

Динамика акустической эмиссии при фильтрации флюида в нагруженном образце горной породы

Н. Б. Бондаренко^{1,2*}

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 РАН
Россия, 123242, Москва, Большая Грузинская, д. 10, стр. 1
(Статья поступила 15.05.2018; Подписана в печать 22.06.2018)

В настоящей работе по результатам лабораторного исследования процессов разрушения на образцах горных пород было обнаружено значительное влияние фильтрации флюида на наклон графика повторяемости и акустическую активность. Обнаружена миграция источников акустической эмиссии от грани, через которую проводилась инъекция воды вдоль оси образца. Подтверждено различие скоростей диффузии флюида в сухом и насыщенном образцах. Для экспериментов с фильтрацией флюида в образцах низкопроницаемых пород предложена методика термостимулирования трещинообразования, позволяющая почти на порядок увеличить пористость и проницаемость образцов горной породы.

PACS: 91.60.Np, 91.30.-f УДК: 550.34.

Ключевые слова: фильтрационные процессы, акустическая эмиссия, лабораторное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Флюиды встречаются практически повсюду в земной коре и играют большую роль во многих процессах. Например, флюидный механизм возникновения невулканических роев рассматривается для объяснения данных о сейсмических роях в Коринфском заливе [1]. Инъекция жидкости в геотермальных полях и при захоронении жидких отходов скважины вызывают микроземлетрясения [2]. Также фильтрационные процессы и вызываемые ими разрушения являются определяющими при гидроразрыве пласта. Кроме того, влияние флюида на геологическую среду — одна из причин наведенной сейсмичности [3].

Но в естественных условиях крайне затруднительно определить величины многих факторов, контролирующих процесс разрушения. Например, давление флюида, проницаемость массива горных пород, степень их насыщения флюидом, напряжения, действующие в среде, и другие параметры. Лабораторное моделирование позволяет точно измерять и контролировать изменение всех этих параметров.

Таким образом, цель настоящей работы заключалась в исследовании динамики акустической эмиссии при фильтрации флюида для более глубокого понимания процесса подготовки и развития землетрясений, инициированных воздействием флюида.

1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Эксперимент проводился на электрогидравлической испытательной установке высокого давления Inova ZUZ 1000, установленной в Геофизической обсерватории «Борок». Система позволяет проводить испытание образцов горных пород в условиях псевдотрехосного сжатия. При помощи управляющего компьютера задается необходимый режим работы и производится сбор информации с датчиков акустической эмиссии (АЭ), силы и перемещения. На рис. 1 представлены схемы расположения экспериментального образца и пьезоэлектрических датчиков, используемых для регистрации волновых форм сигналов АЭ [4].

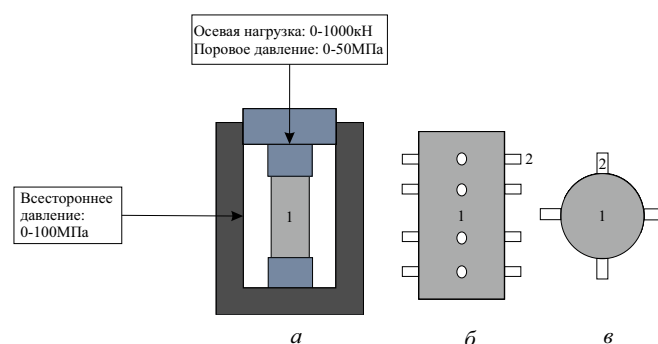


Рис. 1: а — схема размещения образца внутри камеры высокого давления, б — схема размещения ультразвуковых датчиков на образце вид сбоку, в — схема размещения ультразвуковых датчиков на образце вид сверху. 1 — экспериментальный образец, 2 — 16 пьезоэлектрических датчиков

*E-mail: nb.bondarenko@physics.msu.ru

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ И ТЕРМОСТИМУЛИРОВАНИЕ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ

Одним из важных факторов при лабораторном моделировании является время, которое занимает один эксперимент. В случае фильтрационных процессов это время определяется проницаемостью образца. Для первого опыта был использован песчаник Береа с высокими фильтрационно-емкостными свойствами, которые представлены в таблице I.

Таблица I: Результаты измерения пористости и проницаемости песчаника Береа

Длина, мм	Диаметр, мм	Пористость, %	Проницаемость, мДа
59.8	30.4	18.1	252

Результаты эксперимента на песчанике будут представлены в следующем разделе, а пока остановимся на образцах для последующих экспериментов. Так как сейсмичность в основном наблюдается в изверженных породах, то кроме эксперимента на песчанике были выполнены аналогичные испытания на образцах изверженных горных пород — на гранитах. Проницаемость гранитов значительно меньше, чем песчаников (примерно на 5 порядков). Это значит, что эксперимент займет длительное время. С другой стороны, в естественных условиях фильтрация чаще всего происходит по трещинам, а не через матрицу горной породы, поэтому было принято решение увеличить трещиноватость образцов за счет термостимулирования. В гранитах содержится значительное количество кварца, при нагревании которого происходит фазовый переход из низкотемпературной модификации (альфа-кварц) в высокотемпературную (бета-кварц). В работе [6] указано на трещинообразование при фазовых переходах составляющих минералов и о значительном влиянии дефектов кристаллических решеток (дислокации, примеси, флюиды) на фазовое состояние макро- и нанокристаллов кварца. Фазовый переход начинается около дефектов строения и по мере повышения температуры распространяется на все менее искаженные области кристаллов. Это приводит к появлению механических напряжений в областях кристалла, не затронутых фазовым переходом, и может вызвать его разрушение в отсутствие приложенных извне напряжений [7], что и было использовано для увеличения фильтрационно-емкостных свойств. В табл. II представлено изменение пористости и проницаемости после нагревания.

Из табл. II можно видеть, что термостимулирование трещинообразования позволило увеличить проницаемость и пористость образцов почти на порядок. В работах [8] и [9] авторами использовался метод термостиму-

лирования для увеличения проницаемости гранитных образцов, нагрев до 850 °С позволил им увеличить проницаемость на 3 порядка. В целом, в данной работе получен схожий результат. Различие в конечной проницаемости после термостимулирования может быть объяснено различными скоростями нагрева и охлаждения в данной работе и работах [8] и [9].

3. ЭКСПЕРИМЕНТ НА ПЕСЧАНИКЕ

Цель эксперимента — зарегистрировать движение источников АЭ после инъекции воды в сухой нагруженный образец. На рис. 2,б показано распределение источников АЭ. Можно увидеть, что изначально источники сконцентрированы в верхней части образца, а со временем опускаются вниз.

Более наглядно миграцию «облака» источников АЭ можно наблюдать на графике 3. Источники АЭ (следовательно и микроразрушения) на разных расстояниях от грани инъекции флюида возникают не в один момент, что можно связать с распространением фронта флюида. То есть разрушения происходят только в той области, в которую уже проник флюид. Таким образом, формируется фронт разрушения (на графике 3 зависимость положения этого фронта от времени показано красной линией). В результате разрушений происходит релаксация внутренних напряжений, и спустя некоторое время источники АЭ перестают возникать в области, в которую проник флюид. В результате образуется фронт релаксации (на графике 3 показан голубой линией).

Похожее явление можно наблюдать в естественных условиях на масштабе сотни метров—первые километры. На рис. 4 показано распределение микроземлетрясений в зависимости от времени после инъекции флюида в скважину в геотермальной области Soultz-sous-Forets [2]. Здесь также формируются фронты разрушения и релаксации [10].

Закон Гутенберга-Рихтера для магнитуд записывается в виде:

$$\lg N = a - bM, \quad (1)$$

где N — количество событий с магнитудой M , a — сейсмическая активность, b — наклон графика повторяемости. Таким образом, параметры a и b являются одними из основных характеристиками сейсмического режима, поэтому они были рассчитаны для анализа экспериментальных данных. Акустическая активность рассчитывалась как отношение количества событий АЭ, произошедших за интервал времени, к продолжительности этого интервала. Методика расчета наклона графика повторяемости представлена в работе [11].

Из рис. 5 видно, что инъекция флюида вызывает противофазные изменения наклона графика повторяемости и акустической активности: после инъекции

Таблица II: Изменение проницаемости и пористости в результате термостимуляции

№ образца,	T_{max} , °C,	Длина, мм,	Диаметр, мм,	Пористость, %		Проницаемость, мДа	
				до термост.	после термост.	до термост.	после термост.
1	710	60	30	0.1	2.98	0.005	0.014
2 ₁	470	15	30	0.1	1.7	0.005	0.014
2 ₂	710	15	30	0.1	2.94	0.005	0.05
3	470	13	30	0.05	1.23	0.02	0.26

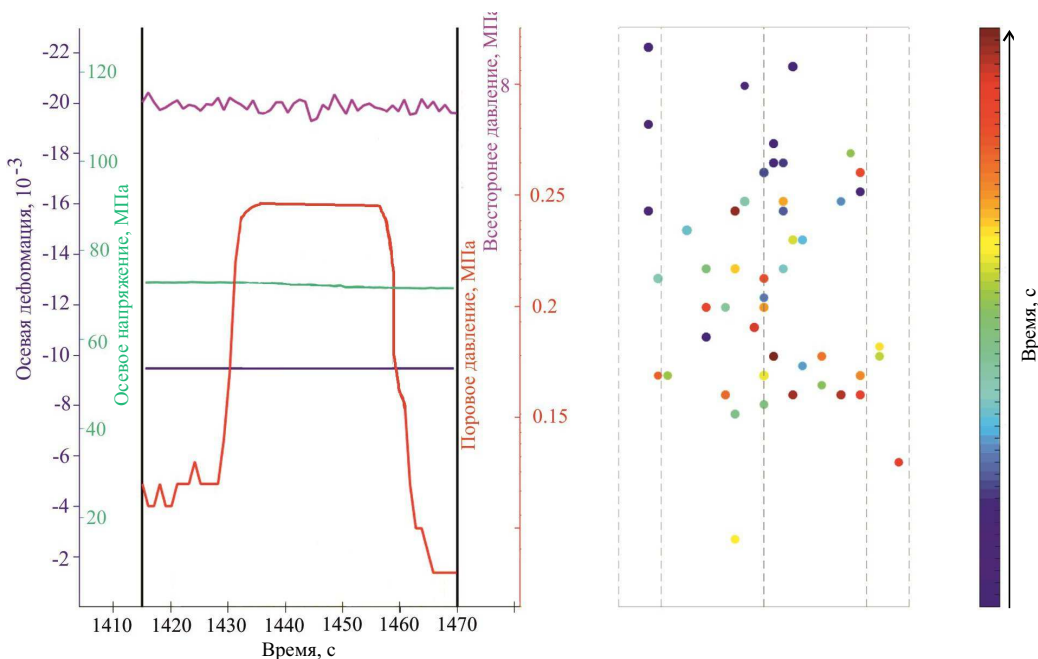


Рис. 2: а — зависимость основных параметров от времени, б — распределение источников АЭ вдоль вертикальной оси образца, штрихами изображен образец (вид сбоку), цветом показан порядок возникновения источников по времени

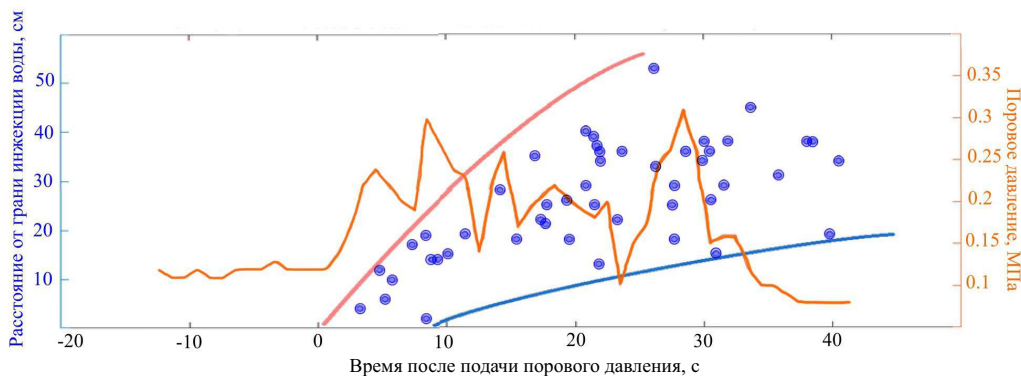


Рис. 3: Изменение вертикальной координаты источников АЭ со временем

флюида происходит уменьшение наклона графика повторяемости и увеличение акустической активности. Аналогичное поведение отмечается в работе [12].

4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ГРАНИТАХ

После эксперимента на песчанике были проведены опыты со ступенчатым увеличением порового давления на гранитах. Целью данного этапа было исследование

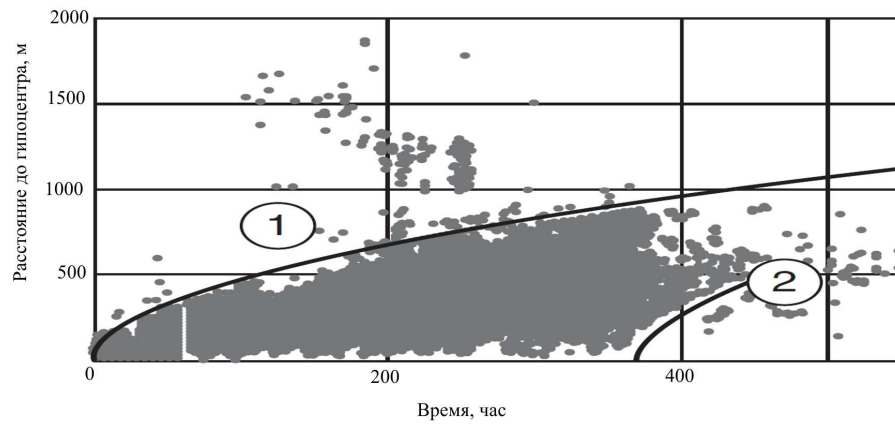


Рис. 4: Пространственное распределение микроземлетрясений в зависимости от времени. Расстояние отсчитывается от скважины [2]

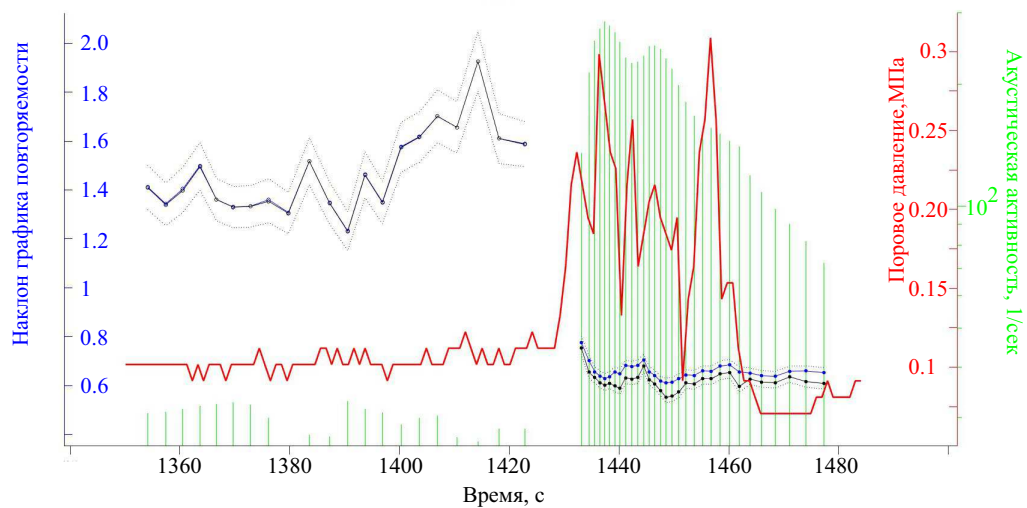


Рис. 5: Зависимость наклона графика повторяемости и активности АЭ от времени. Черным цветом — оценка снизу наклона графика повторяемости, синим — оценка сверху наклона графика повторяемости

задержки максимума АЭ для сухого и насыщенного флюидом образца. На рис. 6,б, 7,б отражена значительная разница во времени между инъекцией флюида и максимумом АЭ. Это объясняется различием коэффициента диффузии порового давления и коэффициента диффузии жидкости. Кроме разницы коэффициента диффузии, на задержку максимума АЭ влияет и величина изменения порового давления: чем больший градиент давления будет приложен, тем быстрее наступит максимум АЭ. В рамках закона Дарси коэффициент диффузии жидкости при обводнении или диффузии давления воды в обводненной среде определяется проницаемостью k , вязкостью жидкости η и скачком давления ΔP [5].

$$D = \frac{k\Delta P}{\eta}$$

Соответственно, чтобы исключить из рассмотрения зависимость от скачка давления, необходимо пересчитать все задержки к одинаковому изменению порового давления. Это можно сделать, если разделить время задержки на ΔP и умножить на величину изменения порового давления, к которой мы хотим привести. Все задержки, которые представлены на рис. 6,б, 7,б, приведены к ступеньке порового давления в 1 МПа.

Таким образом, в проведенных экспериментах на гранитах задержка инициации разрушения при распространении флюида в сухой среде оказалась в несколько раз больше, чем при распространении фронта порового давления в насыщенной среде. Это может говорить о том, что в натуральных условиях время до землетрясением, вызванного проникновением флюида, может существенно меняться (в зависимости от степени насыщенности среды флюидом).

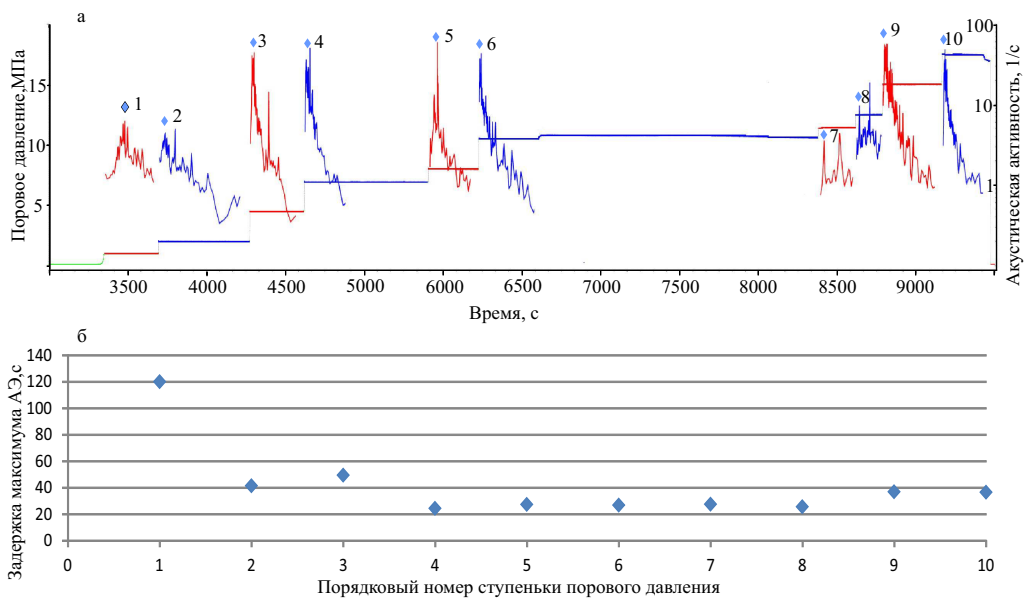


Рис. 6: а — Эксперимент со ступенчатым изменением порового давления на граните №1, б — задержка максимума АЭ после ступенчатого увеличения порового давления

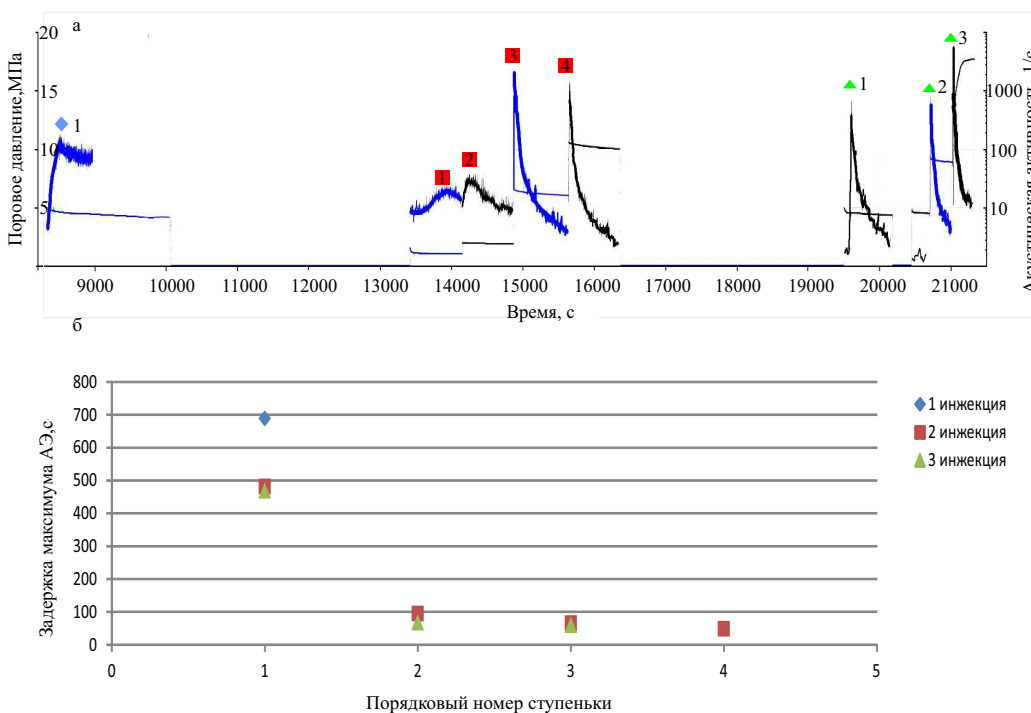


Рис. 7: а — Эксперимент со ступенчатым изменением порового давления на граните №2, б — задержка максимума АЭ после ступенчатого увеличения порового давления

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- Обводнение образца, находящегося в напряженно-деформированном состоянии,

инициирует развитие разрушения горной породы.

- Разрушение развивается вместе с проникновением фронта обводнения: «облако» источников акустической эмиссии мигрирует от грани, через которую проводилась инъекция воды, вдоль оси образца; формируются фронты разрушения и релаксации.

- Инжекция флюида вызывает уменьшение наклона графика повторяемости и увеличение активности акустической эмиссии.
- Задержка инициации разрушения при распространении флюида в сухой среде и распространении фронта порового давления в насыщенной среде может отличаться в несколько раз.

Благодарности

Автор выражает большую признательность Пономареву А.В. и Смирнову В.Б. за обсуждение ра-

боты и научное руководство. Автор также благодарит А. В. Патонина, И. В. Фокина, З.-Ю. Я. Майбука и П. А. Казначеева за возможность участвовать в экспериментальном процессе, ценные рекомендации и обсуждения.

Работа выполнена в рамках госзадания (№ гос. регистрации 0144-2014-0096) «Физика переходных и триггерных процессов в сейсмичности: лабораторное моделирование, полевые наблюдения, петрофизический анализ».

-
- [1] Bernard P., Lyon-Caen H., Briole P., Deschamps A., Boudin F., Makropoulos K., Papadimitriou P., Lemeille F., Patai G., Billiris H. et al. *Tectonophysics*. 2006. № 426. P. 7.
 - [2] Shapiro S.A. *Fluid-Induced Seismicity*. Cambridge university press, 2015.
 - [3] Михайлов В. О., Арора К., Пономарев А. В., Шринагеш Д., Смирнов В. Б., Чадда Р. *Физика Земли*. 2017. № 4. С. 28.
 - [4] Патонин А. В., Пономарев А. В., Смирнов В. Б. Аппаратно-программный лабораторный комплекс для решения задач физики разрушения горных пород.
 - [5] Yeh T-Ch.J., Khaleel R., Carroll K. C. *Flow through heterogeneous geologic media*. Cambridge university press, 2015.
 - [6] Соболев Г. А., Пономарев А. В., Никитин А. Н., Балагуров А. М., Васин Р. Н. *Физика Земли*. 2004. № 10. С. 5.
 - [7] Соболев Г. А., Веттегренъ В. И., Киреевкова С. М., Кулик В. Б., Мамалимов Р. И., Морозов Ю. А., Смольская А. И., Щербаков И. П. *Нанокристаллы в горных породах*. М.: ГЕОС, 2016.
 - [8] Nasser M.H.B., Schubnel A., Benson P.M., Young R.P. *Pure and Applied Geophysics*. 2009. **166**. P. 927.
 - [9] Faoro I., Vinciguerra S., Marone C., Elsworth D., Schubnel A. *Geophys. Res. Lett.* 2009. **40**. P. 2590.
 - [10] Смирнов В. Б., Пономарев А. В., Бернар П., Патонин А. В. *Физика Земли*. 2010. № 2. С. 26.
 - [11] Потанина М. Г., Смирнов В. Б., Бернар П. *Физика Земли*. 2011. № 7. С. 54.
 - [12] Потанина М. Г., Смирнов В. Б., Пономарев А. В., Бернар П., Любушин А. А., Шозиёв Ш. П. *Физика Земли*. 2015. № 2. С. 126.

Dynamics of fluid-triggered acoustic emission in loaded rock samples

N. B. Bondarenko^{1,2,a}

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

²*The Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Moscow, 123242, Russia*

E-mail: ^anb.bondarenko@physics.msu.ru

In this study, a significant effect of fluid injection on the b-value and acoustic activity was found from the results of a laboratory study of the destruction processes caused by filtration processes. The migration of sources of acoustic emission from the side through which water was injected along the sample axis was detected. The difference in the rates of fluid diffusion into dry and saturated samples was confirmed. The used method of thermal stimulation of cracking allowed to increase the porosity and permeability of rock samples by almost an order of magnitude.

PACS: 91.60.Np, 91.30.-f

Keywords: filtration processes, acoustic emission, laboratory modeling.

Received 15 May 2018.

Сведения об авторе

Бондаренко Никита Борисович — бакалавр; e-mail: nb.bondarenko@physics.msu.ru.
