

## ГЕОМЕХАНИКА. РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.831.327

DOI: 10.21440/0536-1028-2024-2-51-66

### Энергия сейсмических событий и критерии склонности горных пород к динамическому разрушению

Жабко А. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: zhabkoav@mail.ru*

#### Реферат

*Актуальность и проблематика вопроса.* Горная порода – единственная инженерная среда, которая утрачивает свою сплошность уже при относительно небольших нагрузках (прочность по трещине отдельности). Вместе с этим утрачивается и математический аппарат для расчета напряженно-деформированного состояния, резко и неопределенно снижаются прочностные и деформационные характеристики массива, да и сами понятия напряжения, и деформации начинают утрачивать свой первоначальный смысл. Помимо этого, несплошность (анизотропия) горной породы придает ей способность разрушаться в динамической форме, что создает повышенную опасность при ведении горных работ в шахтах и рудниках.

*Методология исследований.* На основе ранее выдвинутой модели пластического деформирования горных пород обосновывается механизм горных и горно-тектонических ударов, толчков и землетрясений. Исходя из данного механизма динамических явлений выводятся зависимости для определения энергии сейсмических событий и предлагается критерий удароопасности горных пород.

*Результаты исследований, их анализ и рекомендации к применению.* Сдвиговые микротрещины, возникающие на стадии упрочнения, постепенно разворачиваются с целью снижения на них напряжений и обеспечения условия специального предельного равновесия. С энергетической точки зрения, данный разворот приводит к тому, что часть накопившейся в объеме энергии расходуется на данный разворот, т. е. изгиб элементов среды, содержащих данную микротрещину, тем самым уменьшая энергию, предназначенную для сдвига. Таким образом, энергия в окрестности любой предельно напряженной трещины, от трещины отдельности до разлома в земной коре, накапливается двумя путями: в виде линейной деформации и в виде изгиба элементов среды. Получены зависимости, определяющие сейсмическую (динамическую) энергию. Предложены критерии склонности горных пород к динамическому (хрупкому) разрушению, основанные на балансе линейной (статической) и угловой (динамической) энергоемкости. Показывается, что все породы подразделяются на склонные к динамическим проявлениям и асейсмичные.

**Ключевые слова:** критерий пластичности; критерий прочности; горные породы; дилатансия; упрочнение; пластическая деформация; сейсмическая энергия; упругая энергия; линейная энергия; угловая энергия; энергоемкость; горный удар; горно-тектонический удар; землетрясение; критерий удароопасности.

**Введение.** Горные породы и их массивы, как материалы с внутренним трением, а соответственно, с хрупким характером разрушения, обладают, в отличие от связных материалов, целым рядом особенностей при пластическом деформировании и разрушении. Это, прежде всего, явление дилатансии, иерархическое строение массивов и связанные с ним диссипация упругой энергии, реидные

и медленные волны, способность разрушаться в динамической форме и целый ряд связанных с этим явлений: горные удары и внезапные выбросы, толчки и горно-тектонические удары, землетрясения, не имеющие в рамках существующих концепций всеобъемлющих объяснений и, в то же время, приносящие большой социальный и экономический ущерб человечеству.

На сегодняшний день сейсмические события изучаются преимущественно геофизическими методами (сейсмометрия). С помощью обработки данных о приходящих к сейсмостанциям продольных, поперечных и поверхностных волн устанавливаются гипоцентры (эпицентры) сейсмических событий, их кинематический тип (квадрантные распределения) и выделившаяся в результате события энергия. Данным аспектам, а также изучению горных и горно-тектонических ударов посвящено достаточно много работ [1–13], однако необходимо отметить, что многие вопросы не находят ответов и сегодня.

Горняки – единственные специалисты, у которых есть непосредственный доступ для изучения сейсмических явлений и их последствий (например, по результатам обследования разрушенных выработок можно определить размер блока, подвергшегося подвижке, выделить тектоническую зону, по которой эта подвижка произошла, определить направление и амплитуду смещения и т. д.). И, действительно, горняки сталкиваются в своей профессиональной деятельности с данными стихийными явлениями «лицом к лицу», к сожалению, очень часто данные «встречи» заканчиваются трагедиями. Заметим, что магнитуда горно-тектонических ударов, происходящих на шахтах и рудниках, на сегодняшний день превышает значение 4–5, сейсмические волны от таких явлений регистрируются на расстояниях в тысячи километров. Последствия таких сильных сейсмических событий крайне плачевны: человеческие жертвы, километры полностью уничтоженных выработок на разных горизонтах шахт и рудников, колоссальные экономические убытки, простои предприятий в течение нескольких лет и т. д.

**Цель работы.** В рамках представленной работы предлагается принципиально новый взгляд на механизм накопления энергии деформации в горных породах и массивах, который, в свою очередь, основывается на современных представлениях о механизме пластического деформирования и разрушения горных пород. На основе данного механизма накопления энергии выводится зависимость для определения энергии сейсмических событий и предлагается принципиально новый критерий склонности горных пород к динамическому разрушению.

**Механизм накопления энергии деформации в горных породах.** В работах [14, 15], автором приводится и подробно анализируется критерий пластического деформирования и прочности горных пород, который может быть представлен и записан через различные компоненты напряжений и связывать различные параметры. Для плоского случая он может быть представлен следующим образом:

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{2(C + \operatorname{tg}\varphi\sigma_1)}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad \text{или} \quad \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \operatorname{ctg}\psi(C + \operatorname{tg}\varphi\sigma_1), \quad (1)$$

где  $\psi$  – угол наклона наиболее слабой сдвиговой площадки к минимальному главному напряжению  $\sigma_3$  (в общем случае является функцией напряженного состояния);  $\varphi$  – угол внутреннего трения;  $C$  – сцепление горной породы (образца);  $\sigma_1$  – максимальное главное напряжение.

В отличие от известных критериев прочности, которые описывают лишь одну точку на диаграмме «напряжение-деформация» – максимум несущей способности породы или предел прочности, критерий (1) описывает всю ветвь от предела упругости до предела прочности, включая и предел упругости, и предел прочности.

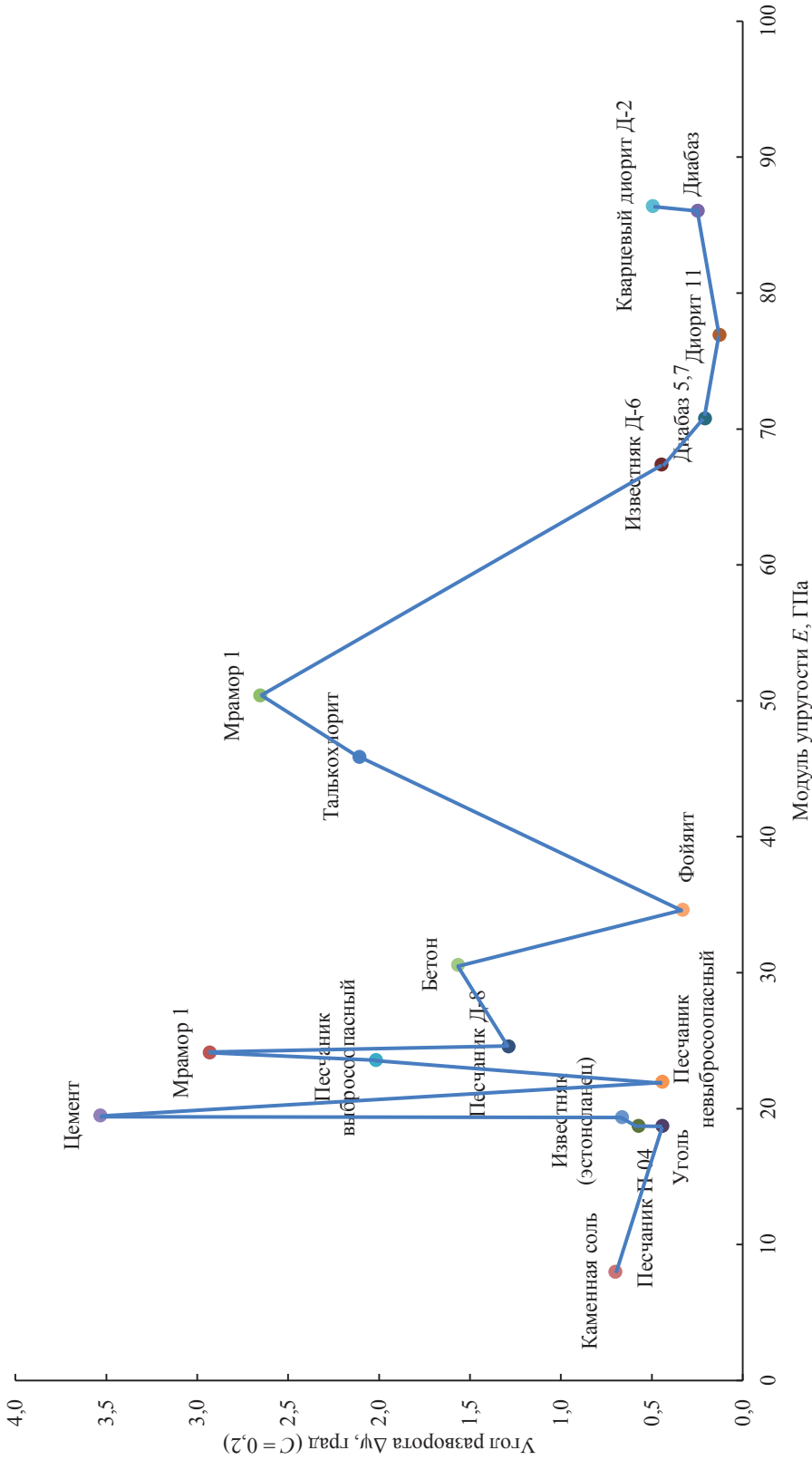


Рисунок 1. График зависимости угла разворота сдвиговых площадок в процессе упрочнения от модуля упругости пород  
 Figure 1. Graph of the dependence between the shear platforms turn angle during consolidation and rock elasticity modulus

Итак, в силу того, что критерий (1) описывает не одну точку (предел прочности), а всю стадию деформационного упрочнения, можно проследить, как в процессе упрочнения (роста напряженного состояния) меняются его параметры. В частности, из уравнения (1) можно проследить изменение ориентировки (угла) сдвиговой площадки в процессе упрочнения, для этого достаточно подставить в него компоненты напряженного состояния на пределе упругости и прочности. Разница данных углов  $\Delta\psi$  определит степень разворота сдвиговой площадки в процессе упрочнения.

Возникающая или уже существующая на стадии упрочнения площадка микросдвига в образце или же трещина, или тектоническое нарушение в горном массиве в растущем поле напряжений должны пребывать все время упрочнения в специальном предельном равновесии, иначе по ним будет идти подвижка, что приведет к прорастанию трещины отрыва, параллельной максимальному главному напряжению. Однако обеспечение условия специального предельного равновесия по ним при растущем поле напряжений (в процессе упрочнения), согласно критерию (1), невозможно при постоянных характеристиках прочности и ориентировки данной площадки в пространстве. Таким образом, если все-таки считать прочностные показатели породы в процессе упрочнения постоянными, то выполнение равенства (1) (выполнение условия специального предельного равновесия) будет возможным только при меняющемся угле  $\psi$ . Другими словами, упрочнение или рост напряженного состояния при накапливающимися микродефектами и подвижкам по ним возможен только вследствие разворота данных площадок с целью обеспечения условия равновесия (уравновешивания напряжений на контакте). Разумеется, подвижка по контактам и их разворот должны приводить к распырению среды, который и принято называть дилатансией. Более подробно механизм пластического деформирования горных пород, а также объяснение природы появления момента сил, разворачивающего данную площадку микросдвига (структурный блок) после превышения по ней предела прочности, рассмотрен в работах [14, 15]. Необходимо отметить, что в случае, если все-таки природа действует иначе и автор неправ в вопросе механизма пластического деформирования, тогда автор придумал весьма эффективный способ повышения сопротивляемости материала или как можно разворотом сдвиговой площадки на величину всего лишь в 1 градус скомпенсировать сотни мегапаскалей нагрузки, нарастающей в процессе упрочнения.

На рис. 1 приведен график зависимости максимального угла разворота сдвиговых площадок для некоторых горных пород  $\Delta\psi$  от модуля упругости  $E$ , построенный с использованием критерия (1) (данные для расчета взяты в работе [16]).

Из рис. 1 следует, что значения разворотов площадок, превышающих условное значение в полтора градуса, имеют незакономерный характер распределения и практически не зависят от модуля упругости. Можно показать, что они также не зависят ни от прочности, ни от поперечных пластических деформаций образца.

Забегая вперед, отметим, что практически все из рассматриваемых пород, имеющие значения  $\Delta\psi > 1,5^\circ$  не являются удароопасными и, наоборот, все без исключения породы с углом разворота  $\Delta\psi < 1,5^\circ$  являются удароопасными и характеризуются достаточно высокой вероятностью протекания в них динамических явлений. Поэтому данный показатель можно рассматривать как комплексный, приближенный и относительный критерий удароопасности.

На рис. 2, 3 приведены графики зависимости угла разворота площадок  $\Delta\psi$  от предела прочности горных пород на одноосное сжатие и поперечной пластической деформации. Анализ графиков (рис. 1–3) показывает, что угол разворота площадок закономерно уменьшается с ростом модуля деформации и предела

прочности на сжатие (как известно, данные показатели коррелируют и находятся в пропорциональном соотношении) и, наоборот, возрастает с ростом поперечной пластической деформации (дилатансионной) в направлении минимального главного напряжения. Такие закономерности являются логичными с точки зрения выдвинутого механизма пластического деформирования горных пород и косвенно подтверждают его.

Необходимо обратить внимание на то, что среди пород с относительно большими значениями  $\Delta\psi$  (рис. 2, 3), подавляющее большинство составляют осадочные породы. При этом наиболее сильные динамические события происходят также в осадочных породах (соли, уголь, известняк, боксит и т. д.).



Рисунок 2. График зависимости угла разворота сдвиговых площадок в процессе упрочнения от предела прочности на одноосное сжатие

Figure 2. Graph of the dependence between the shear platforms turn angle during consolidation and the uniaxial compressive strength

Таким образом, после превышения предела упругости (предела прочности по микротрещине, дефекту, межзеренному контакту, трещине отдельности, тектоническому нарушению и т. д.) в окрестности сдвиговых (микросдвиговых) площадок в образце или же в окрестности тектонического нарушения изменяется механизм деформирования и, соответственно, механизм накопления энергии деформации. С этого момента энергия в образце или массиве начинает накапливаться двумя разными способами, т. е. в любом массиве с предельно напряженным контактом (трещина, дизъюнктив и т. д.), по которому выполняется условие специального предельного равновесия, энергия накапливается как результат всестороннего сжатия материала и в виде изгиба элементов среды в окрестности данной трещины вследствие ее разворота. Первую, наиболее привычную для нас энергию, можно назвать линейной, так как она накапливается в результате возникновения линейной деформации, а вторую – угловой энергией, так как она накапливается в виде изгиба элементов среды. Необходимо оговориться, что термин «угловая деформация» здесь не следует понимать буквально, так как в окрестности

трещины (разлома), вдоль которой выполняется условие специального предельного равновесия, нарушается закон парности касательных напряжений, что, в свою очередь, и приводит к возникновению момента сил и развороту элемента среды, содержащего эту трещину. Заметим также, что обе энергии являются упругими, только накапливаются с помощью разных механизмов.

Накопленная до предела упругости и накапливаемая в окрестности трещины в процессе упрочнения линейная энергия частично тратится на разворот площадок, т. е. изгиб элемента среды в ее окрестности (структурного элемента), а по мере упрочнения частично подпитывает энергией, все сильнее изгибая его. Поэтому к моменту наступления предела прочности (или ранее) полная энергия есть сумма двух ее составляющих – линейной и угловой. Одна часть энергии расходуется на статическое разрушение (линейная), а вторая – на динамическое, и от того, какой энергии на более раннем этапе станет достаточно для выполнения своего сценария разрушения, и будет зависеть исход.

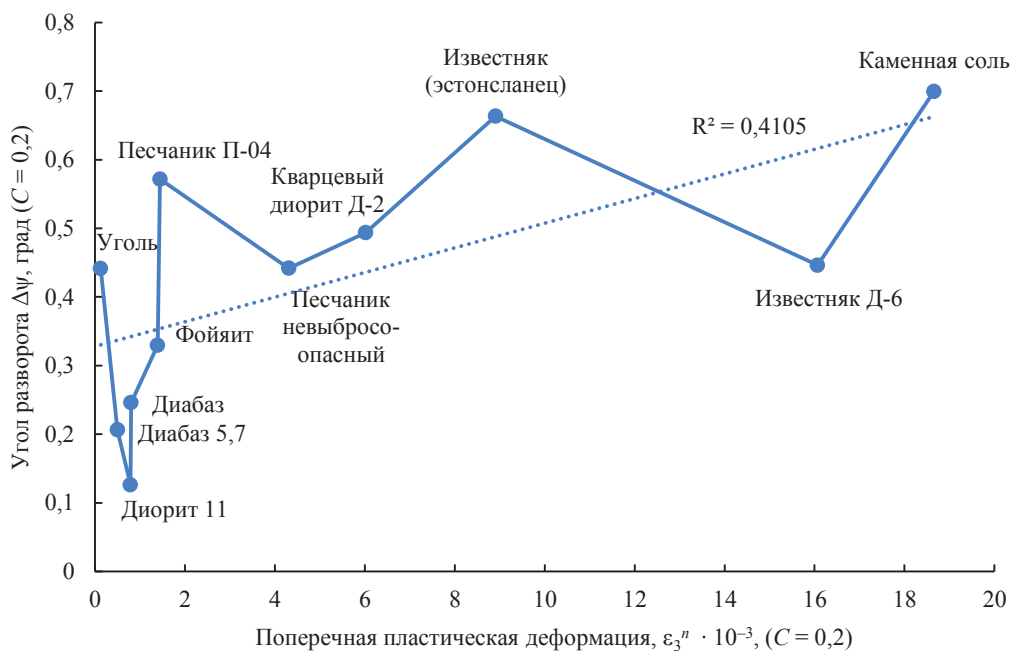


Рисунок 3. График зависимости угла разворота сдвиговых площадок в процессе упрочнения от поперечной пластической (дилатантной) деформации  
 Figure 3. Graph of the dependence between the shear platforms turn angle during consolidation and transverse plastic (dilatant) strain

Таким образом, принципиальная разница между сплошной средой и несплошной (анизотропной), т. е. средой с поверхностями ослабления (дефекты, трещины, разломы и т. д.), заключается в способности анизотропной (несплошной) среды накапливать в себе динамическую энергию. В связи с этим несплошная (анизотропная) среда, к которой можно отнести практически любой горный массив, сама по себе становится хрупкой, в противовес, например, стали. Иными словами, там, где нет трения (внутреннего трения), нет и динамики при разрушении. И, действительно, в подтверждение сказанному, мы не наблюдаем динамических явлений в пластичных средах типа сталей, а также в горных породах, пока не достигнут предел упругости, т. е. пока среда остается сплошной и проявляет изотропные свойства при деформировании. Нужно понимать, что анизотропия материала

определяется не только его структурой, но и напряженным состоянием. До тех пор, пока нет подвижек по площадкам трещин (тектонических разломов) или до предела упругости, материал ведет себя как сплошной, а когда они появляются (условие специального предельного равновесия), в корне меняется механика его деформирования и накопления энергии деформации. Поэтому «анизотропность», в смысле наличия дефектов, трещин и т. д., при достаточном уровне нагрузки является синонимом термина «хрупкость», что бы мы в него не вкладывали. Другими словами, хрупкость – это не свойство самого материала, а его несплошность при определенных нагрузках.

**Энергия сейсмических событий.** Приращение энергии деформации на стадии деформационного упрочнения (динамическая или угловая энергия) для одного образованного дефекта или микротрещины (две равнодействующие реакции по обе стороны от дефекта) при изгибе структурного элемента, согласно [17], выразится зависимостью:

$$U = \frac{1}{2} M_{\text{ср}} \Delta \psi = \frac{1}{2} \int_{\psi_1}^{\psi_2} (\tau - \text{tg} \varphi \sigma_n - C) l^2 \cos \varphi \cos \psi \sin(\psi - \varphi) d\psi, \quad (2)$$

где  $M_{\text{ср}}$  – изгибающий структурный блок (окрестность трещины, дефекта) момент силы;  $\tau$  – предельное касательное напряжение на сдвиговой площадке (контакте, тектоническом нарушении и т. д.);  $\sigma_n$  – предельное нормальное напряжение на сдвиговой площадке (контакте, тектоническом нарушении и т. д.);  $l$  – протяженность (длина) трещины отдельности.

Согласно зависимости (2), накапливаемая на стадии упрочнения в окрестности микродефектов энергия пропорциональна изгибающему моменту сил и углу разворота дефекта в процессе упрочнения. Момент силы пропорционален превышению действующих в плоскости микродефекта касательных напряжений над удерживающими и квадрату длины этого микродефекта (трещины).

Для интегрирования выражения (2) необходимо располагать функцией роста напряжений на стадии упрочнения. С другой стороны, можно воспользоваться некоторым средним значением данной функции, исходя из следующих соображений: на пределе упругости, в момент первой подвижки по микродефекту с наиболее неблагоприятной ориентировкой, разность напряжений вдоль него составляет значение  $C'$  – сцепление по контакту (микротрещине, тектонической зоне). На пределе прочности эта же разность (на уже развернутом контакте) не может превысить значение  $C$  – сцепление межконтактного материала (образца). Иными словами, в процессе упрочнения напряженное состояние по трещине увеличилось со значения  $C'$  до значения  $C$ . Таким образом, величина растущего сцепления в зависимости (2) характеризует уровень напряженного состояния или рост напряжений в процессе подготовки сейсмического события.

После преодоления сопротивления по контакту микротрещины в образце разница напряжений на нем становится равной  $C'$ , и, если продолжить нагружать образец, то он разрушится от прорастания отрывных трещин параллельно главному напряжению, так как силы по сдвиговому контакту не уравновешены. Однако здесь вступает в действие механизм упрочнения, т. е. разворота трещины и ее окрестности, который позволяет сохранять вдоль контакта условие специального предельного равновесия вплоть до предела прочности. При этом часть линейной энергии, запасенной в элементе, тратится на данный разворот (угловая энергия). Таким образом, если в статическом смысле разворот площадки позволяет уравновесить силы вдоль нее, то в энергетическом смысле это все выглядит еще

более изящно: упрочнение (увеличение нагрузки) становится возможным вследствие перераспределения накопленной линейной энергии, т. е. ее разделения на линейную и угловую. Именно поэтому два соседних элемента образца (один с трещиной, а второй – нет) с одним и тем же наклоном площадок, но с различными прочностными характеристиками контакта ( $C'$ ,  $C$ ), на пределе прочности как бы выдерживают одну и ту же нагрузку  $\sigma_1 = \sigma_{пр}$ , где  $\sigma_{пр}$  – предельное значение максимального главного напряжения (предел прочности) (рис. 4). В действительности первичная трещина несет только часть нагрузки, обусловленной энергией  $U'_{лин}$ . Накопленная до предела упругости линейная энергия расходуется на диссипацию энергии при образовании сдвиговых и разрывных дефектов, а также на изгиб элемента (угловая энергия  $U'_{угл}$ ).

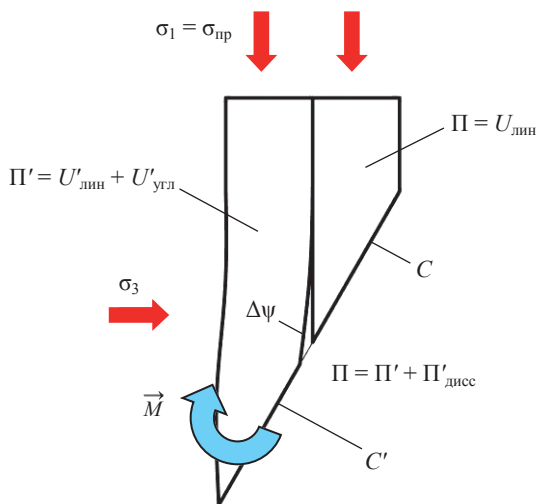


Рисунок 4. Схема деформирования элементов образца на пределе прочности:  $\Pi$  – полная удельная энергия при заданном уровне напряжений;  $\Pi'$  – удельная энергия деформации в окрестности микротрещины за пределом упругости;  $M$  – изгибающий (окрестность трещины, дефекта) момент силы

Figure 4. Scheme of sample elements strain at the ultimate strength:  $\Pi$  – total specific energy under the given stress level;  $\Pi'$  – specific energy of strains in the vicinity of a microfracture beyond the limit of elasticity;  $M$  – bending moment (fracture of defect vicinity)

Если пренебречь энергией диссипации ( $\Pi'_{дисс} \rightarrow 0$ ), то можно показать, что для одинаковых углов наклона площадок  $U'_{лин} / U_{лин} = C' / C$ , а  $U'_{угл} / U'_{лин} = C' / C - 1$ . Величины сцепления по контактам для небольших образцов и горного массива достаточно разные. Для образцов горной породы характерное значение величины сцепления по трещинам находится в интервале:  $C' = (0,1...1)C$ , для горного массива сцепление по разломной области:  $C' = (0,01...0,1)C$ .

Угол разворота  $\Delta\psi$  для горных пород вычисляется по формуле (1), как разность значений угла  $\psi$ , вычисленного для пар компонент главных напряжений на пределе упругости и пределе прочности.

Перейдем к оценке энергии сейсмических событий. Согласно графикам (рис. 1–3), максимальный угол разворота  $\Delta\psi$  для рассматриваемых пород не пре-



вышает 4 градусов, а для удароопасных пород (будет показано ниже) – 1,5 градусов. Введем в качестве показателя анизотропии свойств некий коэффициент  $\lambda = C' / C$ , тогда выделяемая сейсмическая энергия выразится зависимостью:

$$U = \frac{1}{2} M_{\text{ср}} \Delta\psi = \frac{1}{2} \frac{(1+\lambda)}{2} Cl^2 \cos\varphi \cos\psi \sin(\psi - \varphi) \Delta\psi. \quad (3)$$

Угол  $\psi$ , как уже отмечалось, может быть принят близким к значению  $\pi/4 + \varphi/2$ .

Таким образом, для плоского случая при диапазоне изменения угла внутреннего трения  $\varphi = 30 \dots 45^\circ$  и низкой величины сцепления в разломной зоне  $\lambda \rightarrow 0$ , используя зависимость (3), можно выразить величину энергии зависимостью:

$$U = (0,054 \dots 0,026) Cl^2 \Delta\psi. \quad (4)$$

Формулы (3) и (4) определяют полную динамическую энергию. Однако энергия, идущая на образование сейсмических волн, фиксируемых аппаратурой, гораздо меньше. Диссипация энергии учитывается с помощью так называемого сейсмического КПД. Согласно данным [18], почти вся энергия, высвобождаемая при землетрясении, расходуется на создание зоны дробленной породы вдоль разлома (так называемой гаук-зоны). Эти зоны иногда наблюдаются при некоторых режимах роста разлома (асейсмическое, т. е. не хрупкое, а пластическое (крип), скольжение по разломам). Для землетрясений, т. е. масштабных событий, как и для взрыва, сейсмический КПД  $\eta$  составляет 0,01. Для горных ударов сейсмический КПД имеет еще меньший порядок  $\eta \approx 10^{-4} - 10^{-3}$  [18]. Таким образом, с учетом сказанного, для объемного случая формула (4) будет иметь следующий вид:

$$U = (0,054 \dots 0,026) \eta Cl^2 d \Delta\psi, \quad (5)$$

где  $d$  – поперечный размер накапливающего угловую энергию блока.

Для верификации величины энергии, определяемой формулами (3)–(5), рассмотрим следующий пример. В работе [19] описывается самое сильное сейсмическое событие (горно-тектонический удар), которое произошло на одном из Северо-Уральских бокситовых рудников (СУБР), к слову, относящихся к одним из наиболее удароопасных рудников в мире. 13 февраля 2010 года в 08 ч 43 мин местного времени сейсмостанцией «Североуральск» на северном фланге месторождения «Красная Шапочка» зарегистрировано сейсмическое событие с энергией  $1,26 \cdot 10^9$  Дж. Гипоцентр события локализован у плоскости активного тектонического нарушения № 33. Данное сейсмическое событие было зарегистрировано сейсмическими станциями Геофизической службы Российской академии наук, а также сейсмическими станциями Геологической службы США.

Размер подвижного блока массива вдоль активного тектонического нарушения составляет порядка 180 м (хорошо идентифицируется с характером и местами разрушений выработок в шахте), примерный размер в поперечном направлении того же порядка, около 180 м. Сцепление пород и руд месторождений СУБРа оценочно можно принять равным 15 МПа, а  $\Delta\psi = 0,5^\circ$ . Тогда, используя формулу (5), при  $\eta \approx 0,05$  (для горно-тектонического удара, с учетом близкорасположенных сейсмических датчиков), энергия, идущая на образование сейсмических волн, для рассматриваемого случая составит  $U = 0,9 \cdot 10^9$  Дж. Таким образом, измеренная и рассчитанная энергии имеют один порядок величин.

**Энергетический критерий склонности горных пород к динамическому разрушению.** Полная удельная линейная энергия, которую накапливает образец горной породы при объемном напряженном состоянии на пределе прочности, аналитически можно оценить следующей зависимостью [2]:

$$\Pi = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2E} \approx \frac{\sigma_{сж}^2}{2E}. \quad (6)$$

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности на одноосное сжатие.

Удельную угловую или динамическую энергию рассчитываем по формуле (5) с учетом того, что для образца  $\lambda \rightarrow 1$ , а объем области накопления энергии равен  $l^2 \sin\psi \cos\psi$ . В табл. 1, с использованием данных [16], приводится расчет удельных значений линейной и угловой энергий для различных горных пород.

Линейная энергия, определяемая зависимостью (6), – это вся упругая энергия, накопившаяся до предела прочности (по измеренным значениям деформаций в лаборатории). Частично данная энергия в процессе упрочнения тратится на разворот (изгиб) среды в окрестности активной трещины и диссипацию. Вне зависимости от количества рассеянной энергии (работа неупругих деформаций), отношение угловой энергии  $U$  к полной  $\Pi$  будет характеризовать склонность породы к динамическому разрушению. Угловая энергия символизирует потерю устойчивости, а линейная расходуется на статическое разрушение. Поэтому, чем больше угловая энергия будет отнимать полной энергии, тем меньше линейной энергии будет расходоваться на статическое разрушение, а значит будет расти вероятность именно динамического разрушения. Иными словами, удароопасность породы определяется балансом линейной и угловой энергии или их энергоемкостями. Таким образом, показатель удароопасности можно представить в следующем виде:

$$p = \frac{2U}{\Pi}. \quad (7)$$

Коэффициент «2» в зависимости (7) отвечает за то, что в случае, когда  $p = 1$ , линейная и угловая энергии в элементе становятся равными, что является наиболее удароопасным случаем, вся накопленная линейная энергия тратится на угловую или динамическую энергию. Когда угловая энергоемкость начинает превышать линейную энергоемкость, показатель удароопасности (7) становится больше единицы. В этом случае динамическое разрушение в данной породе без притока дополнительной энергии невозможно. Таким образом, в жестком режиме нагружения такие породы не удароопасны. Однако режимы нагружения в реальных условиях бывают как жесткие, так и мягкие. Поэтому показатель удароопасности (7) можно рассматривать как вероятность сейсмического события в конкретной породе, но в случае, когда угловая энергоемкость породы превышает линейную, в качестве показателя удароопасности необходимо принять величину, обратную (7). Таким образом, для этого случая чем больше разница между угловой и линейной энергоемкостью, тем меньше вероятность сейсмического события.

В табл. 1 произведен расчет показателя удароопасности пород (полужирным выделены значения для относительно асейсмичных пород). На рис. 5 приведено распределение показателя удароопасности для разных горных пород.

Заметим еще раз, что все породы с углом разворота, превышающим некоторое модальное значение, относятся к асейсмичным и не коррелируют ни с прочност-

ными, ни с деформационными показателями пород, а их возможное динамическое разрушение связано с притоком внешней энергии. Наиболее же удароопасными являются осадочные породы.

Используя зависимости (3), (6), (7), показатель удароопасности для удароопасных пород, т. е. пород, склонных к динамическому разрушению, можно выразить зависимостью:

$$p = \frac{E\Delta\psi \cdot \cos\varphi \sin(\psi - \varphi)}{2C \cdot \sin\psi \operatorname{tg}^2\psi} \quad (8)$$

Таким образом, согласно зависимости (8), удароопасность пород (до определенного предела) пропорциональна модулю упругости и углу разворота и обратно пропорциональна прочности пород. Пожалуй, этим и объясняется повышенная удароопасность осадочных пород. Кроме того, как удароопасность, так и энергия пропорциональны углу разворота. Разумеется, общая выделяемая сейсмическая энергия будет зависеть от объема, количества дефектов, КПД события и т. д.

**Таблица 1. Баланс энергий и критерий удароопасности горных пород**  
**Table 1. Energy balance and rock burst hazard criterion**

Порода	$C$ , МПа	$\varphi$ , град	$E$ , ГПа	$\Delta\psi$ , град	$\Pi \cdot 10^5$ , Дж	$U \cdot 10^5$ , Дж	$p$
Талькохлорит	24	35	45,9	2,1	0,93	1,88	<b>0,25</b>
Мрамор 1	34	31	24,1	2,9	0,72	4,17	<b>0,36</b>
Мрамор 2	24	31	50,4	2,7	0,71	2,74	<b>0,13</b>
Диабаз	34	45 (55)	86,1	0,2	1,57	0,18	0,22
Песчаник выбросоопасный	35	34	23,6	2,0	3,67	2,69	<b>0,68</b>
Песчаник невыбросоопасный	36	43	22,0	0,4	6,23	0,40	0,13
Песчаник Д-8	35	35	24,6	1,3	3,68	1,69	0,92
Известняк Д-6	34	45 (51)	67,4	0,4	2,00	0,35	0,35
Песчаник П-04	17	40	18,8	0,6	1,41	0,32	0,45
Уголь	15,5	41	18,8	0,4	1,23	0,19	0,30
Диабаз 5,7	36	45 (50)	70,8	0,2	2,1	0,18	0,17
Диорит 11	60	45 (56)	76,9	0,1	5,46	0,15	0,06
Известняк (эстонсланец)	19	42	19,4	0,7	1,88	0,38	0,41
Каменная соль	6	45 (50)	8,0	0,7	0,52	0,11	0,41
Бетон	26	35	30,6	1,6	1,63	1,55	<b>0,53</b>
Кварцевый диорит Д-2	52	43	86,4	0,5	3,31	0,72	0,44
Цемент	40	20	19,5	3,5	3,35	8,04	<b>0,21</b>
Фойяит	36	35	34,6	0,3	2,76	0,40	0,29

Полученные ранее показатели являются относительными хотя бы только потому, что не учитывают рассеянную в процессе упрочнения энергию. Они определяют необходимые условия сейсмического события, т. е. характеризуют саму породу, а не внешние условия. Для того чтобы сейсмическое событие произошло, необходимы дополнительные условия, характеризующие напряженное состояние, устойчивость или геометрию самой разрушаемой конструкции (массива).

В частности, для горного удара и условия объемного напряженного состояния в работе автора [17] предложен следующий критерий удароопасности:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{сж}} = \frac{\cos \varphi' C'}{\cos \vartheta \sin(\vartheta - \varphi') \sigma_{сж}} + \frac{4 + 6 \operatorname{tg} \vartheta \sin[2(\vartheta - \varphi')]}{9 \sin^2(\vartheta - \varphi')} \left( \frac{x_{\max}}{h} \right)^2, \quad (9)$$

где  $C'$ ,  $\varphi'$  – сцепление и угол трения по трещине отдельности;  $\vartheta$  – угол наклона трещины отдельности к оси, совпадающей с направлением действия минимального главного напряжения, на момент начала по ней подвижки;  $x_{\max}$  – ширина буферной зоны (расстояние от забоя до точки максимума вертикальных напряжений);  $h$  – высота буферной зоны (выработки).

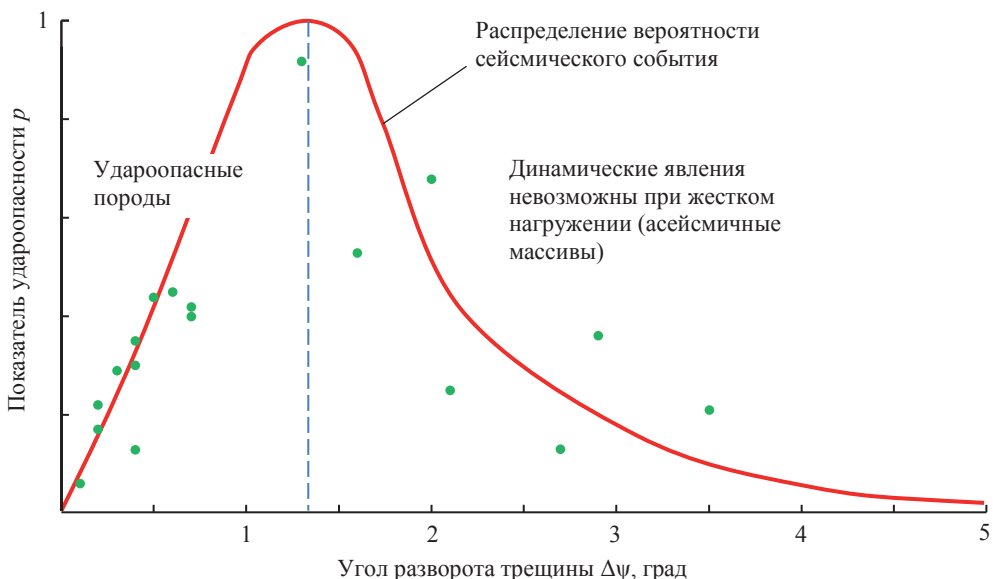


Рисунок 5. Зависимость параметра удароопасности от угла разворота трещины  
 Figure 5. Dependence between the rock burst hazard parameter and the fracture turn angle

В общем виде критерий удароопасности можно представить следующим образом:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{сж}} = \lambda + a \left( \frac{x_{\max}}{h} \right)^2, \quad (10)$$

где  $\lambda = C' / C$  – коэффициент структурного ослабления;  $a$  – коэффициент, зависящий от ориентировки трещиноватости относительно главных напряжений и угла внутреннего трения.

В практике прогнозирования горных ударов и определения удароопасности горных пород часто используется модуль спада  $M$ , характеризующий скорость падения напряжений или нагрузки на запредельной стадии деформирования, а значит, и скорость высвобождения накопленной в образце энергии. Известно, что данный модуль зависит от формы образца и от степени его обжатия минимальным главным напряжением. В частности, он уменьшается при увеличении

бокового обжатия и увеличивается при росте высоты образца или целика. Однако отметим, что он характеризует лишь скорость высвобождения линейной энергии при статическом разрушении, т. е. скорость объединения дефектов. Другими словами, модуль спада характеризует не саму горную породу и ее склонность к динамическому разрушению, а особенности распределения напряженного состояния, которые учитываются критерием (9), (10).

В заключение добавим, что существуют породы, которые имеют отрицательный модуль спада, что может квалифицироваться так, что на момент наступления предела прочности они накопили больше удельной энергии, чем ее необходимо для разрушения [20]. Последнее звучит несколько абсурдно и достаточно сложнообъяснимо с существующих в современной науке позиций. Такие эффекты (отрицательный модуль спада) описаны, например, в работе [21] при испытании достаточно прочных и малонарушенных пород ( $\sigma_{сж} > 250$  МПа) и очень высокой степени бокового обжатия.

Действительно, объяснение феномена снижения остаточной прочности ниже уровня трения при обратном наклоне ветви разгрузки тем, что порода накопила энергии больше, чем ее необходимо для среза, вступает в явное противоречие с соображениями о том, что увеличение бокового обжатия приводит к более вязкому (пластическому) разрушению, это невозможно и противоречит закону сохранения энергии.

Можно предположить, что описанные эффекты связаны именно с отдельным накоплением упругой энергии деформации. В момент, когда линейная энергия тратится на объединение дефектов на запредельной стадии, за счет угловой энергии восстанавливается размер образца, т. е. идет отрицательное приращение осевой деформации (обратимая дилатансия). Именно поэтому и кажется, что есть переизбыток энергии. Судя по всему, данное явление наблюдается не для каждой породы, а только для пород с определенным соотношением линейной и угловой энергий. Иными словами, когда скорость высвобождения угловой энергии выше, чем линейной, но динамическому разрушению что-то препятствует, например, боковой обжим.

**Выводы.** Любая наука призвана объяснить многообразие происходящих явлений на основе ограниченного количества субъективно выбранных параметров, присущих некой модели. Проблемы технических (инженерных) наук состоят в абстрактности данных параметров, собственно, как и самого понятия «сплошная среда», которые часто не представляется возможным даже измерить (например, напряжения в теле). Горная порода – единственная инженерная среда, которая утрачивает свою сплошность уже при относительно небольших нагрузках (прочность по трещине отдельности). Вместе с этим утрачивается и математический аппарат для расчета напряженно-деформированного состояния, резко и неопределенно снижаются прочностные и деформационные характеристики массива, да и сами понятия «напряжение», «деформация» начинают утрачивать свой первоначальный смысл. Но и это еще не все, несплошность (анизотропия) горной породы придает ей способность разрушаться в динамической форме, что создает повышенную опасность при ведении горных работ в шахтах и рудниках.

Ранее было выдвинуто представление о механизме пластического деформирования горных пород и массивов, а также накоплении ими энергии на стадии деформационного упрочнения. Согласно данным представлениям, после достижения предела упругости изменяется механизм накопления энергии деформации. А именно, сдвиговые микротрещины, возникающие на стадии упрочнения, постепенно разворачиваются с целью снижения на них напряжений и обеспечения условия специального предельного равновесия. С энергетической точки зрения,

этот разворот приводит к тому, что часть накопившейся в объеме энергии расходуется на данный разворот, т. е. изгиб элементов среды, содержащих данную микротрещину, тем самым уменьшая энергию, предназначенную для сдвига. Таким образом, энергия в окрестности любой предельно напряженной трещины отдельности, от микротрещины до разлома в земной коре, накапливается двумя путями: в виде линейной деформации и в виде изгиба элементов среды. Первая расходуется на статическое разрушение, а вторая – на динамическое. Делается вывод о том, что хрупкость – это не свойство самого материала, а его несплошность при определенных нагрузках, обеспечивающих условие специального предельного равновесия трещинам отдельности. Только такие среды могут накапливать в себе динамическую (угловую) энергию.

Получены зависимости, определяющие сейсмическую (динамическую) энергию. Предложены критерии склонности горных пород к динамическому (хрупкому) разрушению, основанные на балансе линейной (статической) и угловой (динамической) энергоемкости. Показывается, что все породы подразделяются на склонные к динамическим проявлениям и асейсмичные.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авершин С. Г. Горные удары. М.: Углетехиздат, 1955. 236 с.
2. Петухов И. М., Ильин А. М., Трубецкой К. Н. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках. М.: Академия горных наук, 1997. 376 с.
3. Козырев А. А., Каспарьян Э. В., Федотова Ю. В., Кузнецов Н. Н. Оценка степени удароопасности скальных горных пород на основе результатов лабораторных испытаний // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22. № 1. С. 138–148. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-138-148
4. Ловчиков А. В. Новая концепция механизма горно-тектонических ударов и других динамических явлений для условий рудных месторождений // Горные науки и технологии. 2020. № 5(1). С. 30–38. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-30-38
5. Лобанова Т. В. Исследование геомеханического состояния породного массива при формировании и проявлении горных ударов на Таштагольском руднике // ФТПРПИ. 2008. № 2. С. 38–46.
6. Еременко А. А., Еременко В. А., Александров А. Н., Колтышев В. Н. Опыт разработки безопасной и эффективной геотехнологии освоения рудных месторождений Сибири // ФТПРПИ. 2014. № 5. С. 90–106.
7. Мустафин М. Г. Механизм возникновения горных ударов с разрушением почвы выработок // Записки Горного института. 2016. Т. 217. С. 40–49.
8. Геодинамика и современные технологии отработки удароопасных месторождений // Геодинамика и современные технологии отработки удароопасных месторождений: сб. науч. тр. науч.-практ. конф. 06–11 августа 2012 г. Норильск: Норильский никель, 2012. 230 с.
9. Javed A., Mu Z., Bacha S., Liu G., Yang J., Shahani N. M., Mairaj-haider, Faisal S. A., arif M. A. A review on rock burst phenomenon-theories, mechanism forecasting and classification // International Journal of Science and Business. 2019. No. 3(4). P. 1–16. DOI: 10.5281/zenodo.3245153
10. Wang X., Li S., Xu Z., Xue Y., Hu J., Li Z., Zhang B. An interval fuzzy comprehensive assessment method for rock burst in underground caverns and its engineering application // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2019. Vol. 78. P. 5161–5176. DOI: 10.1007/s10064-018-01453-3
11. Wu M., Ye Y., Wang Q., Hu N. Development of rockburst research: a comprehensive review // Applied Sciences. 2022. No. 12(3). P. 974. DOI: 10.3390/app12030974
12. Zhou J., Li X., Mitri H. Classification of rockburst in underground projects: comparison of ten supervised learning methods // Journal of Computing in Civil Engineering. 2016. Vol. 3(5). Art. 04016003. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000553
13. Sousa L. R., Miranda T., Sousa R. L., Tinoco J. The use of data mining techniques in rockburst risk assessment // Engineering. 2017. Vol. 3(4). P. 552–558. DOI: 10.1016/J.ENG.2017.04.002
14. Жабко А. В. Критерии прочности горных пород // ГИАБ. 2021. № 11-1. С. 27–45. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_111\_0\_27
15. Жабко А. В. Критерий прочности блочных сред и обратные геомеханические расчеты // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2020. № 6. С. 37–47.
16. Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г. Пластичность горных пород. М.: Недра, 1979. 301 с.
17. Жабко А. В. Механика пластического деформирования горных пород при объемном сжатии и механизме горных ударов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2022. № 4. С. 47–63. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-4-47-63
18. Кашников Ю. А., Ашихмин С. Г. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья. М.: Недра-Бизнесцентр, 2007. 467 с.

19. Томилин Н. Г., Воинов К. А., Селивоник В. Г., Глотов С. В. Техногенное землетрясение как результат неустойчивости шахтного поля // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. Всерос. конф., посвященной 80-летию акад. М. В. Курлени (3–6 октября 2011 г.). Т. II. Новосибирск: ИГД СО РАН, 2011.

20. Прочность и деформируемость горных пород / Ю. М. Карташов [и др.]. М.: Недра, 1979, 269 с.

21. Тарасов Б. Г. Верный механизм как инициатор землетрясений и горных ударов на глубоких горизонтах // Горный журнал. 2020. № 3(2272). С. 18–23. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.03

Поступила в редакцию 16 октября 2023 года

#### Сведения об авторах:

**Жабко Андрей Викторович** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой маркшейдерского дела Уральского государственного горного университета. E-mail: zhabkoav@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3081-9522>

DOI: 10.21440/0536-1028-2024-2-51-66

### Seismic events energy and criteria of rock tendency for dynamic fracture

Andrei V. Zhabko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

#### Abstract

**Relevance and problems.** Rock is the only engineering medium that loses its continuity under relatively small loads (diaclose strength). Therefore, mathematical methods for stress-strain state calculation are lost; strength and strain properties of the rock mass decrease sharply and vaguely, and the concepts of stress and strain lose their original meaning. Besides, the discontinuity (anisotropy) of rock provides it with the capacity for dynamic fracture, creating major hazard when mining in shafts and pits.

**Methods of research.** Based on the rock plastic straining model introduced earlier, the mechanism of rock and tectonic bursts, tremors, and earthquakes has been substantiated. Based on this mechanism of dynamic conditions, dependencies determining seismic events energy are derived and a rock burst hazard criterion is proposed.

**Research results, analysis and recommendations for use.** Shear microfractures developing at the consolidation stage gradually turn in order to reduce the stresses and ensure special ultimate rock equilibrium. Energetically, it forces part of the accumulated energy to be discharged on this turn which is the bending of the elements of the medium containing this microfracture. Thereby the energy intended for shear is reduced. Thus, energy in the vicinity of any ultimately stressed fracture, from a separate fracture to a fault in the earth's crust, accumulates in two ways: as linear strain and as medium elements bending. Dependencies that determine seismic (dynamic) energy have been obtained. Criteria for rock tendency to dynamic (brittle) fracture are proposed based on the balance of linear (static) and angular (dynamic) energy intensity. It is shown that all rocks are divided into those with a tendency to dynamic manifestations and the aseismic ones.

**Keywords:** plasticity criterion; strength criterion; rocks; dilatancy; consolidation; plastic strain; seismic energy; elastic energy; linear energy; angular energy; energy intensity; rock burst; tectonic burst; earthquake; rock burst hazard criteria.

#### REFERENCES

1. Avershin S. G. *Rock bursts*. Moscow: Ugletekhizdat Publishing, 1955. (In Russ.)
2. Petukhov I. M., Iliin A. M., Trubetskoi K. N. *Forecast and prevention of rock bursts in mines*. Moscow: Academy of Mining Sciences Publishing; 1997. (In Russ.)
3. Kozyrev A. A., Kasparian E. V., Fedotova Iu. V., Kuznetsov N. N. Estimating the rockburst hazard of hard rocks based on laboratory test results. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Scientific Journal of Murmansk State Technical University*. 2019; 22(1): 138–148. (In Russ.) Available from: doi: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-138-148
4. Lovchikov A. V. New concept of the mechanism of rock-tectonic bursts and other dynamic phenomena in conditions of ore deposits. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020; 5(1): 30–38. (In Russ.) Available from: doi: 10.17073/2500-0632-2020-1-30-38

5. Lobanova T. V. Geomechanical state of the rock mass at the Tashtagol mine in the course of nucleation and manifestation of rock bursts. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2008; 2: 38–46. (In Russ.)
6. Eremenko A. A., Eremenko V. A., Aleksandrov A. N., Koltyshev V. N. Hands-on experience of safe and efficient ore mining in siberia. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2014; 5: 90–106. (In Russ.)
7. Mustafin M. G. The source mechanism for ruck bursts with the lying wall failure. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2016; 217: 40–49. (In Russ.)
8. Geodynamics and modern technologies for rockburst hazardous deposits development. In: *Geodynamics and modern technologies for rockburst hazardous deposits development: Proceedings of the sci. and tech conf., 06–11 August 2012*. Norilsk: Norilsk Nickel Publishing; 2012. (In Russ.)
9. Javed A., Mu Z., Bacha S., Liu G., Yang J., Shahani N. M., Mairaj-haider, Faisal S. A., arif M. A. A review on rock burst phenomenon-theories, mechanism forecasting and classification. *International Journal of Science and Business*. 2019; 3(4): 1–16. Available from: doi: 10.5281/zenodo.3245153
10. Wang X., Li S., Xu Z., Xue Y., Hu J., Li Z., Zhang B. An interval fuzzy comprehensive assessment method for rock burst in underground caverns and its engineering application. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2019; 78: 5161–5176. Available from: doi: 10.1007/s10064-018-01453-3
11. Wu M., Ye Y., Wang Q., Hu N. Development of rockburst research: a comprehensive review. *Applied Sciences*. 2022; 12(3): 974. Available from: doi: 10.3390/app12030974
12. Zhou J., Li X., Mitri H. Classification of rockburst in underground projects: comparison of ten supervised learning methods. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2016; 3(5): Art. 04016003. Available from: doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000553
13. Sousa L. R., Miranda T., Sousa R. L., Tinoco J. The use of data mining techniques in rockburst risk assessment. *Engineering*. 2017; 3(4): 552–558. Available from: doi: 10.1016/J.ENG.2017.04.002
14. Zhabko A. V. Rock failure criteria. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2021; 11-1: 27–45. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236\_1493\_2021\_111\_0\_27
15. Zhabko A. V. The criterion of block media strength and geomechanical back-calculation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 6: 37–47. (In Russ.)
16. Stavrogin A. N., Protosenia A. G. *Rock plasticity*. Moscow: Nedra Publishing; 1979. (In Russ.)
17. Zhabko A. V. The mechanics of plastic volumetric deformation of rock and the rockburst mechanism. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2022; 4: 47–63. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2022-4-47-63
18. Kashnikov Iu. A., Ashikhmin S. G. *Rock mechanics under the development of raw hydrocarbon deposits*. Moscow: Nedra- Businesscenter Publishing; 2007. (In Russ.)
19. Tomilin N. G., Voinov K. A., Selivonik V. G., Glotov S. V. Induced earthquake as a result of mine field instability. In: *Geodynamics and the stressed state of the Earth interior: Proceeding of the All-Russian conf. dedicated to the 80th Anniversary of Academician M. V. Kurleni, 3–6 October 2011*. Vol. 2. Novosibirsk: IM SB RAS; 2011. (In Russ.)
20. Kartashov Iu. M. et al. *Rock strength and strain*. Moscow: Nedra Publishing; 1979. (In Russ.)
21. Tarasov B. G. The fan mechanism as an initiator of deep-level earthquakes and rock bursts. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2020; 3(2272): 18–23. (In Russ.) Available from: doi: 10.17580/gzh.2020.03.03

Received 16 October 2023

#### Information about the authors:

**Andrei V. Zhabko** – DSc (Engineering), Associate Professor, Head of Mine Surveying Department, Ural State Mining University. E-mail: zhabkoav@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3081-9522>

**Для цитирования:** Жабко А. В. Энергия сейсмических событий и критерии склонности горных пород к динамическому разрушению // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 2. С. 51–66. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-2-51-66

**For citation:** Zhabko A. V. Seismic events energy and criteria of rock tendency for dynamic fracture. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2024; 2: 51–66 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2024-2-51-66