

Оценка статистических параметров потока импульсов термически стимулированной акустической эмиссии в лабораторных экспериментах

Г. С. Индаков^{1,*}, П. А. Казначеев^{2†}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики Земли
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской Академии Наук
Россия, 123242, Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1
(Статья поступила 13.02.2021; Подписана в печать 16.04.2021)

Вулканические землетрясения являются опасным явлением природы, требующим серьезного изучения. Они связаны с процессами разрушения горных пород при заполнении вулканической камеры горячей магмой. В связи с этим, натурные и лабораторные исследования процесса термического разрушения горных пород применительно к вулканологической сейсмологии представляют определенный интерес. На сегодняшний день одним из важных вопросов по этой теме является характер режима акустической эмиссии при нагреве образцов горных пород. В данной работе проведен анализ лабораторных экспериментов по нагреву образцов гранитов и базальтов. Была реализована и отработана методика оценки активности термически стимулированной акустической эмиссии и наклона графика повторяемости (*b*-value) на всем этапе нагрева и на всем этапе охлаждения, а также в динамике в непересекающихся окнах по 200 событий. Оценка *b*-value выполнена методами линейной регрессии и максимального правдоподобия. Произведена систематизация экспериментов по типу активности акустической эмиссии для возможности сравнения результатов. Обнаружена закономерность: для образцов с высокой активностью акустической эмиссии *b*-value оказывается меньше. Динамика активности акустической эмиссии и изменения *b*-value в процессе нагрева не показывают связи друг с другом, а также не зависят от типа породы.

PACS: 62.20.Mk, 43.40.Le, 91.40.Zz, 93.85.-q

УДК: 539.4, 551.21

Ключевые слова: термически стимулированная акустическая эмиссия (ТАЭ), термически стимулированное разрушение горных пород, *b*-value, вулканические землетрясения.

ВВЕДЕНИЕ

Вулканические землетрясения являются опасным явлением природы, требующим серьезного изучения. Геофизические механизмы, обуславливающие сейсмическую активность в вулканических постройках, на сегодняшний день не до конца изучены. Вулканическая сейсмичность тесно связана с процессами трещинообразования, вызываемыми происходящими под вулканами движениями магмы. Немаловажной составляющей являются движения флюида в трещинах и магматических каналах, которые обуславливают возникновение низкочастотных сейсмических событий и вулканического дрожания. Для лучшего понимания этих процессов активно проводятся полевые и модельно-лабораторные исследования [1–3]. Одним из самых удобных и эффективных способов мониторинга разрушения горных пород в лабораторных условиях является регистрация акустической эмиссии. Акустической эмиссией (АЭ) называется излучение упругих волн твердым телом, в котором под влиянием внешних и внутренних факторов различной природы происходят изменения структуры материала [4].

Однако напряжения, приводящие к развитию трещин в породах, обусловлены не только давлением, но и температурой. Нагрев горных пород в естественных условиях происходит в результате выделения энергии при распаде радиоактивных элементов, контакта с магмой или с геотермальными системами. В лабораторных условиях термостимулированная акустическая эмиссия вызывается ростом и закрытием трещин, трением между берегами трещин, фазовыми переходами, испарением влаги, взрывами газожидких включений и проч. Вклады каждого из источников в результирующую АЭ существенно различаются и зависят от режимов нагрева, исходных характеристик, минерального состава, упругих, прочностных свойств материала, энергии генерируемых импульсов и др. [4]. Влияние температуры и давления на физические свойства горных пород исследовались, в частности, в работах [5–9]. Для анализа интенсивности процессов разрушения при одноосном сжатии образцов пород, предварительно подвергнутых нагреву, в работе [9] наряду с традиционными параметрами параметрами АЭ (количество, энергия и частота событий) использовалось значение *b*-value. Было показано, что с увеличением температуры, до которой предварительно были нагреты образцы, *b*-value также возрастает. Авторы [9] ограничиваются общими соображениями, что нагрев до более высокой температуры способствует образованию большего числа микротре-

*E-mail: indakov.gs16@physics.msu.ru

†E-mail: p_a_k@mail.ru

щин, что, впрочем, не объясняет их распределение по размерам и наблюдаемое b -value при последующем механическом нагружении.

В основе термического разрушения горных пород лежат два базовых механизма. Первый из них заключается в том, что минералы, слагающие породу, при увеличении температуры расширяются анизотропно, вызывая появление новых трещин. Кроме того, в составе горных пород обычно присутствуют различные минералы, имеющие разные значения коэффициента теплового расширения, что приводит к неравномерному расширению частей породы и ее растрескиванию. Второй механизм учитывает влияние температурного градиента, обуславливающего нарастание неравномерности термомеханических напряжений, которое приводит к развитию трещин. В работе [10] показано, что на некоторых этапах нагрева процесс развития микротрещин в исследуемых образцах обусловлен преимущественно температурой, а на некоторых — температурным градиентом. Результаты работы [11] позволяют подтвердить наличие обнаруженных ранее эффектов, связанных с термостимулированной АЭ, а также выявить новые: длительную АЭ после остывания образца и изменение интенсивности АЭ в зависимости от скорости нагрева, что может быть обусловлено нестационарностью микроскопического градиента температуры. При ступенчатом изменении мощности нагрева образца, средняя по его объему температура не может испытывать резких изменений, и АЭ связана, в основном, с температурным градиентом [12]. При скорости нагрева, не превышающей $10^\circ\text{C}/\text{мин}$, градиент температур не приводит к появлению напряжений, достаточных для образования трещин. В этом случае АЭ образующихся трещин обусловлена, в основном, анизотропией и различием коэффициентов теплового расширения входящих в состав горной породы минералов и характеризует, таким образом, индивидуальные свойства породы [4, 13].

В данной работе исследуется процесс термически стимулированного разрушения горных пород в лабораторных условиях на основе статистики импульсов акустической эмиссии. Анализ экспериментальных данных позволяет судить об интенсивности развития разрушений в исследуемых фрагментах породы с ростом температуры. Рассматриваются такие статистические параметры, как активность акустической эмиссии и параметр наклона графика повторяемости событий (b -value). Анализ данных экспериментов показал различный характер изменения активности акустической эмиссии и b -value со временем и в зависимости от температуры для разных образцов. С учетом этого проведена систематизация экспериментов для возможности сравнения результатов.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Был проведен анализ данных экспериментов с несколькими образцами. Образец — фрагмент поро-

ды, представляет собой прямой цилиндр высотой 6 см и диаметром 3 см. Базальт является материалом, характерным для вулканических построек, гранит — это порода, характерная для сейсмогенерирующих зон. По этой причине эксперименты с образцами гранита и базальта представляют наибольший интерес. Для анализа были выбраны данные 6 экспериментов с образцами гранитов и 5 экспериментов с образцами базальтов, давших наиболее представительную статистику. На рис. 1 для нескольких образцов даны фотографии самих образцов до нагрева, для нескольких образцов даны фотографии зерна, из которого они были взяты.

Образцы одной породы характеризовались следующими петрофизическими характеристиками: плотностью (граниты $2.55\text{--}2.70\text{ г/см}^3$, базальты $2.80\text{--}2.95\text{ г/см}^3$), пористостью (граниты $0.15\text{--}0.45\%$, базальты $1.5\text{--}3.5\%$), скоростями продольных (граниты $5.7\text{--}5.9\text{ км/с}$, базальты $5.8\text{--}5.9\text{ км/с}$) и поперечных (граниты $3.6\text{--}3.9\text{ км/с}$, базальты $3.4\text{--}3.5\text{ км/с}$) упругих волн.

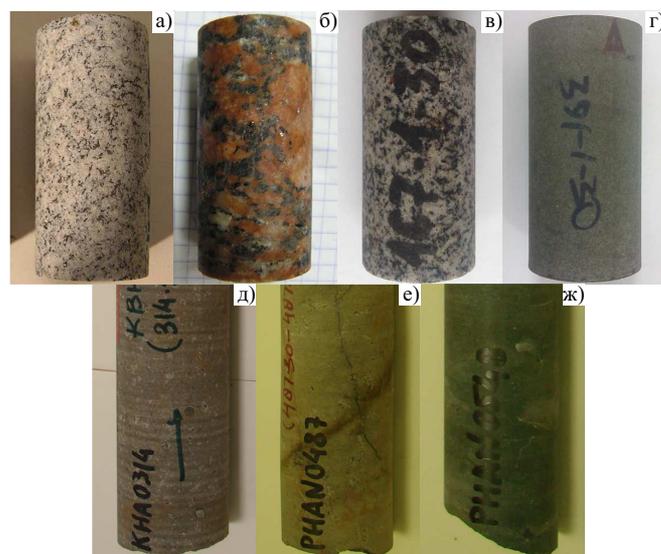


Рис. 1: Фотографии образцов: а — гранит 155-1-30, б — гранит 156-12Г, в — гранит 167-7-30, г — базальт 391-big. Фотографии зерна: д — базальт КНА0314-3, е — базальт PHAN0487-1, ж — гранит PHAN0548-4

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

3.1. Экспериментальная установка

Эксперименты по нагреву образцов проводились на установке, схема которой показана на рис. 2 и подробно описана в [14, 15].

Образец 1 устанавливается на подставку 2, чтобы он целиком находился в зоне наиболее ровного нагрева. Через прослойку индия 8 к торцу образца присоединяется волновод 3, на другом конце которого рас-

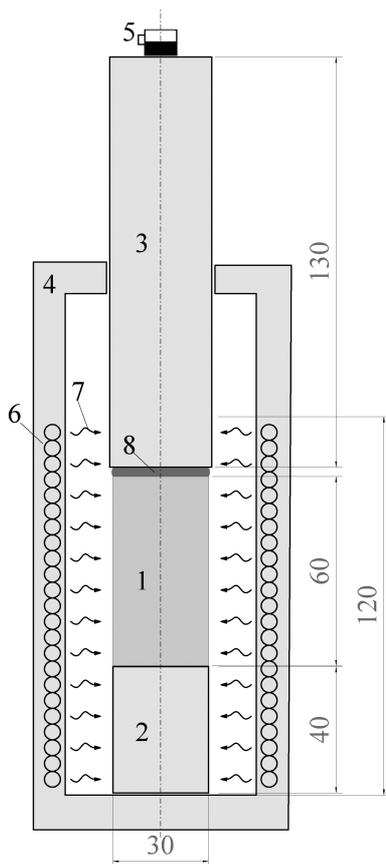


Рис. 2: Схема установки (разрез вдоль вертикальной оси): 1 — исследуемый цилиндрический образец горной породы; 2 — подставка; 3 — цилиндрический акустический волновод; 4 — корпус печи; 5 — датчик акустической эмиссии; 6 — нагревательный элемент; 7 — условное изображение теплового излучения; 8 — прослойка из индия. Размеры установки приведены в мм

положен датчик 5 импульсов термически стимулированной акустической эмиссии (ТАЭ). Датчик — пьезоэлектрический преобразователь производства Olympus Panametric с резонансной частотой 1 МГц. В рабочем диапазоне частот датчик ТАЭ фактически является велосиметром. Прослойка из индия необходима для улучшения контакта между торцом образца и волноводом и уменьшения потерь на прохождение акустического импульса. Датчик ТАЭ подключен к регистрирующей системе A-Line 32D, позволяющей определять параметры импульсов.

3.2. Оценка активности акустической эмиссии

Активность потока акустической эмиссии определяется как количество событий АЭ в единицу времени [16]. Был произведен расчет активности ТАЭ I в импульсах в секунду (имп./с) в окне по 200 событий, которое дает наиболее представительную активность.

В этом случае можно не только наблюдать разномащтабную активность и следить за ее общими изменениями в ходе эксперимента, но и отслеживать слабые вариации. Расчет активности I акустической эмиссии в окне производился по формуле:

$$I = \frac{H}{\Delta t}, \quad (1)$$

где H — число событий в окне, Δt — промежуток времени между первым и последним событиями в окне (в секундах).

До 200°C процессы разрушения идут с низкой интенсивностью. Помимо этого, прослойка из индия обеспечивает плотный и стабильный контакт образца с волноводом только после расплавления металла (около 156°C). Заполнение расплавленным индием зазора между волноводом и образцом и вызываемая этим кратковременная подвижка волновода обуславливают всплеск активности, не связанный с процессами в образце. С учетом этого особый интерес представляют 2 этапа: нагрев от 200°C до максимальной температуры и охлаждение от максимальной температуры до 200°C, когда все импульсы регистрировались как полезные и связанные с термическим разрушением. Оценка активности и статистических параметров ТАЭ производилась только для этих этапов.

3.3. Оценка статистических параметров акустической эмиссии

Процесс развития трещины сопровождается, как правило, коротким импульсом ТАЭ. Продолжительные сигналы несут информацию не только об основном импульсе, но и о его переотражениях. Чаще всего в сигнале есть одна полуволна с амплитудой, уверенно превышающей остальные. Предполагается [14], что основная энергия события акустической эмиссии E примерно пропорциональна квадрату данной амплитуды:

$$E \approx k \cdot (A_V)^2 \quad (2)$$

где E — основная энергия события акустической эмиссии (в джоулях), A_V — максимальная амплитуда импульса акустической эмиссии (в вольтах), k — некоторый коэффициент пропорциональности, учитывающий параметры датчика АЭ и особенности распространения импульса от микротрещины до датчика [14].

Аппаратура регистрирует амплитуду импульса в микровольтах (мкВ) — A_{uV} , которая затем программно пересчитывается в дБмкВ — децибелы относительно 1 мкВ [16]:

$$A_{dB} = 20 \cdot \log_{10} A_{uV} \quad (3)$$

где A_{dB} — амплитуда импульса акустической эмиссии, измеренная в дБмкВ, A_{uV} — она же, измеренная в мкВ. Во избежание регистрации шума в наших

экспериментах был задан порог регистрации 35 дБмкВ. Все импульсы ТАЭ с амплитудой меньше указанного порога не регистрировались.

В дальнейшем для взаимного преобразования величин нам потребуется связь между логарифмом энергии события в джоулях, и амплитудой импульса АЭ, измеренной в дБмкВ. Логарифмируя (2), можно записать:

$$\begin{aligned}\log_{10} E &\approx \log_{10} k + 2 \cdot \log_{10} A_V = \\ &= \log_{10} k + 2 \cdot \log_{10} (A_{uV} \cdot 10^{-6}) = \\ &= \log_{10} k - 12 + 2 \cdot \log_{10} A_{uV} = \\ &= \log_{10} k - 12 + \frac{1}{10} \cdot 20 \cdot \log_{10} A_{uV}.\end{aligned}$$

Преобразуя к дБмкВ с учетом (3), для связи энергии и амплитуды запишем:

$$\log_{10} E \approx c_1 + \frac{1}{10} A_{dB}, \quad (4)$$

где c_1 учитывает преобразование порядков единиц и методические особенности регистрации; c_1 не оказывает влияния на пропорциональность между логарифмом энергии и амплитудой импульса в дБмкВ.

По аналогии с законом Гутенберга–Рихтера график повторяемости событий, т.е. зависимость логарифма числа N событий акустической эмиссии в образце от энергии события E (в джоулях), может быть аппроксимирован законом [14]:

$$\log_{10} N = a - b \cdot \log_{10} E, \quad (5)$$

где N — число событий в интервале энергий $[\log_{10} E; \log_{10} E + d_E]$, d_E — ширина интервала энергий (на логарифмической шкале), a и b — параметры аппроксимации. Для нас важен параметр b , характеризующий наклон графика повторяемости событий по энергиям, называемый далее просто «b-value». В приведенном виде закон (5) описывает т.н. дифференциальный график повторяемости, далее он используется при демонстрации результатов экспериментов и для расчета b-value по методу линейной регрессии.

Используя (2) и (4), можно записать выражение для закона повторяемости импульсов по амплитудам, измеренным в вольтах и в дБмкВ соответственно:

$$\begin{aligned}\log_{10} N &= a - b \cdot \log_{10} E = a - b \cdot \log_{10} k + b \cdot 2 \cdot \log_{10} A_V = \\ &= a_{AV} - b_{AV} \cdot \log_{10} A_V, \quad (6)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\log_{10} N &= a - b \cdot \log_{10} E = a - b \cdot c_1 - b \cdot \frac{1}{10} A_{dB} = \\ &= a_{AdB} - b_{AdB} \cdot A_{dB}, \quad (7)\end{aligned}$$

где a_{AV} и b_{AV} , a_{AdB} и b_{AdB} — параметры аппроксимации закона повторяемости импульсов для амплитуд, измеренных в вольтах и в дБмкВ соответственно.

Для корректного сравнения натуральных данных (сейсмология) и данных экспериментов запишем вместе

выражения для связи энергий событий акустической эмиссии и амплитуд импульсов акустической эмиссии (4), энергий землетрясений и магнитуд поверхностных и объемных сейсмических волн [17], в тех единицах, которые являются наиболее употребительными при инструментальном анализе:

$$\log_{10} E \approx \log_{10} k + 2 \cdot \log_{10} A_V, \quad (8)$$

$$\log_{10} E \approx c_1 + \frac{1}{10} A_{dB}, \quad (9)$$

$$\log_{10} E_{EQ} \approx 4.8 + 1.5 \cdot M_S, \quad (10)$$

$$\log_{10} E_{EQ} \approx -1.2 + 2.4 \cdot m_b, \quad (11)$$

где E — энергия события акустической эмиссии (в джоулях); A_V и A_{dB} — амплитуда импульса акустической эмиссии, измеренная в вольтах и в дБмкВ, соответственно; E_{EQ} — энергия землетрясения (в джоулях); M_S и m_b — магнитуда поверхностных и объемных сейсмических волн, соответственно; k и c_1 — некоторые константы.

Запишем вместе законы повторяемости — событий акустической эмиссии по энергиям (4), импульсов акустической эмиссии по амплитудам (6)-(7), сейсмических событий по энергиям, поверхностных и объемных волн по магнитудам [17]:

$$\log_{10} N = a - b \cdot \log_{10} E, \quad (12)$$

$$\log_{10} N = a_{AV} - b_{AV} \cdot \log_{10} A_V, \quad (13)$$

$$\log_{10} N = a_{AdB} - b_{AdB} \cdot A_{dB}, \quad (14)$$

$$\log_{10} N_{EQ} = a_{EQ} - b_{EQ} \cdot \log_{10} E_{EQ}, \quad (15)$$

$$\log_{10} N_{EQ} = a_{Ms} - b_{Ms} \cdot M_S, \quad (16)$$

$$\log_{10} N_{EQ} = a_{mb} - b_{mb} \cdot m_b, \quad (17)$$

где параметры a и b аппроксимации закона повторяемости (с соответствующими индексами) определены для каждого из записанных законов по отдельности. Между собой параметры b связаны следующим образом, с учетом (6)-(7), (8)-(11) и (12)-(17):

$$b = \frac{1}{2} \cdot b_{AV}, \quad (18)$$

$$b = 10 \cdot b_{AdB}, \quad (19)$$

$$b_{EQ} = \frac{1}{1.5} \cdot b_{Ms}, \quad (20)$$

$$b_{EQ} = \frac{1}{2.4} \cdot b_{mb}. \quad (21)$$

Важно отметить, что сравнение результатов натуральных наблюдений и лабораторного эксперимента предполагает сравнение только b и b_{EQ} , поскольку только эти параметры аппроксимируют закон повторяемости на одинаковой шкале энергий событий, акустических или сейсмических, заданных в одних и тех же единицах измерения — джоулях.

Все приводимые далее значения b-value соответствуют b , определяемому по энергиям событий акустической эмиссии по (5) или (12), если не оговорено иное.

Оценка b-value производилась в двух вариантах — для целого этапа нагрева или охлаждения (среднее значение b-value за этап) и в скользящем окне (динамика изменения b-value). Для двух вариантов раздельно был выбран диапазон анализируемых амплитуд импульсов АЭ. На низких амплитудах возможна регистрация некоторых помех (шумов), что увеличивает число событий. В области больших амплитуд, наоборот, импульсов крайне мало и возможен дефицит количества зарегистрированных импульсов из-за того, что высокоамплитудный импульс может попасть в одно окно, и не попасть в другое. Поэтому для оценки среднего b-value за этап использовался диапазон амплитуд 36–56 дБ, а для оценки b-value в скользящем окне в 200 событий использовался диапазон амплитуд 36–46 дБ.

Расчет значения и погрешности b-value, среднего за этап и в динамике изменения, производился методом линейной регрессии с интервальной оценкой параметра (доверительный интервал 95%), определение параметров регрессии производилось методом наименьших квадратов.

Для расчета b-value, среднего за этап, также использовался метод максимального правдоподобия с оценкой представительной амплитуды по максимальной кривизне по [18], с учетом (19):

$$b = 10 \cdot \frac{\log_{10}(e)}{A_{dB} - (A_{dBc} - \frac{\Delta A_{dB}}{2})}, \quad (22)$$

где $\overline{A_{dB}}$ — средняя амплитуда для событий с амплитудой, большей A_{dBc} ; A_{dBc} — представительная амплитуда событий на графике повторяемости; ΔA_{dB} — ширина столбца амплитуд (ширина биннинга). Величина A_{dBc} определяется по [18] как значение амплитуды, при котором производная кумулятивного графика повторяемости максимальна. В реализованном алгоритме A_{dBc} определялась эквивалентным способом — как амплитуда столбца дифференциального графика повторяемости с максимальным числом событий.

Для оценки погрешности оценки b-value по методу максимального правдоподобия использовалась формула из [18, 26], с учетом (19):

$$\delta b = 2.3 \cdot b^2 \sqrt{\frac{1}{10^2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N (A_{dB}^{<i>} - \overline{A_{dB}})^2}{N(N-1)}}, \quad (23)$$

где N — количество столбцов амплитуд $A_{dB}^{<i>}$.

Пример распределения событий для одного из экспериментов (sBE1) на всем этапе нагрева и в окне в 200 событий в середине нагрева показан на рис. 3. Показано амплитудно-временное распределение событий (рис. 3, а, в) и график повторяемости событий по амплитудам (рис. 3, б, г).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В результате обработки данных экспериментов были получены графики временной и температурной зависимостей активности и b-value, а также были сделаны оценки средних за этап значений активности и b-value. Различные образцы показали разный характер активности ТАЭ. Было выделено четыре типа активности: слабая (меньше 0.1 имп./с), средняя (от 0.1 до 2 имп./с), сильная (от 2 до 10 имп./с), критическая (разрушившиеся образцы). Систематизация экспериментов по нагреву приведена в табл. 1.

Для разрушившихся образцов число зарегистрированных событий может быть меньше числа реально произошедших событий. Это связано с ухудшением контакта волновода с образцом из-за проседания образца в момент разрушения и уменьшением «наблюдаемого» объема образца после разрушения. Кроме того, процесс разрушения может вызывать образование большого числа трещин, способных развиваться за короткий промежуток времени (стягивание к макротрещине, см. обсуждение). Это приводит к появлению плотного потока акустических импульсов, который используемая аппаратура может не успевать регистрировать. В связи с этим разрушившиеся образцы были выделены в отдельный тип.

На рис. 4 приведен пример комплекта графиков, полученных для эксперимента с образцом базальта LAT0411.

Для каждого из экспериментов был произведен расчет среднего b-value на этапе нагрева и на этапе охлаждения, по методу линейной регрессии (ЛР) и методу максимального правдоподобия (ММП) с оценкой представительной магнитуды по максимальной кривизне. Погрешность оценивалась как погрешность косвенных измерений. На основе полученных оценок были построены гистограммы средних за этап значений b-value для обоих типов пород в зависимости от типа активности (рис. 5).

На графике для этапа нагрева (рис. 5, а) заметна тенденция — уменьшение b-value с изменением типа активности в последовательности средняя–сильная–критическая. Для этапа охлаждения такой тенденции не наблюдается, во всяком случае, для гранитов. Результаты, полученные по ММП, показывают схожую тенденцию уменьшения b-value с изменением типа активности от средней до критической для этапа нагрева. Для этапа охлаждения, опять же, нельзя утверждать об однозначной тенденции для обоих типов пород.

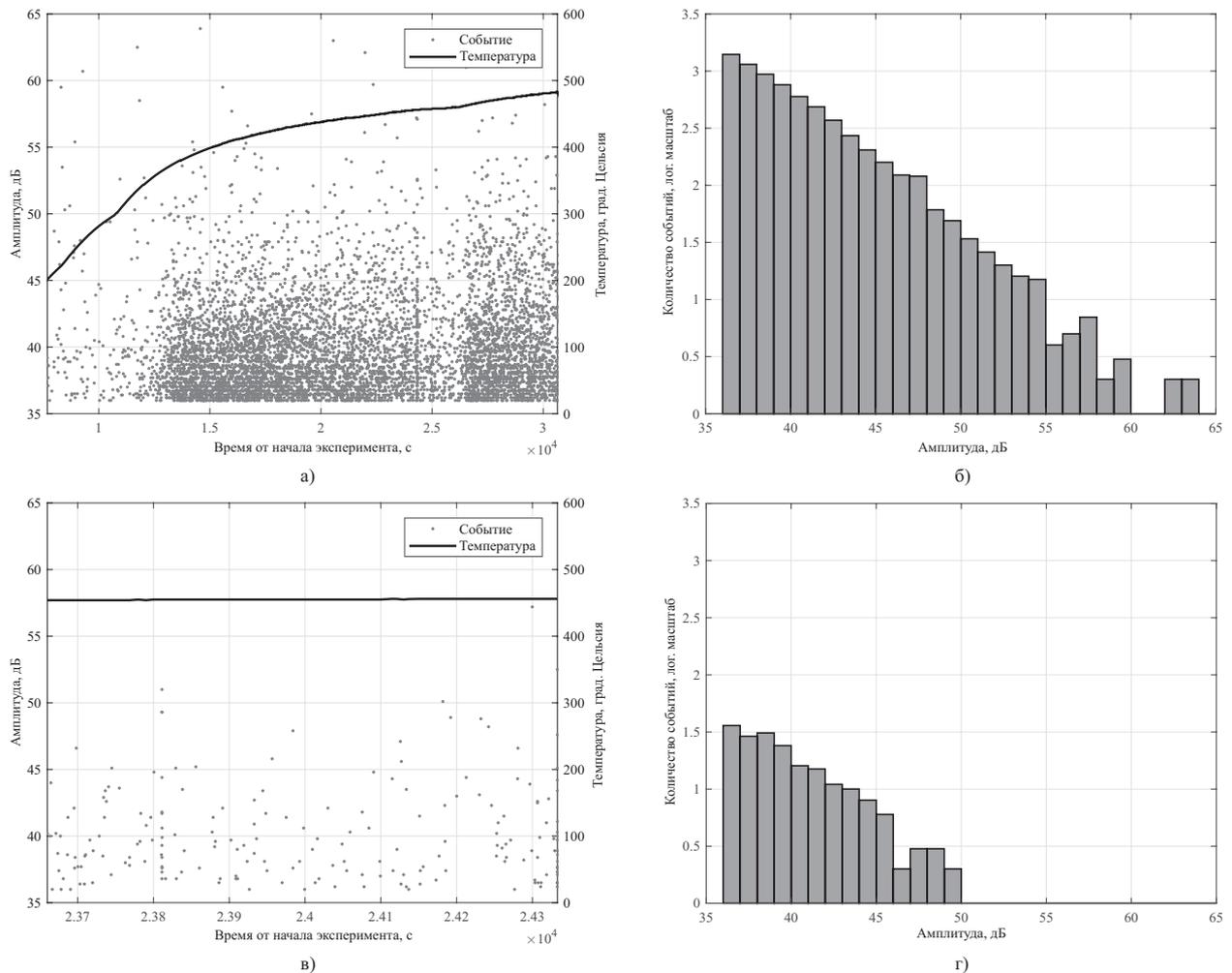


Рис. 3: Результаты эксперимента sBE1 (гранит 117-1-30) для всего этапа нагрева от 200°C до T_{max} (а, б) и для избранного окна в 200 событий в середине нагрева (в, г). Показаны амплитудно-временное распределение событий и график температуры (а, в) и график повторяемости событий по амплитудам (б, г)

Таблица I: Систематизация образцов по типу активности

Активность АЭ, имп./с	Гранит	Базальт
Слабая (менее 0.1)	PHAN0548-4	LAT0209-4-30
Средняя (от 0.1 до 2)	155-1-30 (№1а) 117-1-30	КНА0314-3 PHAN0487-1
Сильная (от 2 до 10)	167-7-30 (№7) 156-12Г	LAT0411
Критическая (разрушившиеся образцы)	393-1-3С	391-big

Также для всех экспериментов были качественно проанализированы зависимости активности ТАЭ и b-value от времени и от температуры (подобные рис. 4, б-г). Явных закономерностей обнаружено не было.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

5.1. Анализ результатов экспериментов

При нагреве образцов с разной активностью акустической эмиссии (за исключением случая слабой активности) прослеживается тенденция — чем боль-

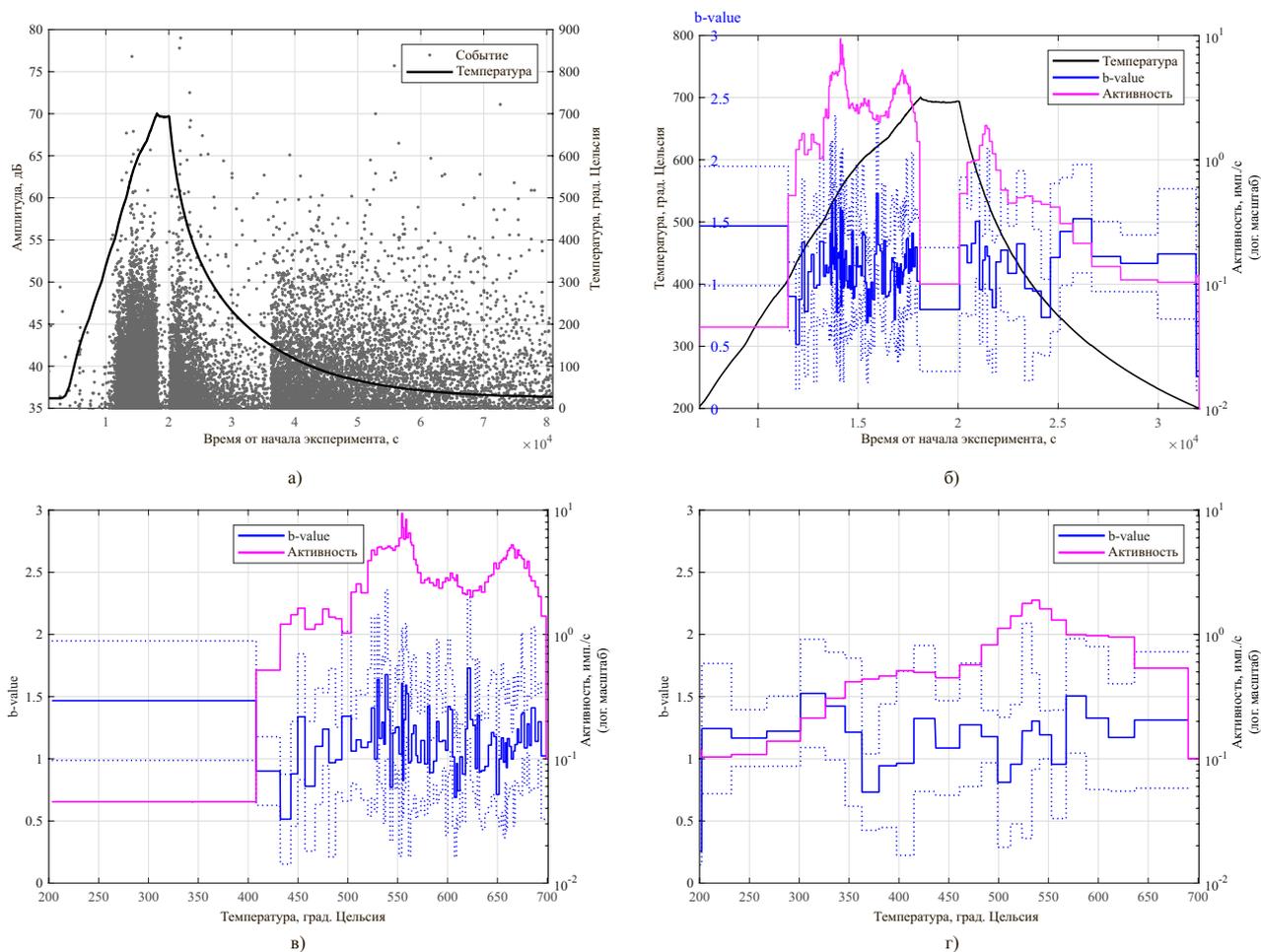


Рис. 4: Пример результатов обработки данных эксперимента (образец базальта LAT0411): *a* — амплитудно-временное распределение событий (точки) и зависимость температуры от времени (сплошная кривая); *б* — зависимость температуры (сплошная черная кривая), активности ТАЭ (сплошная розовая кривая) и *b*-value (сплошная синяя кривая) от времени; *в* — зависимость активности ТАЭ (сплошная розовая кривая) и *b*-value (сплошная синяя кривая) от температуры на этапе нагрева; *г* — зависимость активности ТАЭ (сплошная розовая кривая) и *b*-value (сплошная синяя кривая) от температуры на этапе охлаждения. Пунктирными синими линиями (*б*, *в*, *г*) показан доверительный интервал оценки *b*-value

ше активность ТАЭ для образца, тем меньше *b*-value (рис. 5, *a*, *в*). Для образцов со слабой активностью общее число зарегистрированных импульсов невелико, вследствие чего полученные оценки *b*-value оказались статистически непредставительными и не учитывались при анализе.

По величине *b*-value незаметно существенной разницы по породам — гранитам и базальтам. Есть некоторое превышение *b*-value для базальтов по сравнению с *b*-value для гранитов, но выборка образцов невелика для однозначного суждения. В целом, разные породы с одинаковым типом активности имеют сопоставимые значения *b*-value. Это может свидетельствовать о том, что характер развития трещин при термически стимулированном разрушении слабо зависит от типа породы и определяется другими параметрами, характеризующими образец (в частности, петрофизическими характеристиками,

включениями минералов и размерами зерен), а также особенностями методики термического воздействия.

Для образцов с одинаковым характером активности, зависимость активности АЭ и *b*-value от температуры в большинстве случаев оказывается схожей. В виду небольшого числа наблюдающихся отличий в температурной динамике *b*-value, нельзя однозначно заключить, что они связаны с типом породы. Зависимость *b*-value от температуры для гранитов и базальтов с одинаковым типом активности может быть похожей, но может и значительно отличаться. Ход динамики *b*-value и активности АЭ не обнаруживает заметной зависимости от типа активности. Таким образом, качественный анализ динамики активности АЭ и *b*-value для различных образцов, включая разрушившиеся, не позволяет в настоящей работе выявить явные отличия между исследуемыми образцами ни по типу породы, ни по типу активности.

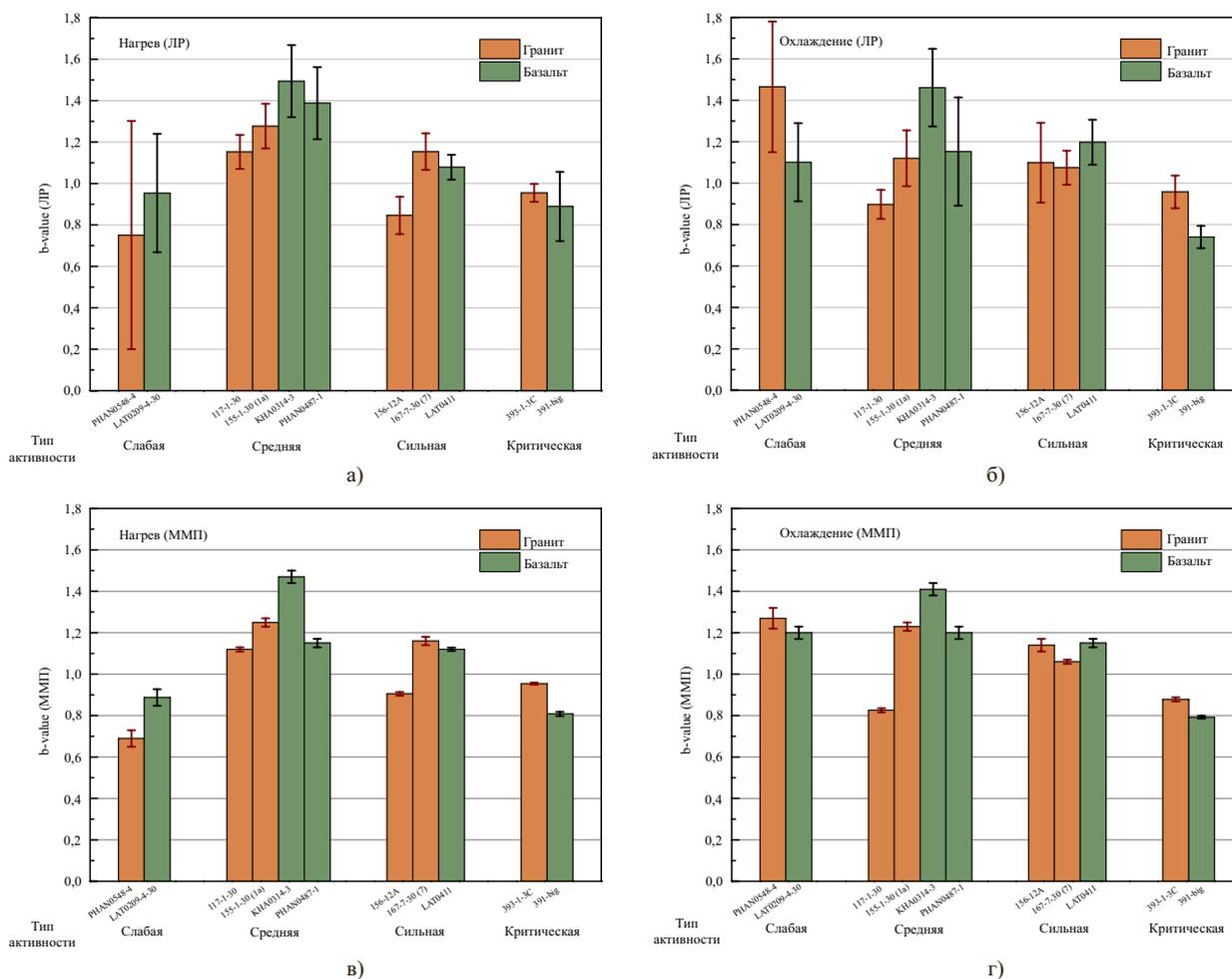


Рис. 5: Гистограммы среднего за этапы нагрева (а, в) и охлаждения (б, г) значений b-value, рассчитанного методом ЛР — линейной регрессии (а, б) и методом ММП — максимального правдоподобия (в, г), для всех экспериментов с группировкой по типам активности

5.2. Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования

Уменьшение b-value с ростом активности на этапе нагрева можно интерпретировать с позиции концепции слияния и роста трещин, известной как модель лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ). В основе этой модели лежат явления взаимодействия полей напряжений трещин и локализации процесса трещинообразования, которые не зависят существенным образом от масштаба рассматриваемой области. Образование макротрещины в рамках модели ЛНТ протекает в несколько последовательных этапов. Сначала происходит накопление микротрещин в некотором объеме до достижения критической концентрации, после чего начинается их слияние и образование пространственно-временных сгущений трещин — кластеров. При этом развитие трещин, находящихся в плоскости трещины большего размера, ускоряется, что приводит к слиянию трещин, а развитие прочих

(неблагоприятно расположенных) трещин замедляется. Последний этап характеризуется стягиванием процессов трещинообразования к поверхности будущей макротрещины (макроразрыва) [19–21].

Модель ЛНТ была разработана прежде всего для механического одноосного нагружения. В отличие от него, при термическом воздействии в образце горной породы не возникает глобального поля напряжений с одним преобладающим компонентом тензора напряжений, так как отсутствуют приложенные внешние силы. Возникающие термомеханические напряжения связаны с расширением и уменьшением объема как отдельных зерен, так и образца в целом. Для нескольких произвольно взятых трещин, находящихся в одной плоскости близко друг другу, поля напряжений могут отличаться. По этой причине в случае термического воздействия на образец нет выделенной плоскости, к которой могли бы стягиваться трещины с последующим образованием магистрального разрыва.

С другой стороны, в масштабах зерен и групп (кластеров) зерен возможно наличие несимметричных зе-

рен (например, эллипсоидной формы) и преобладающей ориентации границ зерен. Согласно общим представлениям о развитии термомеханического разрушения [4, 22], микротрещины образуются вдоль границ зерен (межзерновые трещины) и внутри зерен (внутризерновые трещины). В такой ситуации возможно наличие преобладающего направления для развития микротрещин. Кроме того, в масштабах зерен и кластеров зерен может возникнуть ситуация, когда при некотором распределении зерен поле напряжений будет условно однородным с преобладающим компонентом тензора напряжений. В таких случаях может быть применима модель ЛНТ.

Количество событий АЭ определяется числом трещин, развивающихся в образце. В проведенных экспериментах использовались образцы пород одинакового размера, поэтому в образцах, показавших большую активность АЭ, концентрация трещин выше и, следовательно, выше вероятность их слияния и образования более крупных трещин. Для крупных трещин, число которых за весь эксперимент порядка единиц и десятков, более вероятен дефицит, т.к. некоторые из этих трещин могли не реализоваться (в процессе развития термомеханических напряжений не был преодолен порог активации трещины) и не сгенерировать импульс акустической эмиссии. Поэтому для образцов с малой активностью АЭ может наблюдаться дефицит высокоамплитудных событий АЭ, что приводит к большему b -value («заваливание» графика повторяемости в области больших амплитуд) по сравнению с образцами с большой активностью АЭ.

Согласно основным представлениям теории разрушения, для разрушения характерна фрактальность структуры, т.е. самоподобие иерархии образующихся трещин [21, 23]. Фрактальность обнаруживается как для микротрещин в масштабах зерен, так и для сейсмогенных разрывов. В то же время фрактальность структуры не является статической картиной распределения трещин, а наблюдается во временной динамике. При термическом воздействии с ростом температуры растут термомеханические напряжения и начинают развиваться все более крупные трещины с большим порогом активации. Т.е. сначала образуются трещины малого, а затем — все большего размеров, и количество высокоамплитудных событий АЭ растет. При использовании модели ЛНТ для случая термического разрушения в определенный момент образование новых трещин малого размера будет затруднено, т.к. все большая часть из них реализуется на ранних этапах разрушения. Если в образце есть преимущественное направление развития трещин (обусловленное структурой породы — формой, ориентацией зерен и т.п.), то ситуация усугубится, т.к. развитие неблагоприятно расположенных трещин малого размера будет подавлено сильнее, чем в случае породы с однородной структурой. Таким образом, из соображений фрактальности структуры развивающегося разрушения и из применения модели ЛНТ следует, что чем сильнее развивается разру-

шение (и больше активность АЭ), тем больше дефицит низкоамплитудных событий АЭ и меньше b -value, что соответствует наблюдаемой тенденции.

Использование модели ЛНТ может также объяснить, почему b -value разрушившихся образцов укладывается в наблюдаемую тенденцию. Развитие макротрещины, разрушающей такой образец, идет следующим образом. Если структура породы существенно неоднородная — например, присутствует очень крупное зерно с длинной границей — то вероятность слияния мелких трещин в макротрещину вдоль границы выше. Для этой макротрещины реализуется модель ЛНТ, переход развития разрушений с мелких масштабов на более крупные произойдет раньше, и реализуется больше крупных микротрещин. Соответственно, будет зарегистрировано больше высокоамплитудных событий, и b -value будет меньше, чем для неразрушившихся образцов.

В соответствии с описанным сценарием развития термического разрушения в горной породе по модели ЛНТ величина b -value может уменьшаться с изменением типа активности в последовательности средняя–сильная–критическая, что подтверждается в настоящей работе.

5.3. Сопоставление с результатами других авторов

В опубликованных работах практически нет информации об оценках b -value непосредственно во время нагрева. Прежде всего, это связано с методической сложностью оценки точной энергии события АЭ (использование одного или двух датчиков АЭ вместо системы датчиков для локации). Несколько подробнее этот вопрос рассмотрен в [14]. Поэтому можно сравнивать b -value с результатами экспериментов, где исследуются образцы, подвергавшиеся термическому воздействию [9], и, в меньшей степени, с данными лабораторных экспериментов по механическому нагружению и данными природных (сейсмологических) наблюдений.

В наших экспериментах мы наблюдали значения b -value в диапазоне 0.8-1.4. Эта оценка близка к результатам экспериментов по механическому нагружению в целом [2], и, в частности, по нагружению образцов пород, подвергнутых предварительному термическому нагреву [9].

В работе [2] приведены результаты лабораторных экспериментов при одноосном механическом нагружении в разных режимах (с плавным и с резким ступенчатым нагружением, при приложении и без приложения всестороннего давления и др.). Для анализа статистики событий АЭ в [2] используется условный энергетический класс событий АЭ, учитывающий квадратичную зависимость энергии события АЭ от амплитуды импульса, поэтому b -value можно сравнивать напрямую. Значения b -value составили 0.45-0.95, что меньше полученных в наших экспериментах. Это можно объяснить как большей активностью АЭ при ме-

ханическом разрушении (до сотен и тысяч импульсов в секунду), так большим развитием трещин на всех масштабных уровнях, в результате чего дефицит высокоамплитудных событий отсутствует или мал.

При анализе динамики b -value авторы [2] отмечают, что в рамках одного эксперимента (особенно на заключительной стадии нагружения при нагрузках более 60% от разрушающей) на стадии роста активности АЭ происходит увеличение b -value, а на стадии спада активности АЭ — уменьшение b -value. Это в целом совпадает с нашими результатами, если исходить из общих соображений теории ЛНТ.

Авторы [9] приводят оценку b -value в диапазоне 0.6–2.3. К сожалению, авторы не указывают точную методику расчета b -value. Для аппроксимации закона повторяемости авторы [9] приводят закон Гутенберга-Рихтера с магнитудами, но не указывают, каким образом амплитуды импульсов АЭ связываются с условными магнитудами по закону Гутенберга-Рихтера. В одной из связанных через цитирование работ [24] прямо указано, что b -value определяется для зависимости вида:

$$\log_{10} N = a_{\text{Rao}} - b_{\text{Rao}} \cdot \frac{A_{\text{AEpulse}}[\text{dBmkV}]}{20}$$

т.е. b_{Rao} аналогично b_{AV} по (13) в нашем рассмотрении. По этой причине приведенные авторами значения были пересчитаны к b по (18), и получившийся диапазон вариаций b -value тогда составляет 0.3-1.15. Это также меньше полученных нами данных.

При сравнении разных экспериментов авторы [9] наблюдают увеличение b -value и некоторое уменьшение средней активности АЭ при механическом нагружении образцов мрамора при увеличении температуры их предварительного нагрева. Они связывают увеличение b -value с тем, что при большей температуре нагрева было сформировано больше крупных микротрещин. Наличие этих трещин ослабляет образец и приводит к меньшей активности АЭ в процессе механического нагружения. На наш взгляд, результаты [9] соотносятся с нашими результатами. Большее b -value при механическом нагружении после нагрева в [9] говорит о дефиците высокоамплитудных событий. Эти события могли реализоваться в процессе нагрева и, соответственно, обеспечить меньшее b -value при нагреве, что наблюдается в наших экспериментах. Отметим, что статистика АЭ в процессе нагрева авторами [9] не отслеживалась.

В работе [2] отдельно исследуются результаты натурального эксперимента — изменение параметров переходных сейсмических режимов при нагнетании воды в скважину, расположенную в т.н. сухих горячих породах (натурный эксперимент в Сульц-су-Форе). При этом активизируется разрушение пород, что приводит к увеличению проницаемости и повышению эффективности последующего отбора геотермальной энергии. Регистрировались сейсмические события, расход воды и превышение давления воды в скважине над пласто-

вым давлением. Эксперимент проводился сериями, со ступенчатым увеличением давления. По данным авторов [2], с увеличением давления от ступеньки к ступеньке наблюдается уменьшение b -value и одновременный рост количества событий (т.е. активности сейсмического процесса). Это укладывается в рамки модели ЛНТ — с развитием разрушения количество трещин и их размер увеличиваются [2]. Несмотря на то, что эти данные относятся к одному эксперименту, они также косвенно подтверждают наши данные — b -value уменьшается с ростом активности.

Отдельно можно предположить еще один механизм инициации разрушений в [2] — термический. В процессе нагнетания воды увеличивается зона обводненности около ствола скважины, и, соответственно, зона охлаждения пород. Измеренная температура на забое скважины составляет около 160°C, в породе вдали от скважины ожидаются большие температуры, закачиваемая вода имела температуру окружающей среды на поверхности (около 20°C). Если предположить наличие термического механизма инициации разрушений, то данный натуральный эксперимент может быть сопоставлен с нашим лабораторным экспериментом на этапе охлаждения. По нашим данным (рис. 5, в, г), для охлаждения образцов базальта может наблюдаться схожая тенденция — меньшее b -value при большой активности в образце. В натурном эксперименте [2] слагающие породы — граниты, поэтому для них тоже можно предположить похожую тенденцию в лабораторных экспериментах. Но отметим, что термический механизм никак не может являться определяющим для инициации разрушения пород в экспериментах, подобным [2]. Многочисленные данные натуральных и лабораторных экспериментов говорят об успешной инициации разрушения при инъекции флюида той же температуры, что и температура породы (например, [25]).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лабораторное моделирование процессов термически стимулированного разрушения горных пород является важным направлением исследования процессов, сопровождающих, в частности, вулканические землетрясения. В данной работе исследовалось развитие термически стимулированных разрушений при нагреве образцов гранитов и базальтов на основе регистрации акустической эмиссии (АЭ). Образцы нагревались в специально разработанной установке до температур 700°C (максимально) со скоростью около 2-3°C/мин. В соответствии с методикой обработки данных экспериментов была рассчитана активность АЭ и получены оценки b -value как для целых этапов нагрева (охлаждения) образца, так и во временной динамике в непересекающихся окнах в 200 событий. Сравнение временной и температурной динамики b -value и активности АЭ показало, что различия между породами и образцами с одинаковым типом активности незначительны

для выявления характерных особенностей. Но для интегральных показателей обнаруживается тенденция — среднее значение b -value на всем этапе нагрева меньше для образцов, показавших большую активность акустической эмиссии. Этот результат согласуется с моделью лавинно-неустойчивого трещинообразования, применимой по отношению к экспериментам по термо-стимулированному разрушению горных пород в масштабах зерен и кластеров зерен. Полученная оценка b -value сопоставима с оценкой в работах других авторов, где также косвенно подтверждается обнаруженная тенденция уменьшения b -value с ростом активности. Основная проблема при анализе данных экспериментов по термически стимулированному разрушению горных пород заключается в том, что событий мало и од-

ни и те же породы могут давать различную статистику. Вследствие этого необходимо накапливать данные по различным экспериментам и использовать дополнительные способы оценки статистических параметров.

Благодарности

Авторы выражают благодарность профессору В. Б. Смирнову за обсуждение темы, внимание к работе и ценные замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания ИФЗ РАН.

-
- [1] Benson P. M., Vinciguerra S., Meredith P. G., Young R. P. // *Science*. 2008. **322**. P. 249.
- [2] Смирнов В. Б., Пономарев А. В., Бернар П., Патонин А. В. // *Физ. Земли*. 2010. № 2. С. 17.
- [3] Burlini L., Di Toro G., Meredith P. // *Geophys. Res. Lett.* 2009. **36**. Pap. L08305. P. 1.
- [4] Шкуратник В. Л., Новиков Е. А., Вознесенский А. С., Винников В. А. Термо-стимулированная акустическая эмиссия в геоматериалах. Горная книга. М., 2015.
- [5] Jones C., Keaney G., Meredith P. G., Murrell S. A. F. // *Phys. Chem. Earth*. 1997. **22**, N 1-2. P. 13.
- [6] Burlini L., Vinciguerra S., Di Toro G., De Natale G., Meredith P., Burg J.-P. // *Geology*. 2007. **35**, N 2. P. 183.
- [7] Vinciguerra S., Trovato C., Meredith P. G., Benson P. M. // *Intern. Journ. of Rock Mech. & Min. Sciences*. 2005. **42**. P. 900.
- [8] Xu X. L., Zhang Z.-Z. // *Adv. in Mater. Science and Engin.* 2018. Art. ID 8149870. P. 1.
- [9] Peng J., Rong G., Yao M. et al. // *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2019. **78**. P. 4479.
- [10] Yong C., Wang C.-Y. // *Geophys. Res. Lett.* 1980. **7**, N 12. P. 1089.
- [11] Казначеев П. А., Майбук З.-Ю. Я., Пономарев А. В., Смирнов В. Б., Бондаренко Н. Б. // Триггерные эффекты в геосистемах: мат. IV Всеросс. конф. ГЕОС. М., 2017. С. 163.
- [12] Казначеев П. А., Майбук З.-Ю. Я., Пономарев А. В. // *ГИАБ*. 2018. № 5. С. 5.
- [13] Новиков Е. А. // *ГИАБ*. 2012. № 5. С. 394.
- [14] Казначеев П. А., Майбук З.-Ю. Я., Пономарев А. В., Смирнов В. Б., Бондаренко Н. Б. // *Геофиз. исслед.* 2019. **20**, № 1. С. 52.
- [15] Казначеев П. А., Майбук З.-Ю. Я., Пономарев А. В. // *Сейсм. приб.* 2019. **55**, № 1. С. 29.
- [16] Pollock A. *Acoustic Emission Inspection // Metals Handbook, vol. 17, Nondestructive Evaluation and Quality Control*. ASM International, 1989.
- [17] Касахара К. *Механика землетрясений*. Мир. М., 1985.
- [18] Mignan A., Woessner J. Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs. ETH. Zurich, 2012.
- [19] Соболев Г. А. // *Физ. Земли*. 2019. № 1. С. 166.
- [20] Соболев Г. А. *Основы прогноза землетрясений*. Наука. М., 1993.
- [21] Соболев Г. А., Пономарев А. В. *Физика землетрясений и предвестники*. Наука. М., 2003.
- [22] Nasseri M. H. B., Schubnel A., Benson P. M., Young R. P. // *Pure and Appl. Geophys.* 2009. **166**. P. 927.
- [23] Смирнов В. Б., Завьялов А. Д. // *Вулканол. и сейсмол.* 1996. № 4. С. 75.
- [24] Rao M. V. M. S., Lakshmi K. J. P. // *Curr. Sci.* 2005. **89**, N 9. P. 1577.
- [25] Соболев Г. А., Пономарев А. В., Майбук Ю. Я., Закржевская Н. А., Понятовская В. И., Соболев Д. Г., Хромов А. А., Цывинская Ю. В. // *Физ. Земли*. 2010. № 2. С. 50.
- [26] Shi Y., Bolt B. A. // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1982. **72**, N 5. P. 1677.

Estimation of the statistical parameters of a pulse stream of thermally stimulated acoustic emission in laboratory experiments

G.S. Indakov^{1,a}, P.A. Kaznacheev^{2,b}

¹Department of the Earth Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia

²Schmidt Institute of the Physics of the Earth, Russian Academy of Science
Moscow, 123242, Russia

E-mail: ^aindakov.gs16@physics.msu.ru, ^bp_a_k@mail.ru

Volcanic earthquakes are known to be a dangerous natural phenomenon, which needs a thorough investigation. They imply the thermal destruction of rocks when magma fills the volcanic chamber. Field and laboratory studies of the process of the thermal destruction of rocks in relation to volcanological seismology are of great interest. Today one of the undeveloped problems in this area is the analysis of the statistics of acoustic emission events. In this work, we analyzed the laboratory experiments of heating of the specimens of granites and basalts. We implemented and exercised the methodology of the estimation of thermally stimulated acoustic emission activity and b-value on the stage of heating and on the stage of cooling, for whole stages and for evolution inside stages. b-value was estimated by linear regression and maximum likelihood methods. We also systemized experiments in accordance to the type of thermally stimulated acoustic emission activity in order to compare the results. Regularity was noticed: b-value for specimens with high acoustic emission activity is lower. The general behavior of acoustic emission activity and variations of b-value for the specimens under investigation do not show the correlation with each other and do not depend on the type of rock.

PACS: 62.20.Mk, 43.40.Le, 91.40.Zz, 93.85.-q

Keywords: thermally stimulated acoustic emission (TAE), thermally stimulated destruction of rocks, b-value, volcanic earthquakes.

Received 13 February 2021.

Сведения об авторах

1. Индаков Глеб Сергеевич — студент; e-mail: indakov.gs16@physics.msu.ru.
2. Казначеев Павел Александрович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (499) 254-23-40, e-mail: p_a_k@mail.ru.