РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2022 № 6

УДК 550.3:534.6:622.02:531

ТРИГГЕРНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ УДАРНОМ РАЗРУШЕНИИ ОДНООСНО СЖАТОГО ОБРАЗЦА ГРАНИТА

И. П. Щербаков, Х. Ф. Махмудов, А. Е. Чмель

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН,
E-mail: chmel@mail.ioffe.ru, *ул. Политехническая, 26, 194021, г. Санкт-Петербург, Россия*

Исследована ударная волна в одноосно сжатом образце гранита, возбуждаемая маятниковым копром, направленным поперечно компрессии. Давление сжатия варьировалось от нулевого до предразрушительного. Образование микротрещин при ударе регистрировалось методом акустической эмиссии (АЭ). Распределение энергии во временных сериях возбужденных импульсов АЭ следовало степенному закону как в свободных, так и статически нагруженных образцах. Отмечено, что первые удары производили локальные повреждения с всплеском АЭ от относительно мелких трещин, слияние которых при последующих ударах вызывало перераспределение вновь возникших микроповреждений более крупных образований. При генерации ударной волны в предпредельно сжатом образце поверхность возникшей магистральной трещины превышала площадь локальных повреждений на несколько порядков, что характерно для триггерных эффектов, ведущих к масштабным разрушениям при внешнем воздействии с формально безопасной плотностью энергии.

Разрушение гранита, триггерный эффект, компрессионная нагрузка, ударная нагрузка, акустическая эмиссия

DOI: 10.15372/FTPRPI20220607

Природные гранитные массивы используются в качестве естественной среды для различных инженерных сооружений, служащих для хранения радиоактивных отходов, подземной газификации угля, а также при строительстве тоннелей и других подземных конструкций. От таких сооружений требуется сохранение стабильности при внешних силовых нагрузках ввиду специфики их эксплуатации или тяжелых последствий в случае разрушения. Создание более крупных объектов инфраструктуры и появление новых технологий, в частности распространение метода гидроразрыва пластов в нефтегазовой промышленности, привело к росту внимания к проблеме устойчивости систем, находящихся в метастабильном состоянии, поскольку разрушение таких систем остается непредсказуемым и ведет к невосполнимым экономическим и человеческим потерям.

Опасные всплески сейсмической активности могут провоцироваться ударными волнами техногенного (взрывы, ведение горных работ) [1 – 5] и естественного происхождения: вулканическая деятельность, отдаленные землетрясения, усталостное разрушение горных пород, приливы, разрушение ледового покрова крупных водоемов, деформация земной поверхности, вызываемая сопряженными антициклонами или циклонами и иными атмосферными явлениями [6 – 12].

Выход энергии при наведенном извне землетрясении может быть намного выше, чем энергия источника его активации. Крупномасштабные процессы, вызываемые низкоэнергетичными событиями, относятся к триггерным эффектам, при которых термодинамическая система (в частности, геосистема), находящаяся в метастабильном состоянии на грани энергетического баланса, теряет равновесие при незначительном внешнем воздействии.

Основные направления исследований в мире — натурные наблюдения и построение математических моделей триггерного срыва, причем, как правило, лишь для конкретных объектов. Имеются сведения о лабораторных исследованиях феномена триггера, которые необходимы для выявления критерия опасности тех или иных природных явлений и антропогенных факторов на стабильность инженерных сооружений [13, 14]. В настоящем сообщении описано исследование триггерного перехода напряженной горной породы в неравновесное состояние в масштабе лабораторного эксперимента. Модельная триггерная ситуация создавалась сочетанием статической компрессионной нагрузки и точечного ударного воздействия, направленного нормально к оси сжатия. Процесс накопления структурных дефектов (микротрещин) при двойном нагружении наблюдался методом акустической эмиссии.

Проведенные лабораторные исследования разрушения горных пород методом АЭ [15 – 17] показали, что зависимость числа импульсов N от их энергии E следует степенному закону, идентичному закону Гуттенберга – Рихтера $\log_{10} N(M > m) \propto -bm$, где N — число землетрясений с магнитудой M, превышающей величину m (величина M пропорциональна логарифму E). Этот факт позволяет говорить об определенном подобии реальных и смоделированных в лаборатории процессов разрушения горных пород, поскольку в их основе лежит зарождение, накопление и кластеризация трещин.

Статистическая обработка временных серий эмиссионной активности заключалась в построении распределений выделенной энергии в импульсах, которые отражают стабильность образца или приближение материала к критическому состоянию. Варьирование ударной нагрузки сжатого образца позволило оценить опасные комбинации нагрузок двух типов для горных пород.

ОБРАЗЦЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Выполнены прямые исследования накопления дефектов в граните при ударной нагрузке с использованием методики наблюдения образования и роста микротрещин в горных породах на основе анализа акустической эмиссии с наносекундным разрешением по времени. Образцами служили блоки мелкозернистого гранита Вестерли размером $10 \times 20 \times 30$ мм. Плотность материала 265 г/см^3; типичный размер зерен и пор 0.8 и 0.6 мм соответственно [18].

Образец помещался под лабораторный гидравлический пресс, которым создавалось ступенчатое одноосное сжатие с относительным давлением $Q / Q_{th} = 0$; 0.30; 0.60; 0.90 и 0.97 (Q_{th} — предварительно определенный порог разрушения без ударной нагрузки). Локализованное повреждение поверхности образца осуществлялось заостренным закаленным бойком, который приводился в движение маятниковым копром. Система регистрации запускалась в момент касания копром бойка. Удар бойка образовывал лунку неправильной формы диаметром 0.2 – 1.0 мм и глубиной 0.2 – 0.5 мм в зависимости от величины Q / Q_{th} (рис. 1).

Испытание проводилось последовательностью ударов в одну точку образца при увеличении Q, что моделировало повторяющееся внешнее воздействие при возрастающем сжатии. При каждом отношении Q / Q_{th} выполнялась серия из трех ударов. Постоянная энергия удара бойка подбиралась высотой размаха маятникового копра таким образом, чтобы финальное макроскопическое разрушение происходило при $Q / Q_{th} = 0.95 – 0.97$.

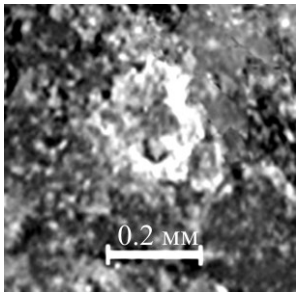

Рис. 1. Поврежденная поверхность образца после первого удара бойка

Для регистрации АЭ на поверхность образца прикреплялся высокочувствительный широкополосный пьезодатчик из керамики $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$. Сигналы АЭ поступали на аналогово-цифровой преобразователь АСК-3106 и заносились в память компьютера в течение 1 мс с шагом 40 нс. Записанные сигналы АЭ подвергались цифровой низкочастотной фильтрации на уровне 100 кГц, чтобы отделить вклад колебаний элементов экспериментальной установки. После фильтрации развертки полезных сигналов АЭ регистрировались в области 100 – 500 кГц.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полный цикл испытаний включал 12 последовательных ударов (по три при нулевой и трех сжимающих нагрузках) плюс завершающие 1 – 2 удара при сжатии $Q/Q_{th} \cong 0.97$, которые всегда приводили к макроскопическому разрушению образца. На рис. 2 показаны временные развертки излучения АЭ после каждого удара. По вертикальной оси отложен квадрат амплитуды сигналов A^2, который пропорционален энергии импульса E.

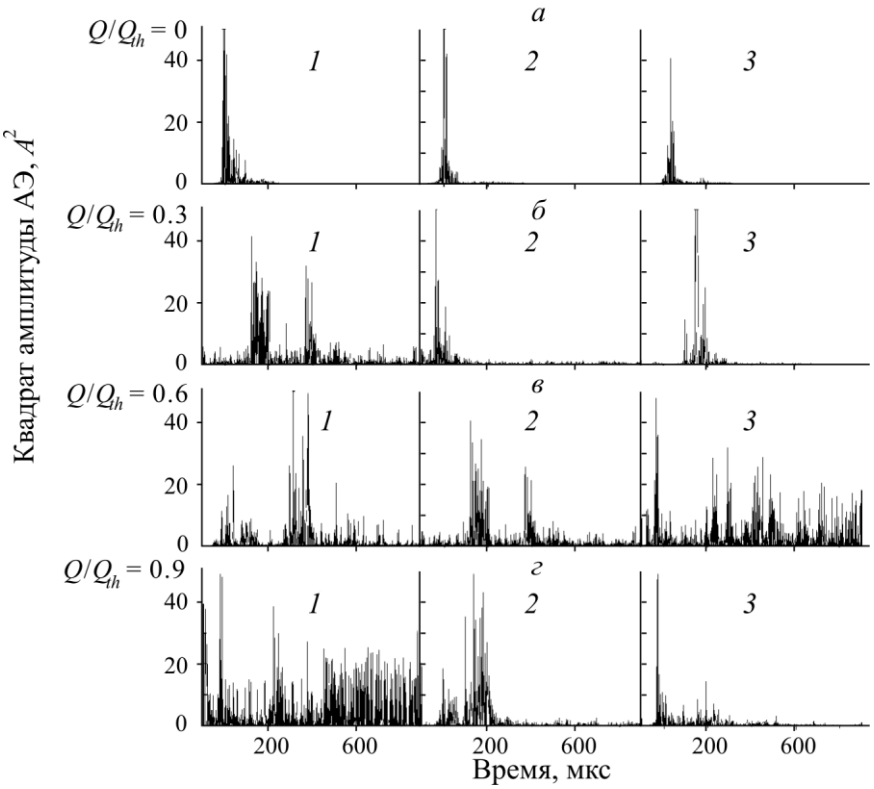

Рис. 2. Временные развертки генерации АЭ при ударах по поверхности свободного (*а*) и одноосно нагруженного образца с давлением $Q/Q_{th} = 0.3$ (*б*), 0.6 (*в*) и 0.9 (*г*). Цифры на полях рисунков — первый, второй и третий удары бойка при данном давлении. Величина A^2 пропорциональна энергии импульса ε

Сравнение продолжительности сигналов выявило определенную закономерность. При воздействии на ненагруженный прессом образец три первых импульса АЭ имеют примерно продолжительную длительность (~ 10 мкс). Первый удар, произведенный при сжатии $Q = 0.3Q / Q_{th}$, (4-й в общей последовательности) имеет бóльшую продолжительность излучения звука, чем три начальных удара на ненагруженный образец, но после следующих второго и третьего ударов при $Q = 0.3Q / Q_{th}$ длительность сигнала АЭ несколько сокращается. В серии $Q = 0.6Q / Q_{th}$ время излучения звука вновь возрастает, причем наиболее длительный сигнал был после последнего (третьего) удара. В финальной серии $Q = 0.9Q / Q_{th}$ время генерации АЭ при первом (10-м в общей последовательности) ударе достигает максимального в настоящем эксперименте, а затем вновь уменьшается и по продолжительности, и по выделенной энергии.

Для оценки характера выделения энергии при точечном ударном разрушении построены графики распределения числа акустических импульсов N в зависимости от их энергии E, которая пропорциональна квадрату амплитуды импульса ($E \propto A^2$). На рис. 3 в двойном логарифмическом масштабе по вертикальным осям показано число импульсов, энергия E которых превышает энергии одиночных импульсов ε. Полученные отрезки прямых отвечают соотношению $\log_{10} N(E > \varepsilon) \propto b \log_{10} \varepsilon$, ($b$ — наклон отрезков). Это соотношение эквивалентно степенному закону $N(E > \varepsilon) \propto \varepsilon^{-b}$, характерному для событий, между которыми имеется дальнодействие. Наклон прямых отрезков характеризует относительный вклад больших и малых импульсов: чем ниже наклон b, тем больше в процессе повреждения материала возникали крупные микротрещины. При отсутствии сжимающего напряжения после первых трех ударов картина развития повреждения была идентичной с точки зрения соотношения условно мелких и крупных микротрещин: наклон прямых отрезков b оставался постоянным в пределах погрешности опытов. В последующих сериях каждый следующий удар из трех вызывал распределение энергии с меньшим наклоном b, т. е. в напряженном образце повторные удары вызывали относительное увеличение более крупных трещин, что особенно проявилось в последней серии ударов максимально напряженного образца ($0.9Q / Q_{th}$). Первый удар в этой серии вызвал накопление мелких трещин, а два последующих (одиннадцатый и двенадцатый в общей последовательности) привели к относительному росту крупных микротрещин.

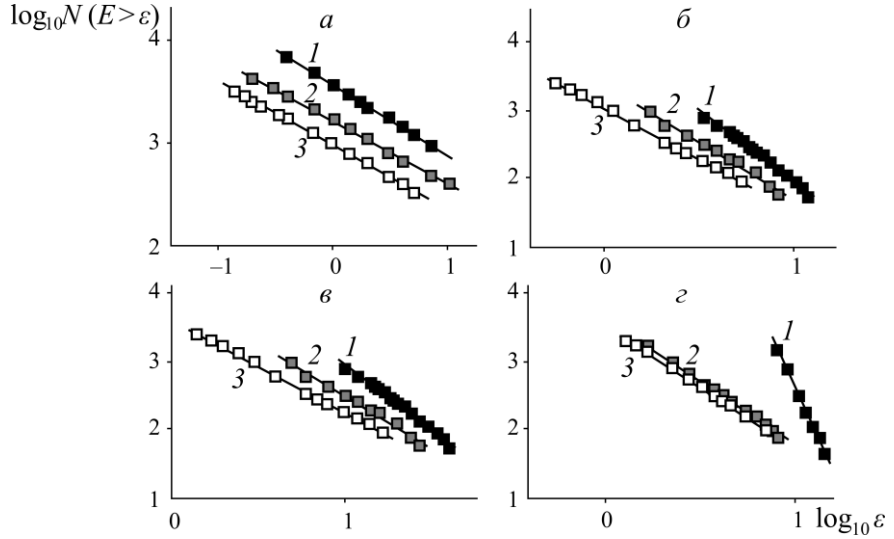

Рис. 3. Распределение энергии в импульсах АЭ, возбужденных ударом бойка по поверхности образца. Цифры у прямых отрезков — последовательности в сериях из трех ударов при сжимающих давлениях $Q / Q_{th} = 0$ (*а*), 0.3 (*б*), 0.6 (*в*) и 0.9 (*г*)

Вариации наклона прямых показали сложный характер накопления трещин в зависимости от степени сжатия образца (таблица). Эволюция распределений энергии в развертках АЭ (рис. 3) отражает изменения в микромеханике локального разрушения гранита при последовательно прилагаемой постоянной ударной нагрузке. Волнообразное изменение наклона показывает, что после очередного увеличения сжимающей нагрузки первый удар вызывает возникновение преимущественно мелких дефектов, которые при последующих втором и третьем ударах объединяются и энергия удара рассеивается в более крупных микротрещинах. Эффект наиболее хорошо выражен при максимальной неразрушающей нагрузке.

Значения наклона отрезков (параметр b) после серии ударного воздействия на образец

$Q/Q_{th}=0$			$Q/Q_{th}=0.3$			$Q/Q_{th}=0.6$			$Q/Q_{th}=0.9$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$-0.68\pm$ ±0.01	$-0.60\pm$ ±0.02	$-0.63\pm$ ±0.02	$-1.38\pm$ ±0.02	$-1.19\pm$ ±0.01	$-01\pm$ ±0.01	$-1.99\pm$ ±0.03	$-1.59\pm$ ±0.07	$-1.35\pm$ ±0.02	$-4.60\pm$ ±0.10	$-1.50\pm$ ±0.03	$-1.44\pm$ ±0.03

Примечание. 1, 2, 3, …, 12 — номер серии ударов.

При повышении компрессии до $\sim 0.97Q/Q_{th}$ происходило макроскопическое разрушение образца. Подчеркнем, что энергия бойка была всегда одинаковой, но масштаб разрушения в последнем случае оказался несопоставимым с повреждениями, возникшими при меньшей компрессии. Сравним площади при локально поврежденной поверхности и при масштабном разрушении образца.

На рис. 1 показана фотография повреждения, возникшего в результате ударного воздействия свободного образца. Площадь поверхностного разрушения составила ~ 0.3 мм^2, тогда как площадь поверхности образца, образовавшейся после прохождения магистральной трещины через весь образец (300 мм^2), на три порядка превышает площадь первичного дефекта. Для создания единицы площади разрушения при сжатии $Q/Q_{th}=0.97$ потребовался лишь ~ 0.1 % энергии удара, создавшего повреждение поверхности в свободном от давления образце.

ВЫВОДЫ

Эксперимент с допороговым, повторяющимся ударным воздействием на образец гранита при ступенчатом увеличении одноосного сжатия показал два аспекта изменения микромеханики разрушения материала при ужесточении условий динамического воздействия.

В сериях ударов с одинаковой энергией происходит изменение размеров повреждений от преимущественно мелких к более крупным при последующих ударах. Эта тенденция становится более выраженной при увеличении компрессии гранита. Эффект объясняется слиянием трещин, возникших на первых этапах воздействия. Сравнение площадей разрушения до приложения сжимающей нагрузки и при компрессии, близкой к порогу разрушения ($Q/Q_{th}=0.97$), показало, что при единообразном воздействии плотность энергии на единицу образованной поверхности оказалась в 3 раза меньше, чем в свободном образце.

Распространение результатов проведенного модельного эксперимента на натурный масштаб позволяет указать на особенности накопления локальных повреждений, ведущих к триггерному (многократно меньшему критической прочности) воздействию ударных волн на гранит, находящийся под статическим давлением (шахты, тоннели, подземные хранилища).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Боков В. Н., Бенкендорф О. В., Лебедев С. В.** Мониторинг и прогноз триггерных эффектов, инициирующих землетрясения // Триггерные эффекты в геосистемах. — 2019. — С. 27.
2. **Батугин А. С.** Горные работы как триггер тектонического процесса // Триггерные эффекты в геосистемах. — 2019 — С. 22 – 23.
3. **Адушкин В. В.** Развитие техногенно-тектонической сейсмичности в Кузбассе // Геология и геофизика. — 2018. — № 5. — С. 709 – 724.
4. **Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Шевкунова Е. В., Подкорытова В. Г., Куприш О. В.** Наведенная сейсмичность в угольных и железорудных районах Кузбасса // Росс. сейсмол. журн. — 2020. — Т. 2. — № 3. — С. 88 – 96.
5. **Шерман С. И.** Деструкция литосферы и ее реализация в разломообразовании и сейсмичности: разработка тектонофизической модели сейсмической зоны // Материалы Всерос. совещ. Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия. — Иркутск, 2009. —77 с.
6. **Prejean S. G. and Hill D. P.** Earthquakes, dynamic triggering of, Meyers R. (ed.), Encyclopedia of Complexity and Systems Sci., Springer, N. Y., 2009.
7. **Lahr J. C., Chouet B. A., Stephens C. D., Power J. A., and Page R. A.** Earthquake classification, location, and error analysis in a volcanic environment: implications for the magmatic system of the 1989 – 1990 eruptions at Redoubt Volcano, Alaska, J. Volcanol. Geotherm. Res, 1994, Vol. 309. — P. 139 – 155.
8. **Леонов М. Г., Кочарян Г. Г., Ревуженко А. Ф., Лавриков С. В.** Тектоника разрыхления: геологические данные и физика процесса // Геодинамика и тектонофизика. — 2020. — Т. 11. — № 3. — С. 491 – 521.
9. **Scholz C. H., Tan Y. J., and Albino F.** The mechanism of tidal triggering of earthquakes at mid-ocean ridges, Nature Commun, 2019, Vol. 10.
10. **Пономарева Е. И.** Двухфазная модель предшоковой стадии подготовки землетрясений применительно к байкальской рифтовой зоне // Триггерные эффекты в геосистемах. —2019. — С. 164.
11. **Латынина Л. А., Васильев И. М.** Деформации земной коры под влиянием атмосферного давления // Физика Земли. — 2001. — № 5. — С. 45 – 54.
12. **Belinskaya A. Yu., Kovalev A., Semakov N. N. and Belinskaya S.** Variations of ionospheric and geomagnetic field parameters during the June 18, 2013, Bachat earthquake, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 2021, Vol. 7. — P. 78 – 84.
13. **Бобряков А. П., Косых В. П., Ревуженко А. Ф.** Триггерное инициирование разрядки упругой энергии в напряженной геосреде // ФТПРПИ. — 2013. — № 1. — С. 1 – 9.
14. **Бобряков А. П.** Моделирование триггерных эффектов в разломных зонах горных пород // ФТПРПИ. — 2013. — № 6. — С. 35 – 44.
15. **Смирнов В. Б., Пономарев А. В., Завьялов А. Д.** Структура акустического режима в образцах горных пород и сейсмический процесс // Физика Земли. — 1995. — № 1. — С. 38 – 58.
16. **Kuksenko V., Tomilin N., and Chmel A.** The role of driving rate in scaling characteristics of rock fracture, 2005, J. Stat. Mech. — P06012.
17. **Lei X. and Satoh T.** Indicators of critical point behavior prior to rock failure inferred from pre-failure damage, 2007, Tectonophys., Vol. 431. — P. 97 – 111.
18. **Chen Y.** Observation of microcracks patterns in Westerly granite specimens stressed immediately before failure by uniaxial compressive loading, Chinese Rock. Mech. Eng., 2008, Vol. 27. — P. 2440 – 2448.

Поступила в редакцию 28/VI 2022
После доработки 26/IX 2022
Принята к публикации 24/XI 2022