

УДК 531.1, 539.3, 539.215

Модель землетрясения как сверхбыстрый катастрофический этап эволюции нагружаемой геосреды

П.В. Макаров^{1,2}, И.Ю. Смолин^{1,2}, Е.П. Евтушенко¹, А.Ю. Перышкин²

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634021, Россия

² Томский государственный университет, Томск, 634050, Россия

Для описания катастрофических сейсмических явлений представлен подход, основанный на идеях эволюции геосреды в полях действующих сил. Обсуждены недостатки существующих моделей очага землетрясений, а также ключевые положения и особенности эволюционной модели. На примерах проведенных численных расчетов показано, что разные элементы нагружаемых геосред эволюционируют как типичные нелинейные синергетические системы.

Ключевые слова: нелинейная динамика, локализация повреждений, численное моделирование, режимы с обострением

Earthquake model as a superfast catastrophic stage of evolution of loaded geomedium

P.V. Makarov^{1,2}, I.Yu. Smolin^{1,2}, E.P. Evtushenko¹ and A.Yu. Peryshkin²

¹ Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, 634021, Russia

² Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia

An approach based on concepts of the evolution of a geomedium in effective force fields is proposed for describing catastrophic seismic phenomena. The shortcomings of available models of seismic focuses and the key points and peculiarities of the evolutionary model are discussed. Using the results of numerical calculations as an example, it is shown that different elements of loaded geomedia evolve as typical nonlinear synergetic systems.

Keywords: nonlinear dynamics, damage localization, numerical simulation, blow-up modes

1. Введение

Желание разобраться в механизмах таких грозных природных катастроф, как землетрясения, побуждает исследователей выдвигать гипотезы об их происхождении. В настоящее время можно выделить несколько наиболее популярных моделей очага землетрясения: модель Рейда упругой отдачи при сколовой деформации горных пород (1911 г.), дилатансионная модель Брейса и Нура (1960–1970 гг.), модель зацепов Шабалина (1984 г.), модель неустойчивого скольжения Шольца (1990 г.) и модель лавинонеустойчивого трещинообразования Мячкина.

Существуют и другие модели, основанные на схожих идеях. В настоящей работе анализируются различные аспекты существующих моделей и обсуждается новый подход, основанный на идеях эволюции геосреды в

полях действующих сил [1–4]. В рамках эволюционной концепции [4–6] любое землетрясение есть неизбежный сверхбыстрый этап эволюции, который развивается как катастрофа в режиме с обострением [4–7].

Неполнота и ограниченность упомянутых выше моделей, прежде всего, проистекает из попытки объяснить природу землетрясений, основываясь на представлениях усредненного макроскопического подхода классической механики сплошных сред, в то время как геологическая среда является иерархически организованной многомасштабной нелинейной блочной системой. Все процессы деструкции в такой нелинейной системе начинаются на микроскопических масштабах, соизмеримых с межатомными расстояниями [1, 2]. Далее в процессы локализации деформаций и повреждений, а также последующего разрушения вовлекаются все большие мас-

штабы, вплоть до формирования макроскопических магистральных разломов и крупных блоков. Понять механизмы землетрясения, рассматривая только макроскопический масштаб усредненного описания, невозможно. Традиционные же модели рассматривают процесс разрушения геосреды исключительно на макроскопическом уровне. Фундаментом эволюционной концепции являются идеи иерархичности и многомасштабности деформационных процессов в геосредах, т.е. идеи, положенные в основу мезомеханики.

Другим недостатком традиционных моделей является то, что они фиксируют внимание на какой-то одной стороне катастрофического события, которая, безусловно, важна и имеет место, но вырванная из контекста существенно более длительного и многообразного процесса деформации геосреды, оказывается неспособной как описать само катастрофическое явление, так и наметить пути к его прогнозу.

Общим недостатком существующих моделей является, по мнению авторов, и то, что в них фактически следствия длительного деформационного процесса (упругая отдача при образовании магистральной трещины, наличие разрушающихся зацепов, фаза неустойчивого скольжения и т.д.) выдаются за причину, в то время как все эти явления есть завершающий катастрофический этап предшествующей длительной квазистационарной стадии эволюции геосреды. Действительно, упругая отдача может привести и приводит к катастрофическим последствиям, но она возникает в результате разгрузки от уже образовавшейся магистральной трещины-разлома, т.е. является следствием длительного процесса предшествующей эволюции. Часто используемая концепция зацепов, разрушение которых и приводит к быстрым подвижкам, выглядит очень наивной. Ведь прочность любых зацепов ничтожна по сравнению с накопленной геосредой энергией, и они будут непременно разрушены в любом случае. Движущиеся тектонические плиты их просто «не заметят». Они и разрушаются, только это процесс разрушения не мгновенный, а длительный, и в зависимости от масштаба он продолжается многие десятки и даже сотни лет. Эволюционная же модель фиксирует внимание на завершающем сверхбыстром этапе локального (в масштабах плитной тектоники) разрушения, когда пространственная локализация накопления повреждений меньших масштабов в геосреде сменяется локализацией процесса во времени, т.е. разрушение переходит в сверхбыстрый катастрофический режим. Места и времена пространственной и временной локализации определяются множеством причин глобального и регионального характера, включая структурные особенности и соответствующую неоднородность напряженно-деформированного состояния как одного из важнейших факторов.

Дилатансия и ее роль в формировании и перераспределении напряженно-деформированного состояния в

нагруженной геосреде огромна. Дилатансионные процессы, по-видимому, связаны и с формированием деформационных волн различных масштабов (медленными движениями) в геосреде, но это отдельный вопрос, к которому авторы обратятся в следующих работах. Сейчас же хотелось обратить внимание на неверную физическую трактовку так называемого дилатансионного упрочнения. Эта трактовка появилась в рамках усредненного макроскопического описания и формально опирается на наблюдаемый рост среднего напряжения в геосреде при увеличении деформации в условиях стесненного деформирования (рис. 1). Если для сыпучих сред такой взгляд имеет простую трактовку как рост сцепления между частицами, находящимися в условиях стесненного деформирования при наращивании нагрузки, то для разрушаемой геосреды такая трактовка не верна. Получается, что более поврежденная среда оказывается прочнее менее поврежденной.

На рис. 1 показана схема, иллюстрирующая эволюцию прочности нагружаемой геосреды как многомасштабной (блочной) системы. В нагруженной и разрушаемой геосреде с увеличением деформации, например от точки *A* до точки *B*, за счет дилатансии при стесненном деформировании растет среднее напряжение, что и трактуется как дилатансионное упрочнение. Формально такой моделью удобно пользоваться при сугубо макроскопическом описании. В рамках многомасштабной модели геосреды физически более верная трактовка будет следующей. Кривая $\sigma_{\text{ср}}$ отражает среднее макроскопическое напряжение повреждаемой геосреды на макромасштабе и в общем случае не имеет никакого отношения к прочности геосреды. На микро- и мезомасштабах локальные напряжения вблизи концентраторов напряжений могут существенно превышать

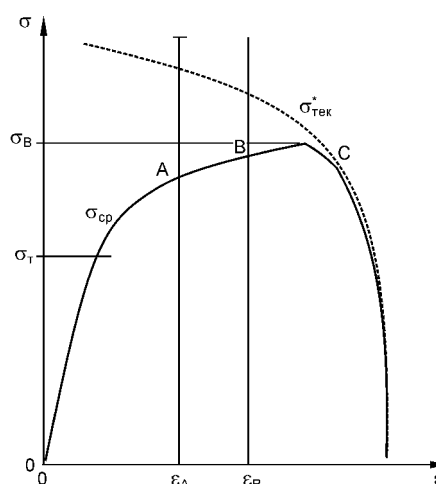


Рис. 1. Прочность геосреды как многомасштабной системы: $\sigma_{\text{тек}}^*$ — текущая интегральная прочность повреждаемой во всей иерархии масштабов геосреды, $\sigma_{\text{ср}}$ — среднее макроскопическое напряжение в среде, $\sigma_{\text{т}}$ — предел «текучести», σ_{B} — наблюдаемый предел прочности [5]

средний уровень макронапряжений и быть даже выше текущей прочности (кривая $\sigma_{\text{тек}}^*$), тогда в этих локальных областях произойдет локальное разрушение, что понизит и усредненную макроскопическую прочность. В некоторый момент этот процесс деградации прочности переходит в сверхбыстрый катастрофический режим и кривая $\sigma_{\text{тек}}^*$ пересекается с кривой среднего напряжения $\sigma_{\text{ср}}$ в точке *C*. Напряжение в этой точке и трактуется в рамках макроскопической теории как предел прочности материала. Реальная же прочность поврежденной геосреды вблизи катастрофического режима существенно ниже средней и обвально уменьшается на катастрофической стадии.

Предлагаемая трактовка не нуждается в физически неверной идее дилатансионного упрочнения. Среднее напряжение в любой точке нагружаемой геосреды может увеличиваться при нарастании дилатансии в стесненных условиях или падать при локальной разгрузке, т.е. оно будет определяться законами изменения напряженно-деформированного состояния и не будет никак связано с локальной прочностью материала $\sigma_{\text{тек}}^*$, которая, в свою очередь, определяется только скоростью накопления повреждений на микромасштабах.

2. Математическая теория эволюции геосреды

В коллективе С.П. Курдюмова на протяжении многих лет изучались режимы с обострением и связанная с ними предшествующая локализация [7]. Было показано, что при переходе эволюционного процесса в сверхбыстрый режим резко уменьшается область локализации, а сама локализация нарастает (рис. 2). Этот же процесс мы наблюдаем и при развитии очага землетрясения. Идея о том, что любой разлом является геологическим телом большой протяженности, полностью согласуется с эволюционной концепцией. Разлом, с нашей точки зрения, — это протяженная область локализованных повреждений. В активном разломе повреждения копятся и на квазистационарной стадии, но вблизи катастрофической стадии, область локализации резко уменьшается, эволюционируя в одну магистральную трещину, либо в систему нескольких трещин. Затем эти трещины будут залечиваться и на следующей квазистационарной

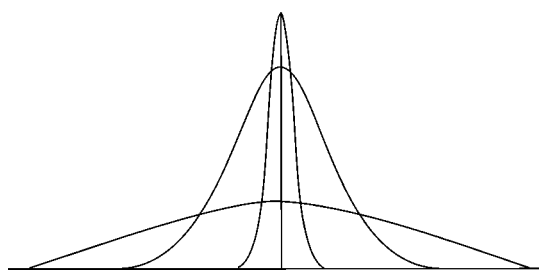


Рис. 2. LS-режим с обострением. На схеме показано уменьшение ширины области локализации повреждений по мере развития процесса локализации

стадии мы будем рассматривать этот разлом как протяженное геологическое тело — поврежденную геосреду в сформировавшейся области локализации деформационного процесса.

Согласно развиваемой эволюционной точке зрения [2–4] само катастрофическое событие, собственно землетрясение, есть сверхбыстрая стадия эволюции геосреды — режим с обострением, особенности которого, а значит, и конкретные механизмы, формируются во всей иерархии масштабов на существенно более длительной предшествующей квазистационарной стадии эволюции геосреды в полях действующих сил. Пространственная локализация деформационных процессов на начальных этапах эволюции (их можно отсчитывать от уже имевшего место крупномасштабного события) приводит и к локализации этих процессов во времени, когда плавный медленный или квазистационарный процесс эволюции сменяется сверхбыстрым режимом, который развивается по законам автокатализа, ускоряя сам себя (именно такой режим изучает модель лавинонеустойчивого трещинообразования, что очень выгодно отличает ее от других предшествующих моделей).

Таким образом, весь многомасштабный процесс деструкции геосреды есть последовательность катастроф разных масштабов, разделенных квазистационарными стадиями накопления повреждений более мелких масштабов. С увеличением масштаба деструкции увеличиваются и времена квазистационарных стадий. Режим с обострением (катастрофа) наступает тогда, когда преодолен некий порог, т.е. параметры, определяющие ход эволюции геосреды (например поврежденность среды на данном масштабе), достигают пороговых значений [3, 4].

Главной содержательной частью эволюционной концепции землетрясений является разработанная одним из соавторов математическая теория эволюции геосреды в полях действующих сил [4], которая позволяет моделировать отклик среды на нагружение, т.е. ее эволюцию на любых, характерных для рассматриваемого масштаба временах, включая геологические времена. Показано, что в основе математической теории эволюции всех твердых тел и сред, в том числе и геосред, лежат уравнения механики деформируемого твердого тела как фундаментальные уравнения математической физики, отражающие самые общие природные законы сохранения массы, импульса, моментов импульса и энергии [1, 2, 4]. Все многообразие физических механизмов неупругой (пластической) деформации и процессов дилатансии, т.е. развития несплошностей разных масштабов и различной физической природы на этом феноменологическом уровне описания интегрально отражается путем задания нелинейных функций отклика среды на нагружение — эволюционными определяющими уравнениями первой и второй группы. Определяющие уравнения первой группы — макроскопичес-

кие уравнения. Эти уравнения задают связи между макроскопическими усредненными параметрами среды: параметрами течения, скоростями изменения напряжений и скоростями неупругой деформации, а также скоростями накопления средой несплошностей (повреждений). В них должны также входить источники неупругой деформации и повреждений, на которых могут возникать нестационарные диссипативные структуры [4]. Эти уравнения должны также включать положительные и отрицательные обратные связи между параметрами. Такие обратные связи являются регуляторами образования различных структур в нагружаемой среде [4]. Эволюционные уравнения второй группы — это кинетические уравнения, задающие скорости накопления неупругой (пластической в том числе) деформации и скорости накопления повреждений. Эволюционные уравнения второй группы устанавливают связи между макроскопическим уровнем описания и процессами на более мелких масштабах, т.е. на микроуровне. В настоящем контексте под микроуровнем понимается иерархия масштабов, которые не вводятся явно в рассмотрение, а учитываются интегрально путем задания соответствующих кинетик накопления средой различного рода несплошностей и повреждений. Определяющие уравнения второй группы включают также уравнения, отражающие изменения усредненных макроскопических прочностных характеристик среды или геоматериала. Они включают как скорость деградации прочностных характеристик за счет накопленных повреждений, так и скорость восстановления прочности вследствие «залечивания» повреждений. Наблюдаемая прочность геосреды является, таким образом, результатом динамического равновесия между этими конкурирующими процессами. Следовательно, эти уравнения конструируются на основе ведущих физических механизмов микроскопических масштабов, т.е. масштабов меньших, чем изучаемый масштаб, который рассматривается как макроскопический. Такой макроскопический масштаб зависит от решаемой задачи.

Полная система 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 определяющие уравнения второй группы (приведен один из частных видов, используемых в представленных расчетах [3, 8, 9])

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{ij}^p &= \left(s_{ij} + \frac{2}{3} \Lambda \left(Y - \frac{\alpha}{3} J_1 \right) \delta_{ij} \right) \dot{\lambda}, \\ \dot{\theta}^p &= 3\Lambda \dot{\epsilon}_{\text{eff}}^p. \end{aligned} \quad (3)$$

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; E — внутренняя энергия единицы начального объема; q_i — компоненты вектора теплового потока; α — коэффициент внутреннего трения; Λ — коэффициент дилатансии; δ_{ij} — символ Кронекера; λ и μ — коэффициенты Ламе; точка над символом означает материальную производную по времени. Используется разложение полной скорости деформации на упругую и неупругую составляющие: $\dot{\epsilon}_{ij}^t = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p$. 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:

$$\dot{\theta}^t = \dot{\epsilon}_{ii}^t, \quad \dot{\theta}^p = \dot{\epsilon}_{ii}^p, \quad \dot{\epsilon}_{\text{eff}}^p = \sqrt{2/3 \dot{\epsilon}_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ij}^p},$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\epsilon}_{ij}^e - 1/3 \dot{\theta}^p \delta_{ij}, \quad s_{ij} = \sigma_{ij} + P \delta_{ij}, \quad -P = 1/3 \sigma_{ii}.$$

Для описания пластических деформаций применяется модифицированная модель Николаевского [3, 8, 9], т.е. предельная поверхность имеет вид:

$$-\alpha P + J_2^{1/2} = Y. \quad (4)$$

Изменения прочностных параметров модели описываются следующими уравнениями [3, 9, 10]:

$$Y = Y_0(1 + A(e) - D_e(e))(1 - D(\sigma)), \quad (5)$$

$$A(e) = 2h \frac{e}{e^*}, \quad D_e(e) = 2h \left(\frac{e}{e^*} \right)^2 = A(e) \frac{e}{e^*},$$

$$D(\sigma) = \int \frac{(\sigma - \sigma_0)^2}{(\sigma^*)^2 t^*} dt \quad \text{для } \sigma > \sigma_0.$$

Здесь h — параметр модели, отвечающий за упрочнение; $e = 2J_2^{p1/2} = 3\epsilon_{\text{eff}}^p$ — накопленная неупругая деформация (параметр Одквиста); e^* — критическая деформация, после достижения которой преобладает деградация материала; σ — эффективное напряжение; σ_0, σ^*, t^* — параметры модели, определяющие пороговое напряжение, начиная с которого начинают накапливаться повреждения, предельное напряжение и скорость процесса накопления повреждений соответственно; $D(\sigma)$ — поврежденность среды.

Таким образом, приведенная модель нагружаемой геосреды учитывает внутреннее трение, дилатансию, накопление повреждений и деградацию прочностных характеристик геосреды. В определяющих уравнениях реализованы положительные и отрицательные обратные связи, определяющие особенности эволюции нелинейных систем. Отрицательные обратные связи обеспечивают релаксацию напряжений (уравнения (2)), стабилизируя процесс. Через положительную обратную связь нелинейный источник разгоняет автокаталитический процесс деградации — локализация повреждений приводит к уменьшению прочностных характеристик среды в областях локализации, что еще более усиливает в них процессы локализации деформации и повреждений. Ускоряя процессы локализации, положительные обратные связи способствуют образованию диссипативных нестационарных структур, а деградация прочностных характеристик среды в областях локализации приводит к сверхбыстрым режимам эволюции системы — к режимам с обострениями.

3. Результаты моделирования

Для тестирования модели были выполнены численные расчеты эволюции горного массива кровли над выработанным пространством в шахте. Параметры модели, определяющие скорости накопления повреждений и деградацию прочности в эволюционных уравнениях второй группы подбирались по известным временам обрушения кровли при заданной глубине выработки

[10]. Показано, что, изменяя только соотношение между положительными и отрицательными обратными связями (при прочих равных условиях), можно получить реакцию среды на нагружение от типичного пластического течения до хрупкого разрушения. Таким образом, снимается известное противоречие между слабо связанными классическими теориями пластичности и хрупкого разрушения [4]. При длительной квазистационарной стадии, предшествующей катастрофическому этапу эволюции среды в режиме с обострением, наблюдается типичное пластическое течение. Другой предельный случай — развитие катастрофы как системы трещин с самого начала нагружения — демонстрирует хрупкое разрушение среды [4].

В основе математической теории эволюции лежит система динамических уравнений механики сплошных сред, численные решения которых имеют принципиальные ограничения по времени процесса. Эти ограничения обусловлены жесткими требованиями на выбор шага по времени (условиями устойчивости разностной схемы). Для решения этой «проблемы времени» предложена специальная процедура введения в модель реального времени процесса, которая заключается в решении последовательности динамических задач на каждом временном отрезке ΔT_i до установления динамического равновесия между приложенными к среде силами и реакцией среды на нагружение на этом этапе процесса ΔT_i . Эта процедура позволяет решать как задачи ударно-волнового нагружения, так и задачи геодинамики и

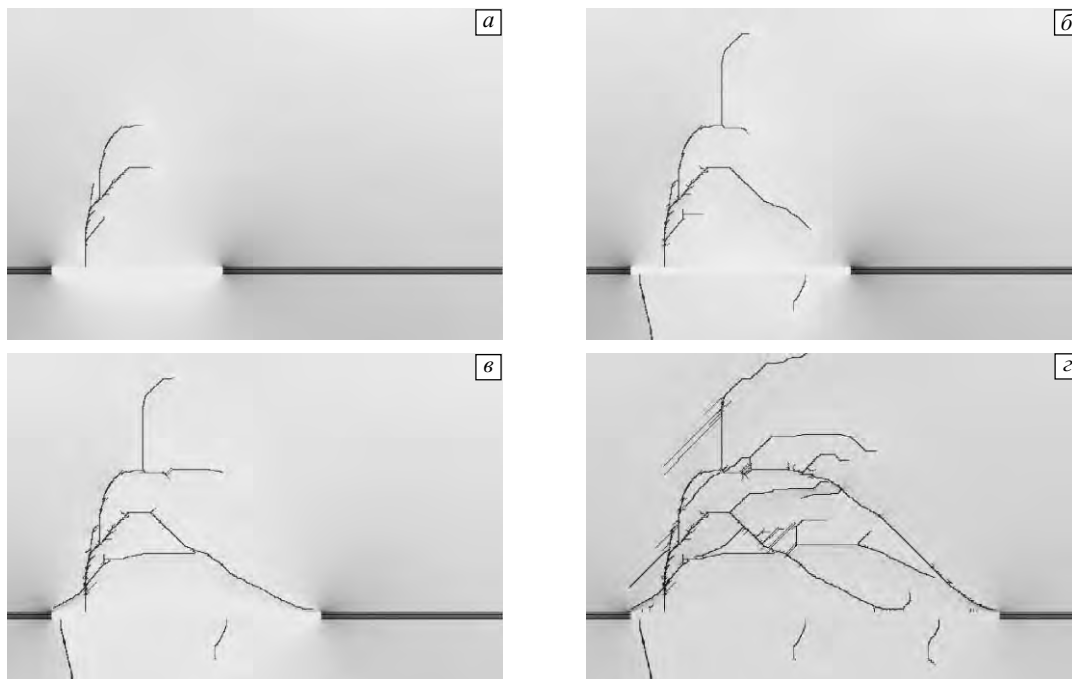


Рис. 3. Расчет первой (а, б) и второй (в, г) посадок кровли при глубине залегания выработки 300 м и длине выработанного пространства 30 (а), 40 (б), 50 (в), 70 м (г). Горизонтальная темная полоса — угольный пласт, темные ломаные линии — магистральные трещины

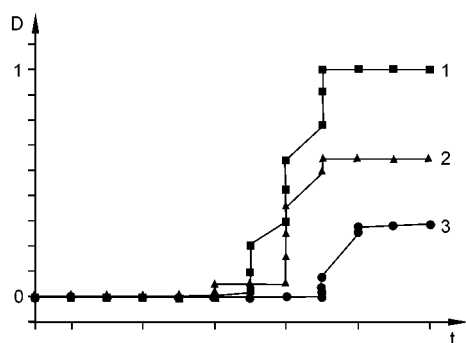


Рис. 4. Эволюция функции поврежденности для магистральной трещины в кровле над выработкой (1) и затухание соседних трещин вблизи главного события (2, 3)

плитной тектоники с характерными временами в миллионы лет. С другой стороны, если предыдущей эволюцией подготовлен сверхбыстрый режим, то на следующем шаге ΔT_{i+1} этот катастрофический режим может быть рассчитан максимально подробно, даже если его скорости близки к ударно-волновым. Эффективность развиваемой методологии ярко иллюстрируется также тем, что выполненные численные расчеты эволюции нагружаемой среды позволяют описывать как медленные квазистационарные фазы эволюции, так и этапы эволюции в сверхбыстрых катастрофических режимах — режимах с обострением. Показано, что наличие медленной подготовительной фазы эволюции и катастрофического сверхбыстрого режима с обострением является фундаментальным свойством общего эволюционного процесса. Характерные времена и масштабы этих этапов эволюции определяются нелинейными свойствами геосреды на соответствующем масштабе и задаются эволюционными уравнениями первой и второй группы.

На рис. 3 показан пример расчета обрушения кровли над выработанным пространством (первая и вторая посадки кровли), а на рис. 4 — характер роста функции

поврежденности D ($0 \leq D \leq 1$) в магистральной трещине и смежных областях для момента первой посадки. Видно, как медленная квазистационарная фаза эволюции поврежденности D сменяется катастрофическим режимом с обострением. Следовательно, и скорость деградации прочности также переходит в режим с обострением (прочность $Y = Y_0(1 - D)$ при $D \rightarrow 1$, $Y \rightarrow 0$), и, как результат, происходит обрушение кровли.

Фундаментальным свойством эволюции является наличие зон загибья перед катастрофическим событием. Это явление демонстрирует рис. 4. При численном решении задачи об обрушении кровли был выполнен мониторинг скорости накоплений повреждений в ближней зоне будущего катастрофического события. Процессы накопления повреждений для формирующихся в этой области сопутствующих трещин (кривые 2 и 3) замерли, а накопление поврежденности в будущем магистральном разломе резко обострилось (кривая 1).

Таким образом, любое землетрясение есть обязательный катастрофический этап эволюции геосреды — режим с обострением на соответствующем масштабе. Физически этот режим означает прорыв разрушения с меньших масштабов на большие. Следовательно, увеличение масштаба деструкции всегда развивается как катастрофа в режиме с обострением, а все процессы накопления повреждений и деградации среды в окрестности подготовки крупномасштабного события замирают.

В рамках развиваемой методологии были выполнены расчеты перемещения элементов земной коры — складчатых областей центральной Азии как результата коллизии Евразийской плиты с Индийской на юге и с Североамериканской на северо-востоке. Подробному описанию этой задачи будет посвящена отдельная публикация, а здесь на рис. 5 приведен один из результатов, имеющий непосредственное отношение к формированию очагов разрушения, в данном случае землетря-

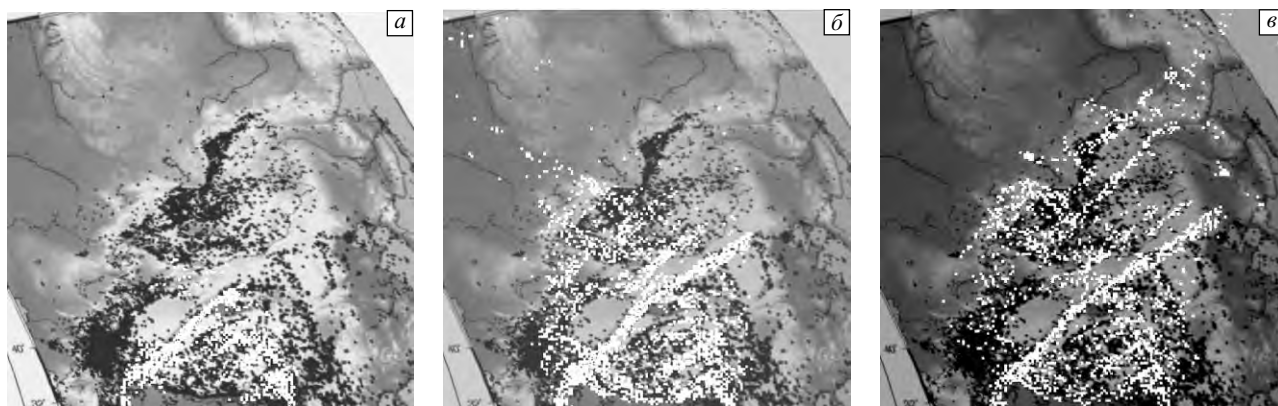


Рис. 5. Коллизия в области центральной Азии. Белыми точками показаны области рассчитанных землетрясений, где мгновенная скорость деформации превышает заданный порог, черными точками отмечены зарегистрированные природные землетрясения

сений, и к проблеме миграции землетрясений. На рис. 5 показано, как по мере нарастания давления со стороны Индийской плиты очаги сверхбыстрых локализованных смещений (белые точки на карте) распространяются вглубь Евразийского материка (расчет), черными точками отмечены наблюдаемые природные землетрясения.

Полученные в расчетах очаги катастрофических процессов хорошо согласуются с наблюдаемыми очагами землетрясений. В этих расчетах была использована зонно-блоковая структурная модель Семинского [11].

4. Заключение

Развиваемая эволюционная концепция землетрясений доведена до количественной математической теории, позволяющей моделировать процессы эволюции геосред как иерархических нелинейных систем на любых масштабах и временах, включая геологические времена. Разрабатываемый подход описывает как длительную квазистационарную стадию эволюции, так и сверхбыстрые катастрофические события разных масштабов. Все выполненные тестовые расчеты убедительно показали, что нагружаемые геосреды эволюционируют как типичные нелинейные синергетические системы.

Работа выполнена при поддержке СО РАН (проекты фундаментальных исследований №№ 7.11.1.6, VII.64.1.8, междисциплинарный интеграционный проект № 114) и программы Президиума РАН (проект 16.8).

Литература

1. Макаров П.В. Нагружаемый материал как нелинейная динамическая система. Проблемы моделирования // Физ. мезомех. – 2005. – Т. 8. – № 6. – С. 39–56.
2. Макаров П.В. Эволюционная природа блочной организации геоматериалов и геосред. Универсальный критерий фрактальной делимости // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. – № 7. – С. 724–746.
3. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Стефанов Ю.П. и др. Нелинейная механика геоматериалов и геосред. – Новосибирск: «Гео», 2007. – 237 с.
4. Макаров П.В. Математическая теория эволюции нагружаемых твердых тел и сред // Физ. мезомех. – 2008. – Т. 11. – № 3. – С. 19–35.
5. Макаров П.В. Самоорганизованная критичность деформационных процессов и перспективы прогноза разрушения // Физ. мезомех. – 2010. – Т. 13. – № 5. – С. 97–112.
6. Макаров П.В. Самоорганизованная критичность и сейсмический процесс // Материалы Всерос. семина. «Триггерные эффекты в геосистемах», Институт динамики геосфер РАН, Москва, 22–24 июня 2010 г. / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. – М.: ГЕОС, 2010. – С. 79–86.
7. Курдюмов С.П., Князева Е.Н. У истоков синергетического видения мира: режимы с обострением // Самоорганизация и наука: опыт философского осмысления. – М.: Аргус, 1994. – С. 162–186.
8. Николаевский В.Н. Механика пористых и трещиноватых сред. – М.: Недра, 1984. – 367 с.
9. Стефанов Ю.П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупкопластичных материалов // Физ. мезомех. – 2005. – Т. 8. – № 3. – С. 129–142.
10. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Евтушенко Е.П., Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ворошилов С.П. Моделирование обрушения кровли над выработанным пространством // Физ. мезомех. – 2008. – Т. 11. – № 1. – С. 44–50.
11. Семинский К.Ж. Иерархия зонно-блоковой структуры литосферы Центральной и Восточной Азии // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49. – № 10. – С. 1018–1030.

Поступила в редакцию
15.04.2010 г.

Сведения об авторах

Макаров Павел Васильевич, д.ф.-м.н., зав. лаб. ИФПМ СО РАН, проф. ТГУ, pvm@ms.tsc.ru
Смолин Игорь Юрьевич, д.ф.-м.н., внс ИФПМ СО РАН, проф. ТГУ, smolin@ispms.tsc.ru
Евтушенко Евгений Павлович, прогр. ИФПМ СО РАН, eugene@ispms.tsc.ru
Перышкин Алексей Юрьевич, магистрант ТГУ, alexb70@sibmail.com