотворной для анализа деформации и разрушения материалов и сред [1–5, 7, 19]. Излагаемая концепция полностью соответствует методологии физической мезомеханики и ее основным положениям [1–5].

Практически в любом случае из всей возможной иерархии масштабов рассматриваемой среды для изучения выделяется объект (образец) вполне определенных ограниченных размеров, в зависимости от целей исследования. Как правило, это макроскопический объект и его интегральные макроскопические характеристики усредненно отражают его поведение на макроуровне. Физическая мезомеханика переносит центр внимания на более низкий, предшествующий мезоскопический уровень.

Таким образом, объектом изучения является мезообъем нагружаемого материала, который является элементом  $n$  уровня иерархии (мезоуровень) и включает в себя определенное число блоков (элементов) ( $n - 1$ )

уровня (микроуровень). Сам исследуемый мезообъем является составной частью более крупного структурного элемента-блока ( $n + 1$ ) уровня (макроуровень).

Если выбран масштаб образца для изучения, то, как правило, достаточно трех указанных уровней описания: микро- (интегрально отражает вклады нижележащих уровней и более подробное описание часто является избыточным [20, 21]), мезо- и макроуровень. Вышележащие уровни просто не рассматриваются.

Адекватное выделение блоков соответствующих иерархических уровней (в рамках выбранного представительного мезообъема), определение размеров и свойств межблоковых границ чрезвычайно важно и для разработки соответствующих моделей механического усредненного поведения данного мезообъема как элемента квазисплошной среды. Для такой блочной среды должны быть установлены некоторые эффективные физико-механические параметры, определяющие процессы деформации, накопления повреждений более мелких масштабов и разрушение мезообъема. Деструкция материала на мезоуровне в контексте методологии иерархических моделей рассматривается как развитие мезотрещин, соизмеримых по размерам с масштабом выбранного мезообъема. Процессы релаксации напряжений и характерные времена релаксации оказываются существенно связанными с рассматриваемыми пространственными интервалами. Понятно, что поведение тектонических плит и, прежде всего, характерные временные интервалы геологических процессов будут существенно отличаться от механического отклика на нагружение геоматериала много меньшего размера, например угля при разработке угольного пласта. В этом контексте изучение поведения горного массива или горной выработки или мезообъема существенно меньших размеров потребует разработки специфических моделей механического поведения блочной системы соответствующих масштабов (например, сотен метров и первых километров или миллиметров), в зависимости от задач исследования.

## 2. Деструкция геоматериалов и геосред

Так как первые работы, в которых нагружаемая среда (или материал) рассматривались как иерархически организованные блочные системы, были выполнены применительно к геосредам и геоматериалам, то, обобщая полученные в них результаты на более широкий класс материалов и сред, включая пластичные среды (с учетом их специфики), воспользуемся результатами, полученными в геомеханике, которые восходят к работам В.В. Пиотровского [22] и М.А. Садовского [8].

Следуя достаточно хорошо устоявшейся терминологии, употребляемой в геомеханике и геофизике, поясним смысл ряда понятий и терминов, употребляемых в настоящей работе [6, 7, 23–25]:

1. Под блоком понимают объем (участок) геосреды, обладающий индивидуальной структурой.

2. Системы трещин, разломы, литологические контакты, выявляемые как линейные элементы структуры геологических сред, принято называть линеаменами (полями трещин). Принято считать, что поле линеаментов и формирует структурный блок данного масштаба. (Г.Г. Кочарян и А.А. Спивак [6] дают очень важное разъяснение в связи с этим: «Из этой наглядной и привычной картины возникает привычное заблуждение — пересечение нарушений сплошности всегда формирует структурный блок»).

3. Поля линеаментов разных размеров формируют системы решеток разного порядка, тем самым определяя размеры блоков в иерархии масштабов в процессе деформации среды.

4. В связи с этим дается более точное определение блока заданного порядка как участка соответствующей длины двумерного (в более общем случае трехмерного) поля трещин, обладающего простой решеткой или их совокупностью [6].

5. Консолидированным состоянием блочной системы называют такую систему, которая под внешними воздействиями деформируется как целое структурное образование.

6. Под неконсолидированным состоянием понимают такое состояние геоматериала, которое проявляет при нагружении квазине независимое поведение ее составляющих элементов, т.е. наблюдаются заметные межблоковые смещения.

В связи с этим следует особо отметить новое направление в исследованиях блочных массивов горных пород и земной коры — изучение структуры и свойств межблочных промежутков [6, 24, 25], которые существенно влияют на делимость геологических сред при их деструкции.

Этот процесс деструкции носит не случайный хаотический характер накопления повреждений и слияния мелких трещин в более крупные, как считалось ранее, а достаточно строго упорядочен. В результате деструкции геоматериала или геосреды формируется иерархия блочных структур разных масштабов [6–10, 18, 23, 26–31].

Многие авторы [6, 9, 22, 26] считают установленным, что размеры блоков геоматериалов и элементов земной коры не произвольны, а дают некоторый дискретный ряд, в котором отношение размеров блоков  $n$ -го порядка к размеру соседних блоков порядка  $(n + 1)$  и  $(n - 1)$  удовлетворяет некоторому фундаментальному соотношению — универсальному принципу делимости материала при деструкции:

$$L_{n+1}/L_n = A \approx 3. \quad (1)$$

В соответствии со сказанным в работе [6] со ссылкой на результаты исследований В.В. Пиотровского [22] и

М.А. Садовского [8] приводится соотношение, определяющее соответствующий размер блока  $L_n$  в иерархии масштабов:

$$L_n = \begin{cases} (3+6) \cdot 10^{(n-1)/2} & \text{для } n = 2k - 1, \\ (1+2) \cdot 10^{(n-10)/2} & \text{для } n = 2k. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $k$  — целое число, изменяющееся от 1 до 9;  $L_n$  — характерный размер блока порядка  $n$ , измеряемый в километрах. В этой формуле наивысший порядок иерархии равен 18 при  $k = 9$ , что приводит к размерам блоков  $L_{18} \approx (10+20) \cdot 10^3$  км, характерным для литосферных плит. Минимальный масштаб блока при  $n = 1$  и  $k = 1$  приводит к  $L_1 = 3+6$  см (следующий в иерархии блок  $L_2 = 10+20$  см получается при  $k = 1$  и  $n = 2k = 2$ ) и т.д.

Поразительно, но соотношения (1) и (2) удивительно точно выполняются для всех материалов, устанавливая, например для пластичных материалов, отношение размеров дефектов структуры (в их обобщенном понимании) [32–34].

Прежде чем перейти к обсуждению иерархичности процесса деструкции упругопластических сред, остановимся на экспериментальных исследованиях масштабов разрушения угля в мезоскопическом диапазоне  $1+1000$  мкм [35, 36].

Экспериментальной задачей этих исследований было определение размеров последовательности блоков, которые в данном случае можно считать консолидированными. Блочное строение исследуемых мезообъемов угля нашло отражение в рельефе поверхностей изломов этих образцов при их выделении из более крупного образца, т.е. при разрушении более крупного куска угля (в том числе угольного пласта при его разработке). Для анализа иерархии разрушения угля была использована характеристика фрактальной размерности поверхностей скола (излома) угля [35, 36].

С.В. Гольдин, критикуя абсолютно универсальный характер блочности геологической среды (земной коры), как уже сложившейся системы, вне ее динамики, привел несколько ценных доказательств ее самоподобия, анализируя особенности затухания и поглощения волн в среде [7]. Он также справедливо отмечает, что «геологическая среда вряд ли является точным математическим фракталом» [7]. Понимание последнего позволяет относиться к соотношениям, подобным (1), (2), как к простому и удобному средству упорядочения и анализа наблюдаемых иерархических структур, не требуя строгого количественного согласия с ними наблюдаемых экспериментальных данных.

Если считать принцип делимости (1) вместе с иерархическим рядом (2) универсальным, а величину  $A$  фундаментальной константой, как полагают многие авторы, то допустимо продолжить иерархию (2) на более мелкие масштабы. Замечание же С.В. Гольдина [7] о том, что подобие, обнаруживаемое свойствами сейсмических

волн, начинается от характерных размеров кристаллических решеток, является дополнительным аргументом в пользу продления иерархического ряда (2) в область более мелких масштабов, что и было сделано в [35, 36].

Если строго следовать выражению (2), определяющему размеры блоков в иерархии масштабов применительно к изучаемому мезоскопическому уровню, то в исследуемом масштабе до 1000 мкм должны выявляться блоки следующих размеров:

$$L_{-3} = 300+600 \text{ мкм } (n = 2k - 1, k = -1),$$

$$L_{-4} = 100+200 \text{ мкм } (n = 2k, k = -2),$$

$$L_{-5} = 30+60 \text{ мкм } (n = 2k - 1, k = -2),$$

$$L_{-6} = 10+20 \text{ мкм } (n = 2k, k = -3),$$

$$L_{-7} = 3+6 \text{ мкм } (n = 2k - 1, k = -3),$$

$$L_{-8} = 1+2 \text{ мкм } (n = 2k, k = -4).$$

Действительно, все эти масштабы присутствуют в выполненных измерениях (см. табл. 2, 3, рис. 2, 4 в [35, 36]), а оценки размеров полученных фрагментов и делимость образцов угля достаточно хорошо соответствуют выражениям (1), (2).

Споры относительно универсальности принципа делимости материалов (1), (2) при их деструкции ведутся давно. Многие авторы отмечают серьезные отклонения наблюдений от (2) для разных сред (не только геоматериалов) [37]. Другие авторы объясняют подобные отклонения погрешностями экспериментов, а для геоматериалов неадекватным выделением блоков [6] на шумовом фоне множества нарушений сплошности среды.

В работе [10] Е.И. Шемякин на основании равенства накопленной потенциальной энергии деформации в объеме ( $A_* = VA$ , где  $A$  — удельная энергия деформации) и поверхностной энергии разрушения ( $E = \gamma S$ ,  $\gamma$  — удельная поверхностная энергия разрушения) ввел в рассмотрение характерный линейный масштаб разрушения  $VA = S\gamma$ , что дает  $V/S = \gamma/A = D_{cr}$ , где  $D_{cr}$  — критический размер области, в которой запас накопленной потенциальной энергии достаточен для образования новой поверхности. Как показано в [10], размер тела  $R$  простейшей формы (например шар, куб, цилиндр), отделяемого от основного объема, должен превосходить первоначальный критический размер предыдущего уровня  $D_{cr}$  в три раза.

Действительно, шар имеет запас упругой энергии деформации  $E = 4/3 \pi R^3 A$ , при свободном разрушении новая поверхность образуется по сфере  $S = 4\pi R^2 \gamma$ , отделяющей шар от остальной среды. Таким образом, только в шаре критического радиуса  $R$  запасается потенциальная энергия, достаточная для образования новой поверхности, и этот радиус в три раза превосходит критический размер предыдущего уровня. Действительно, т.к.  $S = E$  на момент разрушения, то  $4\pi R^2 \gamma = 4/3 \pi R^3 A$ , откуда  $R = 3\gamma/A = 3D_{cr}$ . Индукция по этому процессу

позволяет продвигаться вверх по иерархической лестнице [10]. Аналогичные результаты получаются и для других компактных тел (куба и цилиндра) [10].

Более того, Е.И. Шемякин [10] делает вывод, что отклонение коэффициента делимости от 3 свидетельствует об отклонении блока от компактного. Следовательно, по отклонению  $A$  в (1) от 3 можно судить о коэффициенте формы блоков в иерархии. В [10] приведены следующие примеры для параллелепипедов:

1. Набор  $R_1 = R$ ,  $R_2 = 1/2 R$ ,  $R_3 = 2R$  дает  $R = 3.5D_{ст}$ .
2. Набор  $R_1 = R$ ,  $R_2 = 1/5 R$ ,  $R_3 = 5R$  дает  $R = 6D_{ст}$ .

Таким образом, даже заметное отклонение блока от компактной формы дает значение коэффициента делимости  $A$  в (1), близкое к 3 (набор 1). Этот факт разъясняет, почему так хорошо работают соотношения (1) и (2).

Заметные отклонения коэффициента делимости от 3 в [35] побудили так организовать обработку экспериментов [36], чтобы можно было определить коэффициент формы, тем более, что оптические изображения поверхностей изломов свидетельствовали об удлиненной форме образовавшихся блоков [35, 36]. Найденный коэффициент формы для девяти разных образцов из разных угольных пластов варьировался в пределах от 1.2 до 4.5. Поразительно, что средний коэффициент формы также оказался практически равным универсальной постоянной делимости твердых тел  $\sim 2.7 \div 3.0$ . Этот результат можно трактовать следующим образом. Удлиненный элемент (в среднем) содержит три компактных блока.

### 3. Деструкция пластичных сред

Анализ локализации деформации и разрушения пластичных материалов, т.е. их деструкции, обычно проводится на основе методов определения концентрации, распределений и размеров повреждений разных масштабов [12, 32–34]. В качестве меры поврежденности среды используется концентрация сходных (близких по размеру) повреждений (дефектов, трещин). В качестве удобной критериальной величины используется безразмерная величина  $M$ , представляющая собой среднее расстояние между трещинами, измеренное в единицах их среднего размера ( $M = L/l$ , где  $L$  — среднее расстояние между трещинами,  $l$  — их средняя длина).

Установлено, что практически для всех материалов — пластических и хрупких, металлов, сплавов, горных пород и геосред, полимеров и композитов при различных условиях нагружения

$$M = a, \quad (3)$$

где  $a$  — универсальная постоянная, близкая к трем. Часто полагают, что  $M = e$  ( $e$  — основание натурального логарифма).

Условие  $M = a \approx e$  называют концентрационным критерием укрупнения трещин [12]. Работоспособность концентрационного критерия разрушения изучена не только для широкого круга материалов, но и проверена в чрезвычайно широком диапазоне линейных размеров трещин (от 100 Å до десятков км, т.е. в диапазоне  $\approx 12$  порядков) при вариации концентрации трещин приблизительно на 30 порядков [12]. Причем, во всех случаях относительное среднее расстояние между трещинами на момент разрушения (или укрупнения трещин) всегда близко к трем.

Таким образом, на основе совершенно иных физических соображений и другими средствами получен результат, полностью совпадающий с принципом универсальной делимости геоматериалов и геосред (1), (2), т.е.  $A = a$ . Такое совпадение не может быть случайным.

С.Н. Журков с сотрудниками [12] рассматривают процесс формирования укрупненных трещин как возникновение новой стадии структурной самоорганизации разрушаемого твердого тела, а самому концентрационному критерию разрушения (или укрупнения трещин) придается статистический смысл [10]. Расчеты, выполненные разными авторами, показали, что дальности действия концентраторов напряжений, возникающих в вершинах соседних трещин, недостаточно, чтобы трещины слились на расстояниях, равных их утроенной длине.

Традиционное объяснение заключается в следующем. В силу высокой общей концентрации трещин за счет флуктуаций в объеме всегда образуются области, в которых концентрация трещин (дефектов, повреждений) окажется существенно выше и трещины укрупнятся. Средняя же предельная концентрация отвечает критерию (3). Фактически, критерий укрупнения трещин означает, что подъем вверх по иерархической лестнице не просто приведет к более крупным трещинам, в три раза превосходящим предыдущие. В этом случае следующие в иерархии блоки будут в три раза крупнее предшествующих. Таким образом, переосмысление концентрационного критерия укрупнения трещин в рамках принципа универсальной делимости геосреды и геоматериалов (восходящего к работам [8, 22]) приводит к тем же результатам, что и соотношения (1) и (2), но уже для любых материалов и сред. Такая трактовка концентрационного критерия укрупнения трещин полностью снимает проблему слияния трещин размером  $L$  на расстояниях  $3L$  и означает, что трещины локализируются на поверхностях, оконтуривая следующие в ряду иерархии блоки.

В работе [32] анализируется распределение дефектов и изучается структура ансамблей нанодфектов на поверхности нагружаемых металлов (меди, золота и молибдена). Показано, что установленное распределение дефектов по размерам имеет универсальный характер,

который отражает оптимальность свойств ансамблей дефектов (принцип максимума энтропии). Причем, оказалось, что для точного описания распределения необходимо использовать не одно, а два распределения (в выбранном диапазоне масштабов). Отношение средних размеров дефектов в распределениях и стандартных энергий их образования оказалось равным трем.

Авторы [32] пишут: «Этот результат трудно интерпретировать в рамках классической кинетики. В следующей работе мы намерены представить модель, которая объясняет «магическое» число 3» (?).

Более того, расчетное значение  $L/d$ , где  $L$  — среднее расстояние между дефектами, а  $d$  — их средний размер, оказалось  $\approx e$  ( $L/d = 2.6 \div 2.8$ ). Авторы отмечают, что такое же отношение  $L/d \approx e$  было установлено и для трещин перед разрушением [32] и далее пишут: «По-видимому, в этих условиях структура ансамблей трещин также близка к термодинамически оптимизированной».

В работе [33] изучается динамическая долговечность девяти металлов в диапазоне времен  $t < 10^{-6}$  с ( $t \approx 10^{-9} \div 10^{-8}$  с), которая сравнивается с квазистатической долговечностью. При варьировании времени разрушения на 15 порядков от  $10^7$  с до  $10^{-8}$  с для всех металлов получена единая кривая долговечности в универсальных координатах. Отношение критической плотности поглощенной материалом энергии к энергетическим параметрам кристаллической решетки (теплоты фазового перехода и энтальпии) оказалось инвариантом поведения изученных металлов по отношению к внешним воздействиям. Исследованы каскады центров разрушения, которые по данным авторов [33] являются фрактальными кластерами, а процесс разрушения на заключительной стадии контролируется концентрационным критерием на всех рассматриваемых масштабах линейных размеров [33, 38]. Как считают авторы [33], наблюдаемая универсальность обусловлена самоподобием и пространственно-временной самоорганизацией в ансамблях центров разрушения в диапазонах, превышающих четыре порядка по размерам.

К подобным выводам приходят и авторы работы [34], которые утверждают, что анализ накопления несплошностей с точки зрения общих закономерностей процесса разрушения в различных материалах, включая металлы, неметаллы и горные породы, показывает, что эти закономерности оказываются подобными и не зависят от природы материала и рассматриваемого масштабного уровня. Показано, что на различных масштабных уровнях разрушения остается неизменной стадийность процесса повреждаемости среды (накопление микродефектов, полос скольжения, пор, микротрещин и макродефектов развивается подобным образом).

Расчеты значения концентрационного критерия, записанного в форме

$$K = N^{-1/3}/L \quad (4)$$

( $L$  — длина трещины;  $N$  — концентрация трещин), для малоуглеродистой стали [34, 39] показали, что в точке перегиба зависимости для концентрации трещин от их размера (что равносильно достижению концентрации трещин критической величины) величина  $K$  в (4) снижается приблизительно в три раза. Это означает, как легко видеть из (4), увеличение в три раза средней характерной длины трещин  $L$ .

Традиционно трещину принято рассматривать как линейный объект, который распространяется в среде, увеличиваясь в размерах под действием приложенных к телу нагрузок (трещина Гриффитса). Но есть другая сторона проблемы, связанная с процессом деструкции объемов нагружаемого материала.

Разрушение в объеме не есть просто процесс рассеянного накопления повреждений, зарождения и роста систем единичных трещин. Это многоуровневый процесс диссипации в объеме подводимой к телу энергии, который термодинамически оптимизирован, что и приводит к образованию в деформируемом теле иерархий субструктур (объемных блоков) с определенным соотношением размеров формирующихся объемов в ряду иерархии.

Так как разрушение развивается в объеме, то «трещины», дефекты, полосы локализованной деформации (или их системы) будут образовывать поверхности (замкнутые либо нет), околнуривающие определенные объемы. Именно с этих позиций необходимо переосмыслить все накопленные данные по разрушению прочных сред для понимания процессов деструкции твердых тел.

В связи со сказанным концентрационный критерий не имеет отношения собственно к концентрации трещин (это один из физических способов анализа разрушения — подсчет числа повреждений и их распределений) и означает не просто увеличение линейного размера трещин в три раза, а свидетельствует о формировании объемного структурного элемента, дефекта (блока консолидированного или нет) в ряду иерархии, средние линейные размеры которого приблизительно в три раза больше предшествующего. Все сказанное в полной мере относится и к пластической деформации, которая на уровне элементарных актов есть не что иное как нарушение межатомных связей, т.е. деструкция материала.

В объеме пластичного материала, как и в хрупкой геосреде, будут формироваться поверхности локализованной деформации, в которых деструкция материала существенно выше. Пространственные поля таких повреждений будут формировать иерархию блоков в пластичном материале, соотношения размеров которых в иерархии удовлетворяют концентрационному критерию (3) или (4), а значит, и универсальному принципу делимости материалов и сред (1), (2). Здесь также уместно предостеречь от тривиального понимания блока как объема, ограниченного системой сопряженных полос

[6]. Только поля поверхностей (полос в двумерном случае) локализованной деформации разных масштабов в ряду иерархии формируют блоки соответствующих масштабов. И этот процесс нельзя рассматривать вне динамики нагружения материала, так как он полностью определяется развитием конкретного деформационного процесса. Существенное отличие пластичных сред (прежде всего металлов) от геоматериалов и геосред заключается в том, что формирующаяся в этих средах иерархия блоков остается консолидированной вплоть до разрушения, т.е. до разделения материала на части, а стадия предразрушения (пластической деформации) существенно больше.

Реологические особенности нагружаемых сред накладывают свой отпечаток на форму образующихся блоков (например, мезоскопического масштаба, которые значительно легче наблюдать). Так, в пластичных материалах их форма должна быть близка к кубической или к параллелепипедам, в то время как в геосреде, где значительны проявления дилатансии и внутреннего трения, форма блоков будет ближе к параллелограммам. Это подтверждают и поля сопряженных линеаментов (трещин), которые нечасто образуют прямые углы [6] (см. схему линеаментов и схему выделенных блоков по Г.Г. Кочаряну и А.А. Спиваку, рис. 1).

#### 4. Масштабный эффект и «медленные движения» как специфические проявления эволюции блочных систем под нагрузкой

В рамках теории многоуровневых иерархических систем и пространственно-временной самоорганизации

элементов структуры деформируемого материала (среды) находят объяснение многочисленные и хорошо известные проявления так называемого масштабного эффекта. Хорошо известно, что по поведению стандартного образца, существенно меньшего размера, чем исследуемый более крупный объект, нельзя судить о поведении всего объекта. Прочность, например, крупногабаритной, оболочечной конструкции (имеется в виду цельнометаллическая конструкция) существенно ниже, чем ее малых моделей, изготовленных по правилам физического моделирования. Объяснение, что большая конструкция обязательно должна содержать различные технологические дефекты и их статистика непредсказуема, является неудовлетворительным. Современные высокие технологии позволяют создавать подобные конструкции очень высокого качества, когда малые образцы, взятые для испытаний из любой части конструкции, показывают высокие и стабильные прочностные характеристики.

Здесь возможен анализ только с позиций теории систем (в данном случае пространственно-временной иерархии блочных систем). Крупногабаритная конструкция отделена от масштаба образца несколькими (часто многими) промежуточными уровнями, которые вовлекаются в деформационный процесс при ее нагружении. Формирование новых блоков иерархии, бифуркации различного рода или, иными словами, эволюция более сложной иерархической системы с существенно большими возможностями к проявлению коллективных явлений и к самоорганизации приведет к результатам, заметно отличающимся от поведения малого образца, что и наблюдается в опытах.

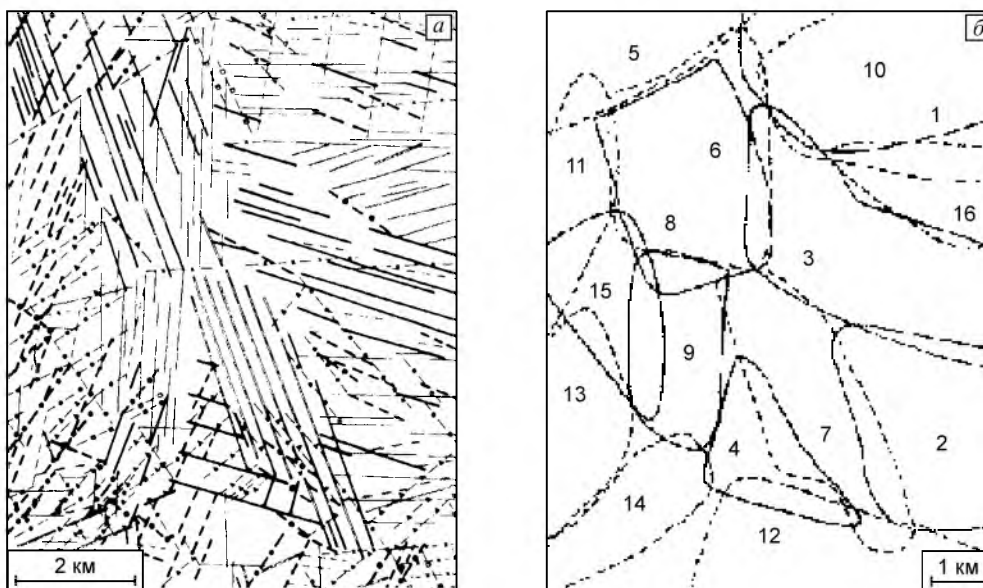


Рис. 1. Схема линеаментов участка западного разрыва, связанного с землетрясением 28 октября 1983 г. в Центральном Айдахо (США) (разными линиями показаны линеаменты различных систем) (а). Схема выделенных блоков 1–16 с различными системами рисунка поля линеаментов (б) [6]

Хорошо известно, что более сложная система всегда менее надежна, в ней больше каналов, способных оптимизировать процесс диссипации энергии, поэтому и прочность крупного элемента (образца, геобъекта) будет ниже, чем прочность малого образца, взятого для испытания. Классическим примером являются сверхпрочные микрокристаллы металлов, так называемые «усы». Дело не только в том, что они обладают почти идеальной кристаллической решеткой (это взгляд со стороны физики), а и в том, что они не обладают сколько-нибудь развитой и способной к эволюции структурой, находясь на самом нижнем ярусе иерархической лестницы (взгляд со стороны теории систем).

В геодинатике и геофизике в понятия «геоматериал» и «геосреда» вкладываются разные значения. Хорошо известно, что деформационные свойства геосреды отличаются от деформационных свойств геоматериала, даже в том случае, когда, например, протяженные участки земной коры слагаются из определенного и хорошо изученного конкретного геоматериала. Имеет место тот же масштабный эффект.

Таким образом, понятие геологического времени (в смысле релаксационных свойств объектов) применимо только к геосредам соответствующих (достаточно больших) масштабов. Оценки показывают, что реология геосред на геологических временах от миллионов до сотен миллионов лет приводит к значениям вязкости порядка  $\eta = 10^{17} \div 10^{22}$  Па·с. Соответствующие значения вязкости и отвечающие им времена релаксации ( $\tau = Gt_p$ ) присущи только геосреде и принципиально не могут быть получены непосредственно из опытов, выполненных на образцах в лаборатории.

Таким образом, геосреда принципиально не сводима к геоматериалу и представляет собой более сложную пространственно-временную иерархическую систему.

Рассматривая деформируемое твердое тело или прочную среду как иерархически организованную (блочную) систему, элементы которой распределены по уровням согласно их пространственно-временным масштабам, последовательность характерных пространственных масштабов можно оценить, используя соотношения (1), (2).

Установление соответствующего ряда характерных времен релаксации, связанных с выбранным для анализа пространственным масштабом, представляет более сложную проблему.

Так, например, дислокационные механизмы, обеспечивающие релаксацию напряжений во фронте ударной волны в металлах приводят к характерным временам релаксации  $\approx 10^{-9} \div 10^{-7}$  с [40, 41]. Непосредственно за фронтом ударной волны, где начинают играть заметную роль коллективные явления, времена релаксации на 2–3 порядка выше и равны  $\approx 10^{-6}$  с [42]. В работе [32] не приводятся характерные времена релаксации наблюдаемых на поверхностях металлов дефектов, но отмечают-

ся, что «мельчайшие» дефекты (5–50 нм) быстро релаксируют (?), в то время как время жизни крупных квазистационарных дефектов на 3–4 порядка больше.

Установление иерархии характерных времен для изучаемых масштабов деструкции крайне важно для понимания процессов и механизмов деформации как пластических сред, так и геоматериалов и геосред, и эта сложная задача ждет своего решения.

В физике пластичности достаточно хорошо изучено такое явление, как зарождение и распространение полос Людерса, которые могут, по-видимому, служить неким аналогом «медленных движений», наблюдаемых в геосредах.

К классу «медленных движений» в деформируемых средах можно отнести и поверхностные «волны локализации пластической деформации», наблюдаемые для широкого круга металлов и сплавов [43, 44]. Для них установлены основные характеристики: зависимости скорости распространения от коэффициента деформационного упрочнения, закон дисперсии, зависимости длины волны от размеров зерен и масштаба образца [43].

Предложенная авторами [43] модель этого явления фактически опирается на блочное иерархически организованное пространственно-временное распределение структурных элементов деформируемой среды: «... деформируемая среда представляется как мозаика по-разному деформированных областей, отдельные элементы которой продеформированы и напряжены по-разному».

Перераспределение в нагружаемой среде накопленной ею энергии деформации (не исключаются и другие виды энергии, например, фазовых переходов, тепловой и т.д., и их трансформации в энергию механического движения) могут породить (и порождают) в иерархии блоков огромное разнообразие «медленных движений» [45–47]. Фронтальное вовлечение в деформационный процесс и в перераспределение энергии блоков определенной последовательности масштабов зависит, по-видимому, от многих факторов и, несомненно, от граничных условий: наличия концентратора соответствующей мощности, выделения энергии в среде (например, мощности взрыва). Такие фронты деформационных волн есть результат коллективных явлений, связанных с самоорганизацией («переупаковками») блоков в иерархии.

В работе [46], где анализируется подобное явление смещения геоблоков от технологического взрыва, отмечен очень важный факт. При регистрации «волн смещений» было замечено, что на определенном расстоянии от очага взрыва ( $\approx 32$  м в данных опытах) при массе взрывчатого вещества в 200 кг волна смещений с характерной для данных условий скоростью волны  $V \approx 0.57$  м/с регистрировалась, а при массах 90, 100 и 130 кг не фиксировалась. Эти измерения не только подтверждают гипотезу о том, что «медленные движения»



есть результат перераспределения энергии и «переупаковки» блоков определенных масштабов в нагружаемой геосреде, но и позволили авторам работ [46, 47] оценить характерный размер блоков, реагирующих на данные технологические взрывы. Этот размер оказался равным 40÷50 см.

В связи с этим возникает следующий вопрос: не составляют ли энергии регистрируемых землетрясений некоторый, характерный для данного региона, дискретный ряд, означающий какой масштаб блочной системы был вовлечен в процесс подвижек?

Уравнения, описывающие подобные медленные движения, могут быть обычными (параболическими, в общем случае нелинейными) уравнениями переноса (тепла, диффузии и т.д.), т.е. уравнениями Гинзбурга-Ландау:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( A \frac{\partial F}{\partial x} \right) + Q. \quad (5)$$

Здесь  $A$  — транспортный коэффициент;  $Q$  — мощность источника.

Вместе с уравнениями, выражающими законы сохранения массы, импульса и энергии (динамические уравнения упругопластичных сред, которые описывают обычные движения в сплошной среде и обеспечивают как накопление упругой энергии в нагружаемой среде, так и перераспределение напряжений со звуковыми скоростями), уравнения (5) приводят к уравнениям смешанного типа. Решение подобной системы уравнений содержит и медленные движения. В работах [48–50] приведены решения для зарождения и распространения полос локализованной деформации, в частности, для полосы Людерса. Эти решения получены на основе комбинированного подхода: уравнений, выражающих законы сохранения, и дискретного метода клеточных автоматов, что и приводит к формированию и распространению фронтов волны деформаций.

### 5. Заключительные замечания

Представление процесса деструкции нагружаемых твердых тел и сред как пространственно-временной эволюции иерархически организованной блочной системы позволяет анализировать их деформацию и разрушение в рамках единой концепции, с позиций теории систем. Характерной особенностью таких пространственно-временных иерархий являются коллективные явления и процессы самоорганизации.

Блочная структура организации деформируемых твердых сред понимается не только и не столько как изначально заданная структура, а как некая динамическая структурная организация, проявляемая в процессе деформирования материала как системы. Развивая эту мысль, можно утверждать, что в консолидированной среде многие блоки разных порядков существуют как потенциальные, еще не полностью сформировавшиеся структурные образования, которые проявляются только

в процессе деформации и разрушения материала. В связи с этим не все потенциально возможные блоки могут проявить себя при заданных условиях деструкции материала.

Перспектива изучения деструкции твердых тел видится в движении от стохастических методов анализа разрушения к анализу поведения и эволюции пространственно-временных иерархических (блочных) систем с позиций теории систем и синергетики.

В качестве методов теоретического анализа поведения таких систем хорошая перспектива просматривается в разработке комбинированных методов и моделей на основе методов механики сплошных сред и дискретных «миров» многоуровневых клеточных автоматов.

Многочисленные проявления так называемых «медленных движений» — специфических волн деформаций и повреждений — находят объяснение как эволюционные процессы в нагружаемой блочной системе.

В пластичных материалах это хорошо известные полосы Людерса и эффект Портевена–Ле Шателье.

Накопление энергии в такой иерархически организованной блочной среде, ее активация, релаксационные процессы и перераспределение энергии, несомненно, обладают рядом специфических черт. Фундаментальным свойством блочной системы является высвобождение накопленной энергии дискретными порциями, величина которых обусловлена масштабом блоков в иерархии, вовлеченных в деформационный процесс. Масштаб и дальное действие таких «медленных движений», по-видимому, и регулируются величиной порции высвобождающейся энергии.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ 02-05-65346.

### Литература

1. Панин В.Е. Основы физической мезомеханики // Физ. мезомех. – 1998. – Т. 1. – № 1. – С. 5–22.
2. Панин В.Е. Синергетические принципы физической мезомеханики // Физ. мезомех. – 2000. – Т. 3. – № 6. – С. 5–36.
3. Макаров П.В. Подход физической мезомеханики к моделированию процессов деформации и разрушения // Физ. мезомех. – 1998. – Т. 1. – № 1. – С. 61–81.
4. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: в 2-х т. / Под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Наука, 1995. – Т. 1. – 298 с.
5. Макаров П.В. Моделирование процессов деформации и разрушения на мезоуровне // Изв. АН. Механика твердого тела. – 1999. – № 5. – С. 109–131.
6. Кочарян Г.Г., Стивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 423 с.
7. Гольдин С.В. Деструкция литосферы и физическая мезомеханика // Физ. мезомех. – 2002. – Т. 5. – № 5. – С. 5–22.
8. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // Докл. АН СССР. – 1979. – Т. 247. – № 4. – С. 829–831.
9. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. – М.: Наука, 1987. – 100 с.
10. Шемякин Е.И. О свободном разрушении твердых тел // ДАН. – 1988. – Т. 300. – С. 1090–1094.

11. Журков С.Н. Кинетическая концепция разрушения твердых тел // Вестник Академии наук СССР. – 1968. – № 3. – С. 46–52.
12. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Можно ли прогнозировать разрушение? // Будущее науки. – М.: Знание, 1983. – С. 99–107.
13. Миклашевич И.А. Микромеханика разрушения в обобщенных пространствах. – Минск: Логвинов, 2003. – 200 с.
14. Mesarovic M.D., Masko D., Takahara Y. Theory of hierarchical multilevel systems. – New York and London: Academic Press, 1970. – 310 p.
15. Mesarovic M.D., Takahara Y. General systems theory: mathematical foundation. – New York and London: Academic Press, 1975. – 240 p.
16. Флейшигер Е.С. Основы системологии. – М.: Радио и связь, 1982. – 290 с.
17. Мороз А.И. Курс теории систем. – М.: Высшая школа, 1987. – 304 с.
18. Шерман С.И., Горемных А.В., Борняков С.А., Гладков А.С., Шишкина Л.П. Динамика формирования генеральных разломов в зонах растяжения литосферы (результаты физического моделирования) // Физ. мезомех. – 2002. – Т. 5. – № 2. – С. 79–86.
19. Трубицын А.А., Макаров П.В., Черепанов О.И. и др. Адаптация методов мезомеханики к исследованию процессов деформации и разрушения угля. – Кемерово: Кузбасс-ЦОТ, 2002. – 115 с.
20. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
21. Бетехтин В.И., Наймарк О.Б., Кадомцев А.Г. и др. Экспериментальное и теоретическое исследование эволюции дефектной структуры, пластической деформации и разрушения. – Пермь: ИМСС УрО РАН, 1997. – 56 с.
22. Пиотровский В.В. Использование морфометрии для изучения рельефа и строения Земли // Земля во Вселенной. – М.: Мысль, 1964. – С. 278–297.
23. Адушкин В.В., Стивак А.А., Гарнов В.В., Слунгин В.Г. Движение структурных блоков массива горных пород при динамическом воздействии. Взрывное дело. № 90/47 / Действие взрыва в неоднородной среде. – М.: Недра, 1990. – С. 25–30.
24. Садовский М.А., Кочарян Г.Г., Родионов В.Н. О механике блочного горного массива // Докл. АН СССР. – 1988. – Т. 302. – № 2. – С. 306–307.
25. Костюченко В.Н., Кочарян Г.Г., Павлов В.Д. Деформационные характеристики межблоковых промежутков различного масштаба // Физ. мезомех. – 2002. – Т. 5. – С. 23–42.
26. Уломов В.И. Глобальная упорядоченность сейсмических структур и некоторые аспекты сейсмического районирования и долгосрочного прогноза землетрясений // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1. – М.: ИФЗ РАН, 1993. – С. 24–44.
27. Шарфановский И.И. Симметрия в природе. – Л.: Недра, 1983. – 185 с.
28. Родионов В.Н. О подобии процесса дробления при взрывах разного масштаба // Механизм разрушения горных пород взрывом. – Киев: Наук. думка, 1971. – С. 3–8.
29. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др. Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига. – Новосибирск: Наука, 1991. – 523 с.
30. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др. Разломообразование в литосфере. Зоны растяжения / Под ред. Н.А. Логачева. – Новосибирск: Наука, 1992. – 225 с.
31. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Черепанов О.И., Трубицын Н.В., Ворошилов Я.С. Упруго-вязкопластическая деформация и разрушение угля на мезоскопическом уровне // Физ. мезомех. – 2002. – Т. 5. – № 3. – С. 63–87.
32. Киллан Х.Г., Веттегрень В.И., Светлов В.Н. Ансамбли дефектов на поверхности нагруженных металлов как результат их обратной агрегации // ФТТ. – 2000. – Т. 42. – Вып. 11. – С. 2024–2028.
33. Ильяев Р.И., Учаев А.Я., Новиков С.А. и др. Универсальные свойства металлов в явлении динамического разрушения // ДАН. – 2002. – Т. 383. – № 3. – С. 328–333.
34. Ботвина Л.П., Опарина И.Б., Новикова О.В. Анализ процесса накопления повреждений на различных масштабных уровнях // Металловед. и термич. обраб. метал. – 1997. – № 4. – С. 17–22.
35. Макаров П.В., Трубицын А.А., Трубицын Н.В. и др. Экспериментальное и теоретическое исследование разрушения углей и расчет выхода пылевых частиц. I. Исследование иерархии масштабов разрушения // Физ. мезомех. – 2004. – Т. 7. – Спец. вып. – Ч. 2. – С. 245–248.
36. Кузнецов П.В., Макаров П.В., Петракова И.В. и др. Определение коэффициента формы блоков в иерархии масштабов разрушения углей в мезоскопическом диапазоне 1–1000 мкм // Физ. мезомех. – 2004. – Т. 7. – Спец. вып. – Ч. 2. – С. 273–276.
37. Слунгин В.Г. Разрывные нарушения Дегелена и опыт исследования их иерархии // Геоэкология. – 2001. – № 6. – С. 542–551.
38. Учаев А.Я., Новиков С.А., Цукерман В.А. и др. Особенности откольного разрушения вольфрама в режиме быстрого объемного разогрева // ДАН. – 1990. – Т. 310. – № 3. – С. 611–614.
39. Suh C.M., Yuuki R., Kitagawa H. Fatigue microcracks in low carbon steel // Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures. – 1985. – V. 8. – No. 2. – P. 193–203.
40. Макаров П.В. Сдвиговая прочность и вязкость металлов в ударных волнах // Ударные волны и экстремальные состояния вещества / Под ред. В.Е. Фортова, Л.В. Альтшулера, Р.Ф. Трунина, А.И. Фунтикова. – М.: Наука, 2000. – С. 219–255.
41. Макаров П.В. Процессы на микро- и мезоуровнях в металлах при ударноволновом нагружении // Хим. физика. – 2000. – Т. 19. – № 2. – С. 51–59.
42. Meyers M.A., Murr L.E. Shock waves and phenomena of high-rate deformation of metals / Ed. by L.E. Murr. – Moscow: Metallurgia, 1984.
43. Зуев Л.Б., Данилов В.И. Медленные автоволновые процессы при деформации твердых тел // Физ. мезомех. – 2003. – Т. 6. – № 1. – С. 75–94.
44. Супранеди, Тойоока С. Пространственно-временное наблюдение пластической деформации и разрушения методом лазерной спекл-интерферометрии // Физ. мезомех. – 1998. – Т. 1. – № 1. – С. 55–60.
45. Ружич В.В., Трусков А.А., Черных Е.Н., Смекалин О.П. Современные движения в зонах разломов Прибайкалья и механизмы их инициирования // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40. – № 3. – С. 360–372.
46. Опарин В.Н., Акинин А.А., Востриков В.И., Юшкин В.Ф. О деформационно-волновых процессах в окрестности взрывов // Физ. мезомех. – 2002. – Т. 5. – № 5. – С. 43–49.
47. Курленя М.В., Опарин В.Н. Проблемы нелинейной геомеханики // ФТПРПИ. – 2000. – № 4. – С. 3–26.
48. Makarov P.V., Romanova V.A. Mesoscale plastic flow generation and development for polycrystals // Theor. and Appl. Frac. Mech. – 2000. – V. 33. – P. 1–7.
49. Makarov P.V. Localized deformation and fracture of polycrystals at mesolevel // Theor. and Appl. Frac. Mech. – 2000. – V. 33. – P. 23–30.
50. Макаров П.В., Романова В.А. О новом критерии пластического течения при моделировании деформационных процессов на мезоуровне // Математическое моделирование. – 2000. – Т. 12. – № 11. – С. 91–101.