

УДК 551.254:550.379:550.394:550.343.3

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ И АКУСТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД НА ПРОХОЖДЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ОТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ *

**П. В. Муратов¹, О. П. Руленко², Ю. В. Марапулец¹,
А. А. Солодчук¹**

¹ Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034, Камчатский край, с. Паратунка, ул. Мирная, 7

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9

E-mail: pavel-mure@yandex.ru, rulenko@ksc.net

Впервые обнаружен совместный электрический и акустический отклик приповерхностных осадочных пород на деформацию при прохождении сейсмических волн от землетрясений. Представлены результаты частотно-временного анализа этого отклика при четырех землетрясениях Южной Камчатки магнитудой 4.9–7.2 на расстоянии 100–200 км от эпицентра. Обнаружена зависимость его проявления от магнитуды землетрясения.

Ключевые слова: сейсмические волны, приповерхностные осадочные породы, деформация, электрический и акустический отклик.

© Муратов П. В. и др., 2018

*Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ИКИР ДВО РАН “Северо-восточный гелиогеофизический центр” СКР_558279.

Актуальность исследования

К настоящему времени накоплены многочисленные данные по наблюдениям у земной поверхности аномальных возмущений различных полей перед землетрясениями. Общепринято считать, что эти возмущения прямо или опосредованно связаны с деформацией пород и рассматриваются как предвестники [9, 10, 11]. В пункте наблюдений приповерхностные породы являются часто осадочными, так как ими покрыто около 80% поверхности континентов [1]. По геологическим и геофизическим данным осадочные породы достигают в некоторых тектонических зонах глубин до 10 км и более [7]. Благодаря фрагментарному строению, они обладают малой механической прочностью и легко деформируются. Поэтому предсейсмические возмущения некоторых полей могут возникать в результате деформации приповерхностных осадочных пород. Об этом, свидетельствуют возмущения высокочастотной геоакустической эмиссии [4] и ее возмущения вместе с радоном, тороном и атмосферным электрическим полем [8]. Для понимания механизмов образования таких возмущений и использования их в качестве возможного предвестника актуально исследование отклика различных полей на деформацию приповерхностных осадочных пород. С целью наблюдения значительного по величине эффекта его желательно проводить при интенсивном деформировании этих пород.

Интенсивное деформирование пород наблюдается при прохождении сейсмических волн от землетрясений. Скорость деформации в сейсмической волне от слабых близких землетрясений оценивается как $10^{-7} - 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ [5], что на 5-7 порядков больше скорости тектонической деформации пород, которая составляет $10^{-14} - 10^{-10} \text{ с}^{-1}$ [9]. При прохождении волн от умеренных и сильных локальных землетрясений скорость деформации пород и отклики полей будут больше.

Осадочные породы имеют сложно построенную полидисперсную влаго- и газонасыщенную пористую структуру малой прочности, и при прохождении сейсмических волн испытывают значительные деформации. Поэтому должны наблюдаться сейсмоэлектрический эффект второго рода и сейсмоакустический эффект. Первый представляет возбуждение электрического поля электрокинетическим током, возникающим при трансформации двойных электрических слоев, существующих на границе соприкосновения фрагментов пород и влагонасыщенного флюида. Второй эффект заключается в генерации акустических сигналов в результате относительных микросмещений фрагментов пород и их взаимодействий. Возмущения электрического поля появятся в диапазоне частот сейсмических волн (доли–первые десятки Гц), а акустической эмиссии — от долей Гц до нескольких кГц.

Сейсмоэлектрический эффект второго рода наблюдался в работах [12, 6], но в них не сообщается о том, какие приповерхностные породы были в пункте наблюдений. Сейсмоакустический эффект обнаружен и исследовался в приповерхностных осадочных породах [4].

Совместное изучение разных по своей сущности, но имеющих общую деформационную природу сейсмоэлектрического и сейсмоакустического эффектов, не проводилось. Оно актуально для понимания механизмов образования возмущений электротеллурического поля и геоакустической эмиссии при деформации приповерхностных осадочных пород и может дать полезную информацию о

дисперсном составе, пористости, влагонасыщенности и других физических свойствах этих пород в пункте наблюдений.

Методика наблюдений и результаты

Наблюдения сейсмoeлектрического и сейсмoакустического эффектов проводились в пункте “Карымшина” (52.83° N, 158.13° E) Института космoфизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, расположенном в районе Верхне-Паратунской гидротермальной системы Южной Камчатки (1).

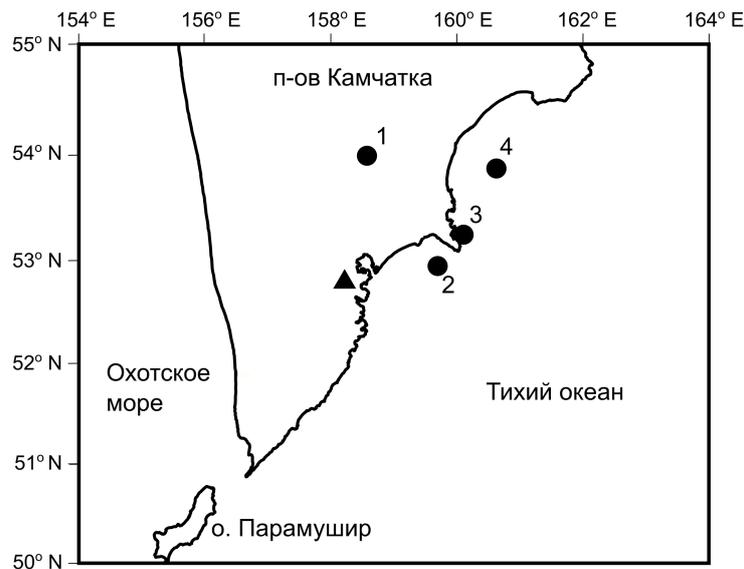


Рис. 1. Местонахождение пункта “Карымшина” (▲) и эпицентров четырех землетрясений (●), при которых анализировались сейсмoeлектрические и сейсмoакустические сигналы. Параметры землетрясений см. в таблице

Горизонтальные компоненты электрического поля в грунте регистрировались с помощью двух ортогональных измерительных линий длиной 10 м, ориентированных вдоль магнитного меридиана (С–Ю) и перпендикулярно к нему (В–З). В качестве электродов использовались свинцовые пластины размером 0.25×1.0 м², закопанные на глубину 1.0 м. Межэлектродное сопротивление линии С–Ю было 10.5, а В–З — 8.7 кОм. Разность потенциалов между электродами подавалась на вход предварительного усилителя с входным сопротивлением 1 МОм. Диапазон регистрируемых частот по уровню 0.7 был 0.1 Гц – 11 кГц.

В качестве приемника акустической эмиссии использовался широкополосный пьезокерамический гидрофон, установленный в искусственном водоеме размером $1 \times 1 \times 1$ м³ в точке пересечения средин измерительных линий для электрического поля. Частотный диапазон измерений был 0.1 Гц – 11 кГц. Гидрофон имел диаграмму направленности 60° и был ориентирован вертикально вниз. Чувствительность гидрофона вместе с предусилителем составляла около 1 В/Па.

Оцифровка электрических и акустических сигналов проводилась с помощью общей 8-канальной 16-разрядной профессиональной звуковой карты M-Audio Fast

Track Ultra 8R с частотой дискретизации 48 кГц, что обеспечило синхронную регистрацию электрических и акустических данных.

По результатам бурения приповерхностные породы в пункте “Карымшина” являются осадочными с толщиной слоя примерно 50 м [3]. В 170 м от гидрофона есть скважина № 99–8 Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН глубиной 19 м. Ее геологическая колонка представлена валунно-галечными отложениями с песчано-глинистым заполнителем (0–5 м), глыбово-щепнистыми отложениями с глинистым заполнителем (5–14 м) и валунно-галечными отложениями с песчаным заполнителем (14–19 м). Согласно работе [4], источники геоакустической эмиссии находятся на расстоянии до первых десятков метров от гидрофона. Учитывая все это, а также малое (10 м) расстояние между электродами и глубину их нахождения в грунте (1 м), можно заключить, что сейсмoeлектрические и сейсмoeакустические сигналы генерируются в приповерхностных осадочных породах.

За период наблюдений с 01.01.2016 по 31.12.2017 гг. было несколько случаев регистрации совместных электрических и акустических сигналов при прохождении сейсмических волн от землетрясений. Четыре, наиболее типичных из них, проанализированы авторами. Параметры произошедших при этом землетрясений представлены в таблице.

Таблица

Параметры землетрясений (NEIC, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>), при которых анализировались совместные сейсмoeлектрические и сейсмoeакустические сигналы

№	Землетрясение		Координаты землетрясения		Глубина, км	Магнитуда	Расстояние до эпицентра, км
	Дата	Время	Широта, градусы N	Долгота, градусы E			
1	2016-01-30	03:25:12	53.978	158.546	177.0	7.2 mww	132
2	2016-12-30	17:13:23	52.930	159.670	64.2	4.9 mb	103
3	2017-09-29	19:25:01	53.234	160.084	49.5	5.3 mww	137
4	2017-12-22	14:44:18	53.859	160.604	47.3	5.5 mww	200

Зарегистрированные при прохождении сейсмических волн электрические и акустические сигналы рассматривались в разных частотных диапазонах и вычислялись их спектрограммы. Результаты анализа представлены на рис. 2–5, на которых также отмечены времена возникновения землетрясений и вступлений продольных и поперечных волн на сейсмической станции “Карымшина” Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН. Эта станция находится в 250 м от точки наших наблюдений.

На рис. 2 представлены результаты анализа электрического и акустического сигналов, зарегистрированных при прохождении сейсмических волн от Жупановского землетрясения 30.01.2016 г. (№ 1 рис. 1, таблица). На спектрограмме акустического сигнала (рис. 2в) видно, что акустическая энергия выделилась в отдельных частотных кластерах. Длительность выделения в низкочастотном кластере примерно до 100 Гц была самой большой и составила около 150 с. Вместе с низкочастотным наблюдались два высокочастотных кластера на частотах примерно 0.1–1 и 1–11 кГц, которые имели меньшую длительность.

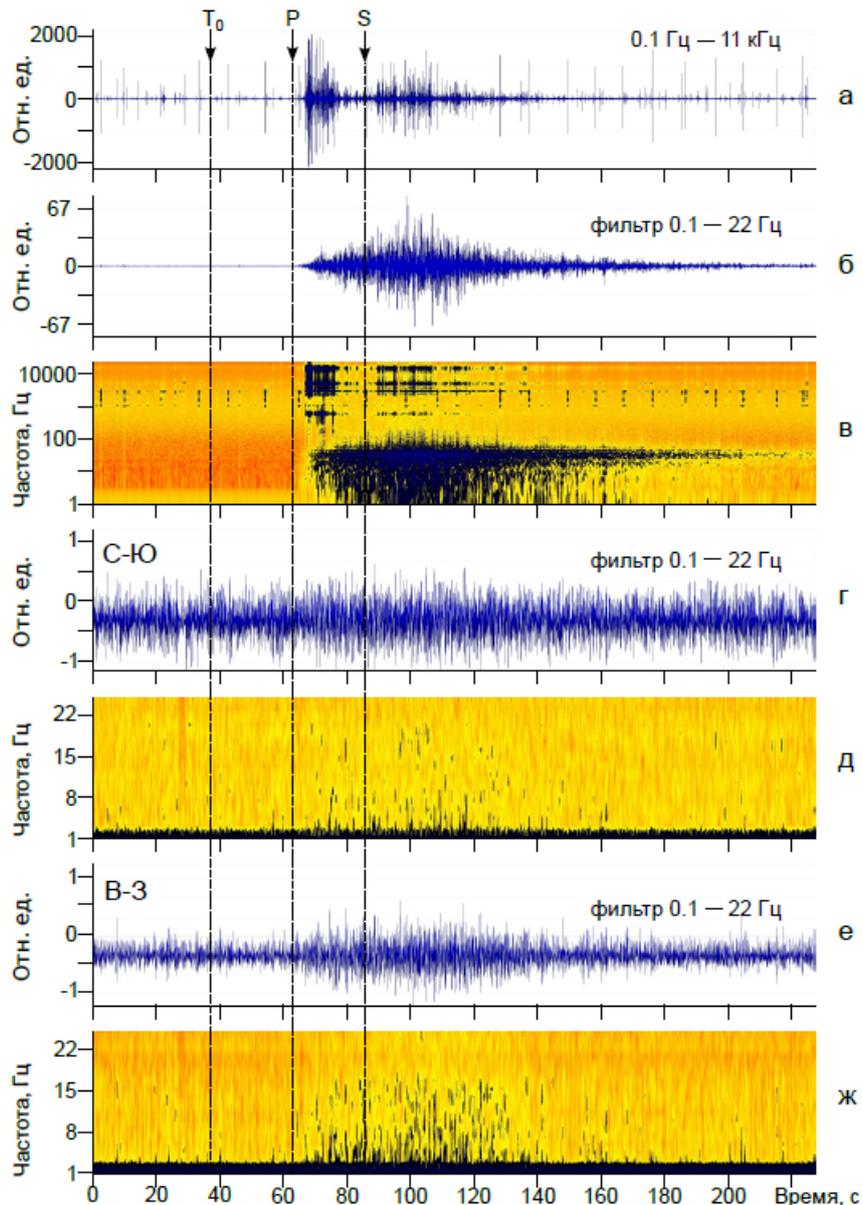


Рис. 2. Результаты анализа акустического (а–в) и электрического (г–ж) сигналов, зарегистрированных при прохождении сейсмических волн от Жупановского землетрясения 30.01.2016 г. (№ 1 рис. 1, таблица). Стрелками отмечены времена возникновения землетрясения T_0 и вступления от него продольной P и поперечной S волн

На спектрограммах электрического сигнала (рис. 2д,ж) видно, что электрическая энергия выделилась на частотах до 15–20 Гц и интенсивность ее выделения была больше на канале В–3. Отметим, что при прохождении P и S волн от этого землетрясения зарегистрированы возмущения электротеллурического поля и на сейсмической станции “Карымшина” Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН [2], которая находится в 250 м от точки наших наблюдений.

Рис. 3 иллюстрирует результаты анализа акустического и электрического сигналов, зарегистрированных при прохождении сейсмических волн от

землетрясения № 2 (рис. 1, таблица). Из-за проявления сейсмоакустического эффекта на частотах примерно до 100 Гц, спектрограмма акустического сигнала представлена только на этих частотах, а его регистрограмма на частотах 0.1 Гц – 11 кГц не приводится. В этом случае акустическая энергия выделилась только в низкочастотном кластере (рис. 3б) и по сравнению с энергией при гораздо более сильном Жупановском землетрясении 30.01.2016 г. (рис. 2в), была намного меньше. Это же наблюдалось и для электрической энергии (рис. 3в–е).

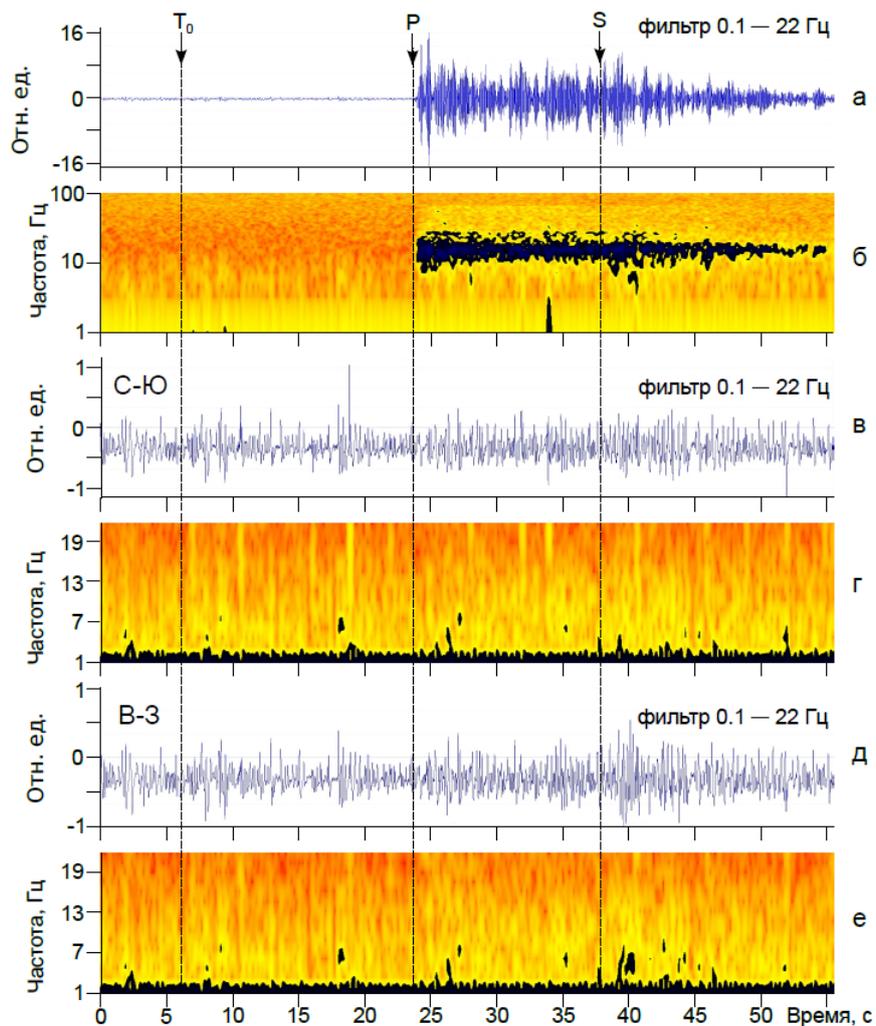


Рис. 3. Результаты анализа акустического (а, б) и электрического (в–е) сигналов, зарегистрированных при прохождении сейсмических волн от землетрясения № 2 (рис. 1, таблица). Обозначение стрелок см. в подписи к рис. 2

На рис. 4 представлены результаты анализа акустического и электрического сигналов, зарегистрированных при прохождении сейсмических волн от землетрясения № 3 (рис. 1, таблица). Регистрограммы акустического сигнала приведены в диапазонах частот 0.1–1400 и 0.1–22 Гц, где его проявление было самым сильным. В этом случае зарегистрированы низкочастотный (примерно до 100 Гц) и один высокочастотный (примерно 0.1–1 кГц) акустические кластеры (рис.4в). Электрический сигнал наблюдался, в основном, после вступления *S* волны и был больше на канале С–Ю.

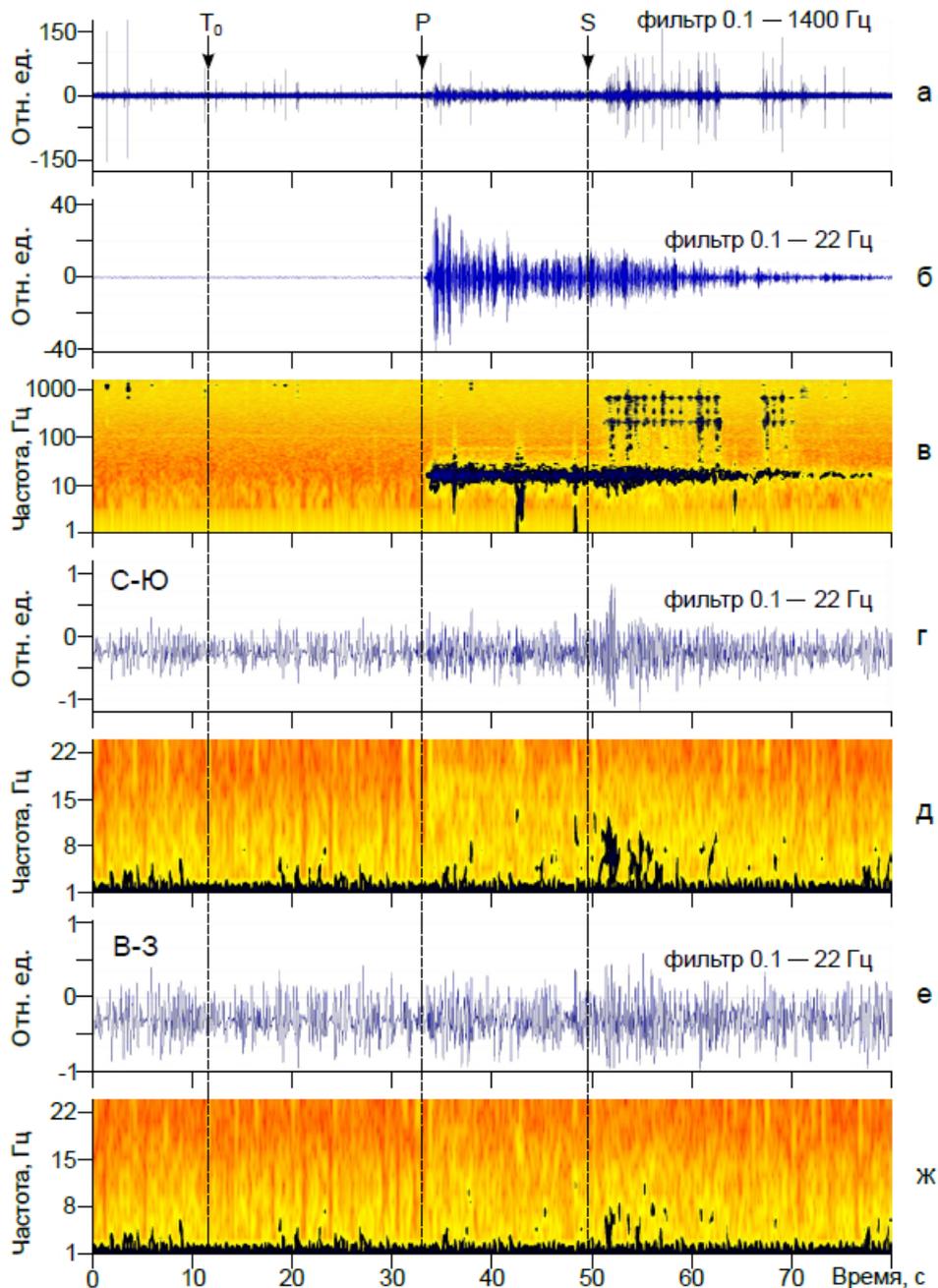


Рис. 4. Результаты анализа акустического (а–в) и электрического (г–ж) сигналов, зарегистрированных при прохождении сейсмических волн от землетрясения № 3 (рис. 1, таблица). Обозначение стрелок см. в подписи к рис. 2

Рис. 5 иллюстрирует результаты анализа акустического и электрического сигналов, зарегистрированных при прохождении сейсмических волн от землетрясения № 4 (рис. 1, таблица). Регистрограммы акустического сигнала представлены в диапазонах частот 0.1–1000 и 0.1–22 Гц, где его проявление было самым сильным. В этом случае, как и при землетрясении № 3 (рис. 4), наблюдались только низкочастотный (примерно до 100 Гц) и один высокочастотный (примерно

0.1–1 кГц) акустический кластеры. Электрический сигнал наблюдался, в основном, после вступления S волны и был почти одинаковый на обоих каналах (рис. 5г–ж).

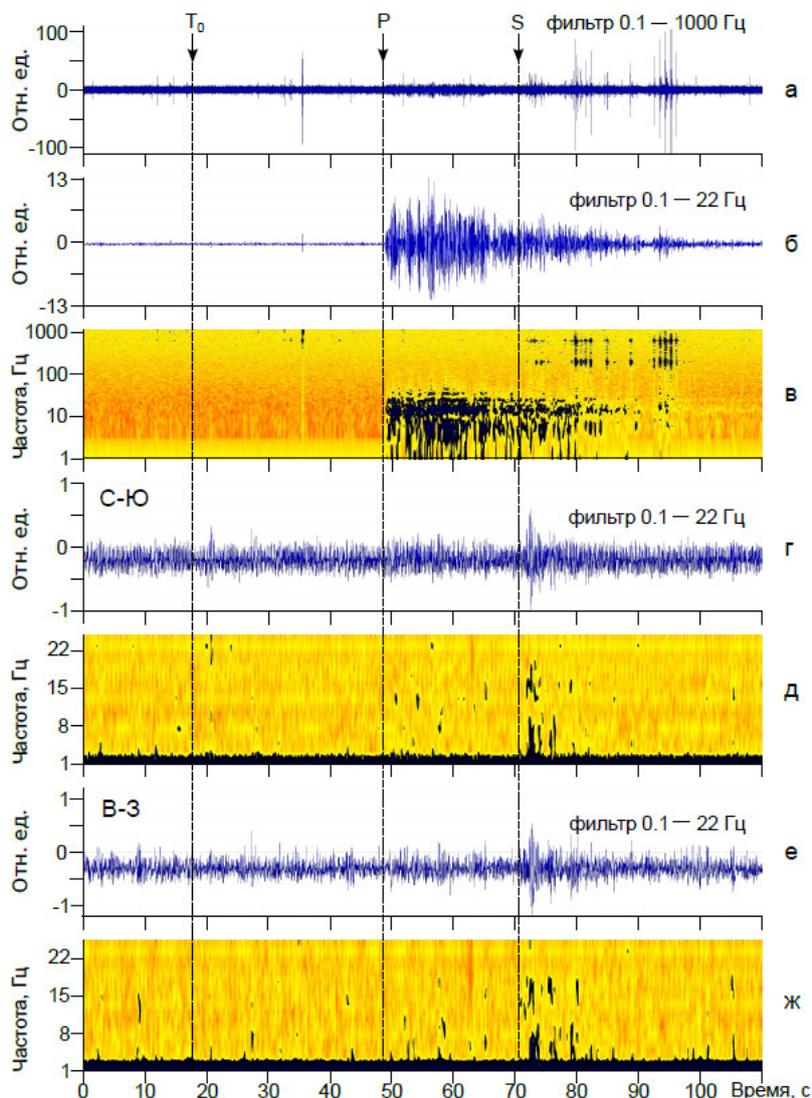


Рис. 5. Результаты анализа акустического (а–в) и электрического (г–ж) сигналов, зарегистрированных при прохождении сейсмических волн от землетрясения № 4 (рис. 1, таблица). Обозначение стрелок см. в подписи к рис. 2

Полученные результаты свидетельствуют о том, что проявление совместного электрического и акустического отклика приповерхностных осадочных пород на деформацию сейсмическими волнами зависит от магнитуды землетрясения. При самом сильном Жупановском землетрясении 30.01.2016 г. наблюдался самый сильный и продолжительный низкочастотный акустический отклик пород, который существовал длительное время после вступления S волны (рис. 2в). Очевидно, что он связан с прохождением поперечных и поверхностных сейсмических волн. Только при этом землетрясении зарегистрирован высокочастотный акустический отклик сразу в двух кластерах (примерно 0.1–1 и 1–11 кГц), а также электрический отклик пород на P и S волны. При самом слабом землетрясении № 2 наблюдался только низкочастотный акустический отклик (рис. 3б), а электрический отклик пород был

очень слабым. Землетрясения № 3 и № 4 имели близкую магнитуду и, несмотря на некоторое отличие в эпицентральной дистанции, акустический и электрический отклики пород сходны между собой. Это заключается в наличии на спектрограммах акустических сигналов (рис. 4в, 5в) низкочастотного (примерно до 100 Гц) и одного высокочастотного (примерно 0.1–1 кГц) кластера, а также в появлении последнего только после вступления S волны вместе с электрическим откликом.

Обращает на себя внимание тот факт, что акустические сигналы генерировались не только на частотах механического воздействия сейсмических волн, но и на более высоких килогерцовых частотах. Верхняя граница высоких частот была больше с увеличением магнитуды землетрясения. Это говорит о том, что с усилением деформирования осадочных пород в них возникали все более высокочастотные акустические сигналы. В случае сейсмоэлектрического отклика пород, как и при сейсмоэлектрическом эффекте второго рода, более высокочастотных сигналов не было.

Заключение

Впервые проведены одновременные измерения электрического поля и акустической эмиссии в приповерхностных осадочных породах. Используя частотно-временной анализ полученных данных, обнаружен совместный электрический и акустический отклик этих пород на деформацию при прохождении сейсмических волн от землетрясений. Обнаружено, что проявление совместного отклика зависит от магнитуды землетрясения. Акустические сигналы генерировались в породах не только на частотах механического воздействия сейсмических волн, но и на более высоких, килогерцовых частотах. Верхняя граница высоких частот была больше с увеличением магнитуды землетрясения. В случае сейсмоэлектрического отклика пород, как и при сейсмоэлектрическом эффекте второго рода, более высокочастотных сигналов не было.

Список литературы

- [1] Гаррелс Р., Маккензи Ф., *Эволюция осадочных пород*, Мир, М., 1974, 272 с. [Garrels R., Mackenzie F., *Evolution of sedimentary rocks*, W.W. Norton and Company, Inc., New York, 1971, 397 pp.]
- [2] Касимова В. А., Потанин М. Е., Берсенёва Н. Ю., “Отклики параметров электромагнитного поля на землетрясения на КГО Карымшина, Камчатка”, *Сб. докладов VII международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений»*, ИКИР ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 2016, 308–312. [Kasimova V. A., Potanin M. E., Berseneva N. Yu., “Otkliki parametrov e’lektromagnitnogo polya na zemletryaseniya na KGO Kary’mshina, Kamchatka”, *Sb. dokladov VII mezhdunarodnoy konferentsii «Solnechno-zemnyye svyazi i fizika predvestnikov zemletryaseniya»*, IKIR DVO RAN, Petropavlovsk-Kamchatskiy, 308–312].
- [3] Купцов А. В., Ларионов И. А., Шевцов Б. М., “Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских землетрясений”, *Вулканология и сейсмология*, 2005, № 5, 45–59. [Kuptsov A. V., Larionov I. A., Shevtsov B. M., *Vulkanologiya i seysmologiya*, 2005, № 5, 45–59].
- [4] Марапулец Ю. В., Шевцов Б. М., *Мезомасштабная акустическая эмиссия*, Дальнаука, Владивосток, 2012, 126 с. [Marapulets Yu. V., Shevtsov B. M., *Mezomasshtabnaya akusticheskaya emissiya*, Dal’nauka, Vladivostok, 2012, 126 pp.]
- [5] Моргунов В. А., Матвеев И. В., “Электрические и электромагнитные эффекты в эпицентральной зоне афтершоков Спитакского землетрясения”, *Физика Земли*, 2012,

- № 5, 64–76. [Morgunov V. A., Matveyev I. V., “Elektricheskiye i elektromagnitnyye efekty v epitsentral’noy zone aftershokov Spitakskogo zemletryaseniya”, *Fizika Zemli*, 2012, № 5, 64–76].
- [6] Мороз Ю. Ф., Мороз Т. А., “Аномалии электрического поля и электропроводности земной коры в связи с Култукским землетрясением на оз. Байкал”, *Физика Земли*, 2012, № 5, 64–76. [Moroz Yu. F., Moroz T. A., “Anomalii elektricheskogo polya i elektroprovodnosti zemnoy kory v svyazi s Kultukским zemletryaseniym na oz. Baykal”, *Fizika Zemli*, 2012, № 5, 64–76].
- [7] Пархоменко Э. И., *Геоэлектрические свойства минералов и горных пород при высоких давлениях и температурах*, Наука, М., 1989, 198 с. [Parkhomenko E. I., *Geoelektricheskiye svoystva mineralov i gornyykh porod pri vysokikh davleniyakh i temperaturakh*, Moskva Nauka, 1989, 198 pp.]
- [8] Руленко О. П. и др., “Совместное возмущение геоакустического, эманационного и атмосферного электрического полей у границы земная кора – атмосфера перед землетрясением”, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2016, № 3(14), 72–78. [Rulenko O. P. et al., “Joint perturbation of geoaoustic, emanation and atmospheric electric fields at the boundary of the earth’s crust and the atmosphere before the earthquake”, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*, 2016, № 3(14), 72–78].
- [9] Соболев Г. А., *Основы прогноза землетрясений*, Наука, М., 1993, 313 с. [Sobolev G. A., *Osnovy prognoza zemletryaseniya*, Moskva Nauka, 1993, 313 pp.]
- [10] Соболев Г. А., Пономарев А. В., *Физика землетрясений и предвестники*, Наука, М., 2003, 270 с. [Sobolev G. A., Ponomarev A. V., *Fizika zemletryaseniya i predvestniki*, Nauka, Moskva, 2003, 270 pp.]
- [11] Cicerone R. D., Ebel J. E., Britton J., “A systematic compilation of earthquake precursors”, *Tectonophysics*, **476** (2009), 371–396.
- [12] Honkura Y. et al., “Seismic dynamo effects associated with the M7.1 earthquake of 26 May 2003 off Miyagi Prefecture and the M6.4 earthquake of 26 July 2003 in northern Miyagi Prefecture, NE Japan”, *Earth Planets Space*, **56** (2004), 109–114.

Список литературы (ГОСТ)

- [1] Гаррелс Р., Маккензи Ф. Эволюция осадочных пород. М.: Мир, 1974. 272 с.
- [2] Касимова В. А., Потанин М. Е., Берсенёва Н. Ю. Отклики параметров электромагнитного поля на землетрясения на КГО Карымшина, Камчатка // Сб. докладов VII международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». Петропавловск-Камчатский. ИКИР ДВО РАН. 2016. С. 308–312.
- [3] Купцов А. В., Ларионов И. А., Шевцов Б. М. Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2005. №5. С. 45–59.
- [4] Марапулец Ю. В., Шевцов Б. М. Мезомасштабная акустическая эмиссия. Владивосток: Дальнаука, 2012. 126 с.
- [5] Моргунов В. А., Матвеев И. В. Электрические и электромагнитные эффекты в эпицентральной зоне афтершоков Спитакского землетрясения // Физика Земли. 2012. №5. С. 64–76.
- [6] Мороз Ю. Ф., Мороз Т. А. Аномалии электрического поля и электропроводности земной коры в связи с Култукским землетрясением на оз. Байкал // Физика Земли. 2012. №5. С. 64–76.
- [7] Пархоменко Э. И. Геоэлектрические свойства минералов и горных пород при высоких давлениях и температурах. М.: Наука, 1989. 198 с.
- [8] Руленко О. П. и др. Совместное возмущение геоакустического, эманационного и атмосферного электрического полей у границы земная кора – атмосфера перед землетрясением // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2016. №3(14). С. 72–78.

- [9] Соболев Г. А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
- [10] Соболев Г. А., Пономарев А. В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- [11] Cicerone R. D., Ebel J. E., Britton J. A systematic compilation of earthquake precursors // *Tectonophysics*. 2009. vol. 476. pp. 371–396.
- [12] Honkura Y. et al. Seismic dynamo effects associated with the M7.1 earthquake of 26 May 2003 off Miyagi Prefecture and the M6.4 earthquake of 26 July 2003 in northern Miyagi Prefecture, NE Japan // *Earth Planets Space*. 2004. vol. 56. pp. 109–114.

Для цитирования: Муратов П. В., Руленко О. П., Марापалец Ю. В., Солодчук А. А. Электрический и акустический отклик приповерхностных осадочных пород на прохождение сейсмических волн от землетрясений // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2018. № 5(25). С. 62-73. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-62-73

For citation: Muratov P. V., Rulenko O. P., Marapulets Yu. V., Solodchuk A. A. Electrical and acoustic response of the near-surface sedimentary rocks to seismic earthquake waves passing, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2018, **25**: 5, 62-73. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-62-73

Поступила в редакцию / Original article submitted: 22.10.2018

DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-62-73

MSC 86-02

ELECTRICAL AND ACOUSTIC RESPONSE OF THE NEAR-SURFACE SEDIMENTARY ROCKS TO SEISMIC EARTHQUAKE WAVES PASSING ¹

**P. V. Muratov¹, O. P. Rulenko², Yu. V. Marapulets¹,
A. A. Solodchuk¹**

¹ Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, FEB RAS, 684034, Kamchatka region, Paratunka, Mirnaya str., 7, Russia

² Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 683006, Kamchatka region, Petropavlovsk-Kamchatsky, Piip Blvd., 9, Russia

E-mail: pavel-mure@yandex.ru, rulenko@ksc.net

For the first time, a joint electrical and acoustic response of near-surface sedimentary rocks to deformation during the earthquake seismic waves passage was detected. The results of the time-frequency analysis of this response of four earthquakes of South Kamchatka with magnitude 4.9–7.2 at the epicentral distance of 100–200 km were presented. The dependence of the response on the earthquake magnitude was found.

Key words: seismic waves, near-surface sedimentary rocks, deformation, electrical and acoustic response.

© Muratov P. V. et al., 2018

¹The work was performed using the equipment of the Central Dispatch Center IKIR FEB RAS “Northeast Heliogeophysical Center” CKP_558279