

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ РЕАЛИЗАЦИИ ВОЗМОЖНЫХ РЕЖИМОВ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ В ГЕОСРЕДЕ

Беликов В.Т. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

**Аннотация.** На основе анализа уравнения баланса энергии разрушающегося твердого тела, учитывающего объемную и поверхностную его составляющие, сформулированы условия реализации того или иного режима развития процесса разрушения в горном массиве.

### AN INVESTIGATION OF REALIZATION CONDITIONS OF POSSIBLE REGIMES OF FAILURE PROCESS DEVELOPMENT IN GEOENVIRONMENT

Belikov V.T. – Institute of Geophysics, UB of RAS, Yekaterinburg

**Abstract.** Realization conditions of one or another regime of failure process development in a rock massif were formulated, analyzing energy balance equation of a failing solid body, taking into account its volumetrically and surface components.

#### 1. Введение

Проблема предсказания горных ударов и землетрясений решается медленно, прежде всего потому, что мы недостаточно знаем закономерности развития процессов разрушения, особенно в земной коре. В связи с этим важно отметить, что процессы разрушения в геосреде обладают рядом специфических особенностей, характеризуются большими пространственными и временными масштабами и протекают в широком интервале температур и давлений, нередко при участии флюидов. При этом неясными, прежде всего, остаются вопросы, связанные с условиями реализации того или иного режима развития процессов разрушения. Существующие данные говорят о том, что деструктивные (в широком смысле этого слова) процессы в геосреде происходят непрерывно. Однако не всегда развитие процесса разрушения приводит к катастрофическим событиям. Это означает, что в некоторых случаях процессы разрушения не сопровождаются значительным акустическим импульсом и протекают эволюционным образом.

При изучении такого явления, как разрушение чаще всего объектом исследования является отдельная трещина, которая по мере своего роста приводит к нарушению целостности материала и разделению тела на части. С появлением работ по кинетической теории прочности [1] стало ясно, что разрушение представляет собой разворачивающийся во времени физиче-

ский процесс, по мере развития которого происходит глубокое и необратимое преобразование материала, и описывать его только механическими категориями, рассматривая лишь отдельную трещину, недостаточно. Таким образом, для того, чтобы изучать развитие процесса разрушения и, что особенно важно, характер этого развития, необходимо учесть данное обстоятельство, рассмотрев при этом всю область, где происходит разрушение. С этой целью для разрушающегося горного массива целесообразно (в рамках континуального подхода) рассмотреть модель гетерогенной среды, одной из фаз которой является трещинная. Сам твердый материал также может быть гетерогенным и состоять из нескольких фаз, которые (включая трещинную) отделены друг от друга соответствующими межфазными поверхностями. В такой ситуации при изучении процессов разрушения необходимо учитывать и поверхностную энергию. Кроме того, в рамках предлагаемой модели, следует ввести такие измеряемые характеристики разрушающегося твердого тела, как доля объема, занимаемая трещинами (пористость и трещиноватость) и поверхность трещин, рассчитанная на единицу объема (удельная внутренняя поверхность, УВП). На тот факт, что поверхностная энергия играет важную роль в процессах разрушения, одним из первых обратил внимание Гриффитс [2], рассматривавший условия, необходимые

для распространения отдельной трещины. Если считать разрушающееся твердое тело гетерогенным и трактовать процесс разрушения как фазовый переход первого рода [3], то для изучения развития процессов разрушения в пространстве и времени можно использовать уравнения, описывающие процессы тепломассопереноса в гетерогенной геосреде [4], учтя при этом в общем балансе энергии также и поверхностную ее часть. В такой постановке объектом изучения будет уже не отдельная трещина, а вся область, где развиваются процессы разрушения, рассматриваемая как гетерогенная среда с изменяющимися структурными характеристиками, такими как доля объема, занимаемая трещинами (трещиноватость) и УВП.

Целью настоящей работы является изучение условий реализации того или иного режима развития процесса разрушения в геосреде на основе анализа уравнения энергетического баланса разрушающегося массива горных пород и формулировка критериев, определяющих характер этого развития и, в частности, выявление условий, при которых возникает катастрофическое событие типа горного удара или землетрясения.

## 2. Постановка задачи и вывод основных соотношений

При изучении процесса разрушения в геосреде необходимо рассмотреть две фазы: твердую и трещинную (флюид), разделенные соответствующей межфазной поверхностью  $S_{f-s}$ , которую будем предполагать гладкой. В дальнейшем символ  $S_{f-s}$  будет использоваться и для обозначения величины площади межфазной поверхности в некотором объеме  $V$  (называемом далее объемом осреднения) твердого тела. Когда мы рассматриваем процесс разрушения как фазовый переход, трещинная фаза будет представлять собой газообразный флюид, химический состав которого соответствует составу твердой фазы. Уравнение баланса объемной энергии твердой фазы, осредненное (по объему  $V$ ), в соответствии с [4], может быть записано так:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( E + \frac{v_i^2}{2} \right) \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \rho \left( E + \frac{v_i^2}{2} \right) v_i - (\sigma_{ik} + \tau_{ik}) v_k + J_i \right] - \\ & - \frac{1}{V} \int_{S_{f-s}} \rho' \left( E' + \frac{v_i'^2}{2} \right) u_i'^{sp} n_i dS - \\ & - \frac{1}{V} \int_{S_{f-s}} (\sigma'_{ik} + \tau'_{ik}) v'_k n_i dS + \frac{1}{V} \int_{S_{f-s}} J'_i n_i dS = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Обозначения следующие:  $\rho'$ ,  $v'_i$ ,  $\sigma'_{ik}$ , и  $\tau'_{ik}$  – соответственно плотность, скорость, тензоры упругих и вязких напряжений в точке;  $E'$  – внутренняя энергия твердой фазы в точке, рассчитанная на единицу массы;  $J'_i$  –  $i$ -я компонента кондуктивного потока тепла в твердой фазе в точке;  $\rho$ ,  $v_i$ ,  $E$ ,  $\sigma_{ik}$ ,  $\tau_{ik}$ ,  $J_i$  – соответствующие осредненные значения указанных параметров,  $n_i$  –  $i$ -я компонента единичного вектора нормали, внешней по отношению к твердой фазе,  $u_i'^{sp}$  –  $i$ -я компонента скорости движения межфазной границы при разрушении твердого тела [3-4]. Скорость  $\mathbf{u}^{sp}$  определяется из кинетических соображений или из решения задачи Стефана [5]. Объем осреднения  $V$  выбирается таким образом, чтобы его характерный размер был много больше характерного размера трещин и много меньше размеров области разрушения. Первые два слагаемых слева в (1) присутствуют и в уравнении баланса энергии гомогенной среды [6], поэтому обсуждение их физического смысла не требуется. Последние три слагаемых являются специфическими, и их появление обусловлено наличием межфазной поверхности. Их физический смысл обсуждался в работе [7]. Аналогичное (1) соотношение можно записать и для энергии трещинной фазы.

Уравнение, описывающее изменение поверхностной энергии в процессе разрушения твердого тела было получено в работе [7]. Оно имеет вид

$$\frac{dE_{\Omega}}{dt} = \sigma \frac{d\Omega}{dt} = \sigma v \Omega, \quad (2)$$

где  $E_{\Omega}$  – поверхностная энергия единицы объема,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного

натяжения, предполагаемый постоянным,  $\Omega$  – УВП твердого тела, определяемая следующим образом

$$\Omega = \frac{1}{V} \int_{S_{f-s}} dS = \frac{S_{f-s}}{V}.$$

Параметр  $\nu$ , имеющий вид

$$\nu = \langle \mathbf{w} \mathbf{n} \operatorname{div} \mathbf{n} \rangle_{S_{f-s}},$$

где скобки справа означают среднее по межфазной поверхности  $S_{f-s}$ , характеризует изменение УВП, обусловленное движением межфазной границы  $S_{f-s}$ . Причем

$$\mathbf{w} = \mathbf{v} + \mathbf{u}^{sp},$$

где  $\mathbf{v}$  – скорость твердой фазы на границе  $S_{f-s}$  (скорость деформации границы). Таким образом, величина  $\nu$  описывает изменение УВП, вызванное как деформацией твердой фазы, так и фазовыми переходами. Величина  $\operatorname{div} \mathbf{n}$  совпадает с кривизной [8] и является структурным параметром, определяющим эволюцию топологических свойств межфазной поверхности при ее перемещении.

Складывая (1) и (2), получим уравнение баланса полной (объемной и поверхностной) энергии разрушающегося твердого тела. Вычитая из него соотношение для баланса кинетической энергии твердой фазы (составленное с использованием ее уравнения движения [4]) получим выражение, описывающее изменение объемной внутренней и поверхностной энергии разрушающегося твердого тела [7].

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (U + E_{\Omega}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (U v_i) - (\sigma_{ik} + \tau_{ik}) v_{ik} + \frac{\partial J_i}{\partial x_i} - \\ - \frac{1}{V} \int_{S_{f-s}} U' u_i^{sp} n_i dS + \frac{1}{V} \int_{S_{f-s}} J'_i n_i dS - \sigma \nu \Omega = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $U' = \rho' E'$  и  $U = \rho E$  – внутренняя энергия в точке, и осредненная внутренняя энергия твердой фазы, приходящиеся на единицу объема. Энергию трещинной (флюидной) фазы в силу её малой плотности в общем балансе энергии мы не учитываем.

### 3. Обсуждение результатов

Обратим внимание на некоторые важные обстоятельства, связанные с физичес-

ким смыслом слагаемых в (3).

Во-первых, отметим следующее: процессы разрушения, происходящие в твердом теле, приводят к тому, что картина напряженно-деформированного состояния становится существенно нестационарной. В этом случае отличны от нуля тензор скоростей деформации  $v_{ik}$  и коэффициент  $\nu$ . При этом упругие силы производят работу по изменению напряженно-деформированного состояния среды, меняется и поверхностная энергия разрушающегося твердого тела.

Во-вторых, как известно, интенсивность фазового перехода пропорциональна перегреву фазы (испытывающей такой переход) по сравнению с температурой фазового равновесия. Поэтому кондуктивная теплопроводность, способствующая отводу тепла из данной области, снижает вероятность перегрева в ней и уменьшает степень интенсивности фазового перехода. Таким образом, при прочих равных условиях более высокой теплопроводности тела соответствует более высокая его прочность.

В-третьих, чем с большими скоростями деформируется тело, тем больше тепловыделение за счет вязкой диссипации (слагаемое  $\tau_{ik} v_{ik}$  в (3)) и тем больше вероятность перегрева и разрушения.

Оценим по порядку величины слагаемые слева в (3) и изучим возможные режимы развития процесса разрушения в зависимости от соотношения между ними. Для этого введем три характерных времени  $\tau_1 = \eta/K$ ;  $\tau_2 = Ku^2/(\lambda T)$ ;  $\tau_3 = Ku^2/(L^2 \nu \sigma \Omega)$ , где  $K$  – какой-либо упругий модуль,  $u$  – смещение,  $L$  – характерный размер,  $\eta$  – вязкость,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Если  $K$  – модуль сдвига, то  $\tau_1$  – максвелловское время релаксации [9]. Прежде всего, отметим, что слагаемое, описывающее конвективный поток энергии в силу малости скоростей деформации в твердом теле можно опустить. При  $t \gg \tau_1$  можно пренебречь тепловыделением за счет вязкой диссипации (слагаемое  $\tau_{ik} v_{ik}$ ) по сравнению с работой упругих сил в единицу времени (слагаемое  $\sigma_{ik} v_{ik}$ ). Иными словами, чем

меньше  $\tau_1$  (то есть меньше вязкость горных пород  $\eta$ ) тем раньше наступает момент времени, начиная с которого  $\sigma_{ik}v_{ik} \gg \tau_{ik}v_{ik}$ . Можно сказать и так: чем меньше  $\tau_1$ , тем более вероятен режим, когда  $\sigma_{ik}v_{ik} > \tau_{ik}v_{ik}$ . При  $t \ll \tau_2$ , величина  $\sigma_{ik}v_{ik}$  существенно больше кондуктивного отвода тепла (слагаемое  $\partial J_i / \partial x_i$ ). В этом случае, чем больше  $\tau_2$  (то есть, чем меньше коэффициент теплопроводности), тем более вероятно, что в течение всего промежутка времени развития процесса разрушения мощность упругих сил превышает кондуктивный отвод тепла. Такая ситуация характерна для силикатных горных пород, обладающих более низкой теплопроводностью, например, по сравнению с металлами. При  $t \ll \tau_3$ , мощность упругих сил много больше работы, затрачиваемой в единицу времени на изменение УВП (слагаемое  $\sigma v \Omega$ ). То есть, чем больше  $\tau_3$ , тем в течение большего промежутка времени осуществляется такой режим развития процессов разрушения при котором  $\sigma_{ik}v_{ik} \gg \sigma v \Omega$ . Если говорить конкретно, то это происходит в том случае, когда скорость изменения УВП  $d\Omega/dt = v \Omega$  (см. (2)) относительно мала. В этой связи немаловажно отметить, что скорость изменения удельной внутренней поверхности помимо всего прочего зависит и от структурно-петрофизических свойств горных пород. При  $\tau_1 \ll t \ll \tau_2$  мощность упругих сил превышает и диссипативное тепловыделение и кондуктивный отвод тепла. Если к тому же  $\tau_2 < \tau_3$ , то она превышает и работу, затрачиваемую в единицу времени на образование новой поверхности. В этом последнем случае можно ожидать ускоренный (и даже катастрофический) режим развития процесса разрушения. Более того, если по мере его протекания, образования и роста трещин (с соответствующим изменением УВП) возможны значительные деформации с большими скоростями, то кинетическая энергия разрушающейся горной породы может стать сравнимой с ее внутренней энергией. Тогда следует анализировать уравнение для полной энергии твердого тела, полученное сумми-

рованием соотношений (1) и (2), из которого видно, что в этом случае возникает значительный акустический импульс, описываемый вторым слева в (1) поверхностным интегралом. Если этот акустический импульс, связанный с колебанием межфазных поверхностей не компенсирует потерь свободной энергии деформации при разгрузке, появляются магистральные трещины достаточного большого характерного размера, нарушающие целостность материала на данном пространственном масштабе, что и приводит к большим деформациям. При этом значительные скачкообразные смещения, не отделившихся окончательно от разрушающегося горного массива частей, могут приводить к генерации мощных акустических импульсов. Именно такой сценарий развития процессов разрушения в геосреде может приводить к большим подвижкам отдельных фрагментов горного массива и возникновению горных ударов и землетрясений той или иной интенсивности. В том случае, когда после нарушения целостности материала происходит разделение тела на части, запасенная в нем упругая энергия, может переходить в кинетическую энергию его отдельных фрагментов.

Если пренебречь в (3) слагаемыми, связанными с конвективным потоком внутренней энергии, кондуктивной теплопроводностью, тепловыделением за счет вязкой диссипации, а также функциями источника, обусловленными фазовыми переходами и теплообменом между фазами (оба поверхностных интеграла в (3)), тогда в квазистационарном случае, при

$$\frac{\partial}{\partial t}(U + E_{\Omega}) = 0 ,$$

можно получить выражение [7]

$$\sigma_{ik} v_{ik} + \sigma v \Omega = 0. \quad (4)$$

При выполнении условия (4), разрушение происходит таким образом, что мощность упругих сил скомпенсирована работой, затрачиваемой в единицу времени на изменение поверхности. Характер развития

процесса разрушения, соответствующий условию (4), когда практически отсутствует акустический импульс, можно (в достаточной степени условно) назвать эволюционным [7]. Соотношение (4) можно рассматривать как аналог энергетического критерия Гриффитса [3, 7]. Если мощность упругих сил превышает скорость изменения поверхностной энергии, то процесс разрушения (как мы сказали выше) будет развиваться уже не в квазистационарном режиме. Динамика этого развития будет определяться как внешними (напряженное состояние твердого тела), так и внутренними (его структура) факторами. Процесс разрушения в этом случае будет описываться не условием (4), а общим соотношением, полученным суммированием (1) и (2).

#### 4. Заключение

Таким образом, при изучении проблемы предсказания горных ударов и землетрясений, прогресс может быть достигнут только в том случае, когда мы научимся правильно формулировать критерии, характеризующие возможный режим (эволюционный или катастрофический) развития деструктивных процессов в геосреде. Умение прогнозировать тот или иной сценарий протекания процессов разрушения в земной коре и определять условия реализации каждого из них позволит вплотную подойти к предсказанию катастрофических событий типа горных ударов и землетрясений. Естественно, что осуществить это можно только в том случае, когда имеются индикаторы процессов разрушения, изучая которые удастся восстановить характер временных изменений тех структурно-петрофизических параметров геосреды, которые в первую очередь влияют на реализацию того или иного режима развития процесса разрушения. Одним из таких индикаторов являются газы радиогенной природы, например, радон [10]. Следу-

ет отметить, однако, что необходимые данные могут быть получены и по другим индикаторам процессов разрушения. В частности полезными и перспективными с этой точки зрения могут оказаться результаты экспериментов по наблюдениям акустической и электромагнитной эмиссий.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 07-05-96053-р\_урал\_a).

#### Литература

1. В.Р. Регель, А.Н. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
2. Griffith A.A. The phenomenon of rupture and flow in solids // Phil. Trans. Roy. Soc. Ser. A. 1920. V. 221. P. 163–198.
3. Беликов В.Т. О термодинамической интерпретации эмпирического соотношения для долговечности твердых тел // Дефектоскопия, 1996. №1. С. 96–101.
4. Беликов В.Т. Количественное описание процессов тепломассопереноса в литосфере // Геология и геофизика, 1991. №5. С. 3–9.
5. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука. 1964. 488 с.
6. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. М.: Наука. 1977. 552 с.
7. Беликов В.Т., Шестаков А.Ф. Изучение временных изменений напряженного состояния геосреды в процессе разрушения // Геология и геофизика, 2008. Т. 49, №5. С. 461–470 (в печати).
8. Левич В.Г. Курс теоретической физики. Т.1. М.: Наука. 1969. 912 с.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука. 1987. 246 с.
10. Беликов В.Т., Шестаков А.Ф. Влияние процессов разрушения на миграцию радона в трещиновато-пористой среде. Деп. № 2315-В96. М.: ВИНТИ, 1996. 38с.