

УДК 539.3, 539.4, 624.131

Сценарии эволюции горного массива над выработкойП.В. Макаров^{1,2}, И.Ю. Смолин^{1,2}, Е.П. Евтушенко¹, А.А. Трубицын³,
Н.В. Трубицына³, С.П. Ворошилов⁴¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634021, Россия² Томский государственный университет, Томск, 634050, Россия³ ОАО «Научный центр ВостНИИ по безопасности работ в горной промышленности», Кемерово, 650002, Россия⁴ НП «Кузбасский межотраслевой центр охраны труда», Кемерово, 650002, Россия

Рассмотрена задача о накоплении повреждений в горном массиве вокруг выработки и обрушении кровли с точки зрения развиваемого авторами эволюционного подхода. Нагружаемая полем сил тяжести геосреда рассматривается как нелинейная динамическая блочная система, эволюционирующая по законам синергетики. Определяющие соотношения, записанные в виде двух групп эволюционных уравнений, обеспечивают конкуренцию положительных и отрицательных обратных связей между параметрами геосреды, для которой учтены эффекты внутреннего трения, дилатансии, накопления повреждений и деградации прочностных свойств. Выполненные расчеты показали, что, меняя нелинейные характеристики среды, можно описать как вязкий, так и хрупкий режим разрушения, квазистационарный или существенно неравновесный режимы обрушения кровли.

Ключевые слова: горная выработка, повреждения, разрушение, эволюция, синергетика

Evolution scenarios of the rock mass over the openingP.V. Makarov^{1,2}, I.Yu. Smolin^{1,2}, E.P. Evtushenko¹, A.A. Trubitsyn³,
N.V. Trubitsyna³ and S.P. Voroshilov⁴¹ Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, 634021, Russia² Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia³ Research Center VostNII for Work Safety in Coal Industry, Kemerovo, 650002, Russia⁴ Kuzbass Interbranch Center for Occupational Safety, Kemerovo, 650002, Russia

In the paper we study a problem on damage accumulation in the rock mass around the opening and roof collapse within the evolutionary approach developed by the authors. A geomeium under gravity is taken as a nonlinear dynamic block system that evolves by the synergetic rules. Constitutive relations written as two groups of evolutionary equations provide the competition of positive and negative feedbacks between geomeium parameters. Consideration is given to effects of internal friction, dilatancy, damage accumulation and degradation of strength properties in the medium. The calculations performed show that the variation in nonlinear characteristics of the medium allows describing ductile and brittle failure as well as quasistationary and essentially nonequilibrium modes of roof collapse.

Keywords: mine opening, damage, fracture, evolution, synergetics

1. Введение. Эволюционная точка зрения на процессы деструкции в геосредах

Различные подземные полости антропогенного происхождения могут представлять серьезную угрозу как для наземных сооружений, так и для безопасного проведения горных работ, в том числе вследствие обрушения образующихся над ними кровель. Поэтому одной из актуальных проблем является задача управления кровлей

над выработанным пространством. В последнее десятилетие эта проблема стала особенно острой в связи со значительным увеличением производительности горных работ. Высокие скорости подвигания забоя приводят к тому, что горный массив вокруг выработки и, особенно, в кровле оказывается в существенно неравновесном и неустойчивом состоянии [1]. Происходит зависание протяженных участков кровли. Значительное уве-

личение шагов первой посадки кровли (до 100 м и более) и последующих посадок (до нескольких десятков метров) грозит катастрофическими неуправляемыми обрушениями кровли. Наряду с уже разработанными технологическими способами управления кровлей вблизи очистного забоя [2, 3], понимание основных закономерностей эволюции горного массива вокруг выработки и возможных сценариев развития событий в сверхбыстрых, катастрофических режимах представляет собой актуальную фундаментальную задачу геомеханики, решение которой должно стать научной основой для многих горных технологий.

Механическое поведение кровли над выработанным пространством и всего горного массива вокруг выработки, включая все значимые элементы геосреды, авторы рассматривают с эволюционной точки зрения [4–6]. Согласно развиваемому подходу геосреда в поле сил тяжести, а также при других возможных силовых воздействиях изменяется по законам общей теории эволюции, которая к настоящему времени формируется в рамках нелинейной динамики или синергетики. Однако привлечение традиционных методов и подходов нелинейной динамики, которые основываются на анализе общих свойств решений базовых уравнений синергетики, оказалось практически малоэффективным для выяснения сценариев эволюции конкретных физических и природных систем. И это понятно. Базовые уравнения синергетики не являются математическими моделями изучаемых систем, а схожесть общих закономерностей любого эволюционного процесса ничего не говорит о конкретном эволюционном сценарии исследуемой системы. Следовательно, для каждого физического или природного процесса должна быть создана оригинальная эволюционная модель, которая детально описывает изучаемый процесс.

В работах [4–6] показано, что если задача моделирования физического процесса сформулирована как эволюционная, то решения этой задачи проявляют все свойства решений нелинейных динамических систем, а также качественные закономерности, достаточно подробно изученные при анализе общих решений базовых уравнений синергетики. Это, прежде всего, иерархичность и многомасштабность изучаемых физических и природных процессов, масштабная инвариантность, самоподобие или самоаффинность, пространственная локализация распределений параметров, пороговость физических и природных явлений (когда, например, при переходе на новый масштаб разрушения должен быть преодолен характерный энергетический порог), неравномерность процессов эволюции во времени — наличие медленной квазистационарной стадии и последующая сверхбыстрая эволюция в режиме с обострением и т.д. [7, 8]. Также было показано, что решения соответствующих уравнений механики деформируемого твердого те-

ла демонстрируют все или некоторые из перечисленных особенностей только в том случае, когда задача сформулирована как эволюционная, а условия нагружения обеспечивают достижение управляющими параметрами пороговых значений, при превышении которых в системе наблюдаются изменения пространственно-временной симметрии в распределениях параметров, т.е. происходит самоорганизация — образование новых нестационарных диссипативных структур [4, 5].

В работе [1] предложено решение задачи об обрушении кровли как задачи эволюционной, подобраны скорости накопления повреждений на рассматриваемых пространственно-временных масштабах, что обеспечило приемлемое согласие с натурными данными. В настоящей работе развивается эта концепция. Основные задачи настоящего исследования носят также, в основном, методический характер, хотя параметры, обеспечивающие эволюцию геосреды в поле сил тяжести, подбирались по возможности в соответствии с данными по посадкам кровли для реальных забоев Кузбасса [1].

Цели работы сформулируем как следующие:

- продемонстрировать универсальность предлагаемого подхода для описания эволюции как вязкопластичных, так и хрупких сред, когда одна математическая модель эволюции геосреды допускает возможность реализации различных сценариев в зависимости от значений управляющих параметров и нелинейных свойств геосреды;

- обсудить роль дилатансии в формировании напряженно-деформированного состояния в нагружаемой геосреде;

- привести примеры численного решения задачи об эволюции повреждений в горном массиве вокруг выработки и обрушений кровли для двух режимов: квазиравновесного и существенно неравновесного, приводящего к катастрофическому обрушению протяженных участков кровли.

Основное внимание в работе уделяется общей феноменологии явления без привязки к разнообразным физическим процессам и механизмам, которые могут оказать кардинальное влияние на реализацию конкретного сценария эволюции или смену эволюционных сценариев. Это обводненность среды, наличие разломов, слоистость, другая исходная структурная неоднородность и т.д., которые могут быть в дальнейшем учтены при решении конкретных прикладных задач в рамках развиваемой концепции.

Отметим также следующий фундаментальный аспект, кардинально меняющий сценарий разрушения при решении задачи с позиций развиваемого подхода в отличие от традиционного усредненного макроскопического описания. С традиционной макроскопической точки зрения сплошная деформируемая среда представляет собой один заранее выбранный (продиктованный ре-

шаемой задачей) уровень или масштаб макроскопического феноменологического описания вне зависимости от физического содержания и механизмов, которые могут быть отражены в уравнениях состояния. Эволюционная точка зрения изначально предполагает наличие в среде иерархии масштабов [1, 4, 5], которые и выявляются в среде по мере развития деформационных процессов, формируя в нагружаемом материале иерархии нестационарных диссипативных структур, например систем трещин разных порядков в хрупком материале, или иерархию сравнительно слабдеформированных блоков, разделенных системами сопряженных полос локализованной деформации [4, 5]. Понятно, что при численном моделировании минимальные размеры таких структурных элементов ограничены возможностями счета (дискретными шагами по пространству). Другими словами, эволюционный подход описывает процессы самоорганизации — формирование в нагружаемой геосреде новых нестационарных структур, их взаимодействия и трансформации. Эти структуры не могут быть навязаны среде извне, а генетически присущи самой нелинейной среде. По этой причине нелинейные определяющие уравнения включают две группы: первая выражает связи между макропараметрами; вторая содержит кинетические уравнения, задающие скорости генерации неупругих деформаций и повреждений в зависимости от событий микроуровня. В зависимости от накопленных повреждений (неупругих сдвигов) кинетические уравнения описывают также деградацию прочностных свойств среды. Таким образом, в нагружаемой геосреде, в том числе и первоначально структурно-однородной, формируется неоднородное распределение параметров. Эти неоднородности образуются в среде в силу внутренних причин — нелинейных свойств среды, а не в силу специально подобранных условий нагружения. Это и есть по И. Пригожину [7] диссипативные структуры.

2. Математическая постановка задачи об эволюции нагружаемой геосреды

Следуя работам [1, 4, 5], система уравнений механики твердого деформируемого тела вместе с определяющими эволюционными уравнениями является в общем случае нелинейной. Она описывает эволюцию любых твердых тел, в том числе и нагружаемой геосреды. Связь такой физически 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 [1, 4, 5].

Такая эволюционирующая открытая система будет способна к самоорганизации только в том случае, если в ней имеются объемные, распределенные в пространстве источники, способные генерировать и перераспре-

делять неоднородности в распределении параметров, фактически формировать новые и трансформировать уже имеющиеся структуры: тепловые [7, 8], деформационные [4] и т.д. Именно источниками формируются нестационарные диссипативные структуры, способные к развитию и приводящие к усложнению и совершенствованию системы, т.е. ее адаптации к внешним воздействиям [8], в то время как на стоках возможно формирование только стационарных структур [4, 8]. По этой причине деформируемое твердое тело — это идеальная среда, способная к самоорганизации, так как в ней под приложенными воздействиями генерируются различные дефекты и повреждения разных масштабов [4].

Движущими силами эволюции геосреды являются гравитация и внутреннее тепло. Для решения задачи эволюции горного массива вокруг выработки в настоящей работе ограничимся только гравитацией.

Таким образом, полная система нелинейных уравнений при лагранжевом подходе к описанию движения сплошной среды включает:

– уравнения, выражающие законы сохранения массы, импульса и энергии:

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

– 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:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}^P &= A \frac{\partial}{\partial x^i} B \frac{\partial}{\partial x^i} \theta^P + C(\theta^P), \\ \dot{\epsilon}_{ij}^P &= F(\dot{\epsilon}_{\text{eff}}^P, \sigma_{\text{eff}}^P, S_{ij}). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь ρ_0 и ρ — начальное и текущее значения плотности материала; V_0 и 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; δ_{ij} — символ Кронекера; λ и μ — коэффициенты Ламэ; точка над символом означает материальную производную по времени. Используется разложение полной скорости деформации на упругую и неупругую составляющие: $\dot{\epsilon}_{ij}^T = \dot{\epsilon}_{ij}^c + \dot{\epsilon}_{ij}^p$. 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); A, B, C, F — некоторые функции, определяемые при конкретном задании кинетик (3). Используются также следующие обозначения:

$$\dot{\theta}^T = \dot{\epsilon}_{ii}^T, \quad \dot{\theta}^P = \dot{\epsilon}_{ii}^P, \quad \dot{\epsilon}_{\text{eff}}^P = \sqrt{\frac{4}{3} J_2^P} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^P \dot{\epsilon}_{ij}^P},$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^P = \dot{\epsilon}_{ij}^P - \frac{1}{3} \dot{\theta}^P \delta_{ij}, \quad \sigma_{\text{eff}} = \sqrt{3 J_2} = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}},$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} + P \delta_{ij}, \quad -P = \frac{1}{3} \sigma_{ii}.$$

Определяющие уравнения первой группы (2) записаны в релаксационной форме и выполняют несколько важнейших функций в развитии эволюционного процесса:

1. Упругие напряжения растут в каждой локальной точке нагружаемой среды пропорционально росту полных скоростей деформации $\dot{\epsilon}_{ij}^T$, т.е. в соответствии со скоростью нагружения среды. Такое нагружение может быть осуществлено либо непосредственным заданием полной скорости деформирования $\dot{\epsilon}_{ij}^T$, либо косвенно через приложенные массовые и поверхностные силы и перераспределения параметров в соответствии с развитием течения среды, определяемым законами сохранения (1). Именно в этом смысле скорости полных деформаций $\dot{\epsilon}_{ij}^T$ выполняют роль управляющих параметров согласно терминологии Николаса и Пригожина [7].

2. Релаксируют напряжения в соответствии с развитием неупругих реакций в нагружаемой среде $\dot{\epsilon}_{ij}^P$. 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 эти уравнения с учетом кинетических уравнений (3) реализуются отрицательные и положительные обратные связи. Отрицательная обратная связь реализуется через закон релаксации и стабилизирует деформационный процесс, выравнивая неоднородности. Действительно, чем выше напряжения, тем выше скорость генерации неупругих сдвигов и повреждений, а значит, и выше скорость релаксации. С уменьшением напряжений уменьшается и генерация повреждений и сдвигов. Процесс стабилизируется в состоянии динамического равновесия в данной частице среды, из которого его может вывести, например, изменение полной скорости деформации $\dot{\epsilon}_{ij}^T$ как управляющего параметра. Понятно, что эта стабилизация определяется не только скоростью генерации неупругих деформаций и повреждений, но и механизмами упрочнения и деградации физико-механических характеристик среды, о чем будет

сказано далее. Положительная обратная связь не только ускоряет автокаталитический процесс деградации прочностных характеристик среды (локализация неупругих деформаций (повреждений) снижает прочностные характеристики среды в этих локальных областях, что, в свою очередь, усиливает в них процессы локализации), но и выполняет созидательную роль, формируя в среде новые диссипативные деформационные структуры [4, 8].

Эволюционные уравнения второй группы (3) отражают реакцию среды на нагружение. В то время как полные скорости деформации $\dot{\epsilon}_{ij}^T$, так или иначе, определяются условиями нагружения, $\dot{\epsilon}_{ij}^P$ и $\dot{\theta}^P$ зависят только от внутренних свойств среды и являются результатом работы распределенных объемных источников, генерирующих в среде дефекты. Кинетические уравнения (3) интегрально отражают масштабы микроуровня и определяют возможности среды перераспределять и диссипировать подводимую к ней энергию. В этом смысле они отвечают за способность нагружаемой среды к формированию в ней диссипативных нестационарных структур, т.е. за самоорганизацию. В этом и заключается созидательная роль положительной обратной связи [8]. С другой стороны, эволюционные уравнения второй группы 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), $\dot{\epsilon}_{ij}^P$ и $\dot{\theta}^P$ участвуют в игре между положительными и отрицательными обратными связями, определяя эволюционные сценарии.

Конкретная модель нагружаемой геосреды обсуждена в работах [1, 4, 5] и учитывает внутреннее трение, дилатансию, накопление повреждений и деградацию прочностных характеристик геосреды. Предельная поверхность перехода от упругой реакции среды к неупругому поведению определена по модели Николаевского [9]:

$$-\alpha P + J_2^{1/2} = Y, \quad \dot{\theta}^P \equiv \dot{J}_1^P = 2\Lambda (\dot{J}_2^P)^{1/2} = 3\Lambda \dot{\epsilon}_{\text{eff}}^P, \quad (4)$$

где α — коэффициент внутреннего трения; Λ — коэффициент дилатансии. Изменения прочностных параметров модели описываются следующими уравнениями [1, 5]:

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

$$A(e) = 2h \frac{e}{e^*}, \quad D_e(e) = 2h \left(\frac{e}{e^*} \right)^2 = A(e) \frac{e}{e^*}, \quad (5)$$

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

Здесь h — параметр модели, отвечающий за упрочнение; $e = 2(J_2^P)^{1/2} = 3\epsilon_{\text{eff}}^P$ — накопленная пластическая деформация (параметр Одквиста); e^* — критическая деформация, после достижения которой преобладает деградация материала; σ — эффективное напряжение;

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 соответственно; $D(\sigma)$ — 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:

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

Выбор степенных зависимостей в выражениях (5) был продиктован соображениями, связанными с изучением локализации и образованием тепловых структур и замечанием С.П. Курдюмова 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 [8]. Степенные зависимости в законах накопления повреждений следуют также из идеи самоподобия (или самоаффинности) [10].

Реальное время эволюционного процесса T существенно больше возможного модельного времени t , непосредственно используемого при счете. В рассматриваемой задаче оно задается характерными временами продвижения забоя. За время ΔT забой продвигается на один дискретный пространственный интервал Δx . На квазистационарной стадии эволюции шаг по времени процесса ΔT выбирается из условия

$$\Delta T = \frac{nL}{c}, \quad (7)$$

где $n \approx 3$; L — размер расчетной области; c — скорость звука в геосреде. Условие (7) обеспечивает установление в геосреде практически стационарного распределения параметров после малого возмущения, вызванного увеличением выработанного пространства, и задает связь между временем процесса T и расчетным временем t .

3. Примеры численного решения задачи об обрушениях кровли

Одной из фундаментальных проблем геомеханики, которая пока не нашла должного объяснения, является проблема изменения отклика геосреды от вязкой реакции до хрупкого поведения в зависимости от условий нагружения [11, 12]. Такое поведение геосреды является вполне объяснимым в рамках развиваемой эволюционной концепции. В зависимости от сценария эволюции, который определяется как нелинейными свойствами среды, скоростью генерации повреждений, так и балан-

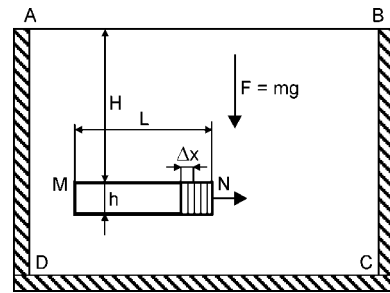


Рис. 1. Схема расчетной области горного массива вокруг горной выработки: F — сила тяжести; MN — выработка; N — подвижная граница (забой); Δx — дискретный шаг наращивания выработанного пространства; AB — свободная (дневная) поверхность; AD, BC, DC — жесткие границы, обеспечивающие стесненные условия деформирования геосреды в поле сил тяжести; H — глубина выработки; h — высота выработанного пространства

сом положительных (ускорение автокаталитического процесса) и отрицательных (стабилизация деформационного процесса) обратных связей, реакция среды может изменяться от типично вязкопластического поведения до хрупкого разрушения [4]. На рис. 1 представлена схема расчетной области, приложенных нагрузок и граничных условий. На рис. 2 представлены результаты расчета развития повреждений в кровле для разных скоростей генерации повреждений. Изменение только одного

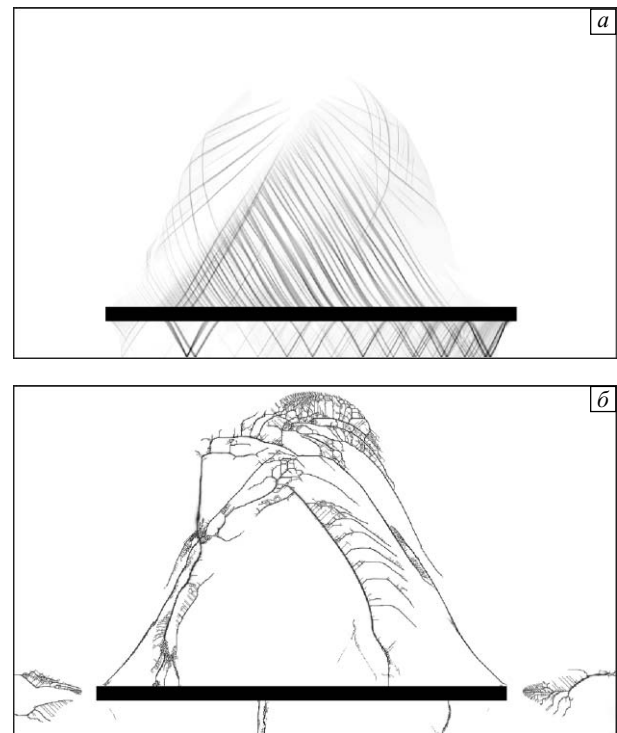


Рис. 2. Распределение повреждений вокруг горной выработки для вязкого (а) и хрупкого (б) разрушения в кровле

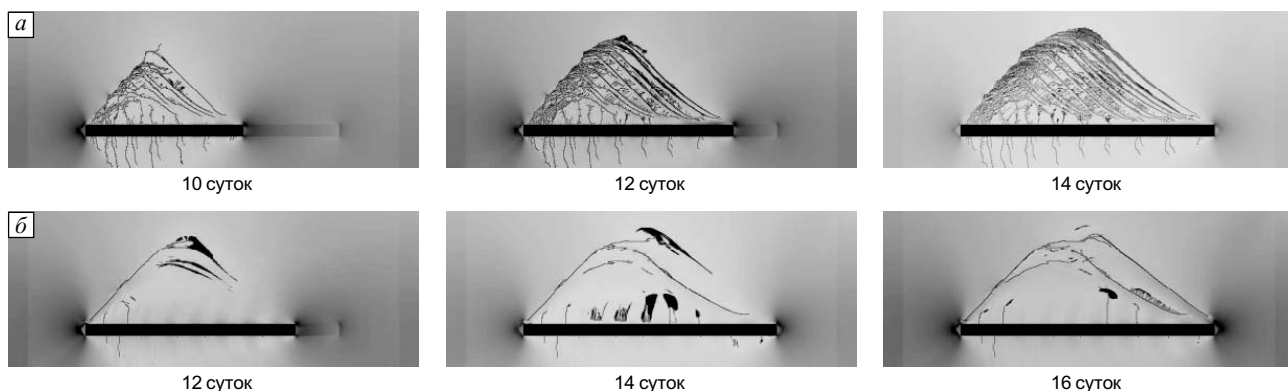


Рис. 3. Распределение повреждений при квазистационарном (*a*) и неравновесном (*b*) режимах обрушения кровли. Длина расчетной области — 80 м, максимальная длина выработки — 50 м

параметра t^* в законе генерации (5) полностью изменило эволюционный сценарий. На рис. 2, *a* мы видим развитое вязкопластическое течение, а на рис. 2, *b* — типичное фрактальное дерево ветвящихся трещин. В полосах локализованной неупругой деформации (повреждений) (рис. 2, *a*) накопленные неупругие деформации более чем на порядок превышают деформации при хрупком растрескивании на рис. 2, *b*. В нагруженной геосреде сформировались диссипативные структуры — блоки.

В зависимости от условий нагружения меняется и сценарий обрушения кровли. При малых скоростях продвижения забоя режим квазиравновесный [1] и обрушения кровли происходят вслед за продвижением забоя (рис. 3, *a*). При высоких скоростях образуются протяженные участки зависшей кровли, полосы локализованных повреждений незамкнуты и реализуется существенно неравновесный режим, при котором поврежденность среды в кровле достигает критических значений только тогда, когда забой успевает уйти на значительные расстояния (рис. 3, *b*). Подобные неравновесные режимы чрезвычайно опасны и грозят катастрофическими обрушениями больших участков кровли. Спускowymi механизмами подобных катастрофических обрушений могут быть различные причины (обводнение, наличие газов, быстрый рост исходных трещин и разломов в гор-

ном массиве). Они могут дополнительно способствовать переходу от медленной стадии эволюции повреждений в кровле к сверхбыстрой [4, 8]. Эти вопросы требуют специального пристального изучения и в настоящей работе не рассматриваются. В рассмотренном случае исключительно за счет нелинейных свойств среды без каких-либо провокаций извне медленная стадия эволюции повреждений в кровле сменяется сверхбыстрым режимом с обострением.

На рис. 4 показаны результаты моделирования первой посадки кровли и нескольких последующих. В расчетах воспроизведена типичная ситуация, наблюдаемая в реальных условиях: шаг установившегося обрушения приблизительно в три раза меньше, чем шаг начального обрушения. Каждая последующая посадка меньше предыдущей, так как увеличение длины пролета выработанного пространства ускоряет процесс накопления повреждений в кровле. На рис. 2–4 мы видим также развитие повреждений в почве, что является отражением ее выпучивания в выработанное пространство.

В любой точке, где функция поврежденности достигает единицы и среда оказывается разрушенной полностью, т.е. материал исчерпывает все возможности сопротивляться разрушению и его прочность становится нулевой, реализуется типичный эволюционный сценарий — предшествующая длительная квазистационарная

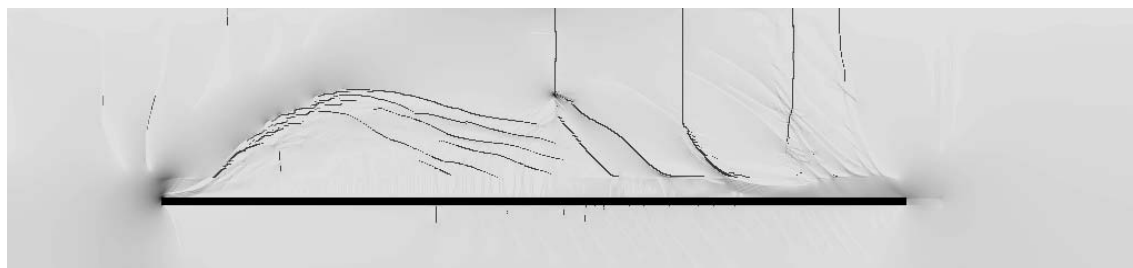


Рис. 4. Первая и последующие посадки кровли. Глубина выработки — 200 м, длина выработки — 300 м

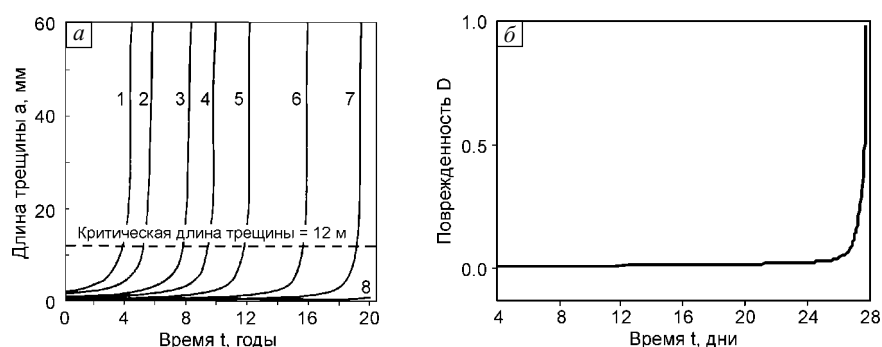


Рис. 5. Экспериментальная временная зависимость длины трещины для алюминия 7075-T6 при разных условиях [13] (а) и зависимость поврежденности $D(\sigma)$ в области локализации повреждений от времени в расчетах вплоть до момента катастрофического обрушения кровли на 28 день (б)

стадия медленного накопления повреждений и медленной деградации прочности сменяется на режим сверхбыстрой эволюции (рис. 5). Понятно, что для разных точек среды продолжительность этих стадий различна в зависимости от эволюции напряженно-деформированного состояния среды в этой конкретной точке. Подобное поведение материалов и сред хорошо известно из экспериментов [12, 13].

Так как эволюция геосреды происходит практически в стесненных условиях, обусловленных горным давлением и смягчаемых только наличием выработанного пространства, роль дилатансионных процессов в развитии повреждений в горном массиве огромна. Роль дилатансии в эволюции напряженно-деформированного состояния в геосредах, а также в связи с развитием различных катастрофических событий, широко обсуждается в литературе [12, 14, 15]. Подробному рассмотрению этой сложной проблемы будет посвящена отдельная работа. Здесь остановимся только на нескольких вопросах принципиального характера. Еще М.М. Протодяковым [14] было замечено, что в геосреде, начиная с некоторой глубины, где гравитация создает напряженное состояние, близкое к предельным величинам для этого материала, за счет дилатансионных процессов формируются арки, принимающие на себя давление вышележащих пород, и с дальнейшим ростом глубины выработки горное давление перестает расти. Наши расчеты также демонстрируют формирование в поврежденной среде подобных арок (рис. 2–4). Пока мы говорим только о качественной стороне проблемы, так как для выяснения количественных характеристик необходимы экспериментальные данные о величинах дилатансии для конкретных геосред в зависимости от приложенных нагрузок. Тестовые расчеты показали, что картина разрушения кардинально меняется в зависимости от принятой модели нарастания дилатансии. При большой дилатансии возможна ситуация, когда большинство периферийных трещин в кровле прекращают рост и развиваются несколько или одна магистральная трещина в центральной части кровли (рис. 6).

В некоторых работах по геомеханике говорят о дилатансионном упрочнении среды. На наш взгляд, подобная концепция неверна, не может частично разрушенный материал быть прочнее неразрушенного. Такая концепция появилась в рамках фактически одномасштабного макроскопического описания разрушения однородного континуума, когда при некотором уровне напряжений σ_1 материал оказывается частично поврежденным. За счет развития дилатансии стесненность деформации нарастает, что вызывает рост напряжений. Формально получается, что последующее разрушение происходит при более высоком уровне сдвиговых напряжений, что породило неверную концепцию дилатансионного упрочнения.

Понимание того факта, что разрушение есть многомасштабный иерархический процесс, а нагружаемая среда неоднородна во всей иерархии масштабов хотя бы потому, что в ней всегда присутствует исходная поврежденность, все ставит на свои места. По мере накопления повреждений в каждой точке геосреды средняя ее прочность Y только падает от некоторого исходного значения до 0, и в этом случае значение функции поврежденности $D(\sigma) = 1$. При среднем макроскопичес-

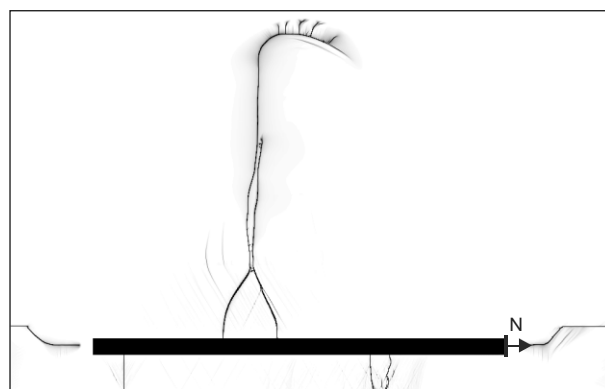


Рис. 6. Развитие повреждений в кровле при большой величине дилатансии

ком напряжении в точке A , равном σ_A , локальные напряжения на более низких масштабах могут существенно превышать и средние напряжения, и величину прочности материала Y , что приводит к появлению повреждений разных масштабов, падению средней макроскопической прочности и росту среднего напряжения в этой точке за счет дилатансии. Значения σ_A и Y сближаются. Когда $\sigma_A = Y$, то только в этой локальной точке A , а не во всем образце, будет иметь место локальное макроскопическое разрушение. В этом случае величина поврежденности $D(\sigma) = 1$ в локальном макроскопическом объеме A . В рассматриваемой эволюционной модели все нижележащие уровни учтены усреднено через функцию поврежденности $D(\sigma)$. В уравнении (5) для $D(\sigma)$ при малой величине σ_0 , меньшей макроскопического предела текучести Y , модель позволяет накапливать повреждения и дилатансию уже на макроскопически упругой стадии, но неупругой на малых масштабах. Такой подход, на взгляд авторов, позволяет качественно правильно учитывать дилатансию и описывать поведение хрупкой геосреды в стесненных условиях деформирования.

4. Заключительные замечания

В работе задача о механическом поведении геосреды вокруг выработки решается с точки зрения развиваемого авторами эволюционного подхода. Расчеты эволюции повреждений в кровле над выработанным пространством показали, что в кровле формируется иерархия блоков разных масштабов, разделенных полосами локализованных повреждений. Показано также, что в зависимости от конкуренции отрицательных обратных связей, стабилизирующих деформационный процесс и сглаживающих неоднородности в распределениях параметров, и положительных обратных связей, ускоряющих автокаталитический процесс дегградации нагружаемой среды, сценарий эволюции геосреды может меняться от типичного вязкопластического течения до сугубо хрупкой реакции. Отмечена важная роль дилатансии в развитии деформации в стесненных условиях. Показано, что дилатансионные процессы приводят к образованию в поврежденной среде арочных форм. Дана критика концепции дилатансионного упрочнения.

Работа выполнена при поддержке СО РАН (проекты фундаментальных исследований на 2007–2009 гг. №№ 7.11.1.6 и 3.6.2.3) и программы Президиума РАН (проект 16.3). Расчеты выполнены на высокопроизводительном кластере СКИФ-Cyberia в Томском государственном университете.

Литература

1. 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.
2. Якоби О. Практика управления горным давлением. – М.: Недра, 1987. – 566 с.
3. Никишин Д.Ю. Обоснование эффективных способов предотвращения обрушений пород кровли в лавах надрабатываемых слоев / Дис. ... канд. техн. наук. – С.-Петербург: СГГИ, 2007. – 153 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., Смолин И.Ю., Стефанов Ю.П., Кузнецов П.В., Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ворошилов С.П., Ворошилов Я.С. Нелинейная механика геоматериалов и геосред. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал ГЕО, 2007. – 235 с.
6. Макаров П.В. Эволюционная природа блочной организации геоматериалов и геосред. Универсальный критерий фрактальной делимости // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. – № 7. – С. 724–746.
7. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 344 с.
8. Курдюмов С.П., Князева Е.Н. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. – М.: Наука, 1994. – 236 с.
9. Гарагаи И.А., Николаевский В.Н. Неассоциированные законы течения и локализации пластической деформации // Успехи механики. – 1989. – Т. 12. – № 1. – С. 131–183.
10. Карпинтери А., Лачидонья Дж., Пуцци С. Прогноз развития трещин в полномасштабных конструкциях на основе анализа показателя b и статистики Юла // Физ. мезомех. – 2008. – Т. 11. – № 3. – С. 75–87.
11. Наймарк О.Б. Структурно-скейлинговые переходы и автомодельные закономерности развития землетрясений // Физ. мезомех. – 2008. – Т. 11. – № 2. – С. 89–106.
12. Гольдин С.В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли. – 2004. – № 10. – С. 37–54.
13. Си Дж. Мезомеханика, понятие сегментации и мультискейлинговый подход: нано-микро-макро // Физ. мезомех. – 2008. – Т. 11. – № 3. – С. 5–18.
14. Протодьяконов М.М. Давление горных пород и рудничное крепление. Ч. 1. Давление горных пород. – М.: Госгориздат, 1933. – 127 с.
15. Шемякин Е.И. Механика горного массива // Научные сообщения Института горного дела им. А.А. Скочинского. – 2007. – Вып. 333. – С. 137–152.

Поступила в редакцию
14.10.2008 г.

Сведения об авторах

Макаров Павел Васильевич, д.ф.-м.н., профессор ТГУ, заведующий лабораторией ИФПМ СО РАН, pvm@ispms.tsc.ru
Смолин Игорь Юрьевич, д.ф.-м.н., доцент ТГУ, старший научный сотрудник ИФПМ СО РАН, smolin@ispms.tsc.ru
Евтушенко Евгений Павлович, программист ИФПМ СО РАН, eugene@ispms.tsc.ru
Трубицын Анатолий Александрович, д.т.н., профессор, генеральный директор ОАО НЦ ВостНИИ, 340670@kemtel.ru
Трубицына Нэля Вадимовна, д.т.н., директор по научной работе ОАО НЦ ВостНИИ, 340670@kemtel.ru
Ворошилов Сергей Петрович, к.ф.-м.н., директор «Кузбасс-ЦОТ», kuzbassCOT@mail.ru