

СЕЙСМОЛОГИЯ

УДК 550.34.01

ВЛИЯНИЕ ИНЖЕКЦИИ ВОДЫ НА АКУСТИЧЕСКУЮ ЭМИССИЮ
ПРИ ДОЛГОВРЕМЕННОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Г.А. Соболев, А.В. Пономарев, А.В. Кольцов, А.А. Круглов, В.А. Луцкий, Ю.В. Цывинская

Институт физики Земли РАН, 123810, Москва, ул. Бол. Грузинская, 10, Россия

Описаны результаты эксперимента по деформированию в условиях двухосного сжатия модели, состоящей из кварцевого песка, гранитной крошки и цемента. На протяжении эксперимента продолжительностью в несколько месяцев при квазистатическом уровне приложенных напряжений модель периодически подвергалась инъекции воды. Установлено, что инъекция малого по сравнению с объемом модели количества воды в область активных трещин приводит к резкой активизации акустической эмиссии. Форма сейсмограмм и графики повторяемости акустических сигналов, зарегистрированных до и после инъекции воды значимо не различаются, что говорит о триггерной природе эффекта. Временная последовательность вызванных инъекцией акустических событий качественно аналогична роевой и в ряде случаев афтершоковой активности землетрясений, что не исключает влияния данного фактора на сейсмичность. Разные типы временной последовательности вызванной акустической активности описываются известным из кинетической теории прочности уравнением при условии зависимости от времени энергии активации и действующих напряжений.

Сейсмичность, акустическая эмиссия, инъекция жидкости, лабораторное моделирование.

THE EFFECT OF WATER INJECTION ON ACOUSTIC EMISSION IN A LONG-TERM EXPERIMENT

G.A. Sobolev, A.V. Ponomarev, A.V. Kol'tsov, A.A. Kruglov, V.A. Lutsky, and Yu. V. Tsyvinskaya

A model composed of silicate sand, crushed granite, and cement was subjected to biaxial compression, and the resulting deformations have been described. During the experiment lasting for several months, with a quasi-static level of applied stresses, water was repeatedly injected into the model. It has been established that when the volume of water injected into a zone of active fractures is small as compared with the volume of the model, the acoustic emission drastically increases. The shape of seismograms and curves of repeatedness of the acoustic signals recorded before and after water injection do not differ significantly, which implies that the effect is of trigger nature. The time succession of injection-caused acoustic events is qualitatively similar to the swarm and, in some case, aftershock activity of earthquakes. Hence, this factor may have an effect on seismicity. Different types of time succession of induced acoustic activity are described by an equation known from the kinetic theory of strength provided the parameters of activation energy and working stresses depend on time.

Seismic activity, acoustic signal, water injection, laboratory modeling

ВВЕДЕНИЕ

Роль воды в усилении сейсмичности исследовалась в разнообразной сейсмотектонической обстановке, в том числе при заполнении водохранилищ [1—3]. Физический механизм связывался главным образом с повышением внутривещного давления и соответствующим уменьшением эффективного давления пород в рамках модифицированного закона Кулона—Мора [4]. Основополагающее значение этого эффекта заложено в дилатантно-диффузную (ДД) модель подготовки землетрясений [5]. Сделаны количественные оценки условий проявления эффекта в зависимости от величины литостатического и гидростатического давления, температуры и проницаемости горных пород [6]. Авторы работы [7] исследовали фрактальные свойства наведенной влиянием воды сейсмичности.

В развиваемой С.В. Гольдиным современной трактовке природы сейсмичности, где рассматриваются эффекты дилатансии и переупаковки структуры горных пород, приводящие к изменению хрупкости и пластичности, флюидам также отводится существенная роль [8]. Отметим, что на вариации потока относительно слабых землетрясений влияет незначительное изменение порового давления. В работе [9] показано, что сейсмичность в прилегающей к оз. Байкал зоне зависит от сезонных вариаций уровня озера, которые меняют поровое давление в диапазоне миллибар.

В связи с этим можно предположить, что не только механическое воздействие внутривязанного давления, влияющее на эффективное давление в пористых средах, является одним из основных физических механизмов влияния воды на сейсмичность. Авторы настоящей работы провели лабораторные эксперименты, в которых вариации внутривязанного давления на акустическую активность (микротрепетения) исключались и исследовался триггерный эффект смачивания водой стенок трещин.

МЕТОДИКА

Эксперименты выполнены на моделях, приготовленных из кварцевого песка и цемента. Общий вид модели показан на рис. 1. Два боковых слоя обладали большей прочностью по сравнению с центральным, поскольку при их изготовлении использовался цемент марки 400, в то время как в центральном слое связующим компонентом был цемент марки 50. В центральный слой был добавлен гранитный щебень различной дробности с размером кусков от 2 до 20 мм. Первоначальные средние значения скорости продольных волн в боковых слоях составляли 3,5 мм/мкс и в центральном слое — 1,7 мм/мкс. Длина модели (вдоль боковых граней) составляла 300 мм, ширина (в перпендикулярном направлении) — 220 мм. Размер модели в 3-м измерении был равен 65 мм. Мощности боковых и центрального слоев выбраны одинаковыми. Поверхности контактов между боковыми и центральным слоем были неровными вследствие выступающих углов щебня, а средний угол наклона контактов к вертикальной оси (совпадающей с осевой нагрузкой F) составлял 25° . Модели указанного типа использовались нами ранее [10, 11].

Для длительного действия квазипостоянной нагрузки был сконструирован и изготовлен рычажный пресс. Длина рычага составляла 2,9 м, что при соотношении плеч $6 \cdot 10^{-3}$ позволяло доводить нагрузку F до 25 т при постепенном увеличении металлических грузов на длинном плече рычага. Тонкую регулировку уровня нагрузки можно было осуществлять добавлением или убавлением жидкости в сосуде, подвешенном к рычагу параллельно грузам. Боковое сжимающее напряжение G в описываемом ниже эксперименте было равно 4 т и оставалось во время опыта постоянным с точностью до 1 % благодаря роликовым прокладкам между боковыми гранями модели и пуансонами пресса. Тестовые испытания показали, что применение рычажного пресса позволяет существенно снизить уровень акустических шумов по сравнению с прессами, поддерживающими заданную нагрузку с помощью электродвигателей.

Прием акустоэмиссионных (АЭ) сигналов осуществлялся измерительным комплексом А-Line-32D (производство фирмы „ИНТЕРЮНИС“), который является цифровой многоканальной системой сбора и обработки акустоэмиссионной и служебной информации, получаемой с исследуемого объекта от акустических и иных датчиков при проведении экспериментов. Основные компоненты комплекса: контроллер и каналные платы выполнены в стандарте полноформатной платы персонального компьютера, что позволяет размещать их непосредственно в системный блок персонального компьютера. А-Line-32D работает в программной среде WINDOWS 9X и более высоких операционных систем и позволяет проводить акустоэмиссионные измерения в режиме реального времени.

Основные параметры используемой в эксперименте системы:

- количество каналов — 4 (может быть увеличено до 32);
- полоса пропускания канала измерения — от 150 до 500 кГц;
- динамический диапазон измерения амплитуды АЭ сигнала — не менее 84 дБ;
- частота преобразования АЦП — 5 МГц;
- разрядность АЦП — 16 бит;
- точность времени регистрации АЭ события

± 1 мкс.

Программируемые параметры:

- коэффициент усиления — 14...+26 дБ;
- диапазон изменения уровня отсечки шумов от -24 до 106 дБ;
- частоты среза для переключаемых фильтров:
- НЧ-фильтров 100, 250, 350, 500 кГц;
- ВЧ-фильтров 30, 50, 100, 150 кГц;
- диапазон максимальной длительности сигнала от 10 до 65535 мкс;
- диапазон изменения „мертвого времени“ от 30 до 65535 мкс.



Рис. 1. Общий вид модели и прессового оборудования.

Система A-Line-32D позволяет получить представительные файлы данных АЭ, которые могут рассматриваться в качестве аналогов сейсмических каталогов. К полезным особенностям системы, используемым при проведении экспериментов, относятся:

- гибкие критерии автоматической отбраковки ложных источников АЭ, вызванных электромагнитными наводками, помехами разного рода и переотражениями АЭ сигналов;
- фильтрация экспериментальных данных по выбранному АЭ параметру, по результатам локации и кластеризации, фильтрация шумовых, параметрических и служебных данных;
- синхронная запись акустических и параметрических каналов;
- спектральный анализ АЭ сигналов в реальном времени;
- совместимость текстового и графического представления данных с другими Windows-приложениями.

Система комплектуется высокочувствительными и калиброванными резонансными преобразователями акустической эмиссии GT200 с полосой пропускания 130—200 кГц и малошумящими предусилителями сигналов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В нижней части рис. 2 представлена схема одного из экспериментов, длившегося с 10 марта по 25 октября 2004 г., т. е. более 7 месяцев. Вертикальная нагрузка F постепенно поднималась в течение двух первых месяцев до тех пор, пока в нижней части модели не возникла видимая трещина длиной порядка 2 см (см. рис. 2, диаграмма I). 12 мая в устье трещины (в ее верхнюю часть) было впрыснуто из шприца $0,5 \text{ см}^3$ дистиллированной воды; это отмечено на рис. 2 как начало стадии I. На протяжении этой стадии, длившейся до 9 сентября, при практически постоянной ($F \sim 15 \text{ т}$) нагрузке проведено еще 10 инъекций воды того же количества. Интервалы между последовательными инъекциями были неравномерными от 2 до 26 суток. За этот промежуток времени видимая на грани модели трещина подросла примерно на 1 см, так что ее кончик приближался к приемнику № 1. Время очередной инъекции приурочивалось к интервалу относительного равномерного (стационарного) режима акустической эмиссии, когда последствия предыдущего впрыскивания воды (постепенное убывание числа акустических импульсов в единицу времени) уже заканчивались, т. е. не отличались от фона. Серии инъекций схематически показаны стрелками над графиком нагружения (см. рис. 2) без соблюдения их числа и масштаба интервалов между ними.

Следующая стадия II началась 14 сентября, после того как в центре модели возникла серия из трех видимых кулисообразных трещин длиной около 3 см (см. рис. 2, диаграмма II). Эта стадия при нагрузке $F \sim 17 \text{ т}$ продолжалась до 4 октября. За это время было выполнено 6 инъекций по $0,5 \text{ см}^3$ в верхнюю часть серии трещин; интервалы между последовательными инъекциями выбирались из вышеописанного условия.

Заключительная III стадия продолжалась с 5 по 21 октября при уровне $F \sim 20 \text{ т}$. На этой стадии серия кулисообразных трещин в середине модели уже соединялась секущими разрывами, ориентированными вдоль длинной грани модели (см. рис. 2, диаграмма III). Видимые линейные размеры трещиноватой области составляли около 5 см. На протяжении этой стадии проведено 7 инъекций воды в центр трещиноватой области.

Макроразрушение модели трещиной, идущей вдоль центрального (более слабого) слоя, произошло 25 октября, его момент отмечен стрелкой в конце графика нагрузки (F).

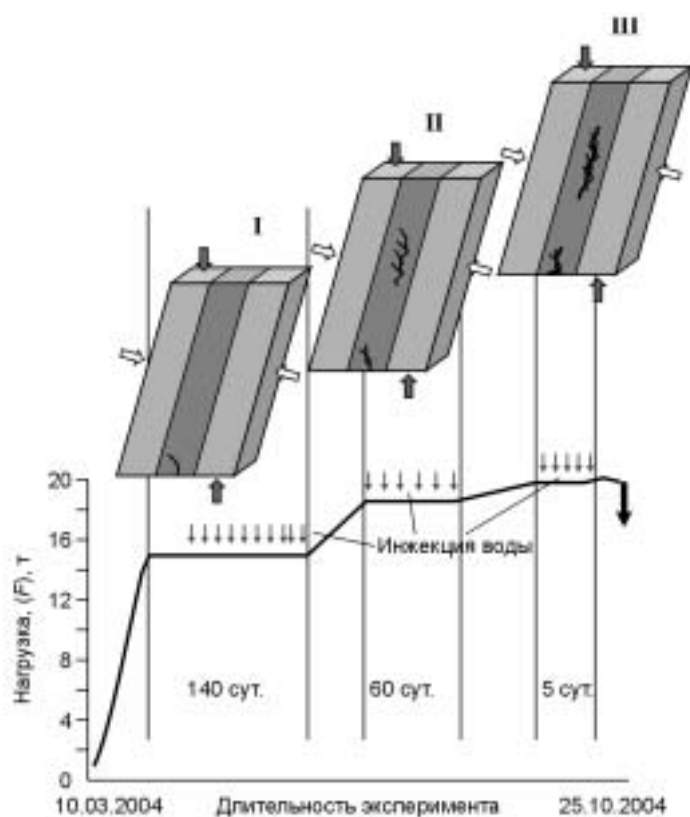


Рис. 2. Схема нагружения и инъектирования воды на стадиях I, II, III эксперимента.

По мере нагружения модели, начиная примерно с нагрузки $F = 10$ т, возникали акустические сигналы. Амплитудный порог их обнаружения был установлен опытным путем существенно выше уровня помех; в начале стадии I он равнялся 50 дБ, а затем был снижен до 45 дБ. Всего на протяжении опыта были зарегистрированы десятки тысяч акустических событий. Времена их вступления на четырех приемниках различались в диапазоне до нескольких десятков микросекунд в зависимости от гипоцентра источника (трещины). При интервале дискретизации сигнала 0,2 мкс и с учетом того, что все четыре приемника были установлены на одной из граней модели, местоположение проекции источника на эту грань можно было определить с ошибкой примерно в 1 см. После появления на стадии I видимой трещины задача определения местоположения источника упрощалась, так как большинство из них возникали у конца трещины.

На рис. 3,а иллюстрируется в качестве примера структура АЭ сигналов на интервале в 20 тыс. с (стадия I), в середине которого была выполнена инъекция воды в верхний конец трещины. В анализ включены только сигналы (всего 191), источники которых находились в области трещины как до инъекции, так и после нее. График 1 демонстрирует изменение количества сигналов в окне 100 с при сдвиге 20 с. Время инъекции (9652 с) проявляется резким возрастанием количества сигналов от единичных событий до десятков, причем активизация началась практически сразу после попадания воды в трещину. Если и было запаздывание реакции, то оно составляло менее 5 с; более точно это установить не удалось. Из графика 1 следует, что явная реакция на инъекцию воды длилась не менее нескольких часов, но быстрый спад величины $N/100$ с после максимума наблюдался в течение первого часа.

На графике 2 эти же данные представлены в виде последовательности отдельных импульсов с указанием их амплитуды (A). При этом $1 \text{ дБ} = 20 \cdot \lg (V/V_0)$, где V — величина сигнала с датчика в мВ и $V_0 = 1 \text{ мВ}$ — опорное напряжение. Минимальная зарегистрированная величина импульсов в 45 дБ была обусловлена уровнем установленного порога дискриминации и соответствовала амплитуде сигнала $a = (A/A_0) \cdot 10^{2,25} = 177,8$ ед. Сигнал с максимальной амплитудой $A = 84 \text{ дБ} = 1,58 \cdot 10^4$ произошел не сразу, а только через $5805 \text{ с} \approx 1,6 \text{ ч}$ после впрыскивания воды.

Динамику первого этапа вызванной водой активизации АЭ сигналов можно проследить на графике 3, где в более детальной развертке показаны времена появления первых 25 импульсов; они уложились в интервале 187 с. Не прослеживается какой-либо яркой закономерности в чередовании как времени появления очередного импульса, так и его амплитуды.

Пример активизации АЭ сигналов после впрыскивания воды в область кулисообразных трещин на стадии II эксперимента показан на рис. 3,б. Отметим следующие отличия по сравнению с предыдущим примером. В тот же интервал времени 20 тыс. с зарегистрировано в 5 раз больше импульсов (916) и в начале активизации отмечалось порядка 100 событий на интервалах в 100 с (график 1). Первые 25 импульсов после инъекции уложились в 13 с (график 2), т. е. интенсивность процесса по количеству сигналов была на порядок выше по сравнению с рис. 3,а. Однако имеются и сходные черты. Быстрый спад активности $N/100$ с после максимума также отмечался в течение первого часа. Наиболее сильный сигнал имел примерно такую же амплитуду $A = 82 \text{ дБ} = 1,26 \cdot 10^4$ и произошел не сразу, а с задержкой в 0,6 ч после момента инъекции (график 2). При детальной временной развертке первых 25 импульсов (график 3) также не видно закономерности в длительности интервалов между последовательными импульсами и амплитуде последних.

Рисунок 3,в демонстрирует реакцию АЭ сигналов на инъекцию в стадии эксперимента III, когда в центральной части модели существовала зона с большим количеством трещин. В основном структура активизации не отличается от предыдущего случая (см. рис. 3,б). Число событий в интервале 20 тыс. с равнялось 707; импульс с максимальной амплитудой $A = 84 \text{ дБ} = 1,58 \cdot 10^4$ зарегистрирован через 0,9 ч; первые 25 импульсов произошли в течение 13 с, и не отмечено закономерности во времени их появления и амплитуде. Единственное отличие, возможно, заключается в быстром спаде величины $N/100$ с после начала активизации (график 1).

Из продемонстрированных выше результатов вытекает главный вывод: инъекция небольшого (0,01 %) по сравнению с объемом модели количества воды в трещины приводит к резкому усилению АЭ сигналов. Чтобы прояснить некоторые существенные особенности механизма активизации были выполнены дополнительные опыты. Если водой на порядок большего объема (4 см^3) смачивались удаленные от зоны трещиноватости поверхности модели, то реакции или не наблюдалось вовсе, или она в небольшой степени возникала через нескольких часов, причем источники сигналов находились в области видимых трещин. Последнее можно объяснить постепенной миграцией воды к трещиноватой зоне. Кроме того, был установлен следующий факт: если проводить инъекцию воды в кончик трещины через небольшой промежуток времени после предыдущей инъекции, то интенсивность активизации падает. Это можно объяснить частичным снятием напряжений вследствие предыдущего акта активизации. Таким образом, можно полагать, что активизация возникает в результате воздействия воды на поверхность напряженной (активной) трещины.

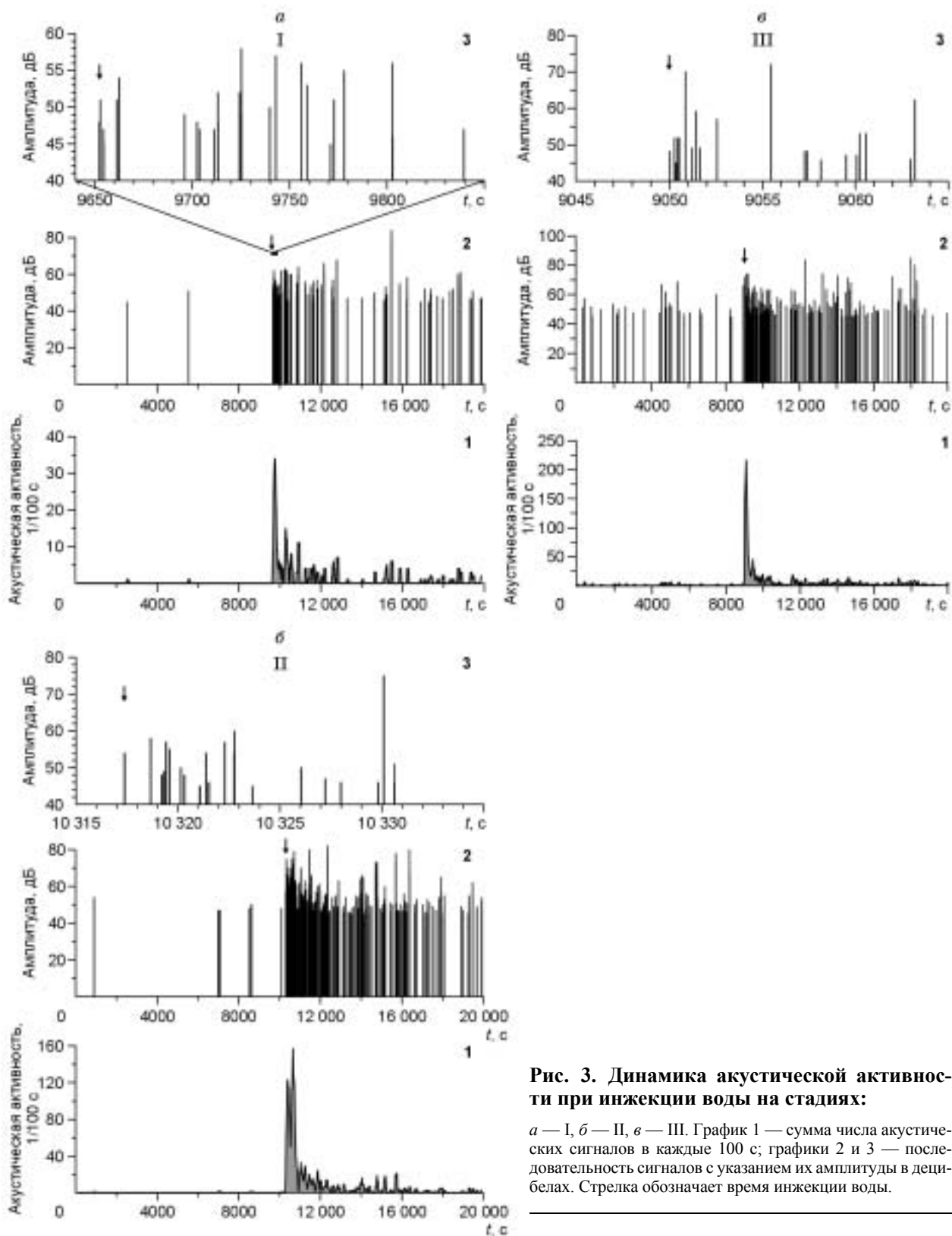


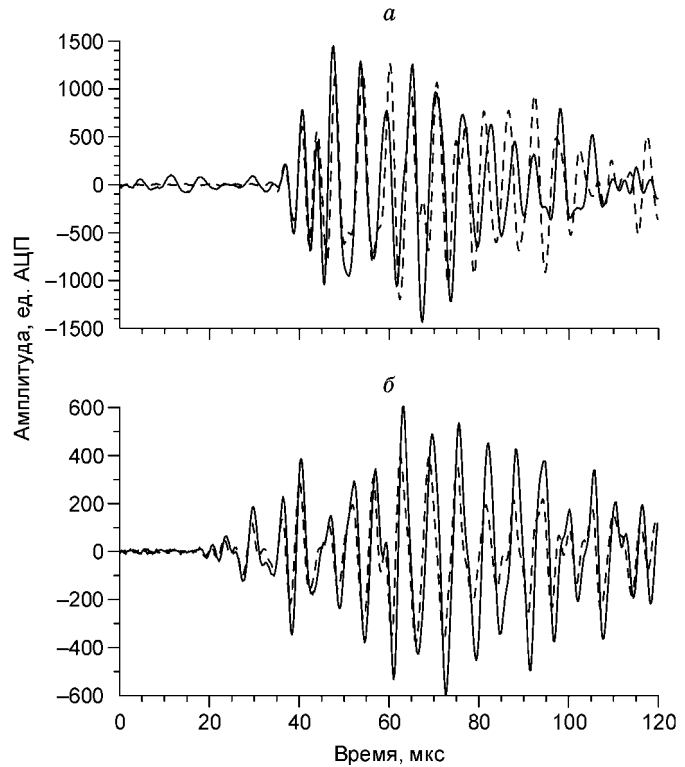
Рис. 3. Динамика акустической активности при инъекции воды на стадиях:

а — I, *б* — II, *в* — III. График 1 — сумма числа акустических сигналов в каждые 100 с; графики 2 и 3 — последовательность сигналов с указанием их амплитуды в децибелах. Стрелка обозначает время инъекции воды.

Возникает вопрос: отличается ли форма и амплитуда акустических сигналов, вызванных воздействием воды, от фоновых? Был проведен корреляционный анализ большого количества сейсмограмм. Наиболее благоприятным для решения данного вопроса был интервал стадии I, когда источники сигналов лежали в области единичной трещины (см. рис. 2, стадия I). На рис. 4 представлены две пары сейсмограмм для двух актов инъекции; на каждом рисунке одна сейсмограмма получена перед инъекцией воды и

Рис. 4. Примеры акустических сигналов до (сплошная линия) и после (штриховая линия) инъекции: на ранней (а), на поздней (б) стадиях эксперимента.

По оси абсцисс — точки дискретизации сигнала через 0,2 мкс; по оси ординат — амплитуда сигналов в условных единицах.



другая — после инъекции. Все сейсмограммы приняты приемником № 1, наиболее близко расположенным к источнику акустического сигнала. Длина записи составляет 600 точек дискретизации, что соответствует 120 мкс. Наблюдается идентичность формы, особенно в начальных фазах. Коэффициент корреляции (r) между показанными на рисунке записями равен 0,63, что значительно превышает 95 %-й доверительный уровень (см. рис. 4,а). Если сравнивать записи в начальных фазах в интервале 180—280 точек (20 мкс), то величина r возрастает до 0,85. Следующий пример (см. рис. 4, б) относится к другому акту инъекции. Коэффициент корреляции между записями составляет 0,79, а при сравнении начальных фаз в интервале 113—213 точек (20 мкс) он возрастает до 0,86. Амплитуды сигналов на рис. 4 соизмеримы. Таким образом, как в этих, так и в других примерах не удалось обнаружить существенных различий в кинематических и динамических характеристиках акустических сигналов, возникших в районе трещины, подвергавшейся инъекции воды.

Было проведено исследование амплитуд сигналов до и после инъекции на статистически значимых выборках, содержащих одно и то же количество сигналов. Для этой цели на каждой из трех стадий в одну из выборок были включены сигналы, зарегистрированные в интервалах до впрыскивания воды, а во вторую — такое же количество, произошедших после впрыскивания. На рис. 5 представлены гистограммы для стадий I—III, где открытыми кружками обозначены распределения фоновых событий, залитыми кружками — инициированных водой. Рисунок 5,а построен по данным 1068 событий в каждой из выборок; рис. 5,б и в основаны на 2225 и 9759 событиях соответственно. По оси абсцисс отложена амплитуда сигналов, по оси ординат — десятичный логарифм их количества в каждом из амплитудных рангов. Графики включают события, охватывающие 2 порядка по амплитуде A (50—90 дБ), что примерно соответствует 4 порядкам по энергии событий. Загиб в области 50 дБ на рис. 5,а объясняется тем, что в начале стадии I порог дискриминации сигналов был установлен на уровне 50 дБ, а в дальнейшем на этой и других стадиях был снижен до 45 дБ.

Приведенные на рис. 5 графики хорошо аппроксимируются уравнением:

$$\lg N = \alpha - \beta \cdot A \text{ (дБ)} \quad (1)$$

Численные значения аппроксимации по этой формуле, а также значения математического ожидания M , медианы Med , коэффициентов вариации Var , детерминации R^2 и среднеквадратического отклонения σ амплитуд сигналов A (дБ) для рассмотренных выборок представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Стадия	α	β	R^2	M	Med	Var	σ
I							
Без инъекции	5,42	0,054	0,97	53,3	52	50,6	7,1
С инъекцией	6,39	0,071	0,97	52,5	51	34,8	5,9
II							
Без инъекции	6,32	0,064	0,99	52,3	50	46,3	6,8
С инъекцией	6,27	0,063	0,98	52,4	50	49,4	7,0
III							
Без инъекции	6,73	0,060	0,99	52,5	50	48,9	7,0
С инъекцией	6,57	0,057	0,99	52,6	51	52	7,2

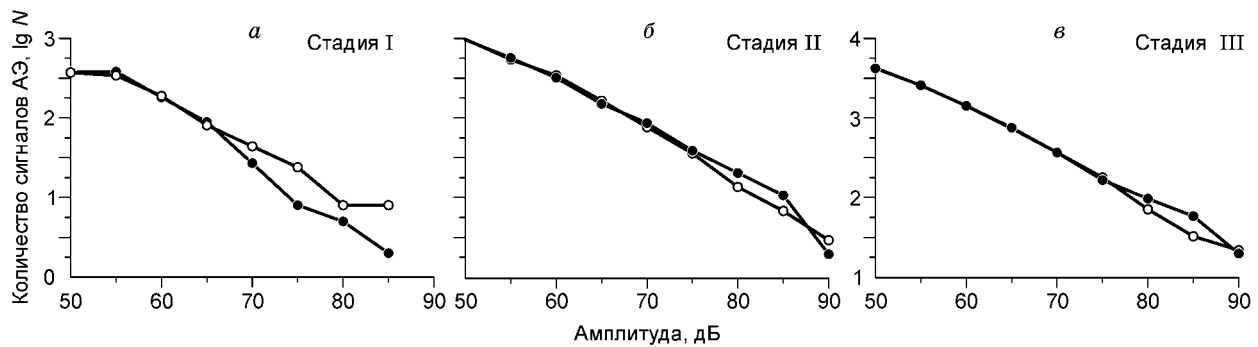


Рис. 5. Зависимости числа акустических сигналов от амплитуды на стадиях I, II, III.

Полые кружки — сигналы без инъекции, залитые кружки — сигналы после инъекции. а—в — пояснения см. в тексте.

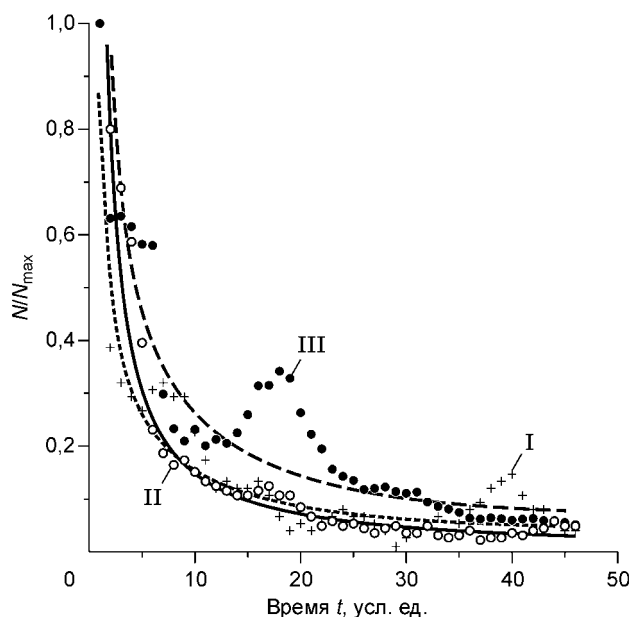
Каждое из распределений отличается от нормального. Поэтому проверка гипотез о различиях или сходстве выборок после инъекции и без нее проведена с использованием непараметрических критериев согласия. Использованы критерии χ -квадрат, сдвига (Вилкоксона и Ван дер Вардена), масштаба рассеяния (Ансари-Брадли и Клотца) и интегральных различий между выборками (Колмогорова—Смирнова) [12]. Во всех случаях не удалось отвергнуть нулевую гипотезу, т. е. найти значимые различия между выборками.

Назовем условно все акты активизации после инъекции воды „роями“. Их длительность изменялась в диапазоне от десятков минут до десятков часов. Для оценки закономерностей в структуре активизации все они были приведены к безразмерным единицам следующим образом. Длительность роя T разбивалась на 10 равных временных интервалов и величина $\tau = T/10$ принималась за длину окна последующего суммирования числа акустических импульсов в нем. Суммирование затем проводилось с шагом $1/5\tau$. Амплитуда сумм N нормировалась на максимальное значение N_{\max} . Таким образом, все гистограммы насчитывали по оси абсцисс равное количество точек (46), т. е. были приведены к одному и тому же условному времени t , хотя масштаб времени для каждой гистограммы был различным и пропорциональным длительности соответствующего роя. Амплитуды всех гистограмм изменялись в пределах от 0—1.

Анализ полученных гистограмм (рис. 6) показал, что после нарастания числа сигналов в первые 10—20 с наблюдается затем их постепенный спад. В грубом приближении форма кривых описывается степенным законом

$$N/N_{\max} = C/(1+t)^p, \quad (2)$$

известным в сейсмологии как закон Омори спада количества афтершоков. Коэффициенты p в нашем случае варьируют в пределах 0,7—1,0. Для показанных на рис. 6 трех графиков коэффициенты $p = 0,76, 1,05, 0,83$ при величине коэффициента детерминации $R^2 = 0,62, 0,92$ и $0,83$ соответственно. Номера I, II, III указывают на соответствующие стадии эксперимента. Длительность роев I, II, III при пересчете t в реальное время составила 19,73, 6,36 и 56,07 ч, а число импульсов в каждом рое равнялось 150, 390, 2786 соответственно.



Для того чтобы более детально изучить структуру нарастания числа событий в первые интервалы времени после инъекции, была выполнена следующая процедура. Рассчитывалось отношение числа акустических импульсов dN к длине интервала осреднения dt , причем длительность последних возрастала по логарифмическому закону, что позволяло получить ряд точек, отстоящих друг от друга на равный интервал в логариф-

Для того чтобы более детально изучить структуру нарастания числа событий в первые интервалы времени после инъекции, была выполнена следующая процедура. Рассчитывалось отношение числа акустических импульсов dN к длине интервала осреднения dt , причем длительность последних возрастала по логарифмическому закону, что позволяло получить ряд точек, отстоящих друг от друга на равный интервал в логариф-

Рис. 6. Примеры изменения числа акустических сигналов со временем после инъекции на стадиях I, II, III.

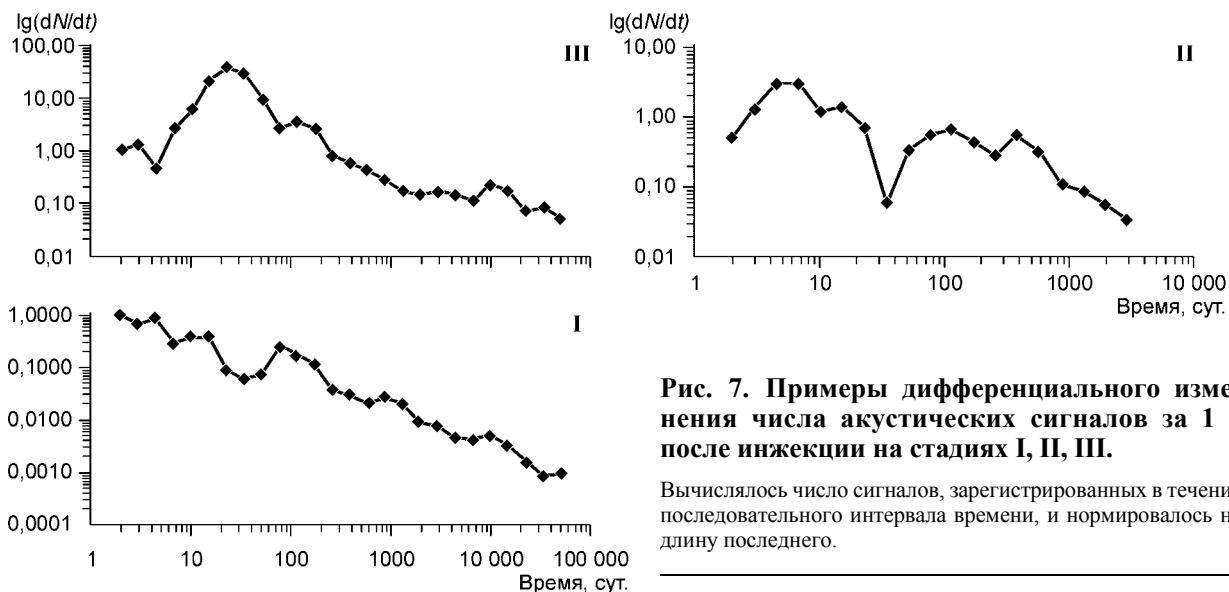


Рис. 7. Примеры дифференциального изменения числа акустических сигналов за 1 с после инъекции на стадиях I, II, III.

Вычислялось число сигналов, зарегистрированных в течение последовательного интервала времени, и нормировалось на длину последнего.

мическом масштабе времени. На рис. 7 в таком представлении показаны графики тех же самых роев, что и на рис. 6. Видно, что лишь график I в первом приближении отвечает модифицированному закону Омори (в дифференциальной форме)

$$dN/dt = C_1/(C_2 + t)^p. \quad (3)$$

Однако можно заметить, что на малых временах t график выполаживается, что говорит о влиянии положительного коэффициента C_2 .

Графики II и III рис. 7 уже не могут быть описаны уравнениями типа (3). Закон Омори (релаксационный тип) превалирует только в заключительной части реакции АЭ на инъекцию. Возрастание dN/dt на малых временах требует другого объяснения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При обсуждении возможных причин активизации АЭ после инъекции воды примем во внимание важную особенность: не удалось обнаружить существенных различий в форме сейсмограмм (см. рис. 4) и графиках повторяемости (см. рис. 5) для акустических сигналов, зарегистрированных до и после инъекции воды. Это приводит к выводу, что механизм развития источников сигналов (трещин) в обоих случаях был один и тот же. С учетом незначительного объема впрыскиваемой жидкости, не меняющего водонасыщение модели в целом, можно полагать, что активизация вызывается некоторым триггерным воздействием, реакция на которое наступала практически одновременно с моментом инъекции воды в активную (нагруженную) трещину.

Увеличение скорости трещинообразования может быть вызвано уменьшением прочности смачиваемой области модели, увеличением хрупкости или напряжений. Эффект уменьшения прочности твердого тела в результате адсорбции, хемосорбции, смачивания и других физико-химических взаимодействий (эффект П.А. Ребиндера) установлен для твердых тел разного состава, в том числе и для горных пород [13, 14]. Он вызван уменьшением свободной поверхностной энергии U на границе жидкости и твердого тела.

Определенный рентгеноспектральным анализом состав модели (мас.%) в нашем эксперименте (табл. 2) содержит много компонентов, в том числе силикатов, проявление эффекта Ребиндера для которых известно [15].

В области трещиноватости процессы, понижающие прочность и увеличивающие скорость разрушения, локализованы вблизи фронта растущей трещины и включают термофлуктуационные акты гидролитического расщепления межатомных связей, активируемого приложенными напряжениями [16]. В случаях преимущественно хрупкого разрушения выполняется соотношение Гриффитса

$$P \sim (E/L)^{1/2} U^{1/2}, \quad (4)$$

характеризующее изменение прочности P в зависимости от поверхностной энергии U , длины существующей трещины L и величины модуля Юнга E .

Таблица 2.

Номер пробы	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO
1 Н	—	1,78	4,32	28,64	0,206	0,43	45,30	0,21	0,002	0,029	2,85
1 В	—	1,21	5,05	52,97	0,145	1,26	23,95	0,18	0,006	0,019	2,12
2 Н	—	1,77	4,22	31,87	0,190	0,48	43,67	0,21	0,004	0,037	2,72
2 В	—	1,16	5,16	52,48	0,138	1,24	23,17	0,191	0,005	0,037	2,14

Размер трещин, вызывавших в наших экспериментах акустические сигналы, можно косвенно оценить следующим образом. Лабораторным экспериментом [17] было установлено, что длина L возмущающей с постоянной скоростью V трещины прямо пропорциональна длительности τ нарастания переднего фронта излучаемого ею акустического сигнала.

$$L \text{ (мм)} = a \cdot V \text{ (мм/мкс)} \cdot \tau \text{ (мкс)}, \quad (5)$$

где a — коэффициент пропорциональности, близкий к единице. Длительность переднего фронта большинства акустических сигналов в наших экспериментах составляла порядка 2 мкс, а скорость распространения трещин в ослабленной средней области модели примем равной половине скорости упругой продольной волны, т. е. около 1 мм/мкс. Таким образом, размеры трещин, найденные при таком подходе, оцениваются величиной ≈ 2 мм.

Видимая на поверхности модели влажная область при инъекции воды объемом 0,5 см³ имела линейный размер вдоль простирания трещины порядка 30 мм. В связи с этим не удивительно, что эффект смачивания мог привести к активизации десятков трещин.

Насколько результаты описанных экспериментов могут быть полезны для лучшего понимания процессов, происходящих в сейсмоактивных областях? Обратим внимание на то, что в ряде случаев закономерность изменения количества акустических сигналов после инъекции (см. рис. 6) напоминает закон Омори затухания афтершоков. Существенным отличием от сейсмологической ситуации является отсутствие главного по энергии события (основного толчка) в начале активизации (см. рис. 3—5). Аналогичный вывод изложен в работе [18], где отмечается, что наличие главного события в его сейсмологическом смысле не является необходимым условием формирования релаксационных процессов подобных афтершоковым последовательностям. Напомним, что такая же закономерность (типа закона Омори) была обнаружена нами ранее при регистрации акустических событий, возникающих после удара по поверхности модели свободно падающим шариком [11], причем переданная в модель упругая энергия удара была на три порядка меньше потенциальной энергии, накопленной моделью в процессе нагружения. Из этого следует, что как удар шарика, так и инъекция небольшого количества воды приводят находящуюся в близкритическом состоянии область модели в возбужденное состояние, и процесс релаксации к более устойчивому состоянию описывается уравнением (2).

Постепенное нарастание АЭ на двух верхних графиках (см. рис. 7) напоминает ход сейсмической активности при роях землетрясений. На рис. 8 представлены в качестве примера три роя землетрясений, произошедших на Камчатке. Мы использовали сейсмический каталог, предоставленный Камчатской опытно-методической сейсмической партией. В нем представлены, практически без пропуска [19] землетрясения с энергетическим классом $K \geq 8,5$. При этом из каталога были исключены афтершоки землетрясений класса $K \geq 12$.

Для выделения роев использовалась следующая процедура [11]. Считалось, что рой (кластер) — это появление двух или более сейсмических событий, если местоположение их гипоцентров, разница во времени появления и энергия удовлетворяют следующим условиям. Расстояние между гипоцентрами должно быть меньше критического, вычисляемого по формуле

$$R_{cr} = 3L + B. \quad (6)$$

Здесь L представляет собой размер сейсмического разрыва; коэффициент 3 соответствует критерию разрушения [20], который указывает на то, что перед макроразрушением твердого тела в его объеме накапливается критическая плотность трещин, расположенных на утроенном расстоянии их размеров; коэффициент B введен для учета ошибок в определении гипоцентров и равнялся 10 км. Размер разрыва L вычислялся по предложенному в работе [21] уравнению

$$\lg L \text{ (км)} = DK + C, \quad (7)$$

где $D = 0,244$, $C = 2,266$.

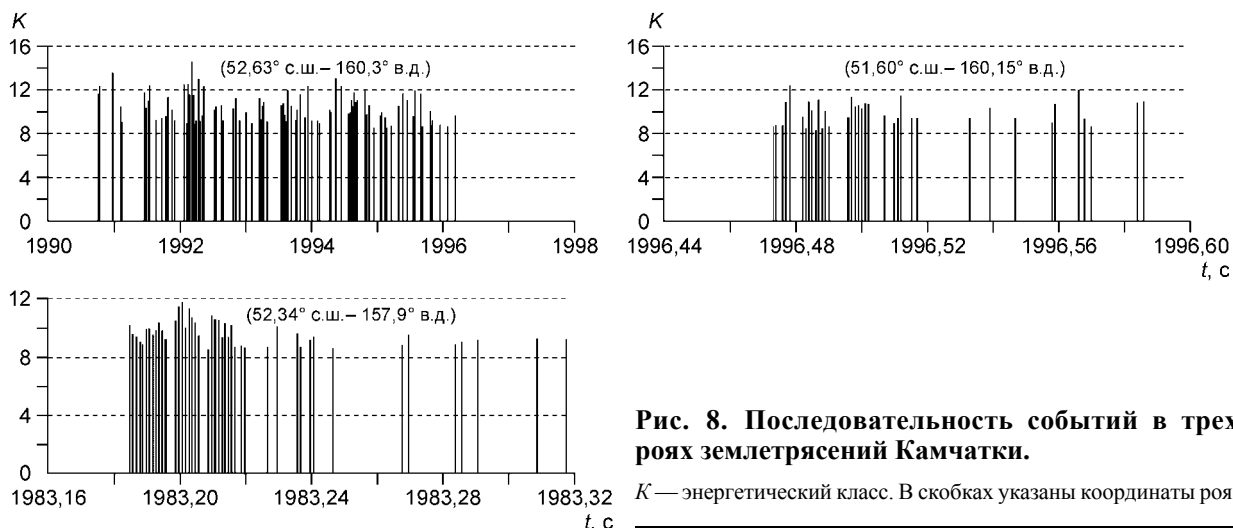


Рис. 8. Последовательность событий в трех роях землетрясений Камчатки.

K — энергетический класс. В скобках указаны координаты роя.

Время между двумя событиями должно быть меньше критического, вычисляемого по формуле

$$T_{cr} = \alpha \cdot 10^{\beta(K_i - K_0)}, \quad (8)$$

где K_0 — минимальный представительный энергетический класс $K = 8,5$; коэффициенты $\alpha = 0,065$ и $\beta = 0,5$ отражают уровень сейсмической активности и изменение частоты землетрясений в зависимости от энергии.

Представленные на рис. 8 рои имеют разные длительность и энергетический состав. Однако во всех случаях главное по энергии событие происходит не в начале роя. На рис. 9 эти же сейсмические рои представлены в форме, аналогичной рис. 7.

Постепенное нарастание акустических (см. рис. 7) и сейсмических (см. рис. 9) событий позволяет предположить, что рои сейсмической активности могут возникать при триггерном воздействии водных растворов на разломную зону, находящуюся в метастабильном состоянии. В некоторых случаях похожее явление наблюдается и в афтершоковых последовательностях. На рис. 10 представлены три серии афтершоков на Камчатке. Они произошли после землетрясений энергетических классов $K > 14$, эпицентры которых расположены примерно в тех же районах Тихоокеанской сейсмоактивной области, что и центры показанных на рис. 9 роев землетрясений. В двух случаях из трех отмечено нарастание активности в течение первых двух суток после главного толчка. Афтершоки выделялись с помощью программы [22], в которой использовался алгоритм [23]. Спад количества афтершоков со временем на рис. 10 характеризуется уменьшением примерно на 3 порядка величины dN/dt при возрастании времени t на 1 порядок.

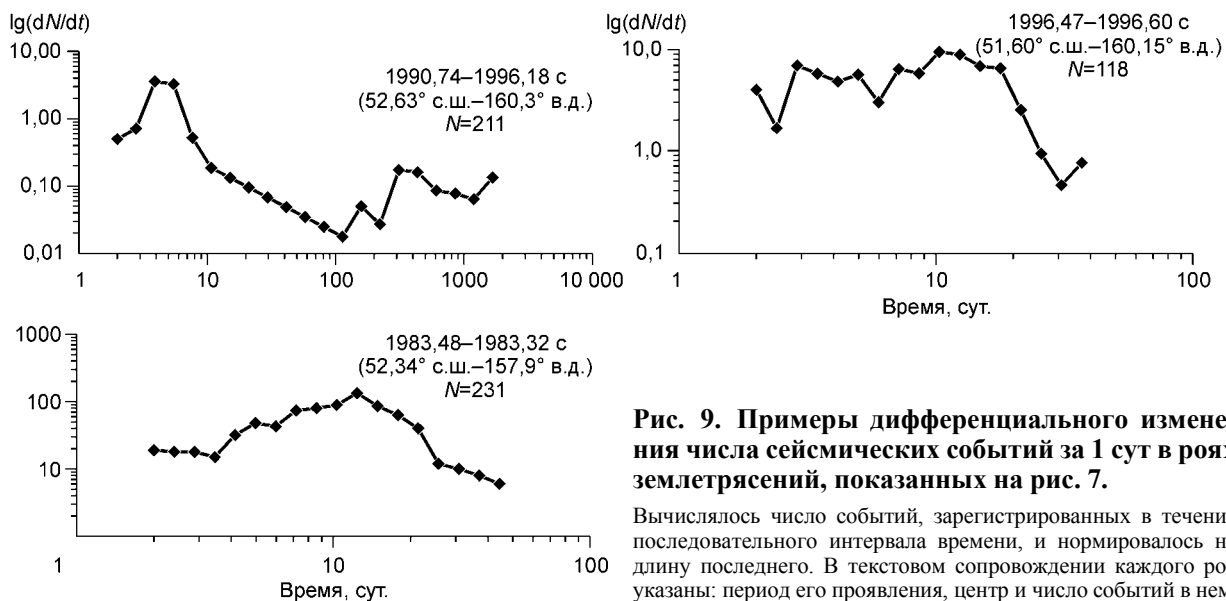


Рис. 9. Примеры дифференциального изменения числа сейсмических событий за 1 сут в роях землетрясений, показанных на рис. 7.

Вычислялось число событий, зарегистрированных в течение последовательного интервала времени, и нормировалось на длину последнего. В текстовом сопровождении каждого роя указаны: период его проявления, центр и число событий в нем.

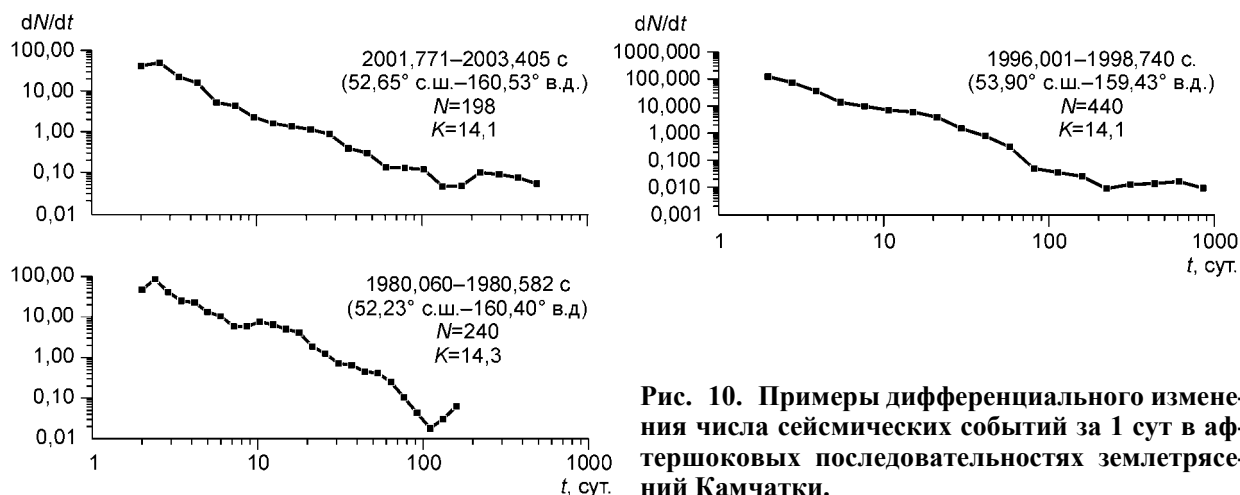


Рис. 10. Примеры дифференциального изменения числа сейсмических событий за 1 сут в афтершоковых последовательностях землетрясений Камчатки.

Вычислялось число событий, зарегистрированных в течение последовательного интервала времени, и нормировалось на длину последнего. В текстовом сопровождении каждой последовательности указаны: период ее проявления, координаты, число событий в ней и энергетический класс главного толчка (K).

Однако спад акустической активности (см. рис. 7) составляет только 1—2 порядка dN/dt на 1 порядок возрастания t . Это свидетельствует, по-видимому, о длительном действии механизма активизации после инъекции по сравнению с влиянием главного толчка в сейсмологической ситуации.

Обсудим еще одно предположение. В литературе описаны многочисленные случаи изменения уровня или дебита подземных вод перед землетрясениями. Обычно они объясняются изменением напряженного состояния пород, вызывающим дилатансию и вариации внутривещного давления, и квалифицируются как предвестники в рамках дилатантно-диффузионной модели землетрясений [5]. Результаты настоящей работы показывают, что при интерпретации данного явления следует учитывать триггерные эффекты физико-химической кинетики.

Для теоретически обоснованного количественного описания графиков типа рис. 7, 9, 10 нужны дополнительные эксперименты при варьировании многих параметров, влияющих на изменение прочности и напряжений в трещиноватой области. Можно искать аналогию с процессами химической кинетики. Например, изменения во времени концентрации исходного вещества F , промежуточного G и конечного продукта H при последовательной реакции первого порядка описываются уравнениями [24]:

$$F = F_0 \exp(-pt), \quad (9)$$

$$G = G_0 \exp(-qt) + [\exp(-pt) - \exp(-qt)] pF_0/(q-p), \quad (10)$$

$$H = H_0 + F_0 \exp(-pt) + G_0 \{1 - \exp(-pt) - [\exp(-qt) - \exp(-pt)] F_0 G_0 / (1 - q/p)\}, \quad (11)$$

где p, q — константы скоростей изменения концентраций, индексами 0 — обозначены исходные концентрации.

Предположим, что в нашем случае F, G, H — это концентрации воды напряженных трещин и продукта их взаимодействия, т. е. очагов акустических сигналов. Анализ уравнений показывает, что величины функции $G(t)$ и $H(t)$ проходят через максимумы при возрастании времени t , однако нормированные на t величины dG/dt и dH/dt демонстрируют только последовательный спад. Не удастся получить аналогию с формой кинетики АЭ, представленной на рис. 7. Требуется введение дополнительного члена, приводящего к быстрому увеличению H и, по-видимому, G в начальный период процесса. Структура такого члена нам не известна.

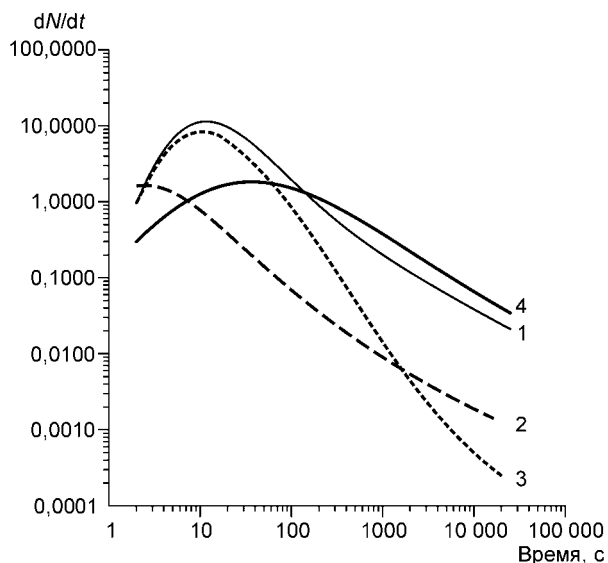
Второй подход состоит в применении идеи, заложенной в уравнение кинетической концепции прочности [25]

$$d\varepsilon/dt = \varepsilon_0 \exp[(\gamma\sigma - U_0)/kT], \quad (12)$$

которое описывает скорость деформации нагружаемого твердого тела: здесь γ — структурный параметр, σ — приложенное механическое напряжение, U_0 — энергия активации, k — газовая постоянная и T — температура.

Рис. 11. Форма изменения числа акустических событий со временем, вычисленная по уравнениям (11), (12).

Коэффициенты уравнения (12) N_0 , k , V , m составляли: график 1 — 100; 0,1; 17; 1, график 2 — 5; 0,1; 5; 1, график 3 — 100; 0,01; 17; 1, график 4 — 150; 0,1; 17; 0,5.



В нашем случае кинетика активизации и последующего спада акустической эмиссии после инъекции воды включает, как минимум, два конкурирующих процесса. Первый приводит к увеличению количества активных трещин (источников АЭ), например, в результате эффекта Ребиндера. Однако проявление этого эффекта должно постепенно ослабляться вследствие ограниченного числа находящихся в метастабильном состоянии трещин, уменьшения накопленной потенциальной энергии в результате АЭ и исчерпания количества воды, вызвавшей активизацию АЭ.

Предположим, что в условиях хрупкого трещинообразования число возникающих в единицу времени трещин равно dN/dt и определяется уравнением

$$dN/dt = (dN/dt)_0 \exp [\phi(t) - \Psi(t)] . \quad (13)$$

По аналогии с формулой (12) можно предположить, что $\phi(t)$ и $\Psi(t)$ описывают изменение со временем напряжения и энергии активации. Тогда в ходе первого процесса (активизация АЭ) число трещин возрастает при увеличении $\phi(t)$ вследствие возрастания напряжения на кончиках существующих трещин при уменьшении внутреннего трения и(или) уменьшения $\Psi(t)$ вследствие падения величины энергии активации. Интенсивность второго процесса (спад АЭ) также возрастает по мере развития первого. Ограничимся простым допущением, что количество активных трещин в рассматриваемый момент времени t_i уменьшается на число тех трещин, которые породили ранее акустические сигналы в ходе первого процесса и стали неактивными (не напряженными до субкритического уровня).

Тогда количество возникающих в единицу времени трещин может быть оценено из соотношения

$$dN/dt = dN/dt_i - dN/dt_{i-1} , \quad (14)$$

где значения dN/dt в последовательных точках вычисляются по уравнению (13). Графики на рис. 11 рассчитаны по соотношению (14) с использованием формулы (13) в виде

$$dN/dt = a \exp [t^k - V/(1 + t^m)] . \quad (15)$$

Варьирование коэффициентов позволяет воспроизвести основные типы развития акустической активизации после инъекции воды (см. рис. 7). Уменьшение коэффициента V приводит к уменьшению скорости трещинообразования в начальных этапах активизации, так что график 2 имеет форму графика I на рис. 7. Уменьшение коэффициентов k и m приводит, соответственно, к ускорению спада dN/dt со временем (график 3) и более пологому максимуму (график 4). В частности, экспериментальным данным I, II, III на рис. 7 наилучшим образом отвечают следующие значения свободных параметров: график I — $a = 50$, $k = 0,0477$, $V = 5$, $m = 0,2$; график II — $a = 10,3978$, $k = 0,12$, $V = 15$, $m = 1,2749$; график III — $a = 600$, $k = 0,0749$, $V = 30$, $m = 0,8884$. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что во всех случаях коэффициент $k \ll 1$. Это свидетельствует о небольшом росте первого подэкспоненциального члена в формуле (15), отвечающего в рамках обсуждаемой интерпретации за изменение произведения структурного параметра γ и напряжения σ (12).

Ясно, что реальный процесс включает разнообразные механизмы, так что количественное описание вызванной инъекцией воды АЭ должно описываться более строгими формулами. Мы хотим лишь подчеркнуть, что описанный в настоящей работе эффект не противоречит фундаментальной концепции прочности, в предположении, что подэкспоненциальные члены в формуле (12) зависят от времени (уравнение 13). При этом важно, что качественно реакция АЭ на инъекцию небольшого количества воды описывается относительно простым уравнением.

ВЫВОДЫ

В результате долговременных экспериментов показано, что инъекция малого по сравнению с объемом модели количества воды в область активных трещин приводит к резкой активизации акустической эмиссии.

Форма сейсмограмм и графики повторяемости акустических сигналов, зарегистрированных до и после инъекции воды, значимо не различаются, что говорит о триггерной природе эффекта.

Временная последовательность вызванных инъекцией акустических событий качественно аналогична роевой и в ряде случаев афтершоковой активности землетрясений, что не исключает влияния данного фактора на сейсмичность.

Разные типы временной последовательности вызванной акустической активности описываются известным из кинетической теории прочности уравнением при условии зависимости от времени параметров энергии активации и действующих напряжений.

Работа поддержана программой 5 ОНЗ РАН (проект „Физика очагов землетрясений и условия их формирования“) и РФФИ (грант 05-05-08022).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Симпсон Д. и др.** Возбужденная сейсмичность в районе водохранилища Нурекской ГЭС. Душанбе, Дониш, 1988, 402 с.
2. **Гидрогеодинамические предвестники землетрясений.** М., ИФЗ АН СССР, 1984, 212 с.
3. **Соболев Г.А.** Основы прогноза землетрясений. М., Наука, 1993, 313 с.
4. **Brace Wf., Martin R.J.** A test of the law of effective stress for crystalline rocks of low porosity // Intern. J. Rock Mech. Mining. Sci., 1968, v. 5, p. 415—426.
5. **Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P.** Earthquake prediction: a physical basis // Science, 1973, v. 181, p. 803—810.
6. **Miller S.A., Ben-Zion Y., Burg J.** A three-dimensional fluid-controlled earthquake model: behavior and implications // J. Geophys. Res., 1999, v. 104, № B5, p. 10621—10638.
7. **Смирнов В.Б., Черепанцев А.С., Мирзоев В.К.** Фрактальные свойства наведенной сейсмичности в районе Нурекского водохранилища. Наведенная сейсмичность. М., Наука, 1994, с. 138—147.
8. **Гольдин С.В.** Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли, 2004, № 10, с. 37—54.
9. **Djadjkov P.G.** Induced seismicity at the Lake Baikal: principal role of load rate // Abstracts of the 29th General Assembly of the International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, August 18—28, 1997. Thessaloniki, Greece. 1997, p. 359.
10. **Соболев Г.А., Пономарев А.В.** Способ определения стадии неустойчивости модели геологической среды // Докл. РАН, 1997, т. 356, № 4, с. 541—544.
11. **Соболев Г.А., Пономарев А.В.** Физика землетрясений и предвестники. М., Наука, 2003, 270 с.
12. **Кулаичев А.П.** Методы и средства анализа данных в среде Windows. Stadia 6/0. М., НПО Информатика и компьютеры, 1996, 256 с.
13. **Ребиндер П.А., Щукин Е.Д.** Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения // Успехи физ. наук, 1972, т. 108, с. 3—42.
14. **Перцов Н.В., Коган Б.С.** Физико-химическая механика // Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем, 1981, № 13, с. 53—65.
15. **Траскин В.Ю., Перцов Н.В., Коган В.С.** Влияние воды на механические свойства и дисперсную структуру горных пород // Вода в дисперсных системах. М., Химия, 1989, с. 83—100.
16. **Atkinson V.K.** Subcritical crack growth in geological materials // J. Geophys. Res., 1984, v. 89, № B6, p. 4077—4114.
17. **Куксенко В.С., Станчиц С.А., Томилин Н.Г.** Оценка размеров растущих трещин и областей разгрузки по параметрам акустических сигналов // Механика композитных материалов, 1983, № 3, с. 536—543.
18. **Смирнов В.Б., Пономарев А.В.** Закономерности релаксации сейсмического режима по натурным и лабораторным данным // Физики Земли, 2004, № 10, с. 26—36.
19. **Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С.** Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки // Вулканология и сейсмология, 1996, № 4, с. 64—74.
20. **Куксенко В.С.** Модель перехода от микро- к макроразрушению твердых тел // Докл. I всесоюз. школы-семинара „Физика прочности и пластичности“. Л., Наука, 1986, с. 36—41.
21. **Ризниченко Ю.В.** Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М., Наука, 1976, с. 9—27.

22. **Смирнов В.Б.** Опыт оценки представительности каталогов землетрясений // Вулканология и сейсмология, 1997, № 4, с. 93—105.
23. **Молчан Г. М., Дмитриева О. Е.** Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Вычислительная сейсмология, 1991, вып. 24, с. 19—50.
24. **Бенсон С.** Основы химической кинетики. М., Мир, 1964, 603 с.
25. **Журков С.Н.** Кинетическая концепция прочности // Вестн. АН СССР, 1968, вып. 3, с. 46—52.

*Поступила в редакцию
28 сентября 2005 г.*