



**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДА К РАЗРУШЕНИЮ НАГРУЖЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД
3D-ВЕРОЯТНОСТНЫМ КЛЕТОЧНЫМ АВТОМАТОМ**

Г. А. Казунина, А. В. Чередниченко

*Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева,
E-mail: gt-kga@yandex.ru, allacherednichenk@rambler.ru
ул. Весенняя 28, г. Кемерово 650000, Россия*

Исследована построенная ранее на основе кинетической теории прочности трехмерная модель вероятностного клеточного автомата, которая описывает процессы накопления повреждений горных пород и формирования кластерной структуры повреждений. При помощи модельных экспериментов путем сравнения кинетических кривых накопления повреждений и корреляционных функций установлено, что в зависимости от значения вероятности прорастания периметра кластера повреждений, которая моделирует интенсивность процесса разрушения материала под действием локальных перенапряжений вблизи уже имеющихся кластеров, для трехмерной модели наблюдаются два качественно различных режима процесса накопления повреждений. Показано, что для вероятностей прорастания периметра кластера, превосходящих значение 0.2, процесс перехода к необратимому разрушению существенно ускоряется и становится сильно коррелированным. При этом лучшее соответствие корреляционных функций компьютерного и физического экспериментов наблюдается для значений вероятности прорастания периметра, меньших значения 0.2.

Клеточный автомат, разрушение, горные породы, импульсная эмиссия.

**TRANSITION TO FAILURE OF LOADED ROCKS
BY 3D-PROBABILISTIC CELLULAR AUTOMATON**

G. A. Kazunina and A. V. Cherednichenko

*Gorbachev Kuzbass State Technical University,
E-mail: gt-kga@yandex.ru, allacherednichenk@rambler.ru, ul. Vesennaya 28, Kemerovo 650000, Russia*

A three-dimensional model of a probabilistic cellular automaton, which was previously constructed on the basis of the kinetic theory of strength, is studied in this paper. It describes the process of rock damage accumulation and formation of a damage cluster structure. Comparing the kinetic curves of damage accumulation and correlation functions by means of model experiments, it was found that, depending on the probability of germination of the damage cluster perimeter, which simulates the intensity of material failure under the action of local overstresses near the existing damage clusters, two qualitatively different modes of damage accumulation are observed for a three-dimensional model. For the probabilities of germination of the cluster perimeter exceeding the value of 0.2, the process of transition to irreversible failure is significantly accelerated and becomes strongly correlated. Along with this, the best correspondence of correlation functions in model and physical experiments is observed for perimeter germination probability values smaller than 0.2.

Cellular automaton, failure, rocks, pulsed emission

Современное развитие методов мониторинга напряженно-деформированного состояния и прогнозирования разрушения горных пород по данным импульсной электромагнитной и акустической эмиссии [1, 2] требует развития новых подходов для интерпретации данных эксперимента. Это связано с тем, что наблюдаемый процесс импульсной эмиссии регистрирует выделение энергии при образовании каждого нового повреждения, фиксируя образование новых

или “проращение” имеющихся повреждений, и несет информацию о кинетическом процессе накопления повреждений. Характеристики импульсной эмиссии дают только косвенную информацию о пространственном распределении повреждений и динамике их кластерной структуры, что представляет основной интерес для прогнозирования разрушения. Одновременное наблюдение накопления повреждений и образуемой ими кластерной структуры в динамике на современном уровне развития технологии не представляется возможным. Такого вида исследование удобно провести методами компьютерного моделирования. В пользу такого подхода свидетельствует и наличие общих закономерностей на стадии, предшествующей разрушению материала [3], когда многоуровневая иерархическая система дефектов структуры достигает состояния самоорганизованной критичности [2], характеризуемой фрактальным пространственным и временным самоподобием на всех иерархических уровнях. По данным акустического эксперимента микротрещины, например, в горных породах образуются преимущественно на мезоскопическом уровне (порядка десятых долей мкм) [4], поэтому процесс перехода разрушения с мезоскопического на макроскопический уровень принципиально может быть описан без обращения к подробностям динамики образования отдельных элементарных повреждений, а опираясь только на геометрические характеристики рассматриваемой структуры на основе перколяционной модели с учетом стохастичности процесса. Предложенная в работах [5–7] на основе кинетической теории прочности клеточно-автоматная изотропная модель хрупкого разрушения рассматривает кинетику накопления повреждений как единый пространственно-временной процесс с учетом внутренней динамики. Модель дает возможность изучать отдельно, но синхронно и согласованно, кинетику вновь возникающих повреждений (аналоги импульсов эмиссии в физическом эксперименте) и пространственно-временную динамику конфигурации образуемых ими кластеров повреждений, получить статистические характеристики процессов, такие как корреляционные функции, статистики Херста, функции распределения кластеров по размерам. Это позволяет обоснованно сравнить статистические характеристики потоков элементарных повреждений модели с характеристиками экспериментальных потоков импульсов эмиссии и выявить в статистических характеристиках особенности, свидетельствующие о переходе системы на стадию, предшествующую разрушению (переход временной автокорреляционной функции через минимум в отрицательной области или излом на статистике Херста).

Работа используемого для моделирования вероятностного клеточного автомата определяется набором вероятностей, характеризующих процессы образования элементарных повреждений по нескольким взаимодополняющим механизмам и генерирующих временные ряды числа элементарных повреждений и числа кластеров элементарных повреждений как результат эволюции пространственной кластерной структуры. Вероятность образования нового элементарного повреждения на свободном узле решетки (вероятность оккупации) p_{occ} отображает интенсивность процесса разрушения материала под воздействием механических напряжений, усредненных в пространственных масштабах, много бóльших характерного размера элементарного повреждения, и определяется внешними условиями нагружения материала. Вероятность проращения периметра кластера повреждений p_{spr} отображает увеличенную интенсивность процесса разрушения материала под действием локальных перенапряжений вблизи уже имеющегося элементарного повреждения (кластера повреждений). Вероятность слияния кластеров, сблизившихся на критическое расстояние, p_{mer} учитывает взаимное влияние пары кластеров повреждений на их встречный рост. Разработанный клеточный автомат позволяет реализовывать различные сценарии моделирования накопления повреждений.

После выбора сценария моделирования и ввода входных параметров каждая итерация алгоритма генерации случайного процесса накопления повреждений работает в следующей последовательности: образуются повреждения на неповрежденных узлах решетки, проращиваются периметры существующих кластеров, сливаются кластеры, сблизившиеся на критическое расстояние, формируется кластерная структура элементарных повреждений. Каждая итерация

завершается уничтожением кластерной структуры, образованной на предыдущем шаге, и возникновением новой с автоматическим обновлением всех характеристик кластеров. Конечной стадией эволюции считается конфигурация, в которой появляется кластер, соединяющий противоположные грани куба. Образование соединяющего кластера интерпретируется как разрушение системы, а число соответствующих итераций отождествляется с временем до разрушения. Конфигурация кластерной структуры на решетке в конкретный момент времени задается числом кластеров, а также такими характеристиками как масса (число элементов в кластере), среднеквадратичный радиус, размахи по строкам, столбцам, слоям. В результате каждая итерация дает по одной точке в каждую из выборок временных рядов “число элементарных повреждений” и “число кластеров элементарных повреждений”, по которым вычисляются характеристики этих временных рядов.

В настоящей работе исследовался внутренний динамический сценарий, который учитывал зависимость вероятностей прорастания периметра кластера от его размера — среднеквадратичного радиуса \bar{R}^2 через концентрацию напряжений вблизи границы кластера:

$$p_{\text{spr}} = p_{\text{spr}}(T) \exp\left(\frac{\gamma \sigma^4 \sqrt{\bar{R}^2}}{kT \sqrt{l}}\right).$$

Здесь $l^{-1/2} \sigma^4 \sqrt{\bar{R}^2}$ — модельная оценка концентрации напряжения; l — характерный размер элементарного повреждения; k — постоянная Больцмана; T — температура; γ — структурный параметр; σ — растягивающее напряжение вдали от трещины.

Моделирование проводилось на кубической решетке $100 \times 100 \times 100$. При этом вероятности, характеризующие процесс образования элементарных повреждений, имели следующие значения: вероятность оккупации клетки $p_{\text{occ}} = 0.0001$, начальное значение вероятности прорастания периметра $p_{\text{spr}} = 0.18$, вероятность слияния соседних кластеров $p_{\text{mer}} = 0.2$. Полученные характеристики случайных процессов усреднялись по 10 реализациям.

Поведение временного ряда “число элементарных повреждений” существенно зависит от выбора параметров моделирования. Для динамического внутреннего сценария кинетика накопления элементарных повреждений в трехмерной модели в зависимости от значения вероятности прорастания периметра кластеров повреждений p_{spr} показывает два качественно различных режима эволюции кластерной структуры. Так, для случая, когда начальное значение вероятности прорастания периметра не превосходит значения 0.2 временной ряд “число элементарных повреждений”, обнаруживая рост на первых шагах эволюции, флуктуирует вблизи практически не подверженного тренду среднего значения. Число кластеров повреждений значительно превосходит число вновь возникающих элементарных повреждений (рис. 1а). Во временном ряду “число элементарных повреждений” имеют место долговременные корреляции (рис. 1б) с выходом корреляционной функции в отрицательную область. При значениях вероятности прорастания $p_{\text{spr}} = 0.2$ число вновь возникающих элементарных повреждений и число кластеров повреждений совпадают по порядку величины. Процесс образования соединяющего кластера ускоряется примерно в три раза. Процессы, формирующие временной ряд “число элементарных повреждений”, становятся более совпадающими между собой.

Для значений вероятности прорастания периметров кластеров, превосходящих значение 0.2, процесс объединения элементарных повреждений и возникновения соединяющего кластера настолько ускоряется, что число вновь возникающих элементарных повреждений в несколько раз превышает число кластеров элементарных повреждений (рис. 1в), и соответственно, число итераций до появления соединяющего кластера существенно сокращается. Процессы, формирующие временной ряд “число элементарных повреждений” и кластеры, становятся полностью совпадающими. Корреляционные функции также практически совпадают, что говорит о возникновении сильных долговременных корреляций (рис. 1г).

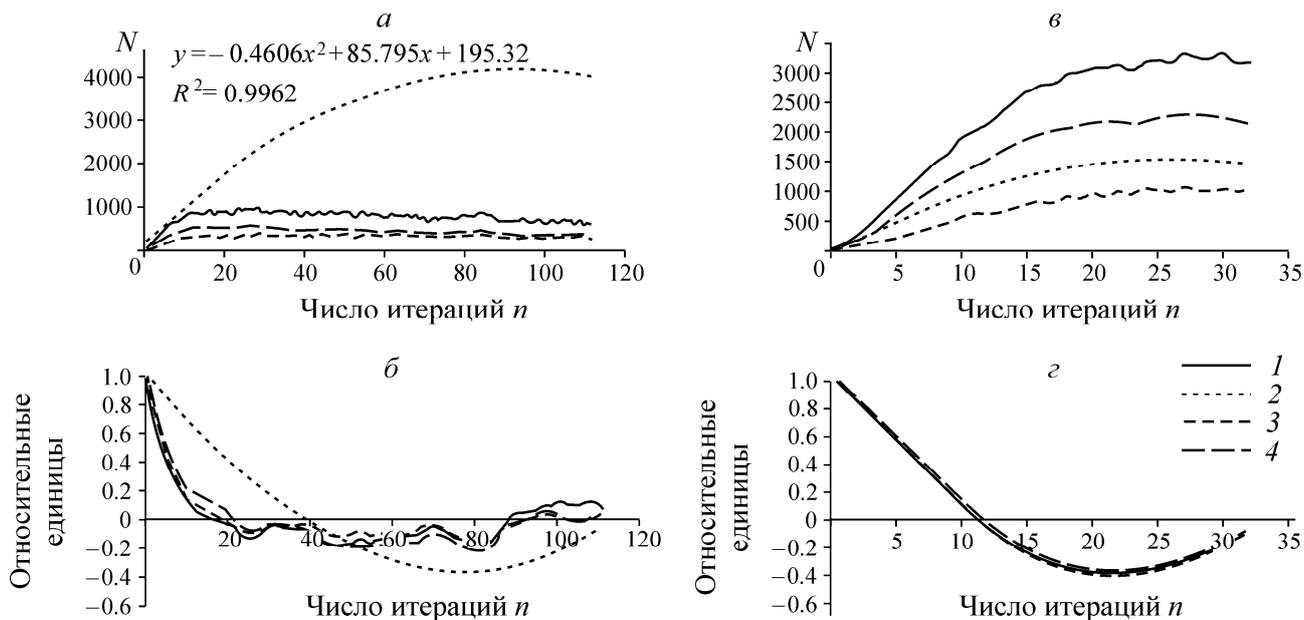


Рис. 1. Кинетические зависимости (а) и автокорреляционные функции (б) временных рядов “число элементарных повреждений” и “число кластеров повреждений” при $p_{spr} = 0.18$; в, г — соответственно те же зависимости при $p_{spr} = 0.22$: 1 — суммарная кривая элементарных повреждений; 2 — кластеры; 3 — одиночные элементарные повреждения; 4 — элементарные повреждения периметров кластеров

Поскольку временной ряд “число элементарных повреждений” соответствует потоку импульсов эмиссии, несущему информацию о возникновении новых и прорастании образовавшихся ранее микротрещин, в данной работе сравнивается поведение временного ряда “число элементарных повреждений”, полученного компьютерным моделированием, с характеристиками измеряемого в физическом эксперименте потока импульсов электромагнитной эмиссии. Как показали предыдущие исследования [6, 7], характерные особенности перестройки кластерной структуры повреждений перед разрушением соответствуют переходу корреляционной функции случайного процесса “число элементарных повреждений” через минимум в отрицательной области. В то же время корреляционную функцию случайного процесса накопления элементарных повреждений можно определить по данным физического эксперимента и сравнить поведение этой функции с поведением функции, полученной компьютерным моделированием по мере приближения к разрушению системы. Таким образом, корреляционная функция является надежной усредненной статистической характеристикой случайного процесса, позволяющей использовать ее как предвестник перехода системы на стадию, предшествующую необратимому разрушению.

На рис. 2 приведено сравнение автокорреляционных функций временного ряда “число элементарных повреждений”, рассчитанных по данным модельного эксперимента, с временными автокорреляционными функциями потоков импульсов электромагнитной и световой эмиссии, полученных при нагружении кварцевого диорита [8]. Автокорреляционные функции вычислялись по стандартной формуле [9]:

$$K(\tau) = \frac{\sum_{i=0}^N [x(i+\tau) - \bar{x}][x(i) - \bar{x}]}{\sum_{i=0}^N [x(i) - \bar{x}]^2},$$

где $x(i)$ — значение рассматриваемой случайной величины в i -м цикле; \bar{x} — текущее среднее значение случайной величины.

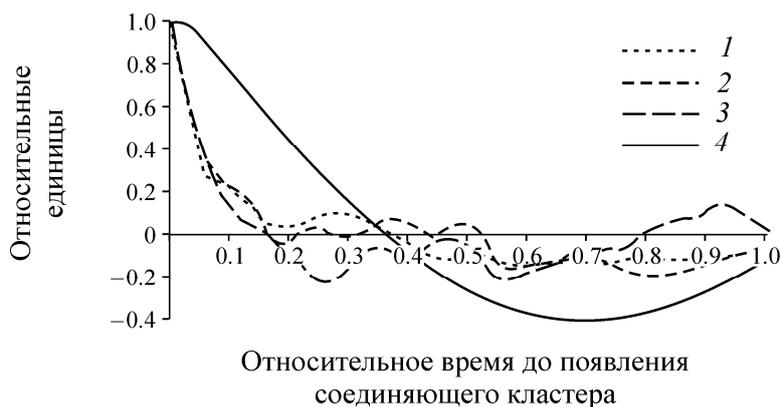


Рис. 2. Автокорреляционные функции временного ряда “число элементарных повреждений”: 1 — кварцевый диорит, электромагнитная эмиссия; 2 — кварцевый диорит, фотонная эмиссия; 3 — внутренний динамический сценарий ($p_{spr} = 0.18$); 4 — внутренний динамический сценарий ($p_{spr} = 0.22$)

Из рис. 2 видно, что поведение автокорреляционных функций числа импульсов эмиссии (как световой, так и электромагнитной) качественно совпадает с поведением автокорреляционной функции временного ряда “число элементарных повреждений” для режима эволюции кластерной структуры, соответствующего значению вероятности прорастания периметра меньшего, чем 0.2.

ВЫВОДЫ

Установлено, что в зависимости от значения вероятности прорастания периметра кластера повреждений для трехмерной модели накопления повреждений наблюдаются два качественно различных режима эволюции процесса накопления повреждений. Для вероятностей прорастания периметра, превосходящих значение 0.2, процесс перехода к необратимому разрушению существенно ускоряется и становится сильно коррелированным. При этом наилучшее согласование данных модельного и физического экспериментов наблюдается для режима эволюции кластерной структуры, соответствующего значению вероятности прорастания периметра, меньшего чем 0.2. Проведенное исследование позволяет более надежно сопоставить данные моделирования с данными физического эксперимента с целью разработки методик непрерывного мониторинга прогнозирования разрушения по переходу автокорреляционных функций потоков импульсов эмиссии в область отрицательной корреляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Kurlenya M. V., Vostretsov A. P., Kulakov G. I., and Yakovitskaya G. E. Registration and processing of signals of electromagnetic radiation of rocks, Novosibirsk, Izd. SO RAN, 2000. (in Russian) [Журленя М. В., Вострецов А. П., Кулаков Г. И., Яковицкая Г. Е. Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения горных пород. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. — 232 с.]
2. Gilyarov V. L., Varkentin M. S., Korsukov V. E., Korsukova M. M., and Kuksenko V. S. Formation of Power-Law Size Distributions of Defects during Fracture of Materials. *Fizika tverd. tela*, 2010, vol. 52, no. 7, pp. 4404–4409. [Гиляров В. Л., Варкентин М. С., Корсуков В. Е., Корсукова М. М., Куксенко В. С. Формирование степенных распределений дефектов по размерам в процессе разрушения материалов // ФТТ. — 2010. — Т. 52. — № 7. — С. 1311–1315.]
3. Botvina L. R. Destruction: kinetics, mechanisms, general laws, Moscow, Nauka, 2008. (in Russian) [Ботвина Л. Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. — М: Наука, 2008. — 334 с.]

4. **Tsai B. N.** Physical Aspects of Mechanism of Rock Failure, *Journal of Mining Science*, 2004, vol. 42, no. 1, pp. 72–78. [**Цай Б. Н.** Физические аспекты механизма разрушения горных пород // ФТПРПИ. — 2004. — № 1. — С. 72–78.]
5. **Alekseev D. V. and Kazunina G. A.** Simulation of damage accumulation kinetics with a probabilistic cellular automaton, *Fizika tverd. tela*, 2006, vol. 48, no. 2, pp. 272–278. [**Алексеев Д. В., Казунина Г. А.** Моделирование кинетики накопления повреждений вероятностным клеточным автоматом // ФТТ. — 2006. — Т. 48. — № 2. — С. 255–261.]
6. **Alekseev D. V. and Kazunina G. A.** Kinetics of clusters of elementary damages in loaded materials: probabilistic cellular automation modeling, *Journal of Mining Science*, 2006, vol. 42, no. 1, pp. 43–53. [**Алексеев Д. В., Казунина Г. А.** Кинетика кластеров элементарных повреждений в нагруженных горных породах: моделирование вероятностным клеточным автоматом // ФТПРПИ. — 2006. — № 1. — С. 49–60.]
7. **Alekseev D. V., Kazunina G. A., and Cherednichenko A. V.** Rock failure forecasting with 3D modeling using probabilistic cellular automata, *Journal of Mining Science*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 917–923. [**Алексеев Д. В., Казунина Г. А., Чередниченко А. В.** Прогнозирование разрушения горных пород с использованием с использованием 3D-моделирования вероятностным клеточным автоматом // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 68–75.]
8. **Kazunina G. A. and Mal'shin A. A.** Study of the kinetics of damage accumulation in loaded materials based on impulse electromagnetic and photon emission, *Izv. Vuzov. Fizika*, 2009, vol. 52, no. 6, pp. 598–601. [**Казунина Г. А., Мальшин А. А.** Исследование кинетики накопления повреждений в нагруженных материалах по импульсной электромагнитной и фотонной эмиссии // Изв. вузов. Физика. — 2009. — № 6. — С. 19–25.]
9. **Berk K. and Kejri P.** Data analysis with Microsoft Excel. Autodexpress, 2005, 560 pp. [**Берк К., Кейри П.** Анализ данных с помощью Microsoft Excel. — М.: Вильямс. — 2005. — 560 с.]