

ИНИЦИАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ФЛЮИДАМИ РАЗНОЙ ВЯЗКОСТИ

© 2022 г. Т. И. Карцева², В. Б. Смирнов^{1, 2, *}, А. В. Патонин³, Д. С. Сергеев²,
Н. М. Шихова³, А. В. Пономарев², С. М. Строганова², В. О. Михайлов^{1, 2}

¹Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

³Геофизическая обсерватория “Борок” ИФЗ РАН, г. Борок, Россия

*E-mail: vs60@mail.ru

Поступила в редакцию 02.02.2022 г.

После доработки 09.02.2022 г.

Принята к публикации 16.02.2022 г.

В лабораторных условиях выявлены закономерности режима акустической эмиссии (АЭ) при инициации разрушения в образцах горных пород флюидами различной вязкости. Проведена серия экспериментов с образцами песчаников и гранитов, пористость которых отличалась на порядок, с флюидами, вязкость которых изменялась в пределах двух порядков. Рассмотрены эффекты внедрения флюида в сухие образцы и повышения порового давления в насыщенных образцах. Поровое давление изменялось как резкими ступенями, так и плавными циклами нарастания–убывания. При инъекции флюидов в сухие образцы задержка активизации АЭ соответствует времени распространения фронта флюида, рассчитанному в рамках модели поршневого вытеснения флюидом воздуха в поровом пространстве. При инициации разрушения скачками порового давления флюида в насыщенных образцах задержка отклика оказалась существенно больше, чем дают расчеты по модели линейной пьезопроводности с постоянным коэффициентом гидравлической диффузии, и значительно меньше, чем время распространения фронта флюида в сухом образце. При плавных изменениях порового давления в насыщенных образцах выявлены характерные изменения режима АЭ: минимальные значения наклона графика повторяемости приходятся на интервалы максимумов акустического отклика, максимальные – на фазы нарастания и спада порового давления. Экспериментальные результаты, полученные на разнопористых материалах и разновязких флюидах, могут быть полезны при анализе натурных данных как в районах техногенной сейсмичности, связанной с водохранилищами и закачкой флюидов в скважины, так и при интерпретации особенностей сейсмического режима тектонической и вулканической активности в зонах субдукции.

Ключевые слова: разрушение горных пород, разновязкие флюиды, акустическая активность, наклон графика повторяемости.

DOI: 10.31857/S0002333722040056

ВВЕДЕНИЕ

Из опубликованных экспериментов по разрушению горных пород, производимых закачкой жидкостей разной вязкости, большинство направлено на исследование возможностей повышения качества методов нефтеотдачи пластов, таких, например, как гидроразрыв пласта (ГРП) или метод повышения нефтеотдачи вытеснением углеводородов фронтом закачанной в пласт воды [David et al., 2015; Ishida et al., 2004; Cornelio et al., 2020]. При этом внимание в основном обращается на проснение механики образования разломов под действием разновязких флюидов и на тип получающихся разломов. В качестве жидкостей с различной вязкостью могут использоваться вода,

нефть, масла с разными химическими свойствами, гели, глицерин.

В работе [David et al., 2015] исследовался характер разрушений при закачке воды и специального масла (*fluorinert oil*), вязкость которого в 24 раза больше, чем у воды. Предпосылками для этой работы была проблема взаимодействия разных флюидов с породой и влияние этого взаимодействия на проседание месторождений при активной выработке и использовании методов увеличения нефтеотдачи с помощью закачки воды в нефтенасыщенный пласт. Проводились два типа экспериментов. В критически нагруженные образцы песчаника закачивались масло или вода. В другом эксперименте поровое пространство образца заполнялось маслом, далее он подвергал-

ся нагрузке до околокритических значений и затем в него закачивалась вода. Исследования показали, что вода оказывала наиболее разрушительное действие во всех экспериментах. Авторы связали это с большим смачиванием у воды, чем у масла. В работе [Ishida et al., 2004] также поднимается вопрос о разном характере разрушений от воды и от масла в применении к гидроразрыву пород. Для метода ГРП основной задачей является увеличить проницаемость пласта для лучшего притока углеводородов. Эффективнее в этом случае будут разрывы пласта с образованием большего количества трещин отрыва, нежели сдвиговых разрывов. Эксперименты на граните с водой и маслом с вязкостью в 80 раз большей, чем у воды, показали, что более вероятным образование трещин отрыва оказывается при использовании масла.

В работе [Cornelio et al., 2020] рассмотрен вопрос о влиянии вязкости флюидов, закачиваемых в пласт, на активацию разломов. Это важно для проблемы техногенной сейсмичности, появляющейся при применении методов увеличения нефтеотдачи месторождений вышеперечисленными способами или при захоронении жидких или газобразных отходов, для которой фактор давления флюида обычно исследовался в первую очередь. В экспериментах на гранитах авторы использовали две сильно различающиеся по вязкости жидкости – воду и глицерин с вязкостью на 3 порядка выше, чем у воды. Основным выводом данной работы оказалось то, что вязкость не влияет на начало реактивации разлома, но определяет тип деформации.

Для получения более широкого ряда вязкостей помимо воды и масла используют водные растворы глицерина [Segur, Oberstar, 1951], воздух или азот. Диапазон вязкостей такого ряда жидкостей варьируется в пределах пяти порядков, что позволяет, к примеру, исследовать в лабораторном эксперименте ряд вулканических процессов, обусловленных движениями флюидов от газов до вязких андезитовых магм. В работе [Clarke et al., 2019] была проведена серия экспериментов на предварительно растресканных осевыми нагрузками образцах гранитов с закачкой азота, воды, растворов глицерина с процентной долей глицерина 60, 85 и 100%. Интерес в данной работе представляла способность флюидов разной вязкости инициировать разрушения, то есть подсчитывалось общее количество зарегистрированных событий. Также исследовался частотный состав регистрируемых акустических сигналов, что важно для понимания вулканических и геотермальных процессов, демонстрирующих сигналы различного частотного состава. По результатам экспериментов выяснилось, что высоковязкие флюиды инициируют меньше событий акустической эмиссии, сигналы более низкочастотны, возникают через большее время от закачки.

В работе [Смирнов и др., 2022] экспериментальные исследования применялись для выяснения особенностей сейсмического режима наведенной сейсмичности. В этой работе на основе данных каталога землетрясений в области наведенной сейсмичности Койна–Варна в Западной Индии за всю историю сейсмологических наблюдений в этом районе были проанализированы сезонные вариации параметров сейсмического режима, связанные с годовыми колебаниями уровня воды в водохранилищах. Были выявлены локальные максимумы сейсмической активности, отвечающие известным механизмам немедленного и задержанного отклика резервуарной сейсмичности и закономерные изменения наклона графика повторяемости землетрясений с минимумами, приходящимися на интервалы максимумов активности, что характерно для развития разрушения по сценарию ЛНТ (лавино-неустойчивого трещиннообразования). Максимумы наклона графика повторяемости не удалось четко соотнести с фазами изменения активности. Они были отнесены авторами работы [Смирнов и др., 2022] к фазам нарастания и спада уровня воды. Для выяснения этой идеи в работе [Смирнов и др., 2022] был рассмотрен пилотный эксперимент по пилообразному изменению порового давления воды в предварительно критически нагруженном образце гранита, отобранного с глубины 548 м из скважины Phansavale (КВН05) [Khanna et al., 2020] в рамках программы глубокого бурения в области наведенной сейсмичности Койна–Варна в Западной Индии [Gupta, 2017]. В лабораторном эксперименте характер изменения давления в цикле нарастания–убывания имитировал сезонные колебания уровня воды в водохранилищах. Был проведен анализ вариаций параметров акустического режима: акустической активности и наклона графика повторяемости. В двух сериях эксперимента, состоящих из циклов увеличения–уменьшения порового давления, были выявлены характерные вариации параметров, схожие с обнаруженными в натурной сейсмичности в области Койна–Варна: с минимумом наклона графика повторяемости, приходящимся на максимум активности, и с максимумами, приходящимися на фазы подъема и спада порового давления.

В эксперименте задавалось изменение порового давления вне связи его с двумя известными механизмами повышения порового давления в природных условиях: вследствие сжатия каркаса породы во всем объеме или в результате распространения порового давления от поверхности в сейсмогенную область. В работе [Смирнов и др., 2022] отмечалось, что выявленные в цикле увеличения–уменьшения порового давления изменения акустического режима можно соотносить как с мгновенным, так и с задержанным откликом

сейсмического режима в натуральных условиях. Но для задержанного отклика нужно учитывать его запаздывание относительно инициирующего увеличения давления воды на дно водохранилища, обусловленного диффузией в земную кору воды (при заполнении водохранилища) или порового давления (при эксплуатации водохранилища).

Результаты лабораторного исследования задержки процесса разрушения при флюидной инициации изложены в работе [Смирнов и др., 2020]. Результаты экспериментов по инициации разрушения горных пород инъекцией воды в сухие образцы показали, что задержка акустического отклика (отражающего задержку процесса разрушения) относительно его инициации инъекцией воды с поверхности сухого образца определяется скоростью распространения фронта обводнения. Для описания движения фронта обводнения и увеличения порового давления была предложена модель поршневого вытеснения воздуха водой, которая показала хорошее согласие с экспериментальными данными. В работе [Смирнов и др., 2020] также было отмечено, что для тех же образцов задержка акустического отклика при инициации разрушения увеличением давления воды на “входе” в водонасыщенный образец оказалась в разы меньше, чем в случае обводнения сухого образца.

Настоящая работа развивает исследования, начатые в работах [Смирнов и др., 2020; 2022], с целью выявления особенностей инициации разрушения в горных породах при использовании флюидов различной вязкости. Поскольку скорость распространения флюида или порового давления определяется, в первую очередь, фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС) породы и вязкостью флюида, мы варьировали как ФЕС, так и вязкость флюида. В настоящей работе рассмотрены в совокупности экспериментальные результаты, полученные нами ранее [Смирнов и др., 2020; 2022], и новые данные с разнотипными флюидами.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Распространение фронта порового давления P во флюидонасыщенных пористых средах в простейшем случае описывается уравнением диффузии, известным как уравнение пьезопроводности [Адушкин, Турунтаев, 2015; Shapiro, 2015]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = D \nabla^2 P. \quad (1)$$

Параметр D известен как коэффициент гидравлической диффузии, его величина определяется ФЕС, сжимаемостями флюида и каркаса породы [Shapiro, 2015]:

$$D = \frac{k}{\eta S}, \quad (2)$$

где k – проницаемость породы, η – вязкость флюида. Параметр S (в англоязычной терминологии storage coefficient) зависит от пористости среды, упругих свойств флюида и твердого каркаса. В работе [Shapiro, 2015] приведены приближенные выражения для S :

$$S = \frac{\phi}{K_f} \quad (3)$$

для высокопористых сред и

$$S = \phi \left(\frac{1}{K_f} + \frac{1}{K_{gr}} \right) \quad (4)$$

для низкопористых сред. Здесь ϕ – пористость, K_f и K_{gr} – модули всестороннего сжатия флюида и зерен каркаса, соответственно. В наших экспериментах использовались высокопористые песчаники и низкопористые граниты. Для последних $K_{gr} \gg K_f$, и вторым слагаемым в скобке (4) можно пренебречь. Следовательно, в нашем случае и для песчаников, и для гранитов выражение (2) для коэффициента гидравлической диффузии принимает вид:

$$D = \frac{k K_f}{\eta \phi} = \frac{k}{\eta \phi \beta}, \quad (5)$$

где через $\beta = 1/K_f$ обозначена сжимаемость флюида.

Время распространения фронта давления τ на расстояние l определяется величиной D и задается формулой [Shapiro, 2015]:

$$\tau = \frac{l^2}{4\pi D} = \frac{\eta \phi}{4\pi k K_f} l^2. \quad (6)$$

Распространение фронта обводнения в изначально сухом образце может быть описано поршневой моделью вытеснения из порового пространства воздуха нагнетаемым в образец флюидом [Смирнов и др., 2020]. В рамках этой модели время распространения фронта флюида на расстояние l от торца образца, через который нагнетается флюид, задается формулой:

$$t_0 \approx \varepsilon \frac{\eta \phi}{k P} l^2, \quad (7)$$

где P – давление, под которым нагнетается флюид; ε – безразмерный коэффициент, зависящий от условий протекания на торце образца, противоположном тому, с которого производится нагнетание флюида. Значение этого коэффициента, определенное в работе [Смирнов и др., 2020] эмпирически для условий наших экспериментов, оказалось равным 0.7.

Таблица 1. ФЕС образцов и вязкости флюида

№	Шифр образца	Порода	Флюид	Проницаемость k , мД	Пористость ϕ
1*	BuPz-3	Песчаник	Вода	23	0.158
2*	BuPp-07	Песчаник	Вода	45	0.17
3	BuPp-26	Песчаник	Раствор глицерина 60%	45	0.17
4	ВКМ-464-6-Zh	Гранит	Вода	0.1	0.03
5*	КВН-5-548-1	Гранит	Вода	0.013	0.013
6*	ВКМ-167-4	Гранит	Вода	0.047	0.02
7*	КВН-5-548-3	Гранит	Вода	0.15	0.0072
8	ВКМ-464-5-Zh	Гранит	Раствор глицерина 85%	0.1	0.03
9	ВКМ-464-4-Zh	Гранит	Раствор глицерина 85%	0.1	0.03

Примечания: В шифрах образцов: Bu – песчаники Буффало; ВКМ – керны из скважины в Воронежском кристаллическом массиве; КВН – керны из скважины в области наведенной сейсмичности Койна–Варна, Западная Индия (см. [Смирнов и др., 2020; 2022]). Жирным шрифтом отмечены значения, измеренные на конкретных образцах; остальные значения являются типичными для соответствующих коллекций.

Таблица 2. Параметры флюидов (при температуре 20°C)

Концентрация глицерина, % по весу	Вязкость, Па · с	Сжимаемость, 1/Па
0 (вода)	1.005×10^{-3}	4.6×10^{-10}
60	10.8×10^{-3}	3.3×10^{-10}
85	109×10^{-3}	3.0×10^{-10}

Из формул (6) и (7) видно, что влияние ФЕС материала и вязкости флюида на время распространения как фронта давления во флюидонасыщенных образцах, так и фронта обводнения в сухих определяется параметром m , равным:

$$m = \frac{\eta\phi}{k}. \quad (8)$$

Из (8) видно, что пропорциональное сочетание флюидов разной вязкости η и образцов с разными ФЕС (пористостью ϕ и проницаемостью k) может образовать системы со схожими величинами параметра m .

В табл. 1 приведены сведения о ФЕС образцов и флюидах, рассматриваемых в настоящей работе. Данные предыдущих экспериментов, использованные в работах [Смирнов и др., 2020; 2022], помечены в первом столбце звездочкой. Пористость использованных песчаников и гранитов отличалась примерно на порядок. В качестве флюидов использовались вода и раствор глицерина в воде, разная концентрация которого позволяла варьировать его вязкость в диапазоне двух порядков. В табл. 2 представлены сведения о вязкости растворов согласно работе [Segur, Oberstar, 1951] и их сжимаемости, рассчитанной по данным работы [Whalley, Heat, 1976] с учетом температурной зависимости из работы [Fine, Millero, 1973].

Эксперименты проводились в лаборатории ГО “Борок” на сервоуправляемом прессе INOVA. Описание лабораторного оборудования представлено в работах [Патонин и др., 2013; 2018].

Специально высушенный образец вначале подвергался в условиях всестороннего сжатия одноосному нагружению с постоянной скоростью деформации до момента ускорения нарастания активности АЭ, отвечающего приближению напряжения к пределу прочности. Далее скорость нагружения уменьшалась на порядок, и с верхнего торца в образец инжестировался под заданным давлением флюид. Нижний торец был непроницаем для флюида. После этого в насыщенном таким образом флюидом образце увеличивалось поровое давление. Применялись два режима изменения порового давления: скачками с последующей постоянной величиной давления заданной величины (ступенькой) и “зубчиками” – поровое давление плавно увеличивалось от начального до заданного максимального, а затем плавно уменьшалось. Такие “зубчики” повторялись по три раза, образуя серии. На всех стадиях осевое нагружение проводилось в режиме управления прессом по деформации (*strain control*).

Подробное описание системы регистрации событий АЭ и принципов ее использования для изучения режима АЭ представлено в работе

Таблица 3. Задержки отклика акустической эмиссии

№	Шифр образца	Сухой образец, задержка АЭ t_d , с	Флюидонасщенный образец, задержка АЭ τ_f , с	Стандартное отклонение S_τ оценки τ_f , с	m (по формуле (8)), Па · с/м ²
1	BuPz-3	5	1.2	2.5	6.90×10^9
2	BuPr-07	6.7	0.8	—	3.80×10^9
3	BuPr-26	46	4.9	2.7	4.08×10^{10}
4	BKM-464-6-Zh	30	3.2	5	3.02×10^{11}
5	KBH-5-548-1	22.4	3.8	2.5	1.01×10^{12}
6	BKM-167-4	149	17.2	2.7	4.28×10^{11}
7	KBH-5-548-3	128	18.7	1.9	4.82×10^{10}
8	BKM-464-5-Zh	—	23.8	2.3	3.27×10^{13}
9	BKM-464-4-Zh	—	26.1	1.3	3.27×10^{13}

Примечание: Прочерки столбце значений t_d для образцов BKM-464-5-Zh и BKM-464-4-Zh означают отсутствие отклика АЭ на инъекцию флюида в сухие образцы.

[Смирнов, Пономарев, 2020]¹. События АЭ регистрируются системой датчиков, расположенных как на цилиндрической поверхности образца, так и встроенных в пуансоны пресса, которые прижимают датчики к торцевым поверхностям образца. Датчик, встроенный в пуансон пресса, обладает большей эффективной чувствительностью. Для анализа использовался акустический бюллетень — набор времен и амплитуд сигналов АЭ, зарегистрированных этим датчиком. Он аналогичен сейсмическому бюллетеню отдельной сейсмической станции. Данные акустического бюллетеня не позволяют судить о локализации акустических событий, но содержат на порядок больше событий по сравнению с данными каталога событий, лоцированных по записям датчиков на цилиндрической поверхности образца. В качестве энергетического класса события АЭ использовалась величина, сходная с магнитудой (энергетическим классом) землетрясения: $K = 2 \lg A$, где A — амплитуда импульса АЭ в относительных единицах. Отличие заключается в том, что, не зная локации источника, нельзя учесть затухание сигнала по мере распространения волны от источника к приемнику. Амплитуда A задана в относительных единицах, поскольку абсолютная калибровка аппаратуры не проводилась.

На первой стадии бюллетень событий АЭ подвергался анализу на однородность по представительному классу, и проводилась соответствующая селекция данных бюллетеня [Смирнов, Пономарев, 2020].

Истории нагружения в четырех новых экспериментах (номера 3, 4, 8, 9 в табл. 1) вместе с акустической активностью, рассчитанной по бюллетеню событий АЭ, представлены на рис. 1, рис. 2. Остальные истории нагружения можно найти в работах [Смирнов и др., 2020; 2022].

ЗАДЕРЖКИ ОТКЛИКА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Для каждой ступеньки повышения порового давления были произведены оценки задержки акустического отклика относительно момента достижения максимума ступеньки порового давления. За время задержки принималась разность времен достижения акустической активности локального максимума и времени “подачи” ступеньки давления флюида на торец образца. Время максимума определялось визуально по графикам акустической активности, на рис. 3 показан типичный пример. В табл. 3 представлена сводка полученных оценок задержек. Для первой ступеньки порового давления, отвечающей инъекции флюида в сухой образец, приведены сами значения, для последующих ступеней, отвечающих повышению порового давления в насыщенных образцах, приведены средние геометрические значения задержек и их стандартные отклонения.

ЗАДЕРЖКА ОТКЛИКА ПРИ ОБВОДНЕНИИ СУХОГО ОБРАЗЦА

Из формул (6) и (7) видно, что параметр m , задаваемый формулой (8), определяет влияние

¹ <https://cloud.mail.ru/public/rfq3/CNDPQRZ7r>

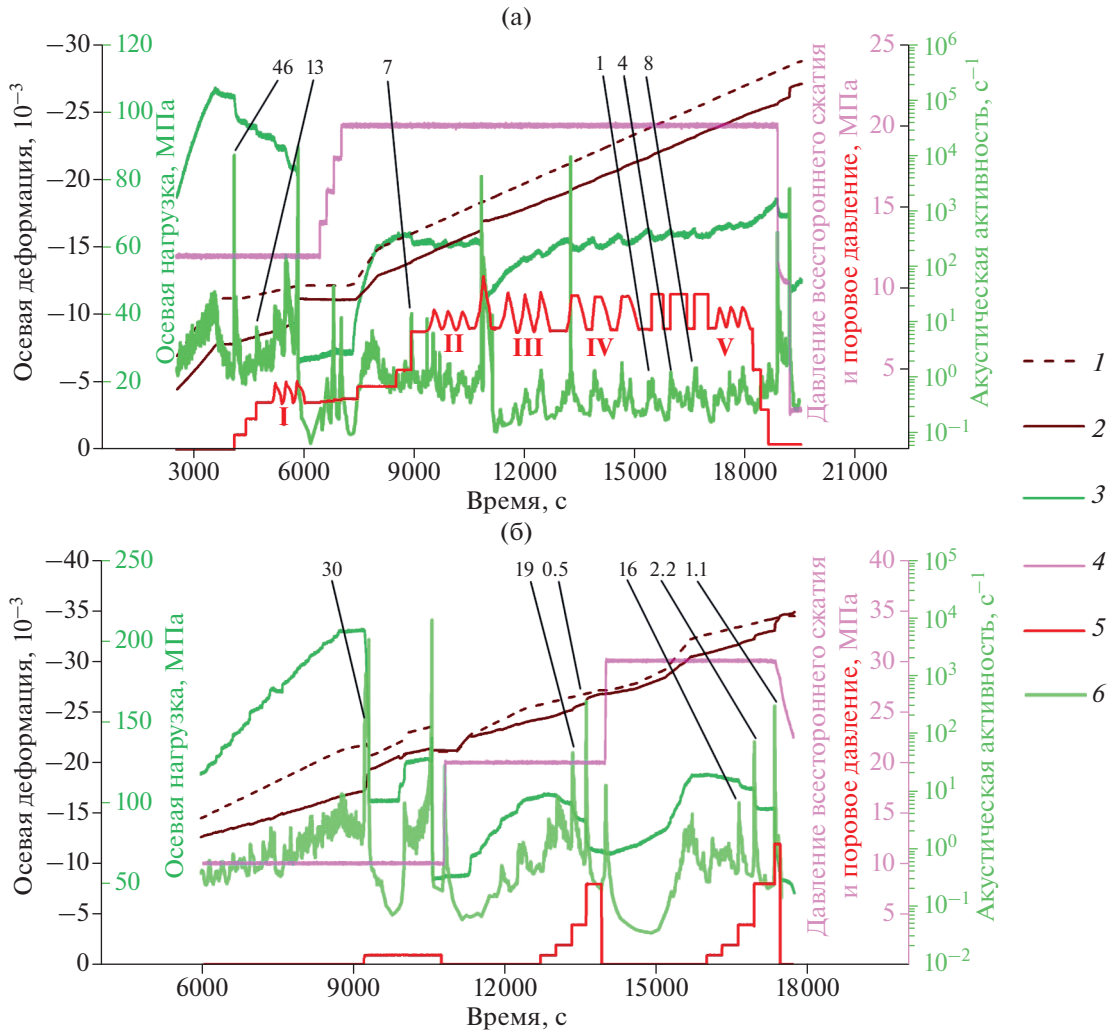


Рис. 1. История нагружения образцов в экспериментах: (а) – ВuРр-26 (3); (б) – ВКМ-464-6-Zh (4), в скобках указаны номера согласно табл. 1. Обозначения кривых: 1 – задаваемая деформация; 2 – истинная деформация образца (с учетом жесткости прессы); 3 – осевая нагрузка; 4 – давление всестороннего сжатия; 5 – поровое давление; 6 – акустическая активность. Числами с указателями обозначены задержки максимумов акустической активности относительно ступенек порового давления, в секундах. Жирным шрифтом обозначены задержки при инъекции в сухой образец.

ФЕС материала и вязкости флюида на время распространения фронта флюида или фронта давления. Для расчета времени распространения фронта на единичное расстояние следует поделить m на соответствующий “силовой” параметр: в случае фронта флюида – на величину скачка инициирующего давления (7), в случае фронта давления в насыщенном образце – на модуль сжатия флюида (6).

На рис. 4а представлена зависимость произведения задержки отклика АЭ при инъекции флюида в сухие образцы (t_d в табл. 3) на величину соответствующего инициирующего скачка давления P от параметра m .

На рис. 4а видно, что все точки за исключением двух, обозначенных цифрами 1 и 2, хорошо ложатся на прямую зависимость от m . Это означает, что задержка отклика АЭ пропорциональна времени распространения фронта флюида t_0 в поршневой модели (7). Действительно, согласно (7)

$$t_0 P \sim \frac{\eta \Phi}{k} = m, \text{ и линейная зависимость эмпирических задержек от величины } m, \text{ показанная на рис. 3а, означает пропорциональность времени задержки отклика АЭ времени распространения фронта.}$$

На рис. 5 детально представлена история нагружения для образца ВКМ-464-6-Zh, отвечающего выпавшей на рис. 4а из линейной зависимо-

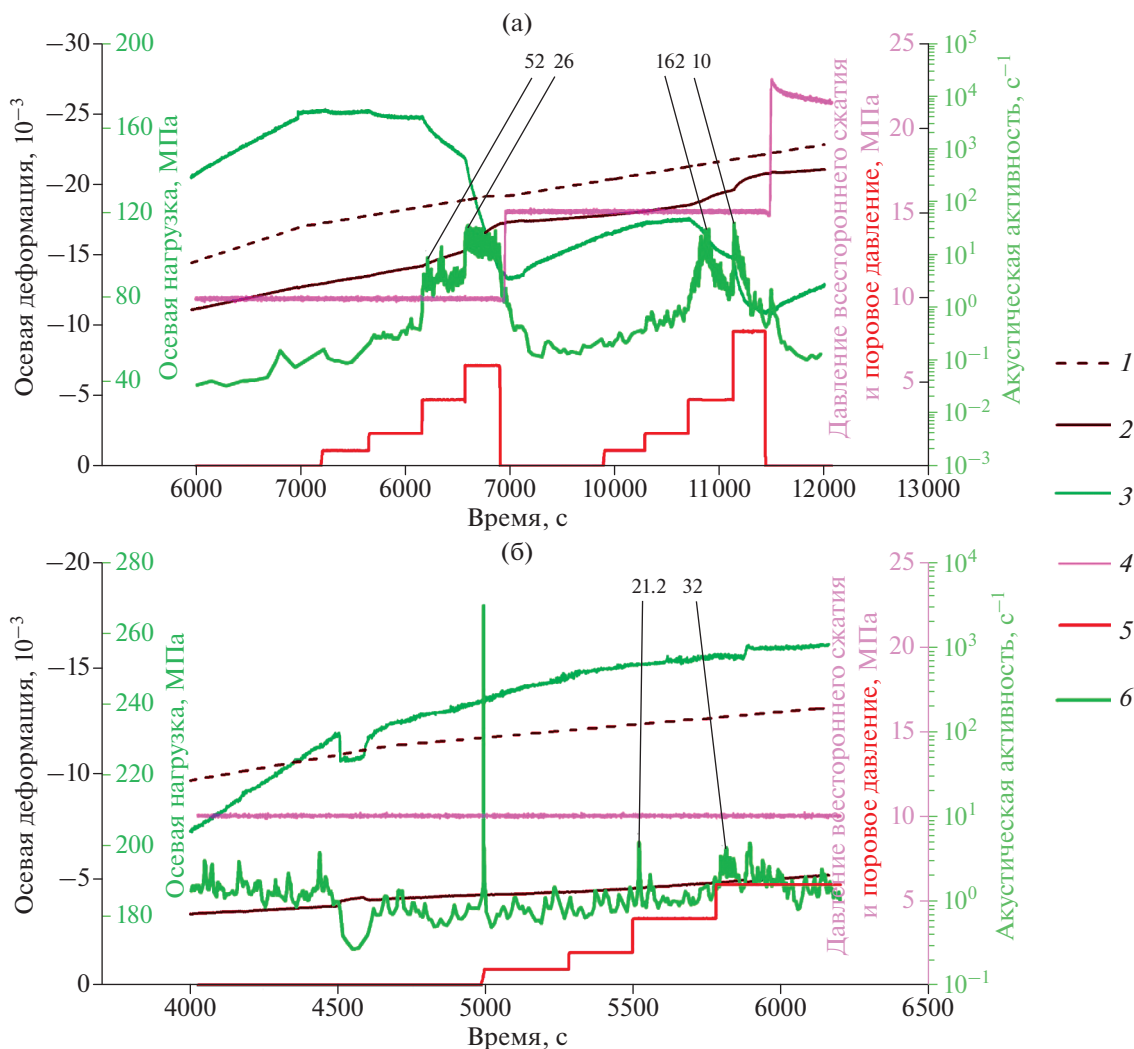


Рис. 2. История нагружения образцов в экспериментах: (а) – ВКМ-464-5-Zh (8); (б) – ВКМ-464-4-Zh (9), в скобках указаны номера согласно табл. 1. Все обозначения как на рис. 1.

сти точке 2. На рис. 5 видно, что рост акустической активности начался (момент отмечен стрелкой) еще до начала инъекции флюида в образец (вертикальная пунктирная линия). Это означает, что активизация разрушения в этом случае отражала его саморазвитие, а не была обусловлена инъекцией флюида. Соответственно, формально определенную задержку оклика АЭ в 30 с следует связывать в данном случае с кинетикой разрушения, а не с движением фронта флюида, время t_0 которого, согласно формуле (7) оценивается в 530 с. Аналогичное предположение было сделано в работе [Смирнов, 2020] о причине выпадения точки 1, отвечающей образцу КВН-5-548-1.

На рис. 4б представлена диаграмма рассеяния эмпирических значений задержки АЭ t_d (табл. 3) и теоретических значений, рассчитанных соглас-

но поршневой модели по формуле (7). Видно, что теоретические значения хорошо согласуются с эмпирическими (за исключением точек 1 и 2). Этот результат подтверждает вывод работы [Смирнов и др., 2020], сделанный по данным лабораторных экспериментов с одной вязкостью. На рис. 4 данные опыта с песчаником ВуРр-26 при вязкости флюида на порядок большей, чем в работе [Смирнов и др., 2020], показаны красной точкой. Видно, что она ложится в общую линейную зависимость.

В опытах с низкопористыми образцами ВКМ-464-5-Zh и ВКМ-464-4-Zh и высоковязким флюидом (см. табл. 1) мы не обнаружили отклика АЭ на инъекцию флюида в сухие образцы (пик активности, заметный около инициирующей ступени на рис. 2б, возник до начала инъекции). Оценка согласно поршневой модели (из формулы (7))

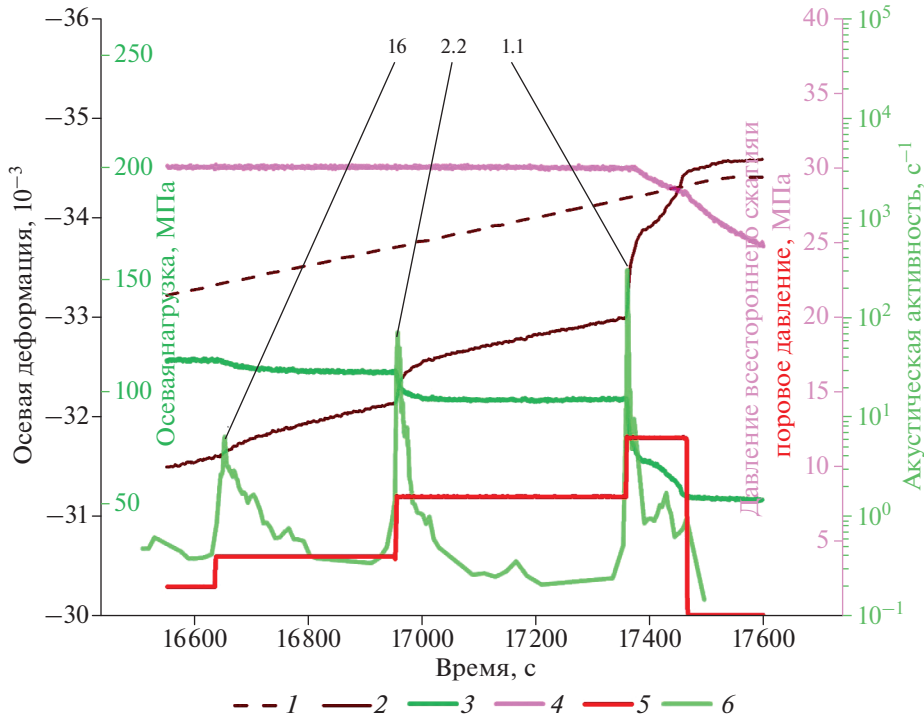


Рис. 3. Пример выделения максимумов акустической активности (фрагмент эксперимента на образце ВКМ-464-6-Zh, рис. 1б). Обозначения кривых – как на рис. 1.

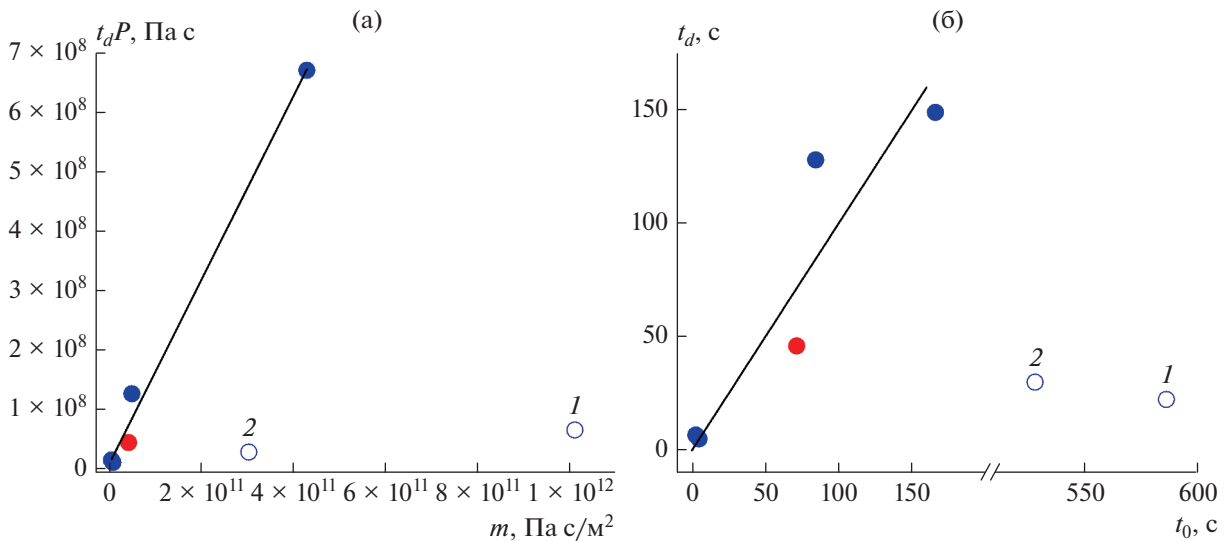


Рис. 4. Задержки отклика АЭ при инъекции флюидов в сухие образцы: (а) – времена задержки, умноженные на скачок давления; прямая – линия регрессии при исключении точек 1 и 2; (б) – времена задержки, прямая соответствует $t_d = t_0$, t_0 согласно формуле (7). Цифрами помечены: 1 – образец КВН-5-548-1, 2 – ВКМ-464-6-Zh (объяснение в тексте).

глубины проникновения флюида 1 в образцы в этих опытах за время ступеньки в 300 с (см. рис. 2б) составляет 4 мм – менее 10% размера образца. Отсутствие отклика АЭ в этом случае объясняется, по-видимому, незначительным объемом области инъекции, что косвенно также подтверждает справедливость поршневой модели при инъекции разновязких флюидов в сухие образцы.

ЗАДЕРЖКА ОТКЛИКА ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ ВО ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ ОБРАЗЦАХ

На рис. 6а представлена диаграмма рассеяния отношения экспериментальных задержек отклика АЭ τ_f (табл. 3) к сжимаемости флюида β (табл. 2) и значений величины m . Согласно модели линей-

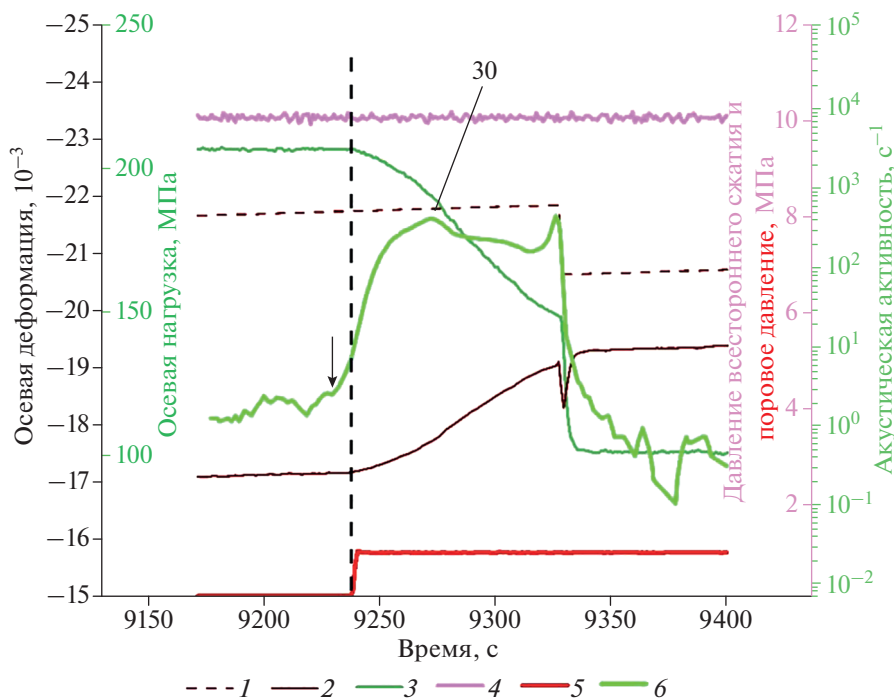


Рис. 5. Фрагмент истории нагружения образца ВКМ-464-6-Zh: инъекция воды в сухой образец (см. рис. 1б). Обозначения кривых: 1 – задаваемая деформация; 2 – истинная деформация образца (с учетом жесткости пресса); 3 – осевая нагрузка; 4 – давление всестороннего сжатия; 5 – поровое давление; 6 – акустическая активность. Вертикальной пунктирной линией показан момент нарастания ступеньки порового давления при инъекции флюида, стрелкой – время начала роста акустической активности.

ной пьезопроводности отношение времени распространения фронта давления τ к сжимаемости β в насыщенной среде пропорционально m : согласно (6) $\tau/\beta = mt^2$.

Рис. 6а демонстрирует нелинейную зависимость эмпирических значений τ_f/β от m (на рисунке использованы дважды логарифмические оси). Регрессионная оценка дает $\tau/\beta \sim m^{0.3}$. Это свидетельствует, что зависимость задержки АЭ от m гораздо более слабая, чем дает линейная теория (формула 6), и задержка отклика АЭ не определяется в полной мере временем распространения фронта давления в рамках линейной модели пьезопроводности. На рис. 6б представлена диаграмма рассеяния значений эмпирической задержки отклика АЭ τ_f и теоретического времени распространения фронта давления τ (согласно (6)). Видно, что $\tau_f \gg \tau$ – точки лежат гораздо выше показанной на рисунке сплошной линии $\tau_f = \tau$.

Согласно линейной диффузионной модели пьезопроводности время распространения фронта давления (6) не зависит от величины инициирующего скачка давления флюида. Рассмотрим с этой точки зрения задержки отклика АЭ. На рис. 7 представлены диаграммы рассеяния значений τ_f

и $1/P$ для тех опытов, в которых варьировалась величина скачка порового давления.

На рис. 7 видно, что величина задержки отклика уменьшается с увеличением величины скачка давления, что указывает на отклонение задержки отклика АЭ от диффузионной фильтрационной модели.

Зависимость времени распространения фронта флюида от скачка давления характерна для поршневой модели: из (7) следует, что $t_0 \sim 1/P$, и коэффициент пропорциональности определяется величиной $m = \frac{\eta\phi}{k}$. На рис. 8 представлена зависимость коэффициента пропорциональности a из регрессии $\tau_f = a \frac{1}{P} + b$ (см. рис. 7) от величины m . На рис. 8 видно, что значения a увеличиваются с увеличением m . Все точки, за исключением одной, отвечающий низкопористому образцу ВКМ-464-5-Zh и высоковязкому флюиду, ложатся на прямую в дважды логарифмическом масштабе. Соответствующая регрессия имеет вид:

$$\lg a = (0.6 \pm 0.1) \lg m - (6 \pm 1). \quad (9)$$

В случае поршневой модели для задержки фронта флюида, согласно (7), следует ожидать $a \sim m$. В случае линейной диффузионной модели

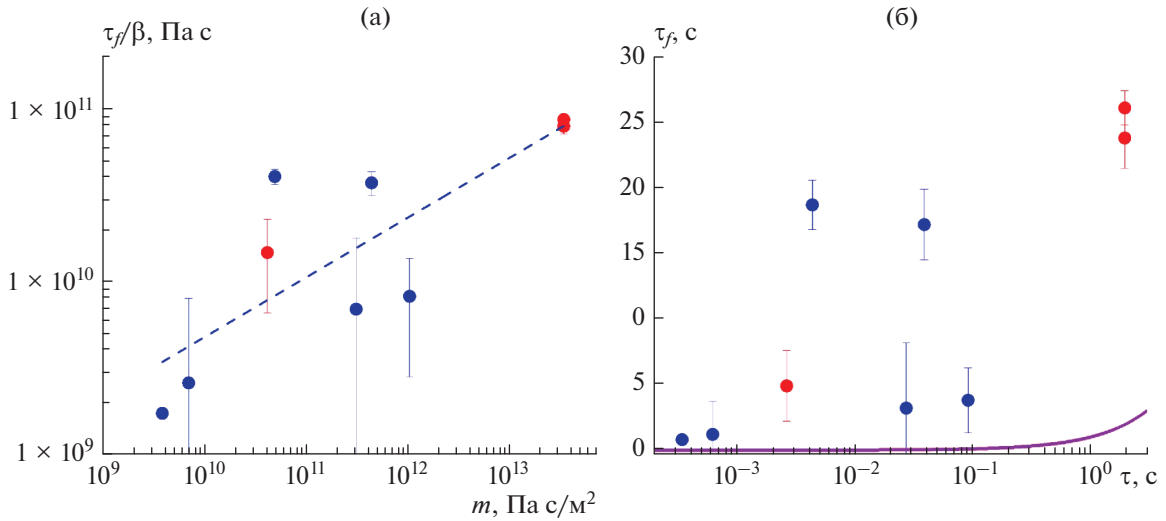


Рис. 6. Задержки отклика АЭ при скачках порового давления в насыщенных образцах: (а) – отношение задержек отклика АЭ τ_f (табл. 3) к сжимаемости флюида β (табл. 2). Пунктиром показана линия регрессии $\lg\left(\frac{\tau_f}{\beta}\right) = (0.3 \pm 0.1) \lg m + (6 \pm 1)$; (б) – времена задержки отклика АЭ τ_f как функция теоретических времен распространения фронта порового давления τ (согласно (6)); сплошная кривая: $\tau_f = \tau$. Красными точками показаны данные экспериментов с высоковязкими флюидами (растворами глицерина).

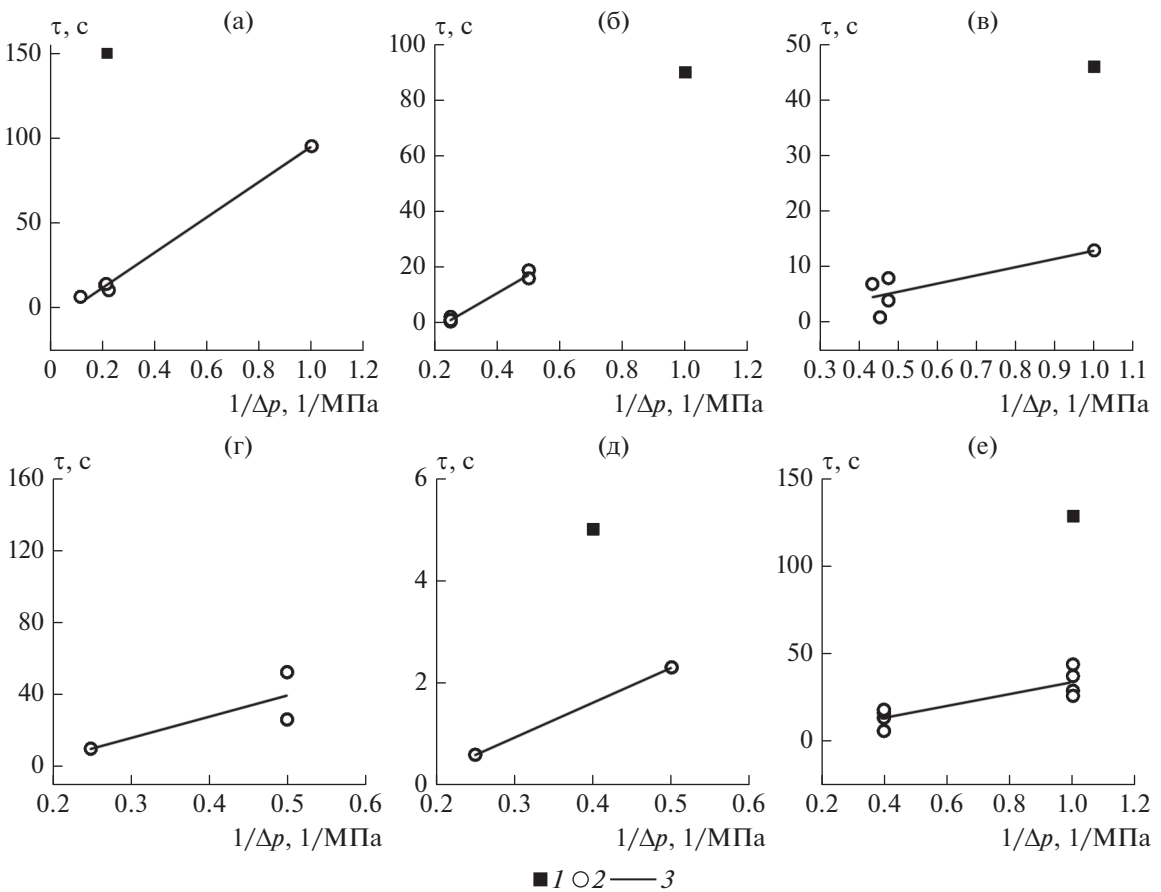


Рис. 7. Зависимость времени задержки отклика АЭ от обратной величины скачка порового давления: (а) – ВКМ-167-4; (б) – ВКМ-464-6-Zh; (в) – ВuPp-26; (г) – ВКМ-464-5-Zh; (д) – ВuPz-3; (е) – КВН-5-548-3. Обозначения: 1 – закачки в сухие образцы; 2 – закачки в насыщенные флюидом образцы; 3 – линии регрессии для насыщенных образцов.

для задержки фронта порового давления, как отмечалось выше, должно быть $a = 0$. Регрессия (9) дает для a соотношение $a \sim m^{0.6}$. Это соотношение соответствует промежуточному положению между поршневой и диффузионной моделями. Выше мы видели, что абсолютные величины задержек отклика АЭ во флюидонасыщенных образцах оказались больше, чем предсказывает механизм линейной диффузии, но меньше, чем дает чисто поршневой механизм. Вопрос о природе отклонения задержки отклика АЭ во флюидонасыщенных образцах от линейной модели пьезопроводности остается открытым. Не имея сейчас экспериментальных измерений движения фронта порового давления, мы не можем сказать, где кроется причина расхождения: в более сложном распространении фронта давления или в особенностях инициации разрушения. Можно лишь предположить несколько возможных механизмов.

Первое предположение связано с влиянием развивающегося процесса разрушения на ФЕС образцов. Кажется очевидным, что по мере развития разрушения увеличивается пористость и проницаемость материала за счет образования новых трещин. Это означает, что коэффициент гидравлической диффузии D не остается постоянным, а уравнение (1) может стать нелинейным, и движение фронта давления уже не будет подчиняться рассмотренным нами простым закономерностям. Такой механизм применительно к волнам разрушения в горных породах и земной коре при флюидной инициации разрушения рассмотрен в работе [Shapiro, 2015]. Кроме этого, увеличение пористости вследствие достаточно интенсивного развития трещиноватости может создать в образце незаполненную флюидом дополнительную пустотность. В этом случае, как отмечалось в работе [Смирнов и др., 2020], “включится” поршневой механизм движения флюида, что приведет как к уменьшению скорости распространения фронта, так и к появлению зависимости задержки времени распространения фронта от скачка порового давления. Эта зависимость не будет, по-видимому, чисто “поршневой” – пропорциональной $1/P$, – поскольку поршневой механизм будет действовать вместе с диффузионным.

Второе предположение связано с тем, что задержка отклика АЭ на флюидную инициацию может быть обусловлена не только динамикой порового давления, но и кинетикой собственно процесса разрушения. Примеры этому можно найти в работе [Смирнов, Пономарев, 2020]. Факторы, определяющие скорость кинетики разрушения, изучены в настоящее время недостаточно хорошо для получения надежных количественных оценок. Но известны физические меха-

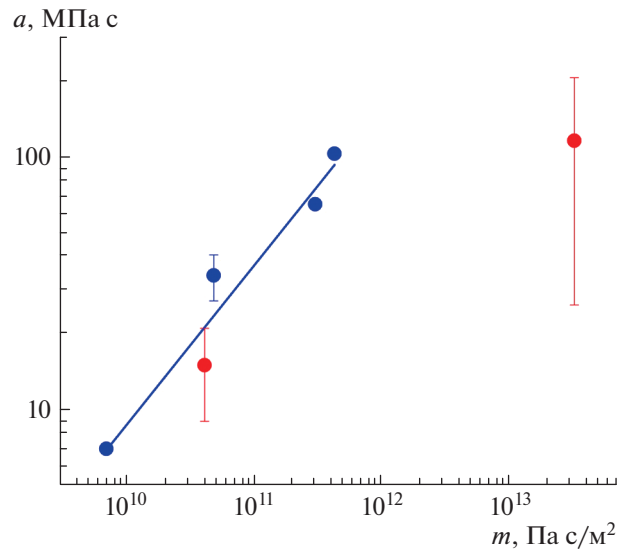


Рис. 8. Диаграмма рассеяния значения наклонов линейной регрессии a (рис. 7) и величин m . Линия – регрессия в дважды логарифмическом масштабе. Красными точками обозначены эксперименты с растворами глицерина: точка с меньшим m соответствует эксперименту на образце ВuРр-26, с большим – ВКМ-464-5-Zh.

низмы и модели зависимостей кинетических характеристик процесса разрушения от величин как действующих в среде, так и дополнительных иницирующих напряжений [Журков, 1968; Narteau et al., 2002; 2009; Смирнов, Пономарев, 2020]. Возможно, они объясняют обнаруженное нами уменьшение величины задержки отклика АЭ при увеличении иницирующего скачка порового давления.

ЦИКЛЫ УВЕЛИЧЕНИЯ–УМЕНЬШЕНИЯ ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ

Режимы с циклами плавного увеличения–уменьшения порового давления во флюидонасыщенных образцах был реализованы в двух из рассматриваемых в этой статье опытах с различными вязкостями флюида. Один опыт был на образце гранита КВН-5-548-3 с водой, его результаты были рассмотрены в работе [Смирнов и др., 2022]. Второй был выполнен на песчанике ВuРр-26 с 60% раствором глицерина, вязкость которого на порядок выше, чем у воды. Но, поскольку, пористости образцов гранита и песчаника тоже отличались на порядок, значения параметра m в этих опытах оказались практически одинаковыми: 4.82×10^{10} Па · с/м² в опыте на граните и 4.08×10^{10} Па · с/м² в опыте на песчанике (см. табл. 1).

По данным этих опытов на стадиях плавного увеличения и уменьшения порового давления

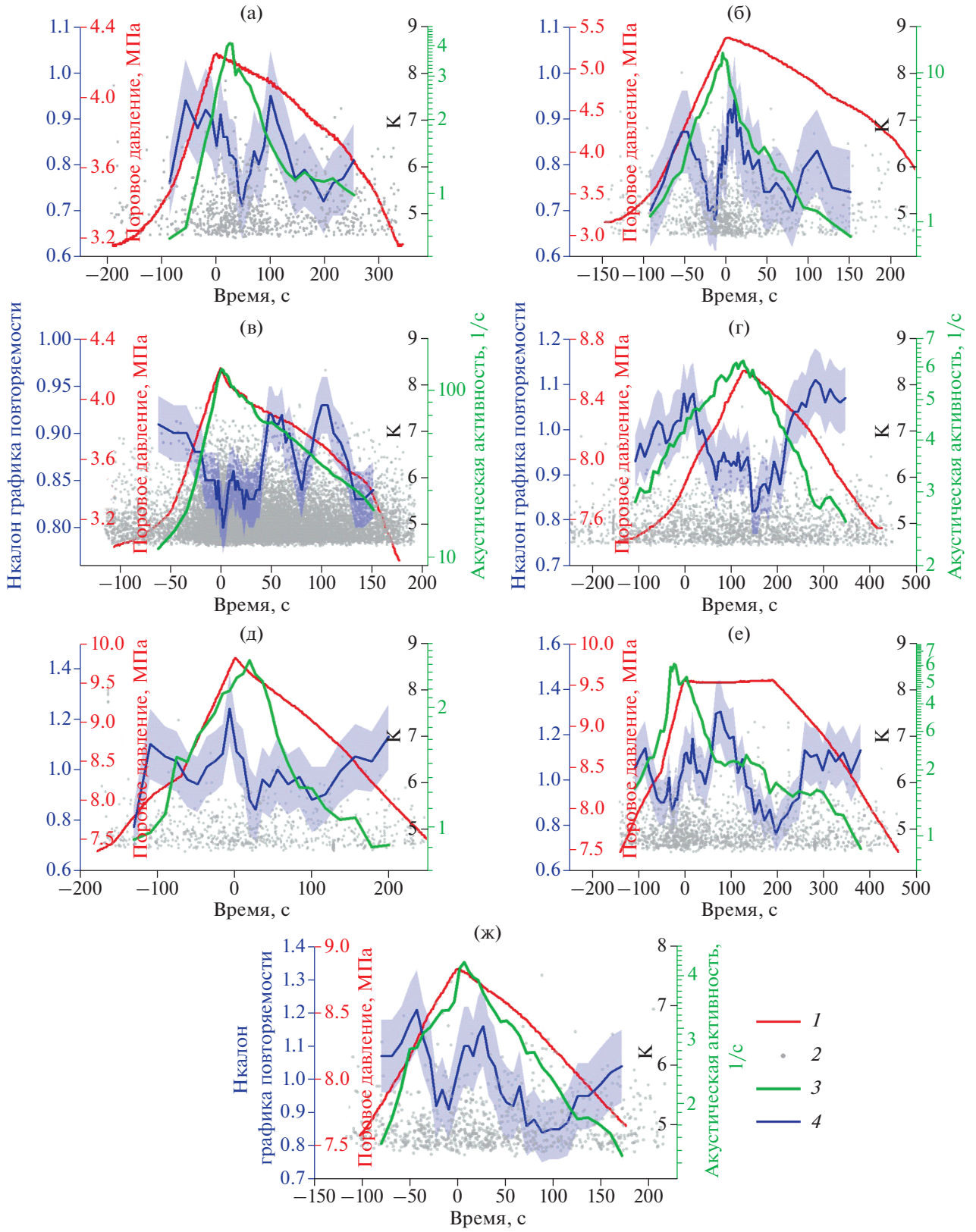


Рис. 9. Изменение акустической активности и наклона графика повторяемости по данным двух опытов с плавным изменением порового давления: (а), (б) — соответственно, первая и вторая серии опыта на образце гранита КВН-5-548-3 с водой (с изменениями из работы [Смирнов и др., 2022]); (в) — серия I; (г) — серия II; (д) — серия III; (е) — серия IV; (ж) — серия V опыта на образце песчаника ВuPp-26 с раствором глицерина (см. рис. 1а). В серии I был исключен третий “зубчик” давления, поскольку на нем в образце произошло образование макротрещины со значительным сбросом напряжений (см. рис. 1а). Обозначения кривых: 1 — поровое давление; 2 — энергетический класс акустического события; 3 — акустическая активность; 4 — наклон графика повторяемости.

анализировались изменения параметров акустического режима: акустической активности и наклона графика повторяемости, характеризующего соотношение сильных и слабых событий. Как отмечалось во введении, целью таких лабораторных исследований, начатых нами в работе [Смирнов и др., 2022], было проявление особенностей сейсмического режима сезонных компонентов наведенной сейсмичности. Методика анализа акустического режима подробно описана в работе [Смирнов и др., 2022]. Суть ее заключается в синхронном накоплении данных по отдельным циклам нарастания—спада порового давления (такие циклы мы для краткости назвали “зубчиками”, см. рис. 1а для опыта на образце ВuPp-26). Акустические события, относящиеся к каждому “зубчику”, накапливались в сводных бюллетенях, которые затем подвергались статистическому анализу. Результаты оценок акустической активности и наклона графика повторяемости по таким сводным бюллетеням приведены на рис. 9, где скомпилированы для совместного рассмотрения новые результаты, полученные на образце песчаника ВuPp-26, и опубликованные в работе [Смирнов и др., 2022] — по образцу гранита КВН-5-548-3.

На рис. 9 для всех серий с “острым” максимумом кривой порового давления (все рисунки, за исключением рис. 9е видно, что минимум наклона графика повторяемости приходится на интервал времени, близкий к максимуму акустической активности. При этом в каждом цикле увеличения—уменьшения порового давления наблюдается несколько локальных максимумов наклона графика повторяемости. На стадию увеличения давления приходится, как правило, один максимум, на стадию спада — один или два максимума.

На рис. 9е, с растянутым во времени максимумом порового давления, видно, что на стадию увеличения давления приходится один максимум наклона графика повторяемости (также, как и для режимов с “острым” максимумом кривой порового давления). А далее, на стадии постоянного и уменьшающегося порового давления видно три максимума наклона графика повторяемости.

Результаты анализа данных этих экспериментов с инициацией разрушения плавными нарастаниями—спадами порового давления в разнотипных флюидах указывают на наличие унифицированного сценария активизации акустической активности (отражающее активизацию процесса

разрушения) и наличие различных сценариев ее релаксации.

На стадии активизации при нарастании порового давления наблюдается более или менее выраженное увеличение наклона графика повторяемости с последующим существенным спадом, совпадающим по времени с нарастанием акустической активности. Такие изменения, отвечающие сценарию слияния и роста трещин (известному в сейсмологии как сценарий ЛНТ), наблюдаются на стадии активизации многих переходных режимов натурной и антропогенной сейсмичности [Смирнов, Пономарев, 2020]. Приуроченность минимума наклона графика повторяемости к максимуму активности также известна для иницированных флюидом сейсмических режимов [Потанина и др., 2011; Смирнов, Пономарев, 2020].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лабораторные исследования с разнотипными жидкостями подтвердили, что при резких (ступенчатых) изменениях порового давления в образцах горных пород наблюдается задержанный отклик АЭ.

При инъекции флюидов разной вязкости в сухие образцы задержка активизации АЭ соответствует времени распространения фронта, рассчитанному в рамках предложенной в работе [Смирнов и др., 2020] модели поршневого вытеснения воздуха флюидом. С физической точки зрения инициация разрушения при заполнении флюидом изначально сухого порового пространства может быть обусловлена как эффектом увеличения порового давления, так и физико-химическими процессами на поверхности трещин (эффект Ребиндера). Оба эти механизма актуальны для различных переходных сейсмических режимов [Смирнов, Пономарев, 2020].

В экспериментах по инициации разрушения скачком порового давления в насыщенных флюидом образцах отклик АЭ также надежно зафиксирован с задержкой после иницирующего скачка давления. Однако величина задержки оказалась существенно больше, чем дают расчеты по модели линейной пьезопроводности с постоянным коэффициентом гидравлической диффузии, и значительно меньше, чем время распространения фронта флюида в сухом образце. Имеющиеся экспериментальные данные сейчас не позволяют нам дать однозначное объяснение такой ситуа-

ции. Можно лишь указать возможные механизмы, которые сводятся либо к изменению ФЕС горных пород по мере развития в них разрушения, либо к кинетике собственно процесса разрушения, инициированного скачком порового давления. Нельзя исключить и одновременного действия обоих механизмов.

Известен натуральный эксперимент, в котором регистрируются разные признаки наличия этих механизмов [Guglielmi et al., 2015]. Эксперимент состоял в ступенчатой закачке воды в скважину, пробуренную через разлом в осадочном бассейне на юго-востоке Франции. Наблюдались два этапа отклика среды на повышение давления: первый – асейсмический крип, сопровождаемый значительным увеличением проницаемости; второй – по мере нагнетания и распространения флюида в глубь среды, инициация микросейсмичности и незначительное изменение проницаемости. Для прояснения причины отличия задержек АЭ от времен распространения фронтов давления в насыщенных породах необходимо проведение специальных лабораторных экспериментов, в которых независимыми методами (не связанными с наблюдением за АЭ) будет отслеживаться распространение фронта флюида в сухих образцах и фронта давления во флюидонасыщенных. Первая задача может быть решена на основе измерений электропроводности образцов на профилях вкрест направления распространения фронта флюида, привлечения данных о скоростях и затуханиях волн на таких профилях, а также по данным о расходе флюида, поступающего в образец. Решение задачи по отслеживанию распространения фронта давления в насыщенных образцах применительно к имеющимся у нас возможностям лабораторных экспериментов требует отдельного методического исследования.

Для прояснения возможной взаимосвязи динамики ФЕС горных пород с процессом их разрушения необходимы экспериментальные исследования формирования и изменения ФЕС в процессе разрушения. Пилотные результаты свидетельствуют о возможности проведения таких исследований на современном прессовом оборудовании Центра коллективного пользования “Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм” ИФЗ РАН².

Выявленный в наших лабораторных исследованиях факт неоднозначности связи времени задержки инициированного флюидами разрушения с временем распространения фронта давления во флюидонасыщенных средах, представляется актуальным для качественной и количественной

интерпретации природных сейсмических эффектов, связанных с динамикой флюидов и изменениями их давления. В частности, в задачах наведенной и триггерной сейсмичности, обусловленной водохранилищами, проницаемости областей земной коры под водохранилищами и в их окрестности оценивают в подавляющем большинстве случаев по задержке сейсмического отклика на вариации уровня воды в водохранилищах [Михайлов и др., 2017]. Наши результаты свидетельствуют, что такие оценки могут быть выполнены по поршневой модели при обводнении областей изначально сухой пористой среды – эксперименты показали, что в такой ситуации время задержки АЭ практически совпадает с расчетным временем распространения фронта флюида. Но в случае распространения фронта давления в насыщенной среде это не так – задержка АЭ оказалась существенно больше модельных оценок по линейному уравнению пьезопроводности. Соответственно, оценки проницаемости в земной коре по задержкам сейсмического отклика, основанные, по сути, на том же линейном уравнении пьезопроводности, без учета механизмов дополнительной задержки отклика разрушения (пока еще не ясных) могут оказаться сильно заниженными.

Второе обстоятельство, на которое следует обратить внимание, это наличие двух механизмов динамики флюида, актуальных при рассмотрении процесса флюидной инициации разрушения: поршневое вытеснение при распространении фронта флюида в сухой пористой среде и диффузия давления (уравнение пьезопроводности) в насыщенной флюидом среде. В среде с одними и теми же ФЕС времена распространения фронтов согласно этим механизмам существенно различны. Из формул (6) и (7) следует, что отношение времени распространения фронта флюида t_0 к времени распространения фронта давления в насыщенной среде τ равно:

$$\frac{t_0}{\tau} \approx \sqrt{\frac{K_f}{P}}. \quad (10)$$

Мы пренебрегли в (10) коэффициентом $\varepsilon \approx 1$ из (7). Характерная величина модуля всестороннего сжатия флюида K_f – первые ГПа (для воды $K_f = 2.2$ ГПа), а величины инициирующих изменений порового давления оцениваются в первые МПа (для плотины высотой 100 м давление столба воды на дно водохранилища равно 1 МПа). Следовательно, отношение K_f/P под корнем в (10) составляет около трех порядков, что дает для отношения t_0/τ оценку около 30. Это значит, что в сухой среде время распространения инициирующего фронта в 30 раз больше, чем в насыщенной флюидом. Такое существенное различие следует,

² Отчет о НИР “Развитие фундаментальных основ и методологии лабораторного, полевого и обсерваторского геофизического эксперимента”, № госрегистрации аааа-а19-119111290091-9, М., ИФЗ РАН, 2021, 152 с.

очевидно, учитывать при расчетах в задачах, связанных с наведенной сейсмичностью. В частности, при заполнении водохранилища, инфильтрация воды через его дно в относительно сухую земную кору, может происходить гораздо медленнее, чем распространение фронта давления в уже насыщенной коре при сезонных колебаниях уровня водохранилища в процессе его эксплуатации. Эмпирическое свидетельство подобного отличия в области наведенной сейсмичности Койна–Варна в Западной Индии отмечалось в работах [Смирнов и др., 2017; Смирнов, Пономарев, 2020].

При плавных изменениях порового давления в насыщенных образцах горных пород лабораторные исследования позволили выявить характерные изменения режима АЭ. В цикле нарастания–убывания порового давления флюида минимальные значения наклона графика повторяемости приходятся на интервалы максимумов акустического отклика. Максимумы наклона графика повторяемости приходятся на фазы нарастания и спада порового давления. Характер изменения акустической активности в совокупности с наклоном графика повторяемости на стадии активизации разрушения согласуется с характерным для активизации переходных сейсмических режимов сценарием постепенного перераспределения процесса разрушения от младших к старшим масштабным уровням.

Закономерности изменения режима АЭ оказались схожими в двух экспериментах, проведенных на различных горных породах (песчаник и гранит), обладающих различающейся на порядок пористостью, при использовании флюидов с различающейся на порядок вязкостью. Недостаточное количество экспериментов не позволяет сделать аргументированного заключения, является ли схожесть сценария возбуждения переходного акустического режима следствием универсальности механизма инициации разрушения разнородными жидкостями, или же сыграла роль определенная пропорциональность ФЕС образцов и вязкостей флюидов – значения параметра m из (8) для двух опытов были практически одинаковыми. Если верно второе, то параметр m может оказаться характеристикой, контролирующей область универсальности выявленных закономерностей инициации разрушения разнородными жидкостями.

Отметим, что флюидная инициация разрушения в своих приложениях не ограничивается только техногенной сейсмичностью, связанной с водохранилищами или закачкой флюидов в скважины. Многие процессы, развивающиеся в зонах субдукции и вулканических районах, ассоциируются с движением флюидов разной вязкости под давлением. Вязкости флюидов варьируются в

широком диапазоне: от 10^5 Па · с для андезитовых магм до 10^{-5} Па · с для газов. В этой связи результаты лабораторного исследования инициации разрушения горных пород при инъекции флюидов разной вязкости могут оказаться полезными для интерпретации особенностей сейсмического режима тектонической и вулканической активности в зонах субдукции.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в соответствии с государственными заданиями Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук и физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Лабораторные эксперименты проведены в Центре коллективного пользования “Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм” ИФЗ РАН при финансовой поддержке грантами Министерства образования и науки № 14.W03.31.0033 и № 075-15-2021-628 “Геофизические исследования, мониторинг и прогноз развития катастрофических геодинамических процессов на Дальнем Востоке РФ”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность–индуцированная и триггерная. 2015.
- Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестник АН СССР. 1968. № 3. С. 46–52.
- Михайлов В.О., Арора К., Пономарев А.В., Шринагеш Д., Смирнов В.Б., Чадда Р. Наведенная сейсмичность в районе водохранилищ Койна и Варна, Индия: обзор современных данных и гипотез // Физика Земли. 2017. № 4. С. 28–39.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Исаева А.В. и др. Флюидная инициация разрушения в сухих и водонасыщенных горных породах // Физика Земли. 2020. № 6. С. 1–21.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В. Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН. 2020. 412 с.
- Смирнов В.Б., Потанина М.Г., Карцева Т.И., и др. Сезонные вариации наклона графика повторяемости землетрясений в наведенной сейсмичности в области Койна–Варна, Западная Индия // Физика Земли. 2022. № 3. С.
- Смирнов В.Б., Шринагеш Д., Пономарев А.В., Чадда Р., Михайлов В.О., Потанина М.Г., Карташов И.М., Строганова С.М. Режим сезонных вариаций наведенной сейсмичности в области водохранилищ Койна–Варна, Западная Индия // Физика Земли. 2017. № 4. С. 40–49.
- Патонин А.В., Пономарев А.В., Смирнов В.Б. Аппаратно-программный лабораторный комплекс для решения задач физики разрушения горных пород // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 1. С. 19–34.
- Патонин А.В., Шихова Н.М., Пономарев А.В., Смирнов В.Б. Модульная система непрерывной регистрации акустической эмиссии для лабораторных исследований разрушения горных пород // Сейсмические приборы. 2018. Т. 54. № 3. С. 35–55.

- Потанина М.Г., Смирнов В.Б., Бернар П. Развитие роевой активности в Коринфском рифте в 2000–2005 гг. // Физика Земли. 2011. № 7. С. 54–66.
- Cornelio C., Passelègue F. X., Spagnuolo E., et al. Effect of fluid viscosity on fault reactivation and coseismic weakening // J. Geophysical Research: Solid Earth. 2020. 125(1), e2019JB018883
- Clarke J., Adam L., Sarout J., van Wijk K., Kennedy B., Dautriat J. The relation between viscosity and acoustic emissions as a laboratory analogue for volcano seismicity // Geology. 2019. V. 47. № 6. P. 499–503.
- Fine R.A., Millero F.J. Compressibility of water as a function of temperature and pressure // The J. Chemical Physics. 1973. V. 59. № 10. C. 5529–5536.
- Guglielmi Y., Cappa F., Avouac J. P., Henry P., Elsworth D. Seismicity triggered by fluid injection–induced aseismic slip // Science. 2015. V. 348. № 6240. P. 1224–1226.
- Gupta H.K. Koyna, India, an ideal site for near field earthquake observations // Jour. Geol. Soc. India. 2017. V. 90. P. 645–652.
- David C., Dautriat J., Sarout J., Delle Piane C., Menéndez B., Maccault R., Bertauld D. Mechanical instability induced by water weakening in laboratory fluid injection tests // J. Geophysical Research: Solid Earth. 2015. V. 120. № 6. C. 4171–4188.
- Ishida T., Chen Q., Mizuta Y., Roegiers J. C. Influence of fluid viscosity on the hydraulic fracturing mechanism // J. Energy Resour. Technol. 2004. V. 126. № 3. C. 190–200.
- Khanna T.C., Arora K., Raza H. et al. Bore-hole well-cores provide evidence for crustal heterogeneity beneath the Koyna-Warna reservoir site, Deccan Volcanic Province, India // J. Geological Society of India. 2020. V. 96. P. 36–42.
- Narteau C., Byrdina S., Shebalin P., Schorlemmer D. Common dependence on stress for the two fundamental laws of statistical seismology // Nature. 2009. V. 462. № 3. P. 642–646.
https://doi.org/10.1038/nature08553
- Narteau C., Shebalin P., Holschneider M. Temporal limits of the power law aftershock decay rate // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. P. B2359.
- Segur J.B., Oberstar H.E. Viscosity of glycerol and its aqueous solutions // Industrial & Engineering Chemistry. 1951 V. 43. P. 2117–2120
- Shapiro Serge A. Fluid-induced seismicity. Cambridge University Press. 2015.
- Whalley E., Heath J.B.R. Isothermal compressibility of water–glycerol mixtures at 60.0°C measured relative to water // Canadian J. Chemistry. 1976. V. 54. № 14. C. 2249–2251.

Initiation of Rock Fracture by Fluids of Different Viscosities

T. I. Kartseva^b, V. B. Smirnov^{a, b, *}, A. V. Patonin^c, D. S. Sergeev^b, N. M. Shikhova^c,
A. V. Ponomarev^b, S. M. Stroganova^b, and V. O. Mikhailov^{a, b}

^aFaculty of Physics, Moscow State University, Moscow, Russia

^bSchmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^cGeophysical Observatory “Borok,” Schmidt Institute of Physics of the Earth, Borok, Yaroslavl oblast, Russia

*e-mail: vs60@physics.msu.ru

The acoustic emission (AE) patterns observed in the laboratory conditions under the initiation of fracture in rock samples by fluids of different viscosities are revealed. A series of the experiments with sandstone and granite samples whose porosities differ by an order of magnitude and with fluids whose viscosities vary within two orders of magnitude have been conducted. The effects of fluid injection into dry samples and the increase in the pore pressure in the saturated samples were investigated. Pore pressure was changed both in abrupt steps and in smooth cycles of increases and decreases. In the case of fluid injection into dry samples, the delay of AE activation corresponds to the time of fluid front propagation calculated assuming the model of piston-type air displacement by a fluid in pore space. In the case of fracture initiation by the jumps in fluid pore pressure in saturated samples, the time delay of the response is substantially longer than predicted by the linear piezoconductivity model with constant hydraulic diffusivity and significantly shorter than the time of fluid front propagation in a dry sample. At smooth variations of the pore pressure in saturated samples, the experiments revealed the characteristic changes of the AE regime: the minimum b -values fall in the intervals of the maxima of the acoustic response, and the maximum b -values occur during the rise and fall phases of the pore pressure rise. The results obtained in the experiments on the rock samples with different porosities using fluids with different viscosities can be useful in the analysis of the field data both in the regions of manmade seismicity associated with the reservoir operations and fluid injection in wells and in the interpretation of the seismicity patterns due to tectonic and volcanic activity in the subduction zones.

Keywords: rock fracture, fluids with different viscosities, acoustic activity, b -value