

УДК 550.344.11

## РЕГИСТРАЦИЯ ЭЛЕКТРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

© 2002 г. Член-корреспондент РАН В. В. Адушкин, Н. К. Капустян, В. Г. Спунгин

Поступило 02.04.2002 г.

Взаимодействие электрических и сейсмических естественных полей Земли проявляется во многих феноменах, в том числе в так называемом электросейсмическом эффекте, при котором изменения электрического поля приводят к вариациям параметров сейсмических полей. Теоретическая возможность этого эффекта рассмотрена в [1], возникновение его связано с изменением мелкомасштабной мозаики внутренних напряжений в кварцсодержащей горной породе на границах зерен, приводящей к перераспределению поля локальных деформаций и микрорастрескиваниям. Все это может проявляться в виде высокочастотного сейсмического излучения, подобного сейсмической эмиссии [2]. В этом электросейсмический эффект отличается от обратного пьезоэффекта горных пород [3], при котором изменения электрического поля ведут к деформациям отдельных кварцевых (или иных) включений и наблюдается осредненный, интегральный макроэффект [4].

В данном сообщении приведены результаты полевых наблюдений электросейсмического эффекта, впервые зарегистрированного при воздействии грозных разрядов на выходы на поверхность кварцсодержащих горных пород вследствие пьезоэффекта зерен кварца и изменения мозаики внутренних напряжений. Эффект наблюдается как эмиссионное сейсмическое излучение, более высокочастотное, чем воздействие. Рассматриваемое явление отличается от известного электросейсмического эффекта, обусловленного токами во влажных сланцевых породах [5].

Натурные эксперименты проводились в Северном Прионежье, разрывное нарушение Поор-Порог. Зона характеризуется выходом на поверхность богатых кварцем коренных пород. Наблюдались одновременно микросейсм и вариации

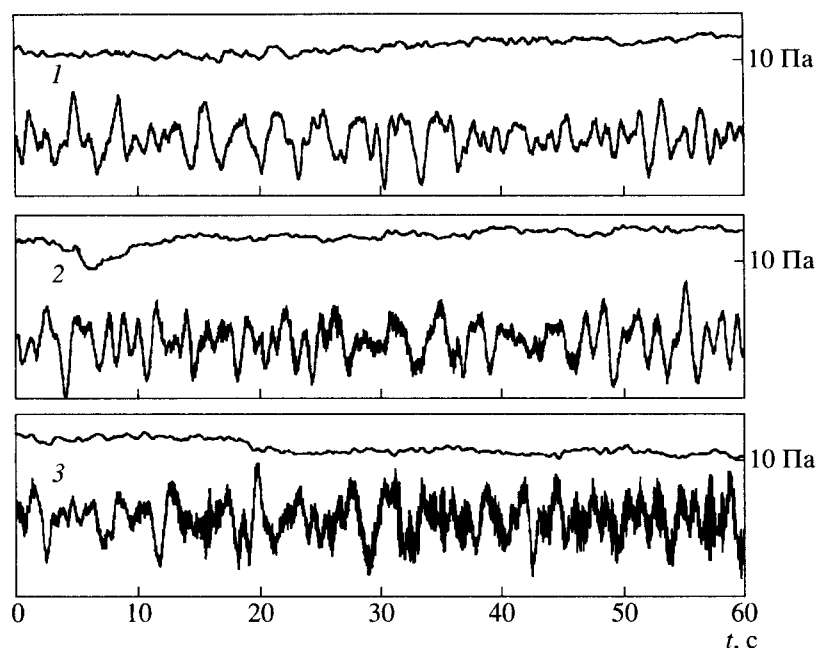
атмосферного давления. Эксперименты были ориентированы на регистрацию тонких эффектов реакции разрывного нарушения на разного рода экзогенные и эндогенные слабые воздействия.

Микросейсм регистрировались в полосе 0.5–30 Гц трехкомпонентной расстановкой в точке (вертикальной Z, горизонтальными N–S, E–W) сейсмометров CM-3, вариации давления – микробарографом (MPX4115AP, Motorola, Inc.), запись велась станцией notebook с 16-разрядным АЦП (PCM-DAS16D/16, ComputerBoards, Inc.). Аппаратура в достаточной степени экранирована от электромагнитных помех, о чем, в частности, можно судить по отсутствию импульсных сигналов на записи микросейсм во время грозы.

На рис. 1 приведены характерные примеры полученных записей вертикального сейсмометра и микробарографа: 1 – в спокойное время; 2 – содержащих отклик на порыв ветра; 3 – содержащих отклик на прохождение грозного облака над точкой наблюдения при сухой (без дождя) грозе. Следует отметить, что порывы ветра вызывают качание высоких сосен, корни которых уходят по трещинам глубоко в массив; деревья создают импульсы с характерным временем 0.2–0.5 с. Просматривается корреляция сейсмических колебаний с бухтой на кривой микробарографа. Видно, что отклик на оба типа экзогенных воздействий состоит в появлении высокочастотных колебаний, но эти типы существенно различаются по развитию микросейсмического процесса во времени и по частоте колебаний. При порыве ветра высокочастотные колебания возникают практически одновременно с импульсом на записи микробарографа. Амплитуда электросейсмического излучения сначала нарастает и затем затухает (на рис. 1 длительность отклика около 50 с). При прохождении грозы высокочастотные колебания присутствуют постоянно, их амплитуда модулируется грозовой активностью.

При обработке микросейсм строились следующие статистические оценки: спектры мощности  $S_{ij}(f)$  для каждой из компонент регистрации ( $i, j =$

*Институт динамики геосфер  
Российской Академии наук, Москва  
Объединенный институт физики Земли  
им. О.Ю. Шмидта  
Российской Академии наук, Москва*



**Рис. 1.** Характерные примеры записей микробарографа (верхняя кривая) и вертикального сейсмометра (нижняя кривая): в спокойное время (1), содержащих отклики на порыв ветра (2) и на прохождение грозового облака над точкой наблюдения (3) (кристаллический массив, Прионежье).

= Z, E–W, S–N) и функции когерентности  $\kappa_{ij}(f)$  попарно для компонент:

$$\kappa_{ij}(f) = \frac{|S_{ij}(f)|}{\sqrt{S_{ii}(f) \cdot S_{jj}(f)}};$$

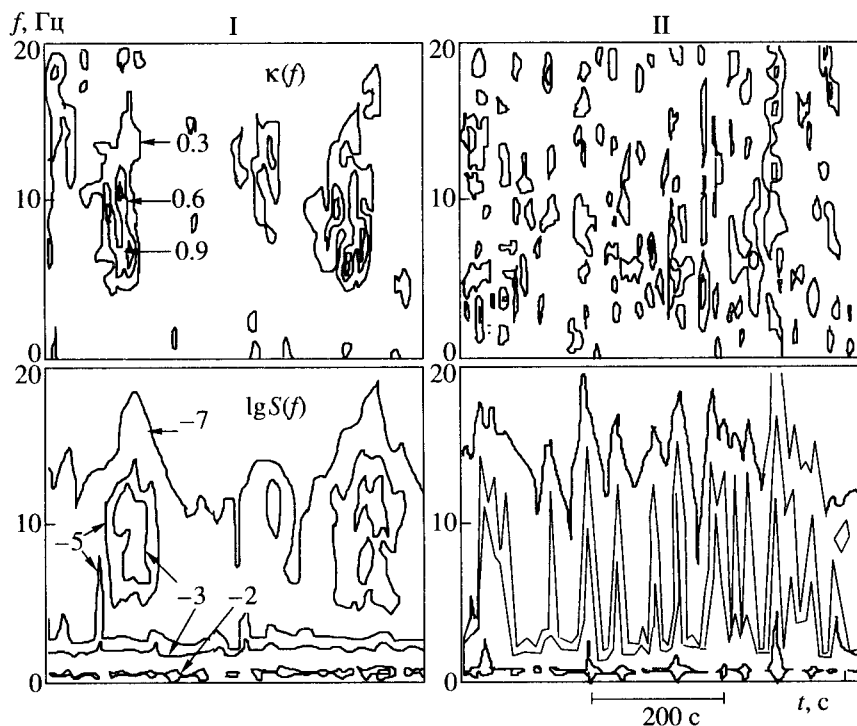
$|S_{ij}(f)|$  – взаимный осредненный спектр. Функция когерентности практически является коэффициентом корреляции для каждой частотной составляющей, присутствующей на компонентах регистрации. В работе [6] показано, что если шум собирается из всего объема среды, то  $\kappa_{ij}(f) = 0$ , если есть выделенное направление (на источник в среде или на поверхности), то  $0 < \kappa_{ij}(f) \leq 1$  в полосе частот сигнала источника.

Для слежения за динамикой микросейсмического процесса проводились расчеты в скользящем по времени окне, в результате которых построены спектрально-временные (СВАН) и когерентно-временные (КВАН) диаграммы:  $S_{ij}(f, t)$  и  $\kappa_{ij}(f, t)$ . На рис. 2 представлены такие поверхности в линиях равного уровня для двух интервалов времени: за 1 ч до грозы (I) при порывах ветра и во время прохождения грозового облака с разрядами над точкой регистрации (II), ветра практически нет. Сравнение диаграмм подчеркивает закономерности, отмеченные выше, а также представляет информацию об излучающей зоне. До грозы наблюдался высокочастотный эмиссионный отклик на низкочастотные импульсы, создаваемые при порывах ветра. На СВАН-диаграмме

это пятна с длительностью примерно 50–100 с в полосе частот 5–13 Гц, расположенные вслед за максимумами на низкочастотном краю. На КВАН-диаграмме пятнам соответствуют также всплески (пятна), т.е. излучение идет из достаточно компактной области. Анализ функций когерентности для разных пар компонент регистрации показывает, что излучающая зона по азимуту совпадает с зоной разлома. Таким образом, ситуация аналогична явлению сейсмической эмиссии [2], т.е. излучение разломной зоной генерируется механическим воздействием ветер–деревья.

Во время грозы картина иная – на СВАН-диаграммах высокочастотные “пятна”, как правило, не следуют за низкочастотными импульсами, т.е. это не ответ на механический импульс. На КВАН-диаграмме таким “пятнам” не соответствуют максимумы когерентности (видна мелкая россыпь всплесков), т.е. высокочастотный сейсмический сигнал собирается из разных азимутов, возможно из всего объема, содержащего зерна кварца. Таким образом, можно утверждать, что регистрируется электросейсмический эффект, выраженный в появлении высокочастотного сейсмического излучения при воздействии сухой грозы на кварцсодержащую породу.

Использование сейсмического канала, калиброванного в абсолютных уровнях скоростей смещений  $V_k$ , позволяет оценить для сейсмического излучения добавочные деформации  $e = \frac{V_k}{V}$ , где  $V$  –



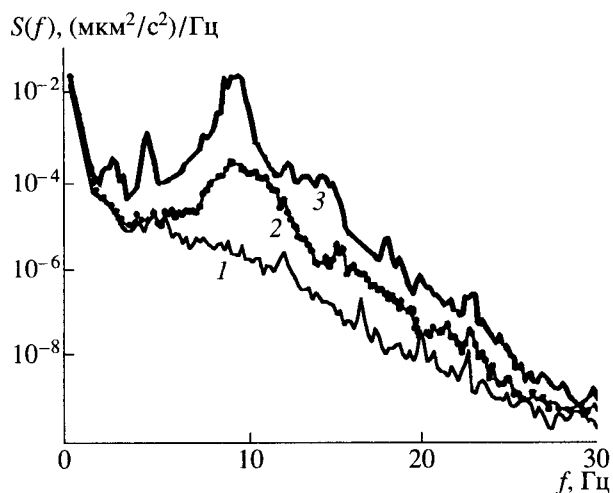
**Рис. 2.** Результаты обработки сейсмограмм, полученных за 1 ч до грозы при порывах ветра (I) и при прохождении грозового облака над точкой регистрации (II), ветра нет. Вверху – диаграммы когерентно-временного анализа (КВАН) вертикальной и горизонтальной компонент, внизу – диаграммы спектрально-временного анализа (СВАН) вертикальной компоненты записи (кристаллический массив, Прионежье).

скорость распространения сейсмических волн в среде. На рис. 3 показаны результаты расчетов спектров мощности микросейсм в абсолютных уровнях, полученных в точке наблюдения в течение одного сеанса, но для разных ситуаций: спокойной (1), с эмиссионной компонентой ветровых помех (2) и при максимуме грозовой активности (3). Как уже отмечалось, всплеск эндогенного излучения как реакция на воздействие характеризуется полосой частот 5–13 Гц, что соответствует появлению соответствующих максимумов в спектрах.

Низкочастотный импульс воздействия ветра характеризуется величиной  $V_k = 5 \cdot 10^{-7}$  м/с, для отклика на него на высоких частотах  $V_k \approx 5 \cdot 10^{-9}$  м/с. Приняв для выходов коренных пород  $V = 5000$  м/с, получаем оценки для ветрового воздействия  $e \approx 10^{-10}$  и отклика  $\tilde{e} \approx 10^{-12}$ . Сейсмический отклик на грозу над точкой регистрации больше, чем на ветровой, по мощности на два порядка (рис. 3), т.е. на порядок по скоростям смещений, и, следовательно,  $\tilde{e} \approx 10^{-11}$ . Таким образом, добавочные деформации при электрическом воздействии должны быть на порядок больше, чем при ветре, т.е. получаем экспериментальную оценку при грозе  $e \approx 10^{-9}$ , учитывая, что частоты воздействий

близки (около 5 Гц [7]), т.е. сравнимы длины волн воздействий, деформирующих среду.

Сравним экспериментальную оценку с расчетом величины деформаций в среде вследствие электросейсмического эффекта, исходя из пред-



**Рис. 3.** Спектры мощности микросейсм, полученные в точке наблюдения в течение одного сеанса, но для разных ситуаций: спокойной (1) и с экзогенными воздействиями ветра (2) и грозовой активностью (3) (кристаллический массив, Прионежье).

ложенного механизма. Напряженность электрического поля  $E$  в атмосфере при грозе оценивается весьма приближенно:  $E > 10^3$  В/м [8],  $E \approx 10^4$ – $10^6$  В/м [9]. Электрическая прочность сухого воздуха  $E = 32 \cdot 10^5$  В/м. Учитывая, что коэффициент прохождения атмосферных электрических полей в массив  $g \approx 0.5$  [1], примем в условиях грозовой деятельности для пиковых значений в среде  $E = 3 \cdot 10^5$  В/м (10 СГСЭ). Вариации электрического поля в среде приводят к деформациям отдельных зерен кварца в пьезоэлектрических горных породах и к нарушению аккомодации их в массиве. При этом энергия электрического поля  $W_E$  будет преобразовываться в механическую  $W_M$ , эффективность преобразования характеризуется коэффициентом  $K = \left(\frac{W_E}{W_M}\right)^{0.5}$ , связанным с пьезомодулями образца [10]. Выделившаяся механическая энергия в поликристалле приводит к изменению мозаики напряжений с максимумами на концентраторах, в том числе на границах зерен. Усредненные крупномасштабные пьезомодули  $d$  поликристаллического кварца из жил на два порядка меньше, чем для монокристалла, т.е.  $d = 10^{-9}$ – $10^{-10}$  СГСЭ [11]. Для оценки усредненной добавочной деформации  $e$  в пьезоэлектрической горной породе за счет электросейсмического эффекта воспользуемся соотношением  $e = dE$ .

Привлекая значение  $d = 10^{-9}$ – $10^{-10}$  СГСЭ для поликристаллического кварца и принятое для условий грозы значение  $E = 10$  СГСЭ, получим, что по порядку величины  $e \approx 10^{-8}$ – $10^{-9}$ . Принимая во внимание оценочный характер расчетов, можно отметить, что рассчитанная величина добавочной деформации  $e$  хорошо согласуется с экспериментальной оценкой.

Таким образом, электросейсмический эффект, возможность которого была предсказана

ранее теоретически, впервые зарегистрирован в природных условиях при воздействии грозových разрядов на выходы кварцосодержащих горных пород. Этот результат представляется существенным, так как экспериментально подтвержден еще один механизм переработки геофизической средой экзогенного воздействия, т.е. еще один способ взаимодействия геосфер планеты.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 01–05–79062).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярославский М.А., Капустян Н.К. // ДАН. 1990. Т. 315. № 2. С. 352–354.
2. Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. // ДАН. 1978. Т. 238. № 2. С. 303–305.
3. Волярович М.П., Пархоменко Э.И. // ДАН. 1954. Т. 99. № 2. С. 239–242.
4. Нейштадт Н.М., Биневич Л.Я., Мазанова З.В. В сб.: Разведочная геофизика в СССР на рубеже 70-х годов. М.: Недра, 1974. С. 202–207.
5. Анциферов М.С. В сб.: Применение сейсмоакустических методов в горном деле. М.: Наука, 1964. С. 180–185.
6. Володин А.А., Зеликман Э.И., Капустян Н.К., Шубик Б.М. В сб.: Геофизическая информатика и дистанционные методы изучения Земли. М., 1985. С. 114–127.
7. Юман М.А. Молния. М.: Мир, 1965. 157 с.
8. Русаков Н.Н. В сб. Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. М., 2000. С. 49–54.
9. Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Добровольский И.П. Электромагнитные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1982. 88 с.
10. Желудев И.С. Физика кристаллических диэлектриков. М.: Наука, 1968. 463 с.
11. Волярович Г.П., Волярович М.П., Пархоменко Э.И. и др. В сб.: Состояние и задачи разведочной геофизики. М.: Недра, 1970. С. 441–444.