

УДК 622.831.312

П.В. Макаров, Е.П. Евтушенко, И.Ю. Смолин

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына

ОАО «НЦ ВостНИИ»

С.П. Ворошилов

НП «Кузбасс-ЦОТ»

Д.В. Ботвенко, С.И. Голоскоков

ОАО «НЦ ВостНИИ»

Моделирование разрушения образцов углей при динамическом нагружении

Численно изучены особенности разрушения образцов углей с различными свойствами в условиях динамического нагружения.

В зависимости от физико-механических свойств углей и особенностей накопления в них повреждений наблюдаются различные сценарии разрушения: от типично хрупкого разрушения до вязкопластического

Эволюционный подход к описанию высокоскоростной деформации геосреды

Взаимодействие рабочих органов горных машин, особенно ударного и ударно-вращательного действия, с разрушаемым геоматериалом осуществляется в условиях высокоскоростного деформирования. Скорости соударения рабочего органа машины с нагружаемыми материалами весьма велики и для высокопроизводительных комбайнов часто превосходят 10 м/с. Как было ранее показано авторами [1], при таких скоростях взаимодействия в ближней зоне контакта формируется слабая ударная волна, в которой реализуется состояние, близкое к всестороннему сжатию, а уровень напряжений в этой области существенно превосходит предел прочности угля. Кроме того, при проведении горных работ часто используются взрывные технологии. В этом случае геоматериал непосредственно нагружается ударной волной.

Особенности разрушения пород при таком ударноволновом нагружении изучены недостаточно полно. Традиционные теоретические исследования высокоскоростного разрушения геосред и геоматериалов основаны на численных расчетах с силовыми критериями разрушения. В подобных моделях среда считается разрушенной, если достигнут некоторый предел прочности, например гюгониевский предел. Серьезный недостаток этой модели состоит в том, что фактически игнорируется фактор времени – как долго среда находится под действием тех или иных напряжений.

Учитывая, что уровень напряжений даже в слабой ударной волне велик и существенно превышает предел прочности материала, то в образующихся в зонах разрушения он оказывается полностью фрагментированным – представляет собой «песок» с размерами «песчинок», равными одному или нескольким счетным пространственным интервалам при традиционных численных расчетах. Ответить на вопрос: каковы размеры и форма фрагментов и сколько образовалось фрагментов в зоне разрушения при таком описании невозможно.

Развиваемый авторами эволюционный подход к описанию процессов деструкции твердых тел снимает эту проблему. При моделировании процессов эволюции нагружаемой геосреды или геоматериала предложенный эволюционный подход и разработанные модели [2]–[4] учитывают ее следующие важнейшие особенности:

- локализацию неупругих деформаций и повреждений в среде (уже одно это позволяет уйти от факта констатации, что некая область разрушена, и достичь в расчетах выделения конкретных фрагментов);

- характерные скорости накопления повреждений в среде;

- деградацию прочностных свойств среды в зависимости от накопленных повреждений.

Оказалось [3], что в рамках единого подхода и общей модели, в зависимости от особенностей локализации (определяемой нелинейными свойствами модели), скоростей накопления повреждений и деградации прочностных характеристик, описывается эволюция как хрупких, так и пластичных материалов. Процесс макроскопического разрушения при таком подходе моделируется как автокаталитическая, сверхбыстрая, катастрофическая стадия эволюции. Этот подход объединяет теорию неупругой (пластической) деформации, представляя ее как медленную квазистационарную стадию эволюции, в ходе которой на микроскопических масштабах (описанных интегрально) накапливаются повреждения, и теорию разрушения, представляя макроскопическое разрушение образца как сверхбыстрый этап эволюции в режиме с обострением [5]. В ходе этого автокаталитического процесса локализация неупругой деформации обостряет процесс деградации в зонах локализации, что, в свою очередь, еще больше усиливает локализацию, разгоняя автокаталитический процесс деградации прочностных свойств. При этом быстро нарастает число мезотрецин и происходит их слияние в магистральные макротрещины. Таким образом, для хрупких материалов в нагружаемых образцах формируются фрагменты различных размеров и формы. Более того, один и тот же материал, в зависимости от условий нагружения, в рамках данного описания может проявлять как хрупкие свойства, так и вязкопластические, что хорошо согласуется с экспериментами.

Цель настоящей работы – на модельном материале (уголь с различными характеристиками хрупко-вязких свойств) описать разрушение хрупкой и хрупко-вязкой среды при ее динамическом нагружении. Условия динамического нагружения моделируются ударом пластины (ударника) по массивному образцу (мишени) (рисунок 1). Все границы расчетной области – свободные поверхности, и от них распространяются волны разгрузки. На границе контакта ударника и мишени заданы условия «прилипания».

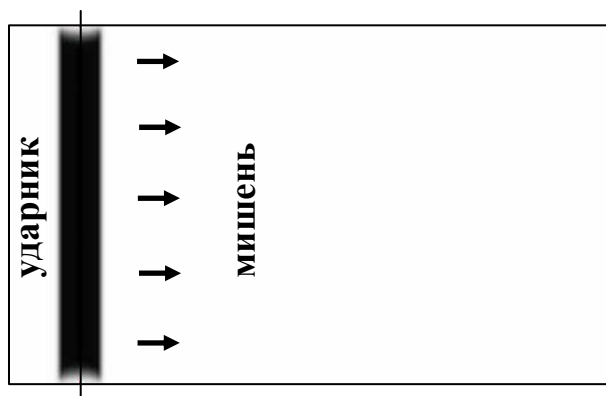


Рисунок 1 – Схема формирования ударной волны при соударении образцов. От границы контакта распространяются фронты напряжений как в ударник, так и в мишень

Математическая постановка задачи о деформации и разрушении угля волнами напряжений

При работе горного режущего инструмента (рабочий орган комбайна и т.д.) происходит ударное нагружение угольного массива, которое генерирует упругие либо упругопластические волны, и дальнейшее сложное нестационарное трехмерное распределение напряжений и деформаций в нем. Упрощая постановку, рассмотрим двухмерную задачу в условиях плоской деформации об ударе между собой двух образцов угля, меньший из которых (ударник) налетает со скоростью 50 м/с на покоящуюся мишень.

Для этого выпишем систему уравнений механики твердого деформируемого тела, которая вместе с определяющими эволюционными уравнениями является в общем случае нелинейной и открытой и реализует эволюционный подход к моделированию динамических процессов в любых твердых телах, в том числе в геоматериалах и геосредах. Связь этой открытой нелинейной системы с внешним миром осуществляется через управляющие параметры, которые совместно с граничными условиями (их также в ряде случаев можно причислить к управляющим параметрам) определяют условия нагружения исследуемого объема геосреды [2]– [4].

Полная система нелинейных уравнений при лагранжевом подходе к описанию движения сплошной среды включает:

- уравнения, выражающие законы сохранения массы, импульса и энергии

$$\rho V = \rho_0 V_0, \quad \rho \dot{v}_i = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x^j} + \rho F_i, \quad \rho \dot{E} = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - \frac{\partial q_i}{\partial x^i}; \quad (1)$$

- эволюционные определяющие уравнения первой группы

$$\dot{\sigma}_{ij}^J = \lambda (\dot{\theta}^T - \dot{\theta}^P) \delta_{ij} + 2\mu (\dot{\epsilon}_{ij}^T - \dot{\epsilon}_{ij}^P), \quad (2)$$

- эволюционные уравнения второй группы

$$\dot{\epsilon}_{ij}^P = F(\dot{\epsilon}_{eff}^P, \sigma_{eff}, S_{ij}). \quad (3)$$

Здесь ρ_0, ρ — начальное и текущее значения плотности материала; V_0, V — начальное и текущее значения объема некоторой частицы материала; x^i — координаты в декартовой системе координат наблюдателя; v_i — компоненты вектора скорости перемещений; σ_{ij} — компоненты тензора напряжений; F_i — компоненты вектора массовых сил; $\dot{\epsilon}_{ij}^T = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x^j} + \frac{\partial v_j}{\partial x^i} \right)$ — компоненты тензора скорости деформации; δ_{ij} — символ Кронекера; λ и μ — коэффициенты Лямэ; E —

внутренняя энергия единицы начального объема; q_i — компоненты вектора теплового потока. Точка над символом означает материальную производную по времени. Используется разложение полной скорости деформации на упругую и неупругую составляющие $\dot{\varepsilon}_{ij}^T = \dot{\varepsilon}_{ij}^E + \dot{\varepsilon}_{ij}^P$. Для учета независимости от жесткого вращательного движения производная по времени от напряжений записана в форме коротационной производной Яуманна $\dot{\sigma}_{ij}^J = \dot{\sigma}_{ij} + \sigma_{ik}\dot{\omega}_{kj} - \sigma_{kj}\dot{\omega}_{ik}$, где $\dot{\omega}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x^j} - \frac{\partial v_j}{\partial x^i} \right)$ — компоненты тензора скорости вращения (вихря). Использованы также следующие обозначения:

$$\dot{\theta}^T = \dot{\varepsilon}_{ii}^T, \quad \dot{\theta}^P = \dot{\varepsilon}_{ii}^P, \quad \dot{\varepsilon}_{eff}^P = \sqrt{\frac{4}{3} \dot{I}_2^P} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^P \dot{\varepsilon}_{ij}^P}, \quad \dot{\varepsilon}_{ij}^P = \dot{\varepsilon}_{ij}^P - \frac{1}{3} \dot{\theta}^P \delta_{ij},$$

$$\sigma_{eff} = \sqrt{3J_2} = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}}, \quad S_{ij} = \sigma_{ij} + P \delta_{ij}, \quad -P = \frac{1}{3} \sigma_{ii},$$

где $\dot{\varepsilon}_{ij}^P$ — компоненты девиатора тензора скорости пластических деформаций; S_{ij} — компоненты девиатора тензора напряжений; P — среднее давление.

Эволюционные уравнения первой группы (2) записаны в релаксационной форме и выполняют несколько следующих важнейших функций в развитии эволюционного процесса.

1 Упругие напряжения растут в каждой локальной точке нагружаемой среды пропорционально росту полных скоростей деформации $\dot{\varepsilon}_{ij}^T$, т.е. в соответствии со скоростью нагружения среды.

2 Релаксируют напряжения в соответствии с развитием неупругих реакций в нагружаемой среде $\dot{\varepsilon}_{ij}^P$. Следовательно, релаксационные определяющие уравнения первой группы обеспечивают установление в каждой точке деформируемой среды динамического равновесия между внешними воздействиями и откликом среды на нагружение.

3 Через релаксационные определяющие уравнения первой группы реализуются отрицательные и положительные обратные связи. Отрицательная обратная связь реализуется через закон релаксации и стабилизирует деформационный процесс, выравнивая неоднородности.

Эволюционные уравнения второй группы (3) отражают реакцию среды на нагружение через задание конкретного вида функции F , $\dot{\varepsilon}_{ij}^P$ и $\dot{\theta}^P$ зависят только от внутренних свойств среды и являются результатом работы распределенных объемных источников, генерирующих в среде дефекты. Они описывают процессы накопления в среде дефектов и повреждений и тем самым полностью определяют деградацию физико-механических свойств среды. Входя в эволюционные уравнения первой группы (2), $\dot{\varepsilon}_{ij}^P$ и $\dot{\theta}^P$ участвуют в игре между положительными и отрицательными обратными связями, определяя эволюционные сценарии.

Определяющие уравнения второй группы для угля обсуждены в работе [4] и учитывают внутреннее трение, дилатансию, накопление повреждений и деградацию прочностных характеристик. Предельная поверхность перехода от упругой реакции к неупругому поведению определена по модели В.Н. Николаевского:

$$\frac{\alpha}{3} J_1 + J_2^{1/2} = Y, \quad \dot{\theta}^P \equiv \dot{I}_1^P = 2\Lambda \dot{I}_2^{P^{1/2}} = 3\Lambda \dot{\varepsilon}_{eff}^P, \quad (4)$$

где α – коэффициент внутреннего трения; Λ – коэффициент дилатансии.

Изменения прочностных параметров модели описываются следующими уравнениями [2]:

$$Y = Y_0(1 + A(e) - D_e(e))(1 - D(\sigma)), \quad A(e) = 2h \frac{e}{e^*}, \quad D_e(e) = 2h \left(\frac{e}{e^*} \right)^2 = A(e) \frac{e}{e^*},$$

$$D(\sigma) = \int \frac{(\sigma - \sigma_0)^n}{(\sigma^*)^n t^*} dt \quad \text{для } \sigma > \sigma_0. \quad (5)$$

Здесь h – параметр модели, отвечающий за упрочнение; $e = 2I_2^{p/2} = 3\varepsilon_{eff}^p$ – накопленная пластическая деформация (параметр Одквиста); e^* – критическая деформация, после достижения которой преобладает деградация материала; σ – эффективное напряжение, а σ_0 , σ^* , t^* и $n = 2$ – параметры модели, определяющие пороговое напряжение, начиная с которого начинают накапливаться повреждения, предельное напряжение и скорость процесса накопления повреждений; $D(\sigma)$ — поврежденность среды.

Усечение предельной поверхности в области растяжения также определяется с учетом повреждений и отражает различие прочностных свойств геосреды при сжатии и растяжении. Фактически среда всегда разрушается в области растягивающих напряжений, абсолютная величина которых невелика и уменьшается с ростом поврежденности среды:

$$P^* = P_0^*(1 - D(\sigma)). \quad (6)$$

Таким образом, принимается, что разрушение и раскрытие трещин происходит при наличии растягивающих напряжений, которые присутствуют в локальных областях неоднородной среды практически при любом виде нагрузок.

Выбор степенных зависимостей в выражениях (5) был продиктован соображениями, связанными с изучением локализации и образованием тепловых структур С.П. Курдюмовым и его глубоким замечанием о том, что не любая нелинейность приводит к возникновению структур, т.е. к самоорганизации. Сложные нестационарные структуры формируются в среде со степенными источниками. При других видах нелинейностей задача часто вырождается при приближении к моменту обострения [5].

Результаты проведенных расчетов

Оценки пределов прочности различных компонентов угля и среднего эффективного значения предела прочности угля приведены в таблице 1.

Гюгониевский предел σ_Γ определяется по формуле:

$$\sigma_\Gamma = \sigma_T \frac{1 - \nu}{1 - 2\nu}, \quad (7)$$

где ν — коэффициент Пуассона.

Так как

$$\sigma_\Gamma = \rho_0 c_y u_\Gamma, \quad (8)$$

то из сравнения (7) и (8) можно определить u_{Γ} , при которой достигается разрушение, если известна величина σ_{Γ} . Здесь c_y – скорость продольной волны звука; u_{Γ} – массовая скорость на пределе Гюгонио.

Таблица 1 - Значения амплитуд напряжений на гюгониевском пределе и максимальных значений массовой скорости в упругом предвестнике для разных компонентов угля и стали [1].

Материал	Плотность, г/см ³	Коэффициент Пуассона	Предел прочности, МПа	Скорость продольных звуковых волн, км/с	Амплитуда напряжений, МПа	Максимальная массовая скорость, м/с
Витринит	1,25	0,4	23	5,85	69	9,4
Семивитринит	1,3	0,45	28	8,19	154	14,5
Липтинит	1,7	0,4	15	4,05	45	6,5
Фюзинит	1,4	0,45	135	17,65	743	30,0
Минеральные примеси	2,5	0,16	190	5,42	235	17,3
Уголь	1,3	0,3	15	3,67	26	5,5
Конструкционная сталь	7,8	0,295	900	6,06	1548	32,7

Скорость ударника должна быть минимум в два раза выше, чем максимальная массовая скорость u_{\max} (таблица 1): $V_0 \approx 2u_{\max}$. Именно в этом случае в мишени в результате распада разрыва на контактной границе «ударник–мишень» сформируется ударная волна с амплитудой по массовой скорости $u \approx u_{\max}$. В расчетах скорость ударника задавалась равной 50 м/с. Эта скорость оказалась достаточной для хрупкого разрушения образца.

При нагружении в образце формируется сложная интерференционная картина распределения напряжений, деформаций и повреждений. В тех областях образца, где времена существования высоких растягивающих напряжений достаточны, чтобы успели накопиться предельные величины повреждений (значение функции деградации $D(\sigma) = 1$ и предела прочности $Y = 0$) образуются мезотрещины, которые могут расти, сливаться и образовывать магистральные трещины.

На рисунке 2 а-в показаны последовательные во времени картины разрушения. Видно (рисунок 2 а), как волна разрушения следует за ударным фронтом (оттенки серого цвета показывают величину среднего давления за ударным фронтом). В нагруженном образце формируются две откольные тарелки и трещины прорастают по направлению к свободным поверхностям (рисунок 2 б-в).

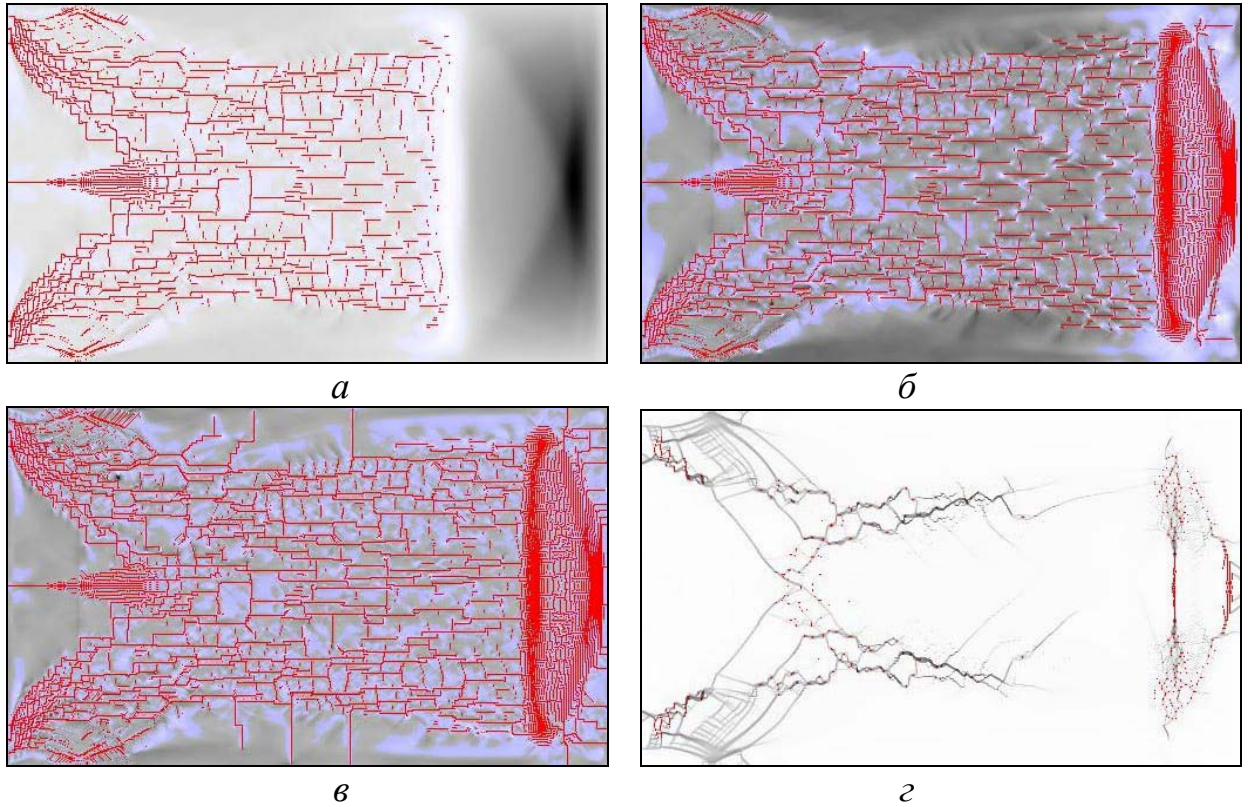


Рисунок 2 – Распространение ударной волны и рост трещин в образце в разные моменты времени: *a* – фронт достиг свободной поверхности; *б*, *в* – второй и третий пробеги ударной волны. Показано распределение давления (градации серого) и формирующиеся трещины (темные тонкие линии); *г* – распределение остаточных неупругих деформаций (градации серого) и формирующиеся трещины (черные точки)

В зависимости от вязкопластических свойств образца, которые регулируются скоростью накопления повреждений и положительной обратной связью, разгоняющей автокаталитический процесс разрушения, реакция угля на прохождение ударной волны меняется от хрупкой (рисунок 2 *a-в*) до пластичной (рисунок 2 *г*).

При изменении геометрических размеров ударника и мишени картины разрушения для хрупкого и вязкопластического поведения образцов качественно не меняются (рисунок 3)

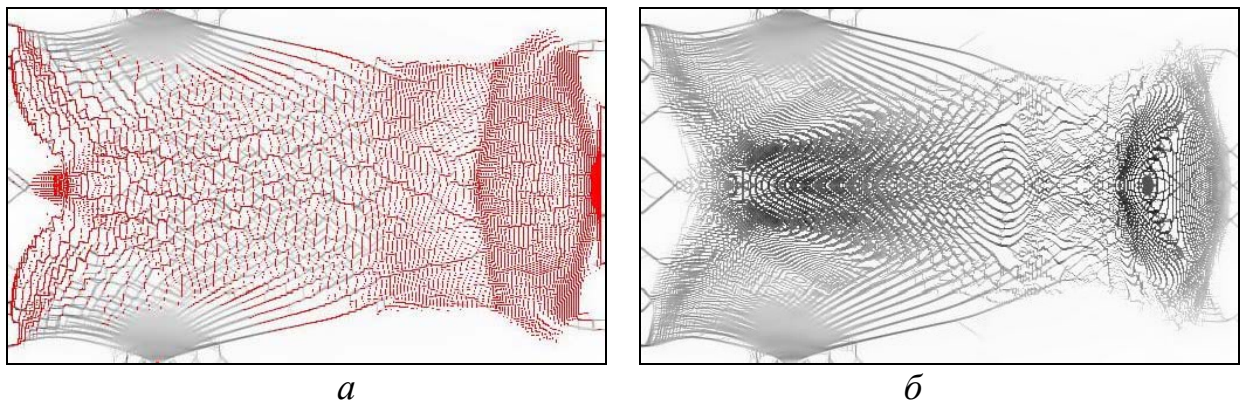


Рисунок 3 – Распределения остаточных неупругих деформаций для образцов с хрупким (*a*) и вязкопластическим (*б*) поведением для удвоенной толщины ударяющей пластины

Представленные расчеты, хотя и привязаны к реальным прочностным характеристикам угля (таблица 1), носят модельный характер. Для решения конкретной прикладной проблемы, например образования фрагментов при заданной скорости взаимодействия рабочего органа горной машины и угольного пласта, необходимо оценить скорость накопления повреждений в угле при известной скорости нагружения и ввести эти данные в модель. Другими словами, модель должна быть протестирована на известных экспериментальных данных.

Заключение

Таким образом, развиваемый эволюционный подход оказался эффективным при описании совместного процесса неупругой деформации и разрушения геосред на малых временах (1-100 микросекунд), в том числе при ударноволновом нагружении. При моделировании разрушения хрупкого материала численная методика позволяет рассчитать количество и форму образующихся фрагментов разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Трубицын, А.А. Адаптация методов мезомеханики к исследованию процессов деформации и разрушения угля / А.А. Трубицын, П.В. Макаров, О.И.Черепанов, С.П. Ворошилов, Н.В. Трубицына, И.Ю. Смолин, В.В. Соболев, Я.С. Ворошилов, В.В. Киселев, С. Грюнинг. — Кемерово: Кузбасс-ЦОТ, 2002. — 116 с.

2 Макаров, П.В. Нелинейная механика геоматериалов и геосред / П.В. Макаров, И.Ю. Смолин, Ю.П. Стефанов, П.В. Кузнецов, А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, С.П. Ворошилов, Я.С. Ворошилов. — Новосибирск: Гео, 2007. — 235 с.

3 Макаров, П.В. Математическая теория эволюции нагружаемых твердых тел и сред/ П.В. Макаров // Физическая мезомеханика. — 2008. — Т. 11. — № 3. — С. 19–35.

4 Макаров, П.В. Моделирование обрушения кровли над выработанным пространством / П.В. Макаров, И.Ю. Смолин, Е.П. Евтушенко, А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, С.П. Ворошилов // Физическая мезомеханика. — 2008. — Т. 11. — № 1. — С. 44–50.

5 Курдюмов, С.П. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем / С.П. Курдюмов, Е.Н. Князева. — М.: Наука, 1994. — 236 с.