06

Сравнение ударно-волнового повреждения гранитов при температурах 20 °C, 200 °C и 400 °C по данным методов акустической и электромагнитной эмиссий

© И.П. Щербаков, А.Е. Чмель

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия
e-mail: chmel@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 1 марта 2026 г.
В окончательной редакции 23 июня 2026 г.
Принято к публикации 2 сентября 2026 г.

Три гранитных породы, отличающиеся минеральным составом, размером зерен, пористости, подвергались точечному ударно-волновому повреждению при температурах 20 °C, 200 °C и 400 °C. Локальная деградация структуры гранитов оценивалась методами акустической и электромагнитной эмиссий. При комнатной температуре формирование очага разрушения при ударе начиналось с гибели „мостиков“ между зернами породы, и при их исчерпании возникали трещины в пятне миллиметрового масштаба. При повышенной температуре на начальном этапе нагружения происходила микропластическая деформация поверхности. При всех температурах при прохождении ударной волны наблюдался пьезоэффект в зернах кварца и контактная электрофикация между различными минералами, а также движение дислокаций при 400 °C. Проявления описанных эффектов связывались с конкретными физико-механическими свойствами гранитов.

Ключевые слова: гранит, нагрев, ударно-волновое разрушение, акустическая эмиссия, электромагнитная эмиссия.

DOI: 10.61011/JTF.2027.01.64181.52-26

Введение

Граниты, как многокомпонентные гетерогенные материалы, используются в специфической инженерной инфраструктуре. Поведение гранитов при непредсказуемых коротких механических нагрузках и тепловых воздействиях при пожарах часто моделируется в лабораториях. Практический интерес в экспериментах ограничен критическим порогом термического разрушения при $\sim 400\,^{\circ}$C [1], при которой в гранитах начинается переход от хрупкого состояния в пластическое [2–4]. В настоящем исследовании указанные аспекты деструктивных воздействий оценены в контексте термомеханического поведения гранитов различного минерального состава, размера зерен, пористости.

При изучении механических и/или термических процессов, вызывающих деградацию горных пород, широко используются эмиссионные методы, а именно акустические [3,5,6] и электромагнитные излучения [7,8], применяемые индивидуально или в комплексе [9,10]. Акустическая эмиссия (АЭ) — пассивный метод неразрушающей регистрации образования трещин и деформаций с целью мониторинга накопления дефектов в нагруженном теле для оценки структурной стабильности объекта. Вызванные ударом колебания стенок вновь образовавшихся трещин представляют собой звуковые волны в удобном для регистрации диапазоне от десятков до сотен килогерц.

Электромагнитная эмиссия (ЭМЭ) также применяется в установлении характера разрушении структуры при динамической нагрузке. При этом имеются два основных механизма генерации ЭМЭ в гетерогенных твердых телах, таких как горные породы [11] и цементный камень [12]. Во-первых, это пьезоэлектрический эффект, проявляющий себя преимущественно в содержащих кварц материалах [9,13,14]. Во-вторых, — нестационарные последовательности импульсов ЭМЭ при контактной электрификации (КЭФ), вызываемой ударом движения зерен различных минералов в породе [13,15] или цементном камне [16].

В настоящей работе представлены результаты, полученные сочетанием локализованного (точечного) удара по поверхности гранитов различного состава, размера зерен, пористости и прочности на сжатие. Эксперименты проводились при температурах от комнатной до 400 °C, что охватывало всю область применения гранита в строительной области.

1. Образцы и оборудование

Состав и физико-механические свойства образцов гранитов представлены в таблице. Образцы вырезались в блоки размером $35 \times 20 \times 10$ mm. Данные таблицы показывают, что граниты различного состава имеют существенно различные физико-механические свойства. В частности, гранит Рапакиви обладает существенно меньшей прочностью; гранит Вестерли сложен наиболее

Состав и физико-механические свойства подвергнутых испытаниям гранитов

Гранит	Состав (%)				Пористость (%)	Размер зерен (mm)	Прочность на сжатие (MPa)	Плотность kg/m^3
	Полевой шпат	Плагиоклаз	Кварц	Прочие				
Рапакиви	40	19	35	11	0.9	3–7	127	2660
Вестерли	32	33	28	7	0.8	0.8–1	240	2630
Куру Грей	38	20	31	11	0.3	1.5–5	297	2600

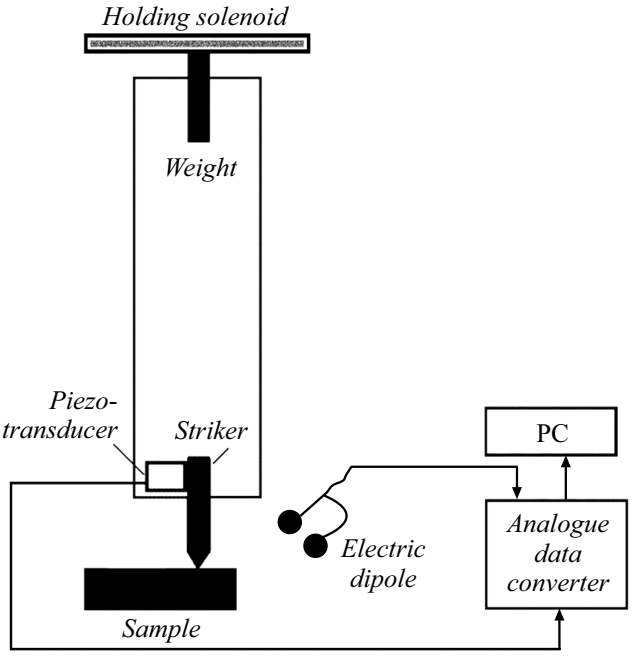


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

мелкими зернами; гранит Куру Грей имеет самую высокую прочность. Ниже будет показано, что структурные особенности перечисленных материалов определяют их микромеханический отклик на ударно-волновое воздействие в широком диапазоне температур.

Экспериментальная установка схематически показана на рис. 1. Образец помещался на массивную металлическую подставку. Локальное повреждение поверхности производилось закаленным стальным ударником, на который падал груз, удерживаемый электромагнитом. Возбужденные ударом АЭ-импульсы из растущих трещин принимались датчиком из высокочувствительной пьезоэлектрической керамики PZT, установленной на ударнике. Импульсы ЭМЭ регистрировали посредством диполя Герца. Сигналы акустического датчика и антенны (диполя) конвертировались в цифровую форму и сохранялись в компьютере. Наиболее интенсивные сигналы АЭ проявлялись в диапазоне 80–600 kHz; активность ЕМЭ была максимальной в окне 10–40 kHz.

2. Результаты и обсуждение

2.1. АЭ

Серии импульсов АЭ, возбужденные точечным ударом по поверхности образцов, нагретых до различных температур, показаны на рис. 2 (20 °C), 3 (200 °C) и 4 (400 °C). Импульсы на панелях (a–c) аппроксимированы прямыми линиями. Временной паттерн на всех рисунках состоял их трех периодов эмиссионной активности (или почти полного отсутствия таковой в некоторых из них). В среднем периоде длительностью 1–1.5 ms при всех температурах образцов доминировали пики АЭ, окруженные (до и после пика) временными отрезками более низкой эмиссионной активности.

В начальный период сжатия индентором (приблизительно 0–1.5 ms) давление распределяется наиболее неравномерно. В зонах контакта между зернами минералов происходит локальное разрушение, что вызывает генерацию АЭ. При комнатной температуре интенсивность АЭ на этом этапе наибольшая в граните Рапакиви (рис. 2, a), имеющем заметно меньшую прочность и бóльшую пористость (см. таблицу), что указывает на наличие большей концентрации „слабых мест“, чем в двух других образцах. Сигнал АЭ в более прочном и мелкозернистом граните Вестерли (рис. 3, a) в начальный период внедрения ударника был заметно меньше, чем в Рапакиви, а в самом прочной породе этой серии (Куру Грей) еще более незначительным (рис. 4, a). Ранее отмечалось, что материалы с более высокой пористостью склонны к образованию более крупных трещин [17].

С повышением температуры гранитов эффект образования трещин под давлением индентора снижался из-за роста микропластичности материалов. Интенсивность АЭ на начальной стадии нагружения (до пика) значительно уменьшалась при температурах образцов 200 °C и 400 °C, т. е. вместо образования микротрещин происходило пластическое течение.

После исчерпания целых стенок между микропорами ударная волна достигает максимального напряжения, и начинается стадия разрушения более крупных структур, которая проявляется пиком в области ~ 2 ms во всех развертках АЭ. На финальной стадии формирования повреждения поверхности (2.5–4 ms), т. е.

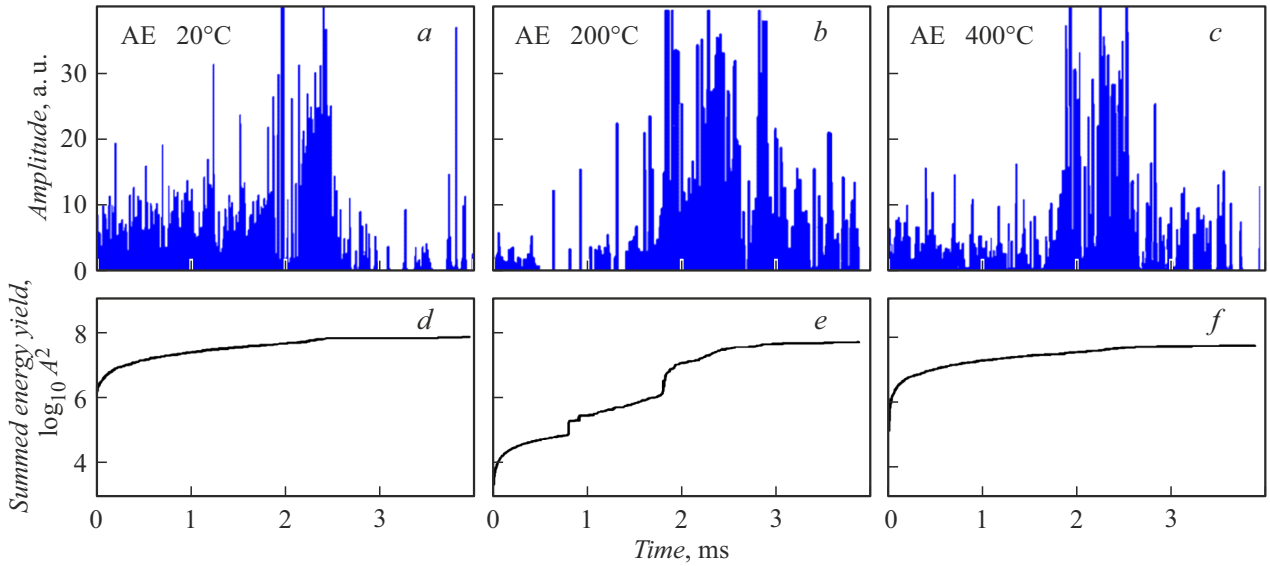


Рис. 2. Развертки сигналов АЭ при разрушении гранита Рапакиви при различных температурах (a–c) и кривые роста выделенной энергии (в логарифмическом масштабе) по мере прохождения ударной волны (d–f).

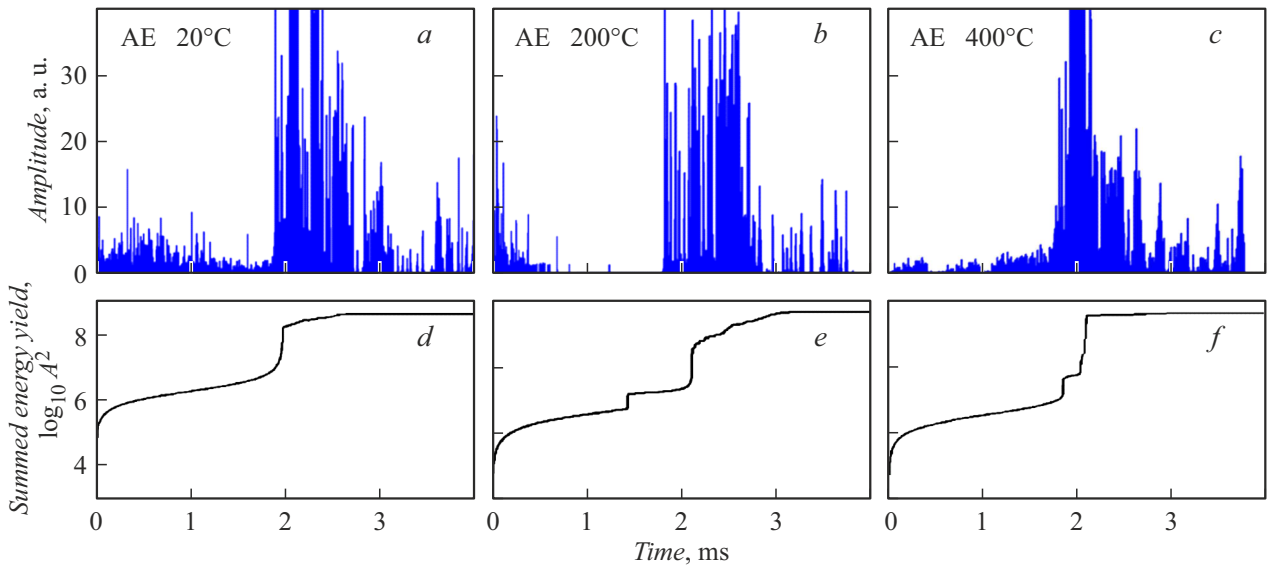


Рис. 3. То же, что рис. 2, для гранита Вестерли.

на спадающем давлении ударной волны, акустический сигнал постепенно убывает.

В дополнение графической иллюстрации накопления повреждений степень разрушения при различной температуре была оценена численно по суммарной энергии АЭ, исходящей из очага разрушения. Выход энергии в элементарных актах распада структуры материала можно охарактеризовать суммированием энергии последовательности одиночных импульсов. Энергия одиночного импульса E пропорциональна квадрату его амплитуды A: $E \propto A^2$. На рис. 2, d–f — 4, d–f в логарифмическом масштабе показаны кривые роста выделенной энергии по мере прохождения ударной волны. Можно видеть, что характер накопления дефектов различен во всех трех гранитах.

При анализе графиков проявились следующие закономерности:

1) по критерию выделенной энергии наименьшая площадь под кривой на графике проявилась в наименее прочном граните Рапакиви, а наибольшая — в самом прочном Гуру Грей;

2) относительно монотонный рост энергии заметен в гранитах Рапакиви и Куру Грей, а в самом мелкозернистом граните Вестерли отмечены участки ускорения и замедления скорости образования дефектов, что можно объяснить чередованием стадий дисперсного накопления

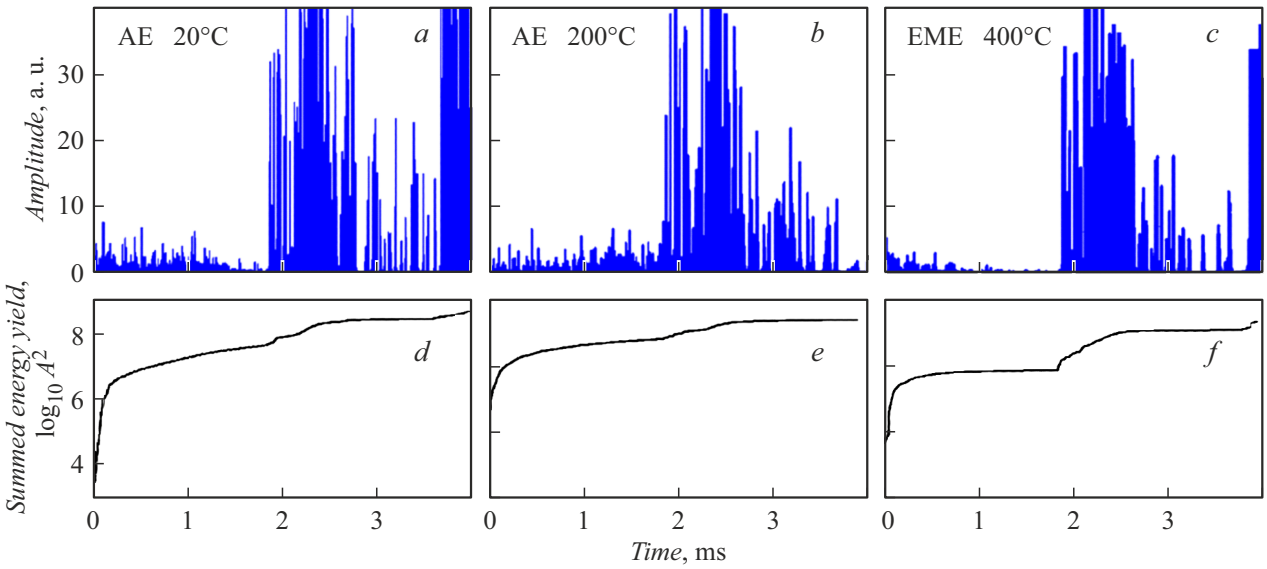


Рис. 4. То же, что рис. 2, для гранита Куру Грей.

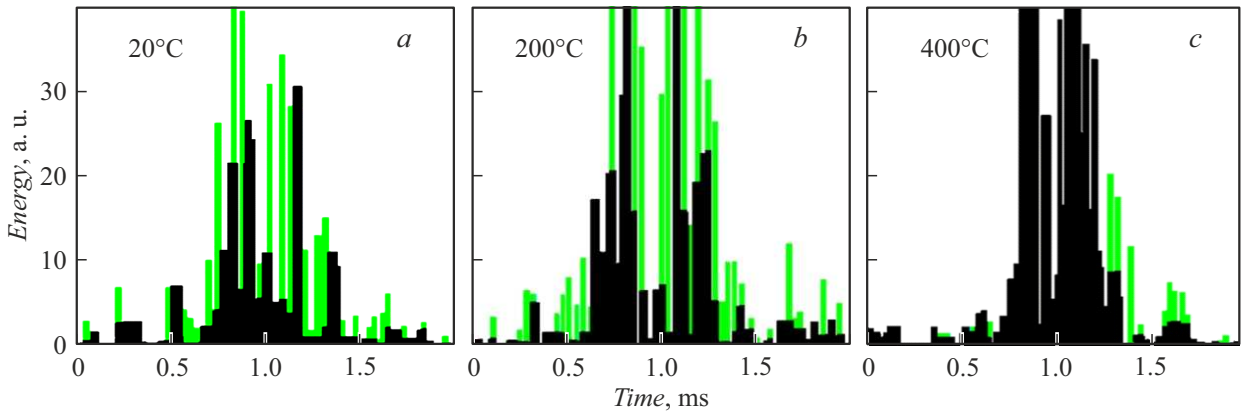


Рис. 5. Развертки сигналов ЭМЭ при ударно-волновом разрушении гранита Рапакиви при различных температурах. Более широкие темные штрихи относятся к импульсам пьезоэффекта большей длительности, а узкие — к коротким сигналам КЭФ.

повреждений и локализованного разрушения в неоднородностях мелкозернистой структуры этой породы [18];

3) ход кривых для гранитов несколько снижается от температуры, что можно предположительно объяснить увеличением интенсивности движения дислокаций, ведущим к частичной релаксации напряжений.

2.2. ЭМЭ

Индуцированные ударом развертки ЭМЭ (рис. 5–7) имели более короткую фазу активности по сравнению АЭ: 2 ms для ЭМЭ вместо 4 ms для АЭ. Кроме того, они имеют более сложную структуру, поскольку, как упоминалось выше, имели два различных источника — пьезоэлектрический эффект и КЭФ. Соответственно при всех температурах всех трех пород можно видеть два типа импульсов: беспорядочные всплески ЭМЭ различной интенсивности и продолжительности (характерные для пьезоэффекта), а также короткие импульсы примерно одинаковой ширины — как одиночные, так и объединенные в небольшие серии краткого (контактного) взаимодействия КЭФ. Интенсивность сигналов пропорциональна энергии импульсов, ширина — продолжительности импульсов.

В граните Рапакиви при температуре 20 °C ЭМЭ, вызванная пьезоэффектом, была существенно менее интенсивной, чем таковая в результате КЭФ (рис. 5, *a*). Однако при нагреве образца до 200 °C интенсивности обоих источников эмиссий приблизительно сравнялись (рис. 5, *b*), а при температуре 400 °C (рис. 5, *c*) доминировал пьезоэффект. Это означает, что пластическое течение в нагретом материале в определенной степени компенсирует импульсы ЭМЭ, возникающие в результате соударения зерен различных минералов под разрушающем давлением индентора.

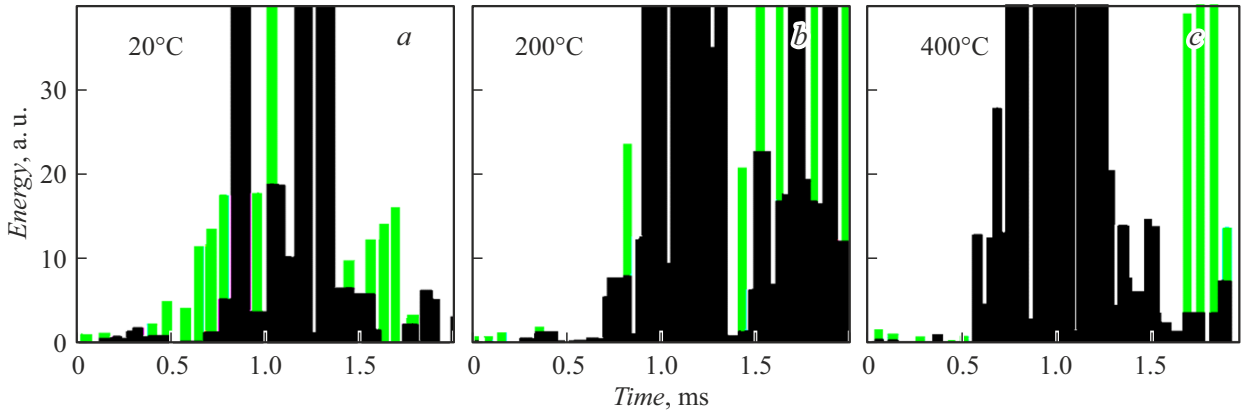


Рис. 6. То же, что рис. 5, для гранита Вестерли.

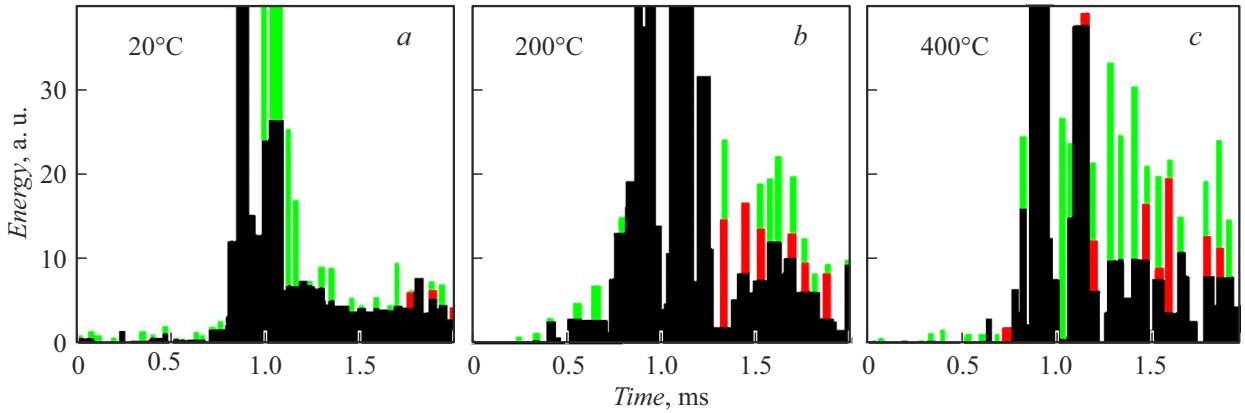


Рис. 7. То же, что рис. 5, для гранита Куру Грей. Кроме наиболее длительных импульсов от пьезоэффекта и коротких сигналов КЭФ, на развертках проявились сигналы промежуточной длительности и интенсивности.

Отметим, что КЭФ является источником ЭМЭ, который проявляется в породах как содержащих, так и не содержащих кварц. Поэтому этот механизм может рассматриваться как универсальный процесс. Присутствие кварца не является единственным выходом ЭМЭ в нагружаемых горных породах и „по большей мере выступает как второстепенный вклад в излучаемую энергию“ [13].

Гранит Вестерли, несмотря на почти двукратно более высокую прочность и многократно меньший размер зерен по сравнению с Рапакиви, показал примерно такую же тенденцию в изменении соотношении вкладов в ЭМЭ от пьезоэффекта и КЭФ с температурой (рис. 6).

Качественные изменения ЭМЭ произошли только при испытаниях гранита Куру Грей. В дополнение к эмиссиям от пьезоэффекта и КЭФ, возникли импульсы с длительностями, немного превышающими длительность таковых КЭФ, и имеющие интенсивность между интенсивностью пьезоэффекта и КЭФ (рис. 7). Примем во внимание, что характерными чертами гранита Куру Грей является низкая пористость — троекратно меньшая, чем у гранитов Рапакиви и Вестерли — и самая высокая прочность по сравнению с этими породами. Эти отличия позволяют отнести дополнительную эмиссию в граните Куру Грей активному движению дислокаций [19-22] при высокой температуре и давлении. Поскольку, если гранит подвергается нагрузкам быстрее, чем дислокации успевают снять напряжение, то в породе накапливаются микродефекты с возбуждением АЭ и ЭМЭ.

Заключение

Деградация структуры гранитов при ударно-волновом разрушении была оценена посредством АЭ и ЭМЭ при обычной температуре окружающей среды, при температуре 200 °C, которую можно характеризовать как предел диапазона „умеренного разрушения“, и при пороге термического разрушения, вызванного хрупко-пластичным переходом (400 °C). Активность обеих эмиссий при всех температурах показала три стадии формирования очага разрушения: гибель „слабых мест“ между зернами породы; интенсивный рост эмиссий при образовании трещин; затухающий выход АЭ и ЭМЭ при спадании энергии ударной волны.

При температуре 200 °C под давлением индентора во всех гранитах возникает микропластическая деформация, что ведет к уменьшению образования микротрещин со снижением интенсивности АЭ на первом этапе деградации структуры и почти полному ее отсутствию из-за пластического течения гранитов при 400 °C.

Источниками ЭМЭ при всех температурах являются пьезоэффект в зернах кварца и КЭФ между различными минералами, а также движение дислокаций, явно выраженное под разрушающим давлением индентора при температуре хрупко-пластичного перехода (400 °C–500 °C), который может принимать лавинный характер с катастрофическими последствиями.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Q. Sun, Zh.W. Zhang, L. Hue, Zh. Zhang, T. Su. Environ Earth Sci., **74**, 2341 (2015). DOI: 10.1007/s12665-015-4234-9

[2] A.K. Alzo'ubi, M. Alneasan, F. Ibrahim, N.M. Okasha, M. Mirrashid. Eng. Fail. Anal., **159**, 108092 (2024). DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.108092

[3] Y. Cui, C. Xu, L. Xue, B. Fengchang, J. Zhu. Sci. Rep., **15**, 29671 (2025). DOI: 10.1038/s41598-025-14590-z

[4] T. Wang, J. Wang, X. Zhang, P. Cheng, F. Xue, X. Mengya. Sci. Rep., **14**, 17149 (2024). DOI: 10.1038/s41598-024-68388-6

[5] R. Přikryl, T. Lokajicek, C. Li, V. Rudajev. RM&RE, **36**, 255 (2003).

[6] A.S. Chaudhary, A.M. Ekatpure, D. Burande, B.D. Patil, K.B. Waghulde, R.V. Bhortake, R. Raushan, S. Gadhave. Panam. Math. J., **33** (4) (2023). DOI: 10.52783/pmj.v33.i4.892

[7] P. Lin, P. Wei, Ch. Wang, Sh. Kang, X. Wang. J. Rock Mech. Geotech. Eng., **13**, 798 (2021). DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.01.001

[8] D. Song, Q. You, E. Wang, X. Song, Z. Li, L. Qiu, S. Wang. Geomech. Geoengin., **19**, 49 (2019). DOI: 10.12989/gae.2019.19.1.049

[9] S. Yoshida, T. Ogawa. JGR Solid Earth, **109**, B9 (2004). DOI: 10.1029/2004JB003092

[10] A. Rabinovitch, D. Bahat, V. Frid. Int. J. Fract., **71**, R33 (1995). DOI: 10.1007/BF00033758

[11] V. Frid, D. Bahat, J. Goldbaum, A. Rabinovitch, A. Isr. J. Earth Sci., **49**, 9 (2000).

[12] Т.В. Фурса, Д.Д. Данн, М.В. Петров, А.Н. Соколовский. ЖТФ, **89** (1), 99 (2019). [T.V. Fursa, D.D. Dann, M.V. Petrov, A.N. Sokolovskii. Techn. Phys., **64** (1), 78 (2019).]

[13] F. Freund. J. Geodynam., **33**, 543 (2002). DOI: 10.1016/S0264-3707(02)00015-7

[14] Т.В. Фурса, Д.Д. Данн, М.В. Петров, А.Е. Лыков. Дефектоскопия, **6**, 63 (2017). [T.V. Fursa, D.D. Dann, M.V. Petrov, A.E. Lykov. Russ. J. Nondestruct. Test., **155**, 451 (2017).]

[15] J. Tian, Y. He, F. Li, W. Peng, Y. He. J. Mater. Chem. A, **13**, 2505 (2025). DOI: 10.1039/D4TA07756C

[16] Т.В. Фурса. ЖТФ, **71**, 53 (2001). [T.V. Fursa. Techn. Phys., **27**, 825 (2001).]

[17] Y. Zhao, X. Li, L. Huang, Z. Zhang, Z. Xu. JRMGE, **16**, 3511 (2024). DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.11.023

[18] Е.Е. Дамаскинская, И.А. Пантелеев, А.Г. Кадомцев, О.Б. Наймарк. ФТТ, **59**, 920 (2017). DOI: 10.21883/FTT.2017.05.44381.364 [E.E. Damaskinskaya, I.A. Panteleev, A.G. Kadomtsev, O.B. Naimark. Phys. Solid State, **59**, 944 (2017). DOI: 10.1134/S1063783417050079]

[19] В.В. Благовещенский, И.Г. Панин. ФТТ, **59**, 1554 (2017). DOI: 10.21883/FTT.2017.08.44757.457

[20] M.C. He, J.L. Miao, J.L. Feng. IJRMMS, **47**, 286 (2010).

[21] J.H. Warner, E.R. Margine, M. Mukai, A.W. Robertson, F. Giustino, A.I. Kirkland. Sci., **337**, 209 (2012).

[22] А.М. Орлов, А.А. Скворцов, В.А. Фролов. Письма в ЖТФ, **25**, 28 (1999).