14

Применение вейвлет-преобразования для описания акустической эмиссии при разрушении материалов

© В.Л. Гиляров, Е.Е. Дамаскинская

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Vladimir.Hilarov@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 26 сентября 2025 г.
В окончательной редакции 28 ноября 2025 г.
Принята к публикации 8 декабря 2025 г.

Проведен вейвлет-анализ временных зависимостей амплитуд сигналов акустической эмиссии для гетерогенных материалов при их механическом нагружении, а также магнитуд землетрясений в Италии в 1990–2000 годах. Показано, что появлению крупных событий и разрушению материалов предшествует увеличение выделения энергии на различных масштабных уровнях. Сделан вывод о том, что это увеличение может служить прогностическим признаком разрушения материала.

Ключевые слова: прогнозирование разрушения, вейвлет-анализ, гетерогенные материалы.

DOI: 10.61011/FTT.2025.12.62425.266-25

1. Введение

Проблема предотвращения разрушения техногенных конструкций и прогнозирование природных и техногенных катастроф остается весьма актуальной в настоящее время. Для решения этих задач часто используется мониторинг состояния материалов (structural health monitoring SHM) [1], который позволяет идентифицировать и локализовать появляющиеся в материалах повреждения. Одним из методов широко применяемым для такого типа мониторинга является метод акустической эмиссии (АЭ) [2,3 и ссылки в них]. Вейвлет-преобразование широко применяется к анализу сигналов акустической эмиссии в основном в том случае, когда известны их волновые формы (см. обзоры [4,5]). Однако получение информации о волновых формах АЭ сигналов по ряду причин крайне затруднено. Во-первых, на вид волновой формы оказывает существенное влияние конструкция пьезопреобразователя, а также система крепления датчика к образцу. Во-вторых, датчик поразному реагирует на приходящую волну в зависимости от угла ее падения. Поэтому источник по типу (трещина определенного размера) может быть один и тот же, а волновая форма, которая будет записана аппаратурой — разная. В-третьих, один и тот же датчик дает различные волновые формы от одинаковых источников, но расположенных в разных частях образца из-за пространственной дисперсии и различного затухания частотных составляющих АЭ сигнала (существенное влияние окажет путь прохождения волны по образцу с точки зрения гетерогенности материала). Кроме того, на волновую форму влияет также искажение сигнала за счет его отражения от внешних и внутренних поверхностей (дефектов, границ зерен) и т.д. Поэтому чаще всего данные АЭ представляют собой набор амплитуд и времен акустических сигналов, а иногда содержат координаты их источников. Настоящая работа посвящена именно изучению временных рядов амплитуд сигналов АЭ.

Основные трудности анализа временных рядов акустической эмиссии связаны с тем, что этот процесс при разрушении материалов не является стационарным, поэтому стандартные статистические методы, такие как расчет моментов распределений, корреляционных функций и спектральный анализ для них неприменимы [6]. Действительно, средние величины (математическое ожидание, дисперсия, ковариация) для нестационарных рядов непостоянны. Это приводит к тому, что теоремы о состоятельности и асимптотической нормальности выборочных оценок и их дисперсий не выполняются. Для различных выборок одинаковой длины функции распределения разные. При увеличении размера выборок точность оценок не возрастает. Поэтому в настоящей работе для изучения нестационарных рядов АЭ применяется вейвлет-анализ. В отличие от Фурье-преобразования, где в качестве базисных функций преобразования используются функции вида $\exp(ix) = \cos x + i \sin x$, являющиеся композицией синусоидальных волн с различными частотами, и делокализованные в пространстве, для вейвлет-преобразования используются существенно локализованные солитонообразные функции. В качестве такой функции нами выбиралась широко применяемая функция вида „сомбреро“, сконструированная из второй производной функции Гаусса:

$$\psi(x) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right). \qquad (1)$$

Использование локализованных базисных функций приводит к тому, что метод вейвлет-преобразований сохраняет хорошее разрешение на разных временных масштабах, поэтому его часто называют математическим микроскопом [7].

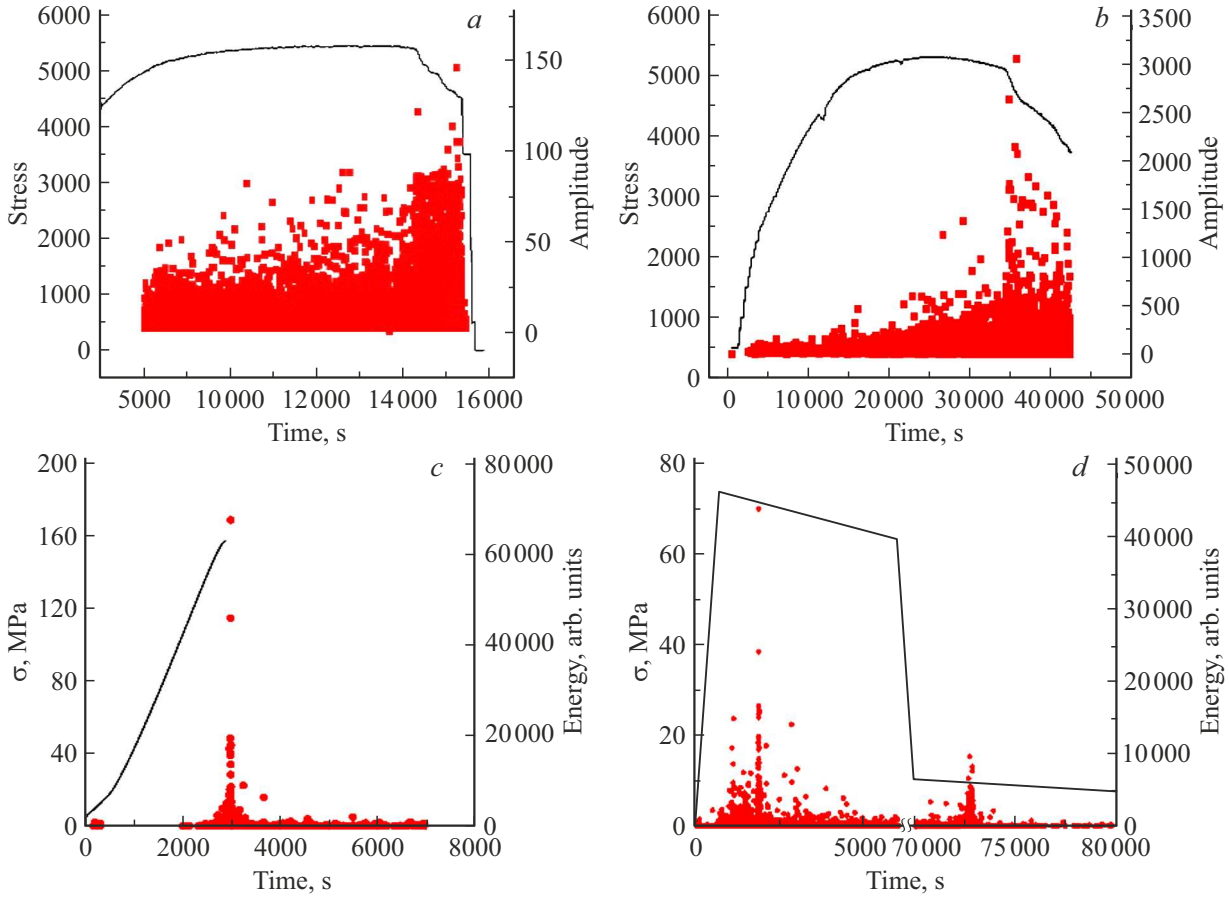


Рис. 1. Кривые нагружения (черные линии) и энергии сигналов акустической эмиссии (красные точки) для рассматриваемых экспериментов: *a* — образец AE42; *b* — AE43, *c* — Westerly U_Y; *d* — Berea obr4_5800N; *e* — Berea obr2 6000; *f* — Westerly 1П 18 kN; *g* — сейсмический сигнал в Италии в 1990–2000 годах.

Известно, что так называемая дисперсия вейвлет-коэффициентов, определяемая формулой (2), может обладать прогностическими свойствами для катастрофических событий [8–10].

$$\sigma(i) = \left[\frac{1}{N-1}\sum_{k=1}^{N}\left(w(i,k) - \langle w(i,k)\rangle\right)^2\right]^{1/2}. \quad (2)$$

Здесь i — масштабный коэффициент вейвлет-преобразования w, k — пространственный коэффициент (задает положение вейвлета во времени). Второе слагаемое в (2), представляет собой среднее значение по времени от вейвлет-преобразования, и, как нетрудно показать, равно нулю, в силу того что анализирующий вейвлет имеет по определению нулевое среднее значение. В силу этого, выражение (2) представляет собой просто дискретный аналог корня из глобального спектра энергии (3), который и будет использоваться в дальнейшем в настоящей работе.

$$E(a) = \int w(a,b)^2 db. \quad (3)$$

Энергия (3) зависит от масштаба a, на котором исследуется процесс. Наряду с (3) также использовалось среднее значение по масштабам от этой величины. Следует отметить, что речь идет не о пространственных масштабах, а скорее о частотном диапазоне. В то же время, высокоэнергетические события обычно захватывают большие пространственные масштабы и сопровождаются более низкочастотными волнами. Применялось непрерывное вейвлет-преобразование из библиотеки pywt для Python [11].

2. Экспериментальные данные

В настоящей работе обрабатывались данные, полученные в следующих экспериментах: AE42 и AE43 [12], Westerly U_Y. Berea obr4_5800N Berea obr2 6000, Westerly обр 1П [13–15], а также данные о сейсмической активности в Италии в 1990–2000 годах в прямоугольнике с координатами 36.663-46.89 N; 5.625-18.589 E из каталога NEIC Геослужбы США.

Временные зависимости амплитуд (энергий) и внешней осевой нагрузки приведены на рис. 1.

В экспериментах, промаркированных AE42 и AE43 на установке, позволяющей управлять деформацией (подробнее описано в работе [12]), подвергали нагружению

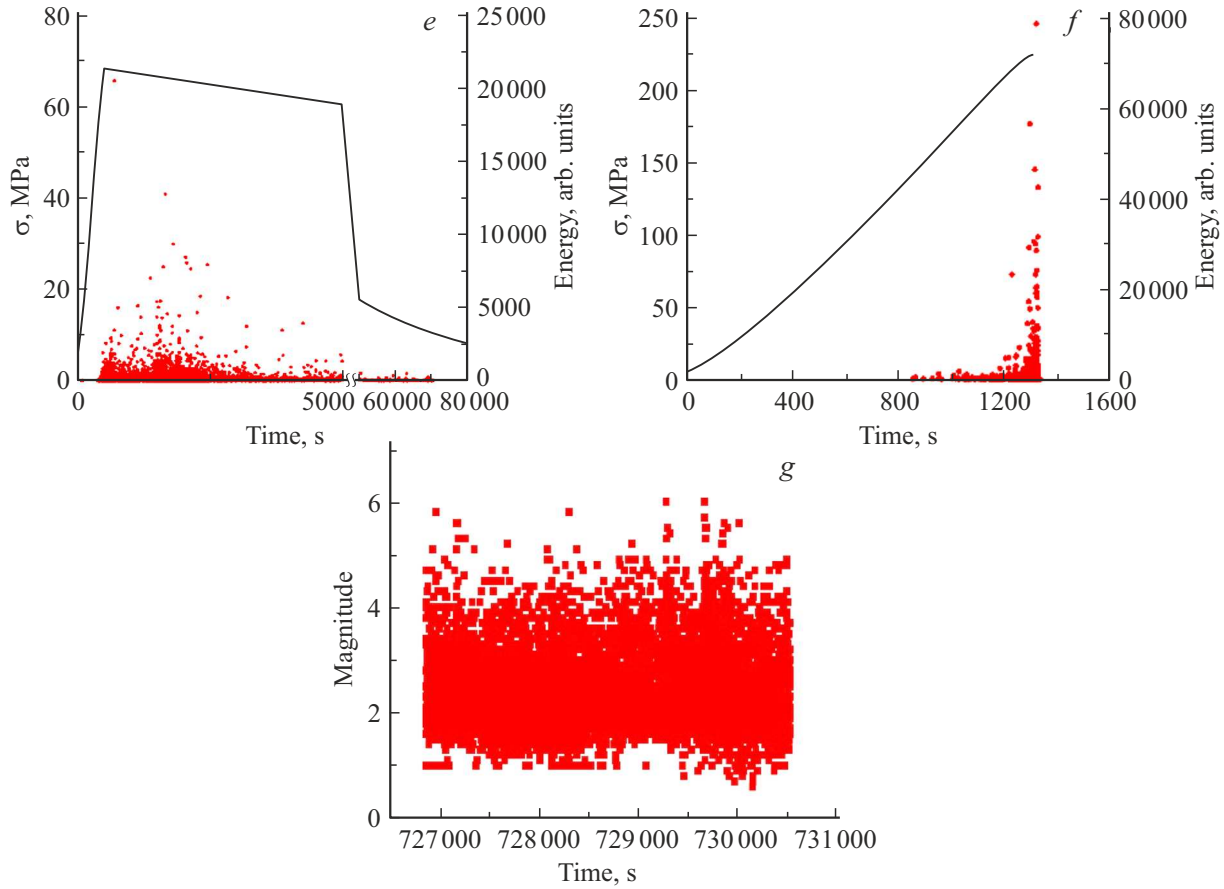


Рис. 1 (*продолжение*).

цилиндрические образцы ($h = 190.5$ mm, $d = 76.2$ mm) гранита Westerly (AE42) и гранита Harcourt (AE43). Образцы деформировали в условиях постоянного всестороннего сжатия (давление 50 ± 0.2 MPa) и одноосного осевого нагружения. Для регистрации сигналов АЕ, генерируемых в процессе нагружения, к образцу крепили систему из шести пьезопреобразователей (резонансная частота 0.6 MHz). В результате проведения эксперимента была получена база данных, в которой каждый сигнал АЕ характеризовался временем излучения, тремя координатами гипоцентра и амплитудой A, приведенной к референс-сфере радиусом $R_f = 10$ mm. Приведенная амплитуда является энергетической характеристикой сигнала. Особенность этих экспериментов состояла в том, что осевая нагрузка изменялась таким образом, чтобы активность АЕ сигналов с амплитудой выше пороговой не превышала заранее установленного уровня.

Квазистатические испытания образцов гранита Westerly (эксперименты, промаркированные Westerly U_Y и Westerly 1П 18 kN) проводились в условиях одноосного сжатия с постоянной скоростью перемещения пуансонов 10 μm/min. Для мониторинга акустической эмиссии был использован аппаратурный комплекс Amsy-5 Vallen System. Два широкополосных пьезопреобразователя акустической эмиссии AE105A с полосой 450–1150 kHz крепились к торцам образца. В процессе эксперимента формировалась база данных, в которой записаны параметры отдельных сигналов АЭ — время излучения, координата источника и энергия. При лавинообразном нарастании активности акустической эмиссии (более ста импульсов АЭ в секунду) процесс деформирования был остановлен. Использованный критерий остановки процесса деформирования в совокупности с низкой скоростью деформирования позволил с одной стороны сформировать магистральную трещину, а с другой — сохранить целостность образца. В эксперименте Westerly U_Y продолжали регистрацию АЭ после разгрузки, в эксперименте Westerly 1П 18 kN регистрация АЭ была прекращена вскоре после остановки нагружения. Более подробно эти эксперименты описаны в работах [13,14].

Программа нагружения образцов песчаника Berea (эксперименты, промаркированные Berea obr4_5800N и Berea obr2 6000) состояла из двух этапов. На первом этапе образец подвергался квазистатическому одноосному сжатию со скоростью нагружения (смещения нагружающих плит) 5 μm/min. Сжатие осуществлялось до усилия, равного 0.9 от $F_{\max}$ ($F_{\max}$ — разрушающая нагрузка, определенная в предварительных экспериментах). Затем образец выдерживался при постоянной деформации до тех пор, пока активность АЭ не спадала до нуля. При

Нумерация образцов

Название эксперимента	AE42	AE43	Westerly U_Y	Berea obr4_5800N	Berea obr2 6000	Westerly 1П 18 kN	Italy
№ эксперимента	1	2	3	4	5	6	7
Число сигналов	43983	36823	7815	30546	18056	3023	6835

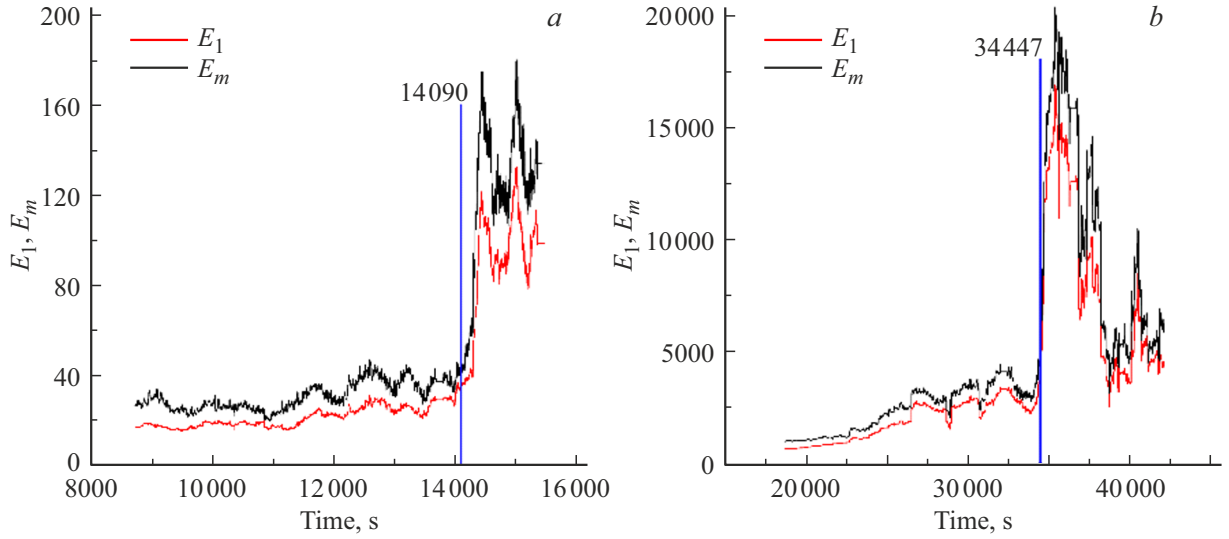


Рис. 2. Временные зависимости средней по масштабам глобальной энергии вейвлет- преобразования E_m и энергии нижнего уровня $E(1) \equiv E_1$: a–f — эксперименты 1–6; g — зависимость энергии низшего масштабного уровня для землетрясений в Италии; h — средняя энергия E_m и средняя энергия событий в скользящем окне из 512 единиц E_a. Вертикальными линиями и числами отмечены характерные временные точки (см. текст).

этом напряжение на образце экспоненциально спадало со временем. Регистрация акустической эмиссии в процессе нагружения осуществлялась с помощью системы Amsy-5 Vallen (Германия). Два пьезопреобразователя AE105A (рабочий частотный диапазон 450–1150 kHz) крепились в специальных полых цилиндрических плитах, с помощью которых непосредственно осуществлялось нагружение образца. Детально постановка эксперимента описана в работе [15]. В дальнейшем будем обозначать эти эксперименты номерами согласно таблице. В таблицу также включены размеры базы данных для каждого образца.

В экспериментах 3–6 было выполнено исследование дефектной структуры (системы микротрещин) в объеме методом рентгеновской микротомографии с помощью томографа SkyScan 1172 (Bruker, Belgium). Установлено, что во всех образцах сформировалась магистральная трещина, при этом образцы сохранили целостность [13,15].

3. Основные результаты

Банки данных по акустической эмиссии и сейсмическому сигналу разбивались на скользящие окна размером 512–2048 событий в зависимости от числа сигналов в базе данных. В каждом окне рассчитывался непрерывный вейвлет-спектр и его энергетические характеристики. Временной отсчет приписывался последнему событию в окне. Следует отметить, что при таком подходе независимой переменной является номер события, а временная шкала представляет собой функцию (вообще говоря нелинейную) от этого номера. Также нужно отметить, что с увеличением масштаба зашумление величины $E(a)$, рассчитанной по дискретному аналогу формулы (3) выражению (4), и усредненной по масштабам энергии $E_m = \mathrm{mean}(E(a))$ увеличивалось. Поэтому наряду со средними значениями E_m использовалась величина $E(1)$ на самом низшем масштабном уровне.

$$E(1) \equiv E_1 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} w(1, j)^2. \qquad (4)$$

Зависимости от времени средней энергии E_m и энергии $E(1)$ для изучаемых экспериментов приведены на рис. 2. Общим свойством всех рассмотренных экспериментов является увеличение рассматриваемых энергетических характеристик перед разрушением образца или крупного энергетического события. На рис. 2, *a, b* вертикальными линиями с цифрами отмечен момент

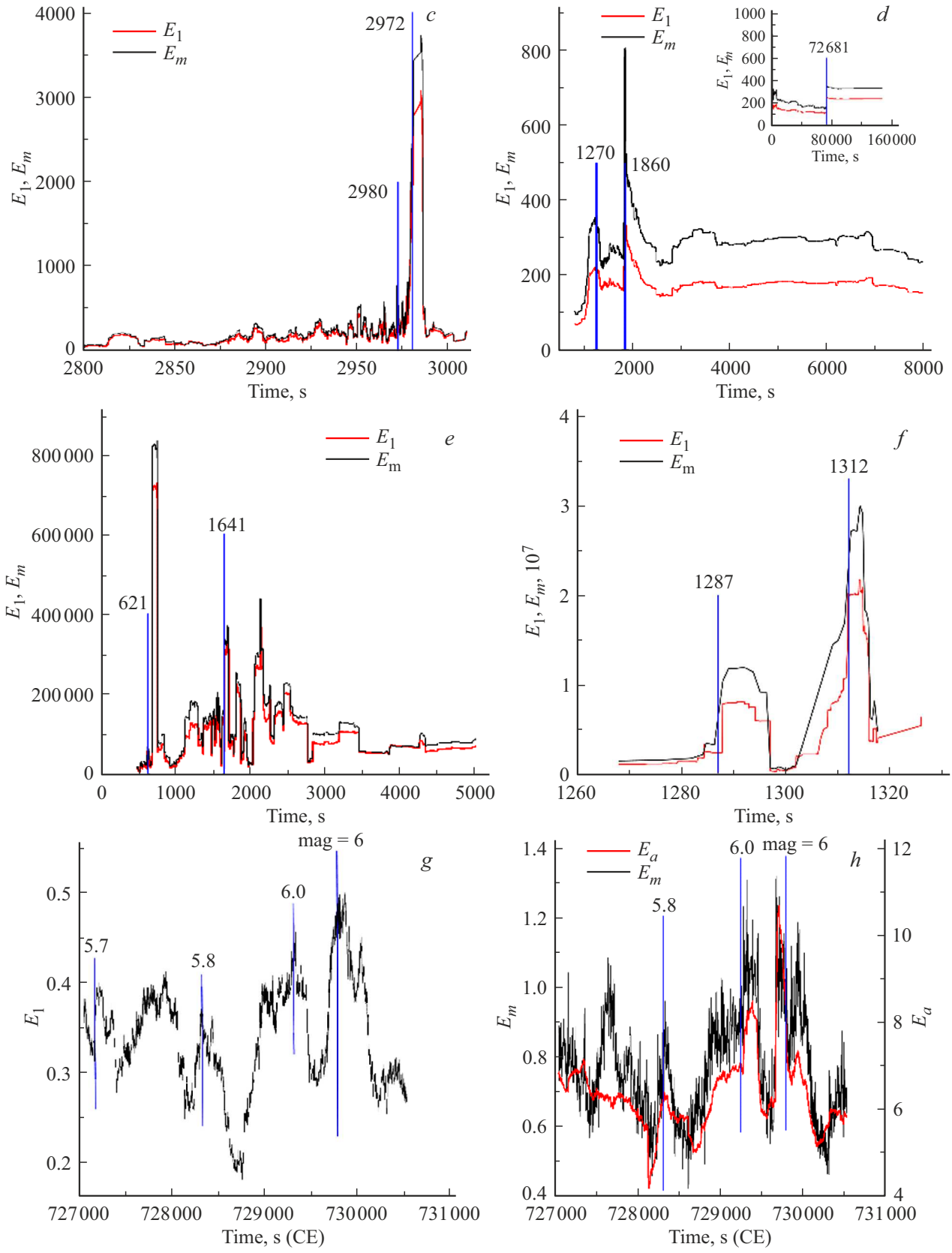


Рис. 2 (*продолжение*).

времени, в который величина корреляционной фрактальной размерности, рассчитанной ранее [16], существенно уменьшается. Это уменьшение, как видно из рис. 2, происходит раньше, чем величина E_m успевает существенно подрасти. На рис. 2, c–f вертикальными линиями с цифрами отмечены времена максимальных энергетических событий, произошедших в рассматриваемый отрезок времени. Видно, что каждому из них предшествует существенное увеличение величин E_m и $E(1)$. На рис. 2, g максимумы значений $E(1)$ совпадают во времени с временами крупных землетрясений в регионе. В то же время простое оконное среднее значение энергии E_a и среднее по масштабам E_m на рис. 2, h таким свойством не обладает. Можно также отметить, что основному максимуму на рис. 2, c–f предшествуют явно выбивающиеся из тренда предварительные максимумы, временные отсчеты которых также приведены на рисунке. Их появление может быть связано с тем, что тенденция к макроразрушению появляется раньше формирования основного максимума, но далее процесс не развивается, так как приток энергии, необходимый для продолжения этого процесса недостаточен. Для описания энергетического баланса в этом случае может быть использована описанная ниже модель.

4. Обсуждение результатов

Увеличение средней по масштабам энергии E_m, равно как и ее составляющих $E(a)$ перед высокоэнергетическим событием свидетельствует о подготовке крупномасштабного разрушения на различных масштабных уровнях (следует напомнить, что здесь речь не идет напрямую о пространственных масштабах, а о частотном диапазоне). Таким образом, значительные увеличения этих величин могут служить прогностическим признаком предстоящего высокоэнергетического события. Казалось бы, что простое оконное среднее также могло служить предвестником разрушения (рис. 3), но как следует из сравнения кривых на рис. 2, g и рис. 2, h, оно в меньшей степени обладает этим свойством. Так, времена максимумов зависимости величины $E(1)$ совпадают с временами крупных землетрясений, а времена максимумов E_a нет. Из этого следует, что частотно-временная локализация вейвлет-преобразования обладает улучшенными прогностическими свойствами высокоэнергетических событий, и события на низших временных масштабах (высокочастотные) играют существенную роль для прогноза разрушения.

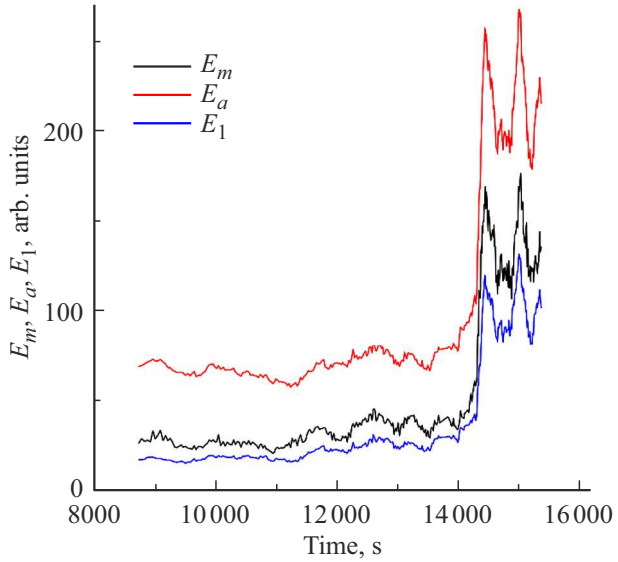


Рис. 3. Временные зависимости простых оконных средних значений энергии, усредненного глобального спектра энергии и энергии первого масштабного уровня для эксперимента AE42.

5. Модель энергетического баланса для описания акустической эмиссии в гетерогенном материале

Рассматриваемая неавтономная нелинейная модель изменения во времени энергии АЭ имеет следующий вид:

$$\frac{dE}{dt} = \alpha E\left(1 - \frac{E}{E_{\max}}\right) - \beta E\langle E\rangle_{[t-\tau_1,t-\tau_1/2]} + \gamma\langle E\rangle_{[t-\tau_2,t-\tau_2/2]}\left(1 - \frac{\langle E\rangle_{[t-\tau_2,t-\tau_2/2]}}{E_{\max}}\right) + v_0 \cdot t. \quad (5)$$

Первый член этого уравнения отражает логистическое накопление выделения энергии АЭ (быстрый начальный рост и дальнейшее замедление за счет исчерпания слабых мест — исходных концентраторов напряжения). Это исчерпание слабых мест приводит также к релаксации внутренних напряжений с характерным временем τ_1 и уменьшению вероятности новых разрывов, что описывается вторым членом уравнения. Учет усреднения за прошедший интервал означает память системы к произошедшим ранее разрывам. События, произошедшие „недавно“, около момента времени t, привели к релаксации напряжений и невозможности, вследствие этого новых акустических событий в этой области. Поэтому наиболее сильное подавление текущей активности происходит от событий, произошедших в середине периода „затишья“ τ_1. Так как материал обычно находится под действием внешних напряжений, то энергия в него продолжает поступать, происходит новое перераспределение внутренних напряжений, и возникают новые концентраторы (обычно на более крупных масштабах — макротрещины). Поэтому энерговыделение АЭ вновь увеличивается, что и описывает третий член уравнения. Время релаксации $\tau_2 > \tau_1$, так как предполагается, что разрушение перешло на более высокие масштабные уровни. Круглая скобка в предпоследнем члене означает ограничение того, что новые очаги активируются только, если система еще не достигла критической поврежденности. Последний член $v_0 \cdot t$ обеспечивает приток

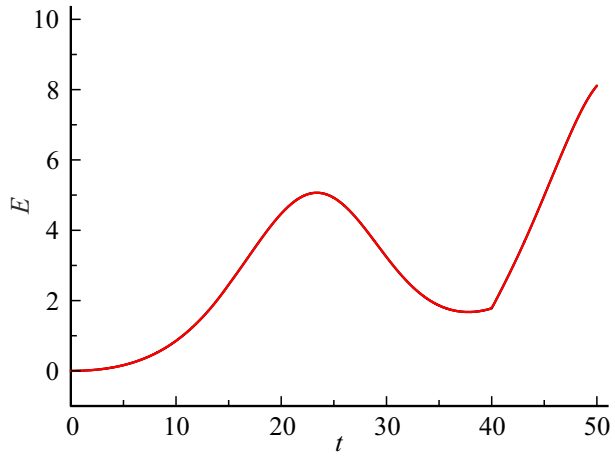


Рис. 4. Зависимость от времени энерговыделения АЭ, полученная как решение уравнения (5).

энергии из нагружающего устройства в предположении линейно зависящей от времени внешней силы.

Численное решение уравнения (5) приведено на рис. 4 для нулевого начального условия $E_0 = 0$ и следующих значений параметров: $\alpha = 0.15$, $\beta = 0.08$, $\gamma = 0.4$, $\tau_1 = 15$, $\tau_2 = 40$, $E_{\max} = 10$, $\upsilon_0 = 0.01$.

Видно, что решение на рис. 4 действительно описывает предварительный максимум, наблюдаемый в экспериментах на рис. 2, *c–f*. Однако нужно отметить, что в зависимости от значений параметров, входящих в (5), этих максимумов может быть несколько или не быть вообще. Поэтому, несмотря на то, что модель представляется разумной, она имеет чисто описательный характер и не может быть использована для выявления прогностических свойств разрушения материала. В создании модели принимала участие нейросеть DEEPSEEK. Следует отметить, что введение асимметричных запаздывающих интервалов позволяет перейти от простой регистрации АЭ к моделированию внутренней динамики повреждений в материале, что является более мощным инструментом для диагностики и прогнозирования. Такого рода модели могут быть использованы также для описания форшоков и афтершоков в земной коре.

6. Заключение

Таким образом, выявлено, что перед разрушением материалов или крупных акустических (сейсмических) событий происходит накопление энергии на различных временных масштабах, что может служить прогностическим признаком этих событий. Применение данного прогностического признака имеет преимущество перед фрактальными признаками, такими как параметр закона Гутенберга–Рихтера (b-value), корреляционная фрактальная размерность (d-value), изменение ширины мультифрактального спектра, так как его расчет не требует применения регрессии для расчета параметров и связанных с ней трудностей автоматического выбора диапазона масштабов, на которых эта регрессия производится. В то же время изменение d-value происходит раньше во времени. (рис. 2, *a, b*). Отмечено, что даже события на низших временных масштабах (высокочастотные) играют существенную роль для прогноза разрушения.

Также отмечено, что основному максимуму энергии в ряде случаев предшествуют явно выбивающиеся из тренда предварительные максимумы, и построена описывающая их кинетическая модель энерговыделения АЭ.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] M.A-B. Abdo. Structural Health Monitoring, History, Applications and Future. Open Science Publishers, NY, USA (2014). 115 p.
[2] Н.А. Семашко, В.И. Шпорт, Б.Н. Марьин. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении. Машиностроение, М. (2002). 239 с.
[3] Md.T. Khan. In: Structural Health Monitoring from Sensing to Processing / Eds. M.A. Wahab, Y.L. Zhou, N.M.M. Maia. Intechopen, L. UK (2018). P. 24–37.
[4] H. Kim, H. Melhem. Eng. Struct. **26**, 347 (2004).
[5] V.R. Skal's'kyi, O.M. Stankevych, I.S. Kuz'. Mater. Sci. **54**, *2*, 139 (2018).
[6] H.E. Stanley, L.A.N. Amaral, A.L. Goldberger, S. Havlin, P.Ch. Ivanov, C.-K. Peng. Physica A **270**, 309–324 (1999).
[7] Н.М. Астафьева. УФН **166**, *11*, 1145 (1996).
[8] В.П. Дьяконов. Вейвлеты. От теории к практике. Солон-Р, М. (2002). 448 с.
[9] S. Thurner, M.C. Feurstein, M.C. Teich. Phys. Rev. Lett. **80**, 1544 (1998).
[10] И.М. Дремин, В.И. Фурлетов, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло, В.Г. Терзиев. Способ диагностики работы двигателя, патент № 2154813 (20.08.2000).
[11] G.R. Lee, Ralf Gommers, F. Wasilewski, K. Wohlfahrt, A. O'Leary. J. Open Source Softw. **4**, *36*, 1237 (2019). https://doi.org/10.21105/joss.01237
[12] D.A. Lockner, J.D. Byerlee, V. Kuksenko, A. Ponomarev, A. Sidorin. Nature **350**, 39 (1991).
[13] Е.Е. Дамаскинская, В.Л. Гиляров, И.А. Пантелеев, Д.Р. Гафурова, Д.И. Фролов. ФТТ **60**, *9*, 1775 (2018).
[14] Е.Е. Дамаскинская, И.А. Пантелеев, Д.Р. Гафурова, Д.И. Фролов. ФТТ **60**, 1353 (2018).
[15] Е.Е. Дамаскинская, И.А. Пантелеев, Д.В. Корост, К.А. Дамаскинский. ФТТ **63**, *1*, 103 (2021).
[16] V.L. Hilarov. Modeling Simul. Mater. Sci. Eng. **6**, 337 (1998).

Редактор А.Н. Смирнов