

## Изучение деформации и разрушения геоматериалов и геосред как иерархически организованных систем

Макаров П.В., Карпенко Н.И., Смолин И.Ю., Стефанов Ю.П., Тунда В.А., Хомяков А.Н.

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

Статья написана по результатам работы над проектом РФФИ 05-05-64659-а. Проект направлен на решение фундаментальной проблемы геодинамики и тектоники — исследование закономерностей накопления и выделения (при разрушении) энергии в элементах земной коры, геоматериалах и геосредах, которые предлагается рассматривать как иерархически организованные блочные системы. Эволюция таких пространственно-временных иерархий под приложенными нагрузками приводит к большому разнообразию медленных движений (специфическим волнам деформации и разрушения), обусловленных эффектами накопления и перераспределения энергии в блочной среде. Методами фрактального анализа поверхностей изломов геоматериалов изучено самоподобие разрушения ряда геоматериалов и установлены характерные масштабы последовательности блоков, сформировавшихся в процессе деструкции материала. Численно, комбинированным методом, объединяющим конечно-разностные методы континуальной механики и дискретный метод клеточных автоматов, исследованы особенности накопления деформации в такой блочной среде, в том числе условия формирования и распространения фронтов локализованной деформации и разрушения на разных масштабах в зависимости от масштабов последовательности блоков в иерархии и особенностей нагружения.

## Study of deformation and fracture of geomaterials and geomeia as hierarchically organized systems

P.V. Makarov, N.I. Karpenko, I.Yu. Smolin, Yu.P. Stefanov, V.A. Tunda, and A.N. Khomyakov

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

The paper is a review of results obtained in the framework of the RFBR Project No. 05-05-64659-a. The aim of the project is to solve the fundamental problem of geodynamics and tectonics, i.e. to study the mechanisms of energy accumulation and release (during fracture) in crustal elements, geomaterials and geomeia that are proposed to consider as hierarchically organized block systems. The evolution of such spatio-temporal hierarchies under applied loads causes a wide variety of slow movements (specific deformation and fracture waves) induced by energy accumulation and redistribution in a block medium. Fractal analysis methods for fracture surfaces of geomaterials are used to study self-similarity of fracture of certain geomaterials and to reveal characteristic scales of a sequence of blocks formed during material destruction. Using a method combining finite-difference methods of continuum mechanics and a discrete cellular automaton method we study numerically peculiarities of strain accumulation in the block medium. Besides, consideration is given to the conditions of formation and propagation of fronts of localized deformation and fracture at different scales depending on the block sequence in the hierarchy and loading peculiarities.

### 1. Введение

Основная цель представленной работы — изучение закономерностей деформации и разрушения геоматериалов, геосред и элементов земной коры как системы блоков определенного масштаба.

То, что блочное строение геоматериалов, геологических сред и твердой оболочки Земли в целом является их фундаментальным свойством, можно считать общепризнанным. Мы считаем, что любой материал представляет собой сложную, иерархически организованную систему (не обязательно блочную) [1, 2]. Реагируя на нагружение, эта система эволюционирует по законам синергетики [1], образуя иерархию элементов разных масштабов или блоков. Этот процесс самоорганизации на начальных этапах нагружения приводит к локализации деформации и повреждений, дальнейшая эволюция системы приводит к образованию системы консолидированных блоков и неконсолидированных блоч-

ных систем, разделенных системами трещин. 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 до размеров крупных тектонических разрывов порядка 10000 км 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.

Многие авторы считают установленным, что размеры блоков геоматериалов и элементов земной коры не произвольны, а дают некоторый дискретный ряд, в ко-

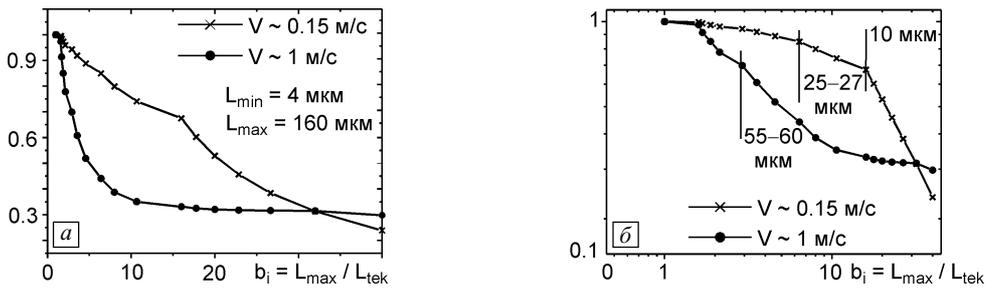


Рис. 1. Масштабы разрушения углей в диапазоне  $L_{\text{тек}} = 4 \div 160$  мкм: кумулятивная сумма вкладов (по весовым долям) частиц разных размеров (а); распределение по весовым долям в двойных логарифмических координатах (б).  $V$  — скорость нагружения

тором 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:  $L_{n+1}/L_n \sim 3$  [3]. Экспериментальное изучение разрушения угля как модельного материала и ряда других геоматериалов, выполненное в рамках настоящего исследования, подтвердило, что их разрушение является самоподобным процессом в исследуемом диапазоне масштабов, начиная от размеров порядка 100 нм до нескольких сантиметров.

Таким образом, в основе предлагаемой методики изучения деформации и разрушения геосред и геоматериалов лежит фундаментальная идея о том, что геосреда и геоматериалы представляют собой иерархически организованные и эволюционирующие под приложенными нагрузками многоуровневые блочные системы. Причем блочная структура сред не только и не столько задана изначально, а выявляется в процессе их деструкции, следуя определенному сценарию эволюции геосреды при нагружении [2]. Определяющими при деструкции твердых тел являются процессы самоорганизации пространственно-временной иерархии блочной системы и самоподобие разрушения на различных масштабных уровнях.

## 2. Результаты экспериментальных и численных исследований и их обсуждение

Экспериментальное изучение масштабов разрушения геоматериалов было проведено двумя методами. Методами фрактального анализа изучались поверхнос-

ти изломов материалов, выбранных в качестве модельных (замечательным модельным материалом является уголь, при разрушении которого очень ярко проявляются мультифрактальные свойства, а последовательность размеров блоков хорошо согласуется с принципом универсальной делимости геосред [2]). Анализировались также распределения частиц по весовым долям в широком диапазоне масштабов разрушения (от 1 мкм до 10000 мкм). Оба метода дали хорошо согласующиеся результаты по иерархии масштабов разрушения.

Рисунок 1 иллюстрирует характерные масштабы разрушения углей  $L_i = 3, 10, 25 \div 27$  и  $55 \div 60$  мкм, выявленные в диапазоне  $1 \div 160$  мкм (масштаб в 3 мкм на рис. 1 не показан) на основе седиментационного и ситового анализа. На больших масштабах выявляются характерные подобласти мультифрактала  $L_i \approx 10$  и 160 мкм в диапазоне  $1 \div 1000$  мкм,  $L_i = 55 \div 60$  и  $400 \div 500$  мкм в диапазоне  $25 \div 2500$  мкм (рис. 2). Эти же экспериментальные данные убедительно свидетельствуют о самоподобном характере разрушения углей в изученном диапазоне масштабов, что иллюстрирует рис. 3, на котором распределения по весовым долям фракций представлены в относительных координатах для трех масштабов разрушения:  $1 \div 10$  мкм,  $25 \div 315$  мкм и  $200 \div 2500$  мкм. Все три кривые практически совпадают.

Изучение оптических изображений поверхностей изломов углей выявило в среднем те же масштабы, что и исследование распределений по весовым долям. На рис. 4 представлены данные теста разработанной компьютерной программы анализа оптических изображе-

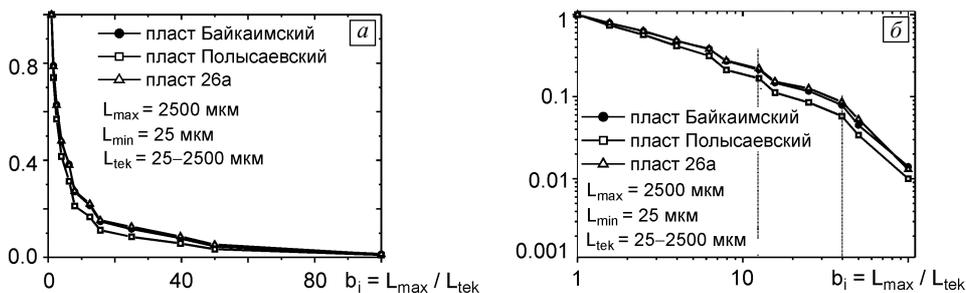


Рис. 2. Масштабы разрушения углей в диапазоне  $L_{\text{тек}} = 25 \div 2500$  мкм: кумулятивная сумма вкладов (по весовым долям) частиц разных размеров (а); распределение по весовым долям в двойных логарифмических координатах (б)

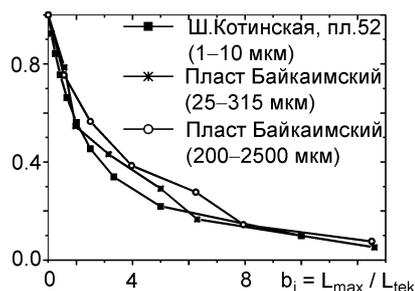


Рис. 3. Самоподобие разрушения угля на разных масштабах. Показаны зависимости кумулятивной суммы вкладов (весовых долей) частиц разных размеров от их относительных размеров для трех разных диапазонов разрушения

ний: кирпичная кладка с известной средней толщиной швов ( $\approx 7$  мм) и кирпичей ( $L \approx 89$  мм) и анализ оптического изображения вдоль вертикальной оси. Выявлен средний размер шва (первый излом) и характерные масштабы:  $L, 2L, 3L$  и т.д.

На рис. 5 показано оптическое изображение излома угля (рис. 5 а) и характерные масштабы разрушения  $L_i$ , равные в данном случае  $9 \div 10$  мкм,  $50 \div 70$  мкм и  $450 \div 500$  мкм (рис. 5, б).

При численном моделировании процессов локализации деформации и повреждений и формирования систем блоков в геосреде ее нелинейный отклик на нагружение учитывался заданием функций внутреннего трения и дилатансии [4].

При сдвиговом деформировании слоя, ограниченно жесткими стенками, практически с самого начала деформирования возникают полосы локализованной деформации (рис. 6). Можно наблюдать основные и

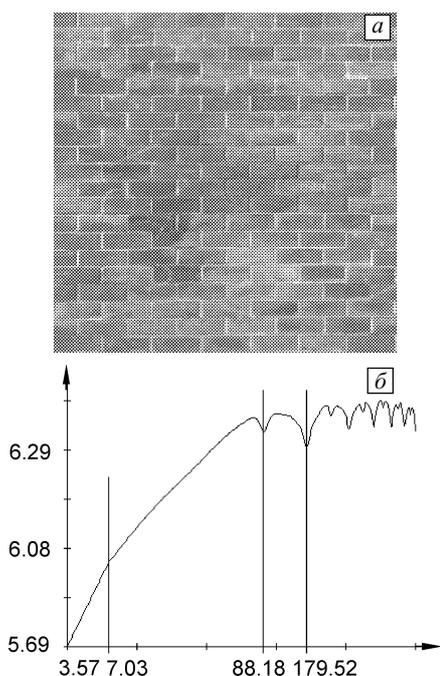


Рис. 4. Изображение кирпичной кладки (а) и анализ этого изображения (б)

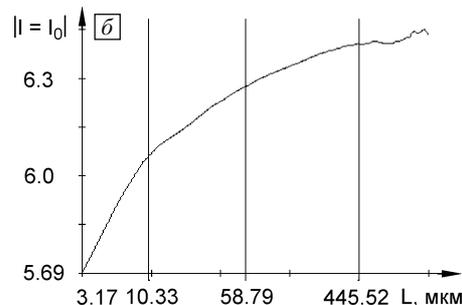
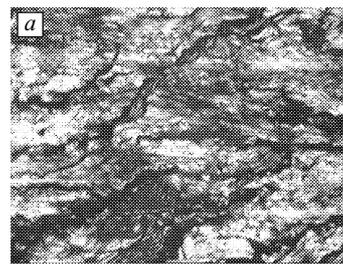


Рис. 5. Анализ оптических изображений поверхностей излома угля сопряженные системы полос деформации, различающиеся углом наклона и интенсивностью. Эшелонированная система полос локализации такого рода — сдвиговые полосы Риделя — наблюдается в геологической среде в зонах разлома.

Вполне вероятно, что наличие сопряженных полос в реальной геологической среде в значительной мере связано с резкими подвижками стенок разломов. При данной геометрии среды ярко выраженные сопряженные полосы наблюдались лишь в случаях больших значений внутреннего трения ( $\alpha > 0.8$ ) и малой скорости дилатансии ( $\Lambda < 0.12$ ). На начальном этапе деформирования расстояние полос имеет периодический характер, расстояние между ними и угол наклона одинаковы. По мере деформирования развивается часть из них, часть на фоне остальных исчезает, а часть сливается. В результате слияния угол наклона и расстояние между полосами могут несколько измениться.

В случае, если одна из стенок не является жесткой, имеет место коробление поверхности (рис. 7, а, б). Возникают сдвиговые полосы деформации, причем

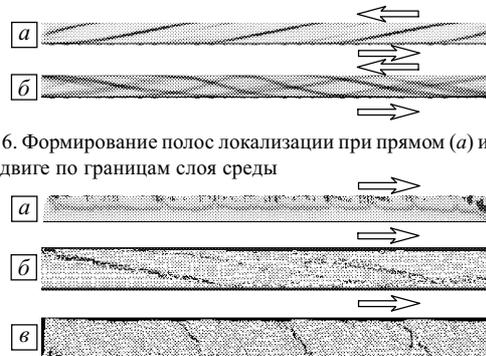


Рис. 6. Формирование полос локализации при прямом (а) и обратном (б) сдвиге по границам слоя среды

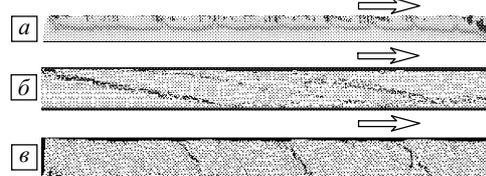


Рис. 7. Формирование складок на свободной поверхности при сдвиге по границам слоя среды (а); картины растрескивания при сдвиге по границам слоя (б, в)

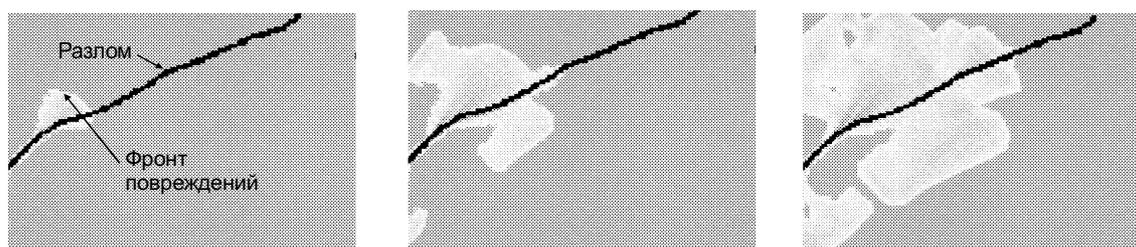


Рис. 8. Генерация фронтов неупругой деформации (повреждений) вблизи разлома для разных моментов времени (растяжение)

основные и сопряженные полосы имеют сопоставимую интенсивность. Наибольшая деформация сосредоточена вблизи деформируемой поверхности, так что при разрушении поверхностного слоя возможно формирование дугообразных зон деформации, проходящих от одной границы фрагмента поверхности к другому (рис. 7, в).

Таким образом, приведенные примеры численного моделирования характера деформации нелинейной геосреды ярко иллюстрируют эволюцию деформационной картины от зарождения локализованной деформации и повреждаемости до формирования систем консолидированных и неконсолидированных блоков.

Дальнейшая эволюция блочной многоуровневой системы, самоорганизация ее внутренней структуры, включающая различные «переупаковки» блоков разных масштабов, могут приводить к разнообразным медленным движениям — специфическим волнам деформации и разрушения в блочной среде. Эти волны распространяются в виде фронтов с характерными скоростями в зависимости от масштабов блоков, вовлеченных в этот процесс. Типичным и хорошо экспериментально изученным примером подобных деформационных волн являются фронты Людерса, распространяющиеся в металлах на мезомасштабном уровне.

Гиперболические уравнения механики сплошных сред принципиально не позволяют описывать такие явления, как медленные течения или движения — специфические деформационные волны, возникновение которых возможно только в нелинейной, структурированной среде, обладающей заметно выраженной дискретностью строения. Комбинированный численный метод, объединяющий конечно-разностные методы механики сплошных сред и дискретный метод клеточных автоматов, явно вводящий в изучение характерный масштаб структурного элемента и его взаимодействие с соседями, позволил смоделировать медленные деформационные фронты и фронты повреждений в нагружаемом материале.

Клеточный автомат определяется положением, состоянием и правилом взаимодействия с другими автоматами. В данном случае каждая ячейка расчетной сетки является одновременно и клеточным автоматом. Состояние клеточного автомата меняется с течением времени, т.е. на каждом временном слое разностной схемы. При моделировании пластической (в общем случае не-

упругой) деформации, клеточный автомат может находиться в двух состояниях — упругом и неупругом, либо поврежденном. Правила перехода в неупругое состояние отражают фундаментальные механизмы этого процесса [5]. Известно, что неупругая деформация невозможна без ее источников. Источниками могут являться различные интерфейсы, границы зерен в металлах, либо блоков в геосреде, свободные поверхности или разломы. Алгоритм «жизни» системы клеточных автоматов обеспечивает зарождение неупругих деформаций или повреждений, их распространение по среде в виде фронтов (полос «Людерса» различной мощности). Таким образом, для клеточного автомата имеем первое правило перехода в неупругое состояние — в соседнем клеточном автомате (ячейке) имеется источник, и второе правило — необходимо, чтобы хотя бы одна соседняя ячейка перешла в неупругое состояние и деформация (поврежденность) в ней достигла некоторого порогового значения.

На рис. 8 представлены картины генерации разломом таких медленных деформационных фронтов, скорость их распространения на несколько порядков ниже скорости звука и зависит от многих факторов: скорости нагружения, свойств геосреды, геометрии разлома, а конфигурация фронта определяется также и распределением напряжений в неоднородной геосреде.

### Благодарности

Авторы работы выражают глубокую признательность П.В. Кузнецову за помощь при анализе оптических изображений, А.А. Трубицыну и Н.В. Трубицыной за предоставленные данные по ситовому и седиментационному анализу пылевых частиц.

### Литература

1. Panin V.E., Makarov P.V., Psakhie S.G. et al. Physical mesomechanics of heterogeneous media and computer-aided design of materials / Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 1998. — 339 p.
2. Макаров П.В. Об иерархической природе деформации и разрушения твердых тел и сред // Физ. мезомех. — 2004. — Т. 7. — № 4 — С. 25–34.
3. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // ДАН СССР. — 1979. — Т. 247. — № 4. — С. 829–831.
4. Стефанов Ю.П. Локализация деформации и разрушение в геоматериалах. Численное моделирование // Физ. мезомех. — 2002. — Т. 5. — № 5. — С. 107–118.
5. Makarov P.V., Romanova V.A. Mesoscale plastic flow generation and development for polycrystals // Theor. Appl. Fracture Mech. — 2000. — V. 33. — P. 1–7.