

## Отклик высокочастотной геоакустической эмиссии на активизацию пластических процессов в сейсмоактивном регионе

Ю. В. Марапулец, И. А. Ларионов, М. А. Мищенко, А. О. Щербина, А. А. Солодчук,\* Б. М. Шевцов  
 Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,  
 Россия, 684090, Камчатский край, с. Паратунка, ул. Мирная, д. 7  
 (Статья поступила 28.10.2014; Подписана в печать)

Излагаются результаты исследований геоакустической эмиссии, которые, начиная с 1999 г. проводятся в сейсмоактивном регионе на полуострове Камчатка. Особенностью экспериментов является использование для регистрации эмиссии широкополосных пьезокерамических гидрофонов, установленных в воде у дна природных и искусственных водоемов. Применение приемников такого типа позволило, по сравнению со стандартными геофонами, расширить частотный диапазон регистрации до 0,1 Гц–11 кГц. В ходе исследований выявлена связь между активизацией деформационных процессов в приповерхностных осадочных породах и высокочастотными аномалиями в геоакустических сигналах. Наиболее ярко она проявляется на заключительной стадии подготовки землетрясений.

PACS: 43.35.+d, 91.30.-f, 91.30.Px, 91.60.Lj

УДК: 534.23; 550.34; 551.254

Ключевые слова: геоакустическая эмиссия, деформации, гидрофон, лазерный деформограф–интерферометр.

### ВВЕДЕНИЕ

Акустическая эмиссия в твердых телах представляет собой упругие колебания, возникающие в результате дислокационных изменений в среде. Характеристика возбуждаемого при этом импульсного излучения непосредственно связаны с особенностями пластических процессов, чем и обусловлен интерес к исследованиям эмиссии с целью развития методов акустической диагностики сред. Наиболее распространены инфрани и ультразвуковой диапазоны частот. Первый предназначен для изучения сейсмического процесса, второй — прочности материалов. Исследования на Камчатке показали эффективность применения акустических методов диагностирования пластических процессов в природных средах на масштабах, соответствующих длинам волн звуковых колебаний [1].

### 1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Особенностью экспериментов является использование для регистрации геоакустической эмиссии широкополосных пьезокерамических гидрофонов, установленных в воде у дна природных и искусственных водоемов. Применение приемников такого типа позволяет по сравнению со стандартными геофонами изменить верхнюю границу частотного диапазона с 1 до 11–20 кГц в зависимости от характеристик гидрофона.

На рис. 1 показана примерная схема акустического эксперимента. Генерация эмиссии происходит в приповерхностных осадочных породах, а регистрация сигнала осуществляется в жидкой среде у дна водоема.

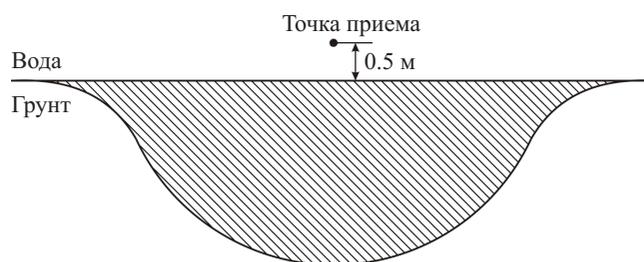


Рис. 1: Схема наблюдения геоакустической эмиссии. Приведено вертикальное сечение через точку установки приемника. Штриховкой отмечена область, из которой может осуществляться прием сигнала

При переходе из твердой среды в воду могут распространяться только продольные колебания, так как в жидкости поперечные колебания отсутствуют. Это можно использовать для селекции поляризации звуковых волн, распространяющихся в твердых средах [2]. На границе раздела двух сред возникает рефракция. Коэффициент преломления при переходе продольных колебаний из осадочных пород в воду составляет, примерно, 1,2–1,7. С учетом небольших расстояний распространения сигналов (ниже приведена оценка) эффектами рефракции можно пренебречь.

Сбор информации производится на персональный компьютер в стандартном формате звуковых данных типа «wave». Одновременно с регистрацией широкополосного сигнала осуществляется цифровая фильтрация в семи частотных поддиапазонах: 0,1–10, 30–60, 70–200, 200–600, 600–2000, 2000–6500, 6500–20000 Гц с последующим детектированием, интегрированием и синхронной записью отчетов с частотой 1 Гц по каждому из 4 каналов, различающихся пространственной ориентацией гидрофонов. Такие измерительные системы установлены на трех станциях ИКИР ДВО РАН: базовой обсерватории «Паратунка» и удаленных от нее

\*E-mail: aleksandra@ikir.ru

на 20 км и 4 км соответственно, станциях «Карымшина» и «Мижижа». Для исследования пространственной структуры геоакустической эмиссии с 2004 г. на станции «Мижижа» в озере на глубине около 5 м была установлена приемная система на базе 4-х компонентного комбинированного приемника (КП), разработанного в ЗАО «Геоакустика» при ФГУП ВНИИФТРИ. Приемник позволяет одновременно регистрировать акустическое давление и три взаимно ортогональные проекции его градиента в диапазоне частот 5–11000 Гц [3,4] и, соответственно, реализовывать алгоритмы векторно-фазовых методов для определения направления прихода энергии акустической волны и анализа характера движения частиц среды в ней [5]. Создан аппаратно-программный комплекс, позволяющий автоматически выделять в потоке данных геоакустические сигналы и определять направление на их источник [6]. Одновременно с записью геоакустического сигнала регистрируются метеорологические величины: атмосферное давление, температура воздуха, его относительная влажность, скорость ветра и интенсивность осадков. Все станции охвачены системой связи по радиомодемам и синхронизации времени с использованием приемников GPS.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ геоакустического сигнала (рис. 2) показывает, что он состоит из серии релаксационных колебаний (импульсов) различной амплитуды и длительности, с ударным возбуждением и частотой заполнения от сотен герц до десятков килогерц.

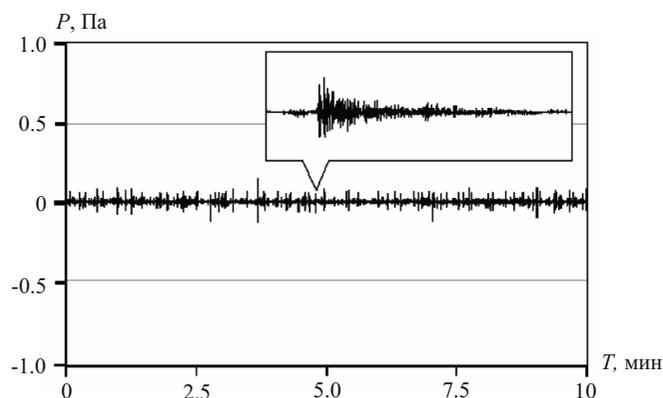


Рис. 2: Фрагмент записи геоакустической эмиссии (на выноске одиночный импульс из этого фрагмента),  $P$  — акустическое давление

Частота следования импульсов определяется деформациями пород и может меняться в широких пределах — от одиночных сигналов на временном интервале несколько секунд в спокойный период (рис. 2) до десятков и даже сотен в секунду в моменты активизации пластического процесса, в том числе и перед

землетрясениями (рис. 3) [6]. Поскольку прочность пород по отношению к касательным напряжениям меньше, чем к сжатию, основными источниками эмиссии будут сдвиговые [6]. Для наблюдаемого времени затухания импульсов 0,01–0,015 с и скорости продольных колебаний в осадочных породах  $V_p \approx 1,8\text{--}2,5$  км/с [7] пространственный масштаб сигнала, как произведение этих величин, составит 18–37 м. Коэффициент ослабления амплитуды в  $e$  раз равен при этом 230–480 дБ/км, что характерно для осадочных пород [8]. При сильном затухании, что соответствует нашему случаю, пространственный масштаб сопоставим с длиной ослабления сигнала, а она в свою очередь, сравнима с расстоянием до источника [9]. Таким образом, в случае сильного затухания, которое имеет место в осадочных породах, по длительности сигнала можно определить расстояние до его источника. Считая источники сдвиговыми, для оценки их длины можно воспользоваться формулой Дж.Бруна [10]  $l = 2,34V_p/2\pi f$ . С учетом того, что основной диапазон регистрации геоакустических импульсов  $f = 0,6\text{--}11$  кГц, имеем  $l \approx 0,06\text{--}1,7$  м. В [11] показано, что в экспериментах на образцах геоматериалов формула Дж. Бруна на порядок увеличивает фактический размер источника. Более точный результат дает формула А. Г. Москвиной [12], но она учитывает значения не только продольных, но и поперечных скоростей упругих волн, получить которые для осадочных пород достаточно сложно. В [13] показано, что для хрупких материалов (консолидированных горных пород) источники сантиметровых размеров возбуждают сигналы акустической эмиссии с характерными частотами десятки кГц. С учетом всего этого, можно считать, что наблюдаемые в экспериментах акустические сигналы создаются сдвиговыми источниками длиной единицы–десятки сантиметров, расположенными на расстоянии до первых десятков метров от приемника.

В периоды активизации пластического процесса, которая может быть связана с ослаблением пород в точке наблюдений или с возникновением удаленного источника напряжений [14,15], наблюдается увеличение как амплитуды импульсов, так и их количества в единицу времени. В качестве примера рассмотрим акустические сигналы, зарегистрированные 23–24 ноября 2006 года. На рис. 3 представлен 10-минутный фрагмент записи сигнала.

Аномалия продолжалась в течение 3 часов с 23.00  $UT$  23 ноября, а в 14:57  $UT$  24.11.2006 г. на эпицентрального расстоянии 200 км произошло землетрясение с энергетическим классом  $K = 11,9$ . Координаты гипоцентра  $51,21^\circ N$ ,  $157,8^\circ E$ , глубина 142 км (здесь и далее в тексте приведены оперативные данные по землетрясениям Камчатского филиала ГС РАН, для энергетической классификации землетрясений использовались классы  $K$  по шкале С. А. Федотова [16], связь  $K$  с магнитудой  $M_{LH}$  определяется формулой  $M_{LH} = (K - 4,6)/1,5$ ).

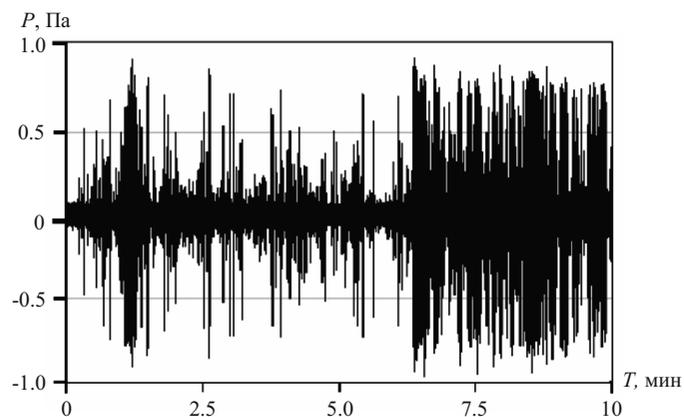


Рис. 3: Фрагмент записи сигнала 23.11.2006 г.,  $P$  — акустическое давление

Аномалии геоакустической эмиссии в диапазоне частот от сотен герц до десятков килогерц, длящиеся от десятка минут до нескольких часов за 1–3 суток перед сильными землетрясениями на расстояниях первых сотен километров от эпицентра, на Камчатке наблюдаются достаточно часто. Статистика их регистрации в период 2003–2012 гг. на станции «Микижа» во время работы комплекса в условиях хорошей погоды следующая:

- 42 из 69 (60,9%) землетрясений с энергетическим классом  $11,0 < K \leq 12,0$  на эпицентральной дистанции до 300 км, предварялись аномалиями геоакустической эмиссии в интервале до 2,5 суток;
- 28 из 38 (73,7%) землетрясений с энергетическим классом  $K > 12,0$  на эпицентральной дистанции до 400 км, предварялись аномалиями геоакустической эмиссии в интервале до 2,5 суток;
- 255 из 693 (36,8%) аномалий геоакустической эмиссии в условиях хорошей погоды предшествовало землетрясениям с энергетическими классами не ниже 9,0.

Согласно последнему выводу, получается, что ложные (с точки зрения предвестников землетрясений) аномалии составляют 63%. Сколько из них соответствует аномалиям, возникшим в результате ослабления (проскальзывания) пород в месте наблюдений, а сколько — медленным удаленным землетрясениям (крипу), оценить очень сложно, ведь природа их формирования одинакова. Процент ложных аномалий представляет интерес для понимания особенностей пластических процессов в природных средах и физики землетрясений. Например, если с помощью геоакустических аномалий строить прогноз землетрясений, то две трети тревог будут ложными. А если учесть, что деформационные процессы лежат в основе формирования предвестников различной природы, то тот же вывод мож-

но сделать и в отношении всех этих методов прогноза землетрясений [2].

Для выявления связи аномалий геоакустической эмиссии с динамикой пластического процесса в 2005 году на станции «Карымшина» с удалением 50 м от акустической системы на обсадных трубах двух пятиметровых сухих скважин, разнесенных на 18 м, был установлен по схеме интерферометра Майкельсона лазерный деформограф неравноплечего типа, разработанный в ТОИ ДВО РАН [17]. На одной из скважин размещен укрытый боксом интерференционный узел с частотно-стабилизированным гелий-неоновым лазером, а на другой — защищенный контейнером уголкового отражатель. Лазерный луч интерферометра проходит между боксом и контейнером по световоду, собранному из стальных труб, обмотанных утеплителем для уменьшения внешнего термического воздействия. Измерительное плечо интерферометра ориентировано на юго-восток, перпендикулярно разлому в зоне субдукции.

Нестабильность частоты лазера за сутки не хуже  $2 \times 10^{-9}$ , длина волны излучения — 0,63 мкм, частота измерений — 860 Гц. При четырнадцатиразрядном АЦП с числом отсчетов 16384 чувствительность деформографа получается примерно  $4 \times 10^{-11}$  м, а точность измерения относительных деформаций при этом будет около  $2 \times 10^{-12}$  [17,18]. Разумеется, что при установке деформографа на поверхности земли, без специального укрытия и откачки воздуха в световодах такая точность измерений не может быть реализована. С учетом влияния вибраций и метеоусловий в точке наблюдений точность измерения относительных деформаций пород  $\varepsilon$  составляла примерно  $10^{-8}$ . Для анализа динамики деформаций использовались первые разности, вычисленные по усредненным на секундном интервале соседним значениям  $\varepsilon$ . Они принимались в качестве оценки скорости деформации пород  $\dot{\varepsilon}$ .

Результаты совместных исследований геоакустической эмиссии и деформаций показали, что аномалии эмиссии наблюдаются при значительном увеличении скорости деформирования, как при сжатии (рис. 4), так и при растяжении приповерхностных пород (рис. 5). При сопоставлении графиков эмиссии и деформаций видно, что геоакустические возмущения возникают во время многочисленных подвижек приповерхностных пород различной амплитуды, так называемых проскальзываний [18].

Наиболее ярко эта зависимость наблюдается около 7 часов 15 октября (рис. 4а) и в 18–19 часов 16 октября 2009 г. (рис. 5б), где отдельным всплескам увеличения скорости деформирования соответствует резкое увеличение амплитуды геоакустической эмиссии. Относительные деформации отдельных подвижек невелики, даже при сравнительно большой амплитуде они составляют не больше  $10^{-8}$  (рис. 4, 5).

Данные, приведенные на рис. 4, 5 получены в сейсмически спокойные периоды, когда на расстояниях до 250 км не регистрировались землетрясения с энергетиче-

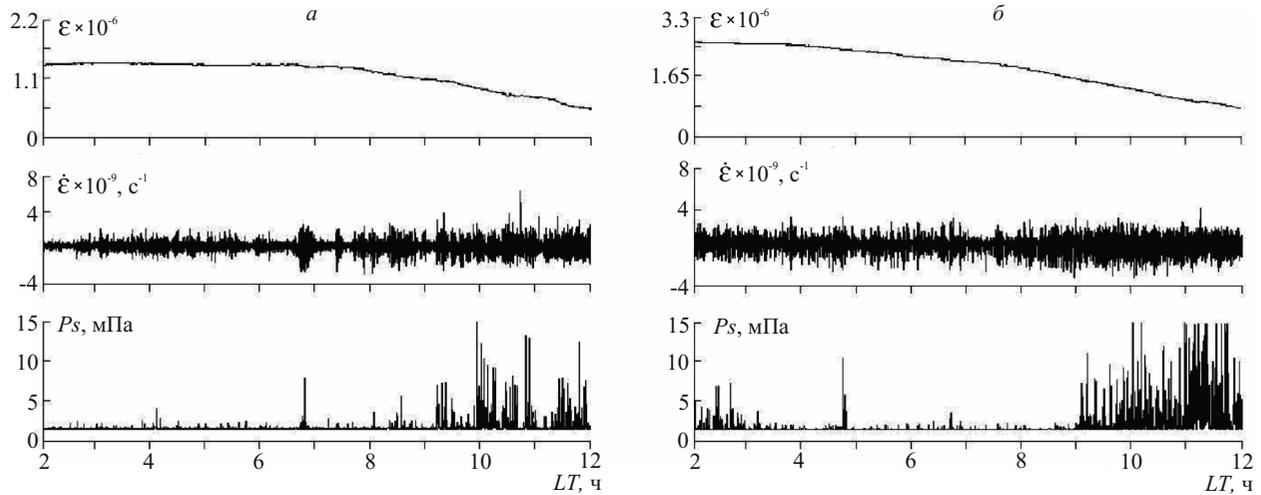


Рис. 4: Примеры аномалий геоакустической эмиссии при сжатии приповерхностных пород 15 (а) и 18 (б) октября 2009 г.;  $\varepsilon$  — относительная деформация пород,  $\dot{\varepsilon}$  — скорость деформирования,  $P_s$  — суммарное за 4 с акустическое давление в диапазоне частот 0,6–2,0 кГц

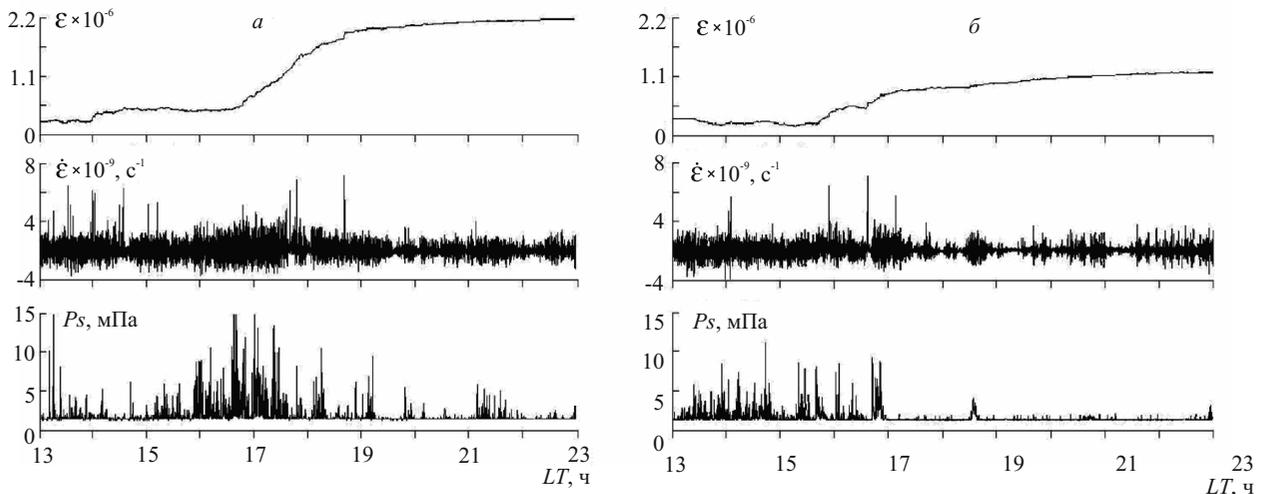


Рис. 5: Примеры аномалий геоакустической эмиссии при растяжении приповерхностных пород 14 (а) и 16 (б) октября 2009 г.;  $\varepsilon$  — относительная деформация пород,  $\dot{\varepsilon}$  — скорость деформирования,  $P_s$  — суммарное за 4 с акустическое давление в диапазоне частот 0,6–2,0 кГц

ческим классом более 10. Наиболее сильно влияние деформаций на поведение геоакустической эмиссии проявляется на заключительной стадии подготовки землетрясений [18]. На рис. 6 приведен пример одновременной аномалии геоакустической эмиссии и деформаций пород, зарегистрированной 1 мая 2007 г. за 25 часов до землетрясения с энергетическим классом 12,1, произошедшим 2 мая 2007 г. в 12:00 UT на эпицентральной расстоянии 154 км. Координаты гипоцентра 52,44° N, 160,33° E, глубина 12 км.

Из рис. 6 видно, что в период с 1 до 9 часов наблюдаются достаточно резкие сжатия пород с последующими сбросами длительностью 1–5 минут, которые сопровождаются увеличением скорости деформирования и одновременным повышением уровня эмиссии в ки-

логерцовом диапазоне частот. Амплитуда сжатий достигала 0,25 мкм, а скорость деформирования увеличилась до  $10^{-8} \text{ с}^{-1}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что аномалии геоакустической эмиссии в виде резкого повышения уровня в частотном диапазоне сотен герц–первых десятков килогерц, продолжающиеся от десятков минут до нескольких часов, возникают при активизации пластических процессов в области наблюдений. В эти периоды повышается скорость деформирования и появляются проскальзывания в породах,

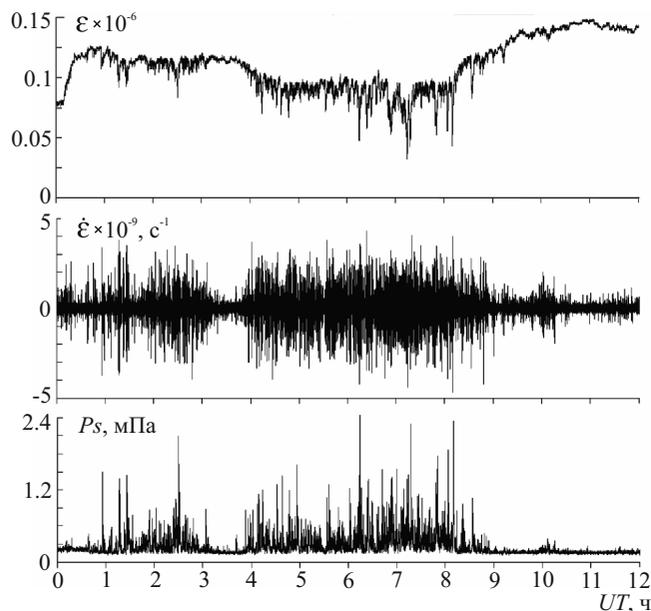


Рис. 6: Пример одновременной аномалии геоакустической эмиссии и деформаций пород перед землетрясением, произошедшим 2 мая 2007 г. в 12:00 UT;  $\varepsilon$  — относительная деформация пород,  $\dot{\varepsilon}$  — скорость деформирования,  $P_s$  — суммарное за 4 с акустическое давление в диапазоне частот 2,0–6,5 кГц

что приводит к генерации эмиссии повышенной интенсивности. Наиболее ярко такие эффекты наблюдаются на заключительной стадии подготовки землетрясений. Учитывая это, геоакустическую эмиссию в килогерцовом диапазоне частот можно считать достаточно эффективным индикатором активизации пластических процессов в пункте наблюдения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комплексной программы фундаментальных исследований Дальневосточного отделения РАН «ДАЛЬНИЙ ВОСТОК», проекты 3.2.34. «Развитие векторно-фазовых методов акустической диагностики мезомасштабных пластических процессов в природных средах» и 14.104. «Исследование отклика атмосферного электрического поля и высокочастотной геоакустической эмиссии на деформации приповерхностных пород».

- [1] Купцов А.В., Ларионов И.А., Шевцов Б.М. Вулканология и сейсмология. № 5. С. 45. (2005).
- [2] Марапудец Ю.В., Шевцов Б.М. Мезомасштабная акустическая эмиссия. (Владивосток: Дальнаука, 2012).
- [3] Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Купцов А.В. и др. Доклады АН. **Т. 407.** № 5. С. 669. (2006).
- [4] Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Краснописцев Н.В. и др. Акустический журнал. № 54. С. 97. (2008).
- [5] Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. (М.: Физматлит. 2007).
- [6] Шевцов Б.М., Марапудец Ю.В., Щербина А.О. Доклады АН. **Т. 430.** № 1. С. 119. (2010).
- [7] Аносов Г.И., Биккенина С.К., Попов А.А. и др. Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки. (М.: Наука, 1978).
- [8] Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография / пер. с англ. (М.: Мир, 1980).
- [9] Виноградов С.Д., Кузнецова К.И., Москвина А.Г. и др. Физические процессы в очагах землетрясений. С. 129. (М.: Наука, 1980).
- [10] Brune J. J. Geophys. Res. **V. 75.** N. 26. P. 4997. (1970).
- [11] Виноградов С.Д. Акустический метод в исследованиях по физике землетрясений. (М.: Наука, 1989).
- [12] Москвина А.Г. Изв. АН СССР. Физика Земли. № 6. С. 3. (1969).
- [13] Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. (М.: Наука, 1993).
- [14] Лукк А. А., Децеровский А. В., Сидорин А. Я. и др. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. (М.: ОИФЗ РАН, 1996).
- [15] Водинчар Г.М., Пережогин А.С., Сагитова Р.Н. и др. Математическое моделирование. **Т. 19.** № 11. С. 59. (2007).
- [16] Федотов С. А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. (М.: Наука, 1972).
- [17] Долгих Г. И., Валентин Д. И., Ковалев С. Н. и др. Физика Земли. № 8. С. 69. (2002).
- [18] Долгих Г. И., Купцов А. В., Ларионов И. А. и др. Доклады АН. **Т. 413.** № 1. С. 96. (2007).

## The response of high-frequency geoaoustic emission on activation of plastic processes in a seismically active region

Yu. V. Marapulets, I. A. Larionov, M. A. Mischenko, A. O. Scherbina, A. A. Solodchuk<sup>a</sup>, B. M. Shevtsov

*Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation FEB RAS,  
684034, Russia, Kamchatka region, Paratunka, Mirnaya str., 7  
E-mail: <sup>a</sup>aleksandra@ikir.ru*

Results of investigation of geoaoustic emission, which has been carried out since 1999 in Kamchatka, are presented. The particularity of experiments is application of broadband piezo-ceramic hydrophones installed near the bottom of natural and artificial reservoirs for registration of emission. Application of the receivers of such type allowed us to expand frequency range of registration from 0.1 Hz to 11 kHz. During the investigations the relation between activation of deformation processes in the near surface sedimentary rocks and high-frequency anomalies in geoaoustic signals was identified. It is observed the most vividly during final stage of earthquake preparation.

PACS: 43.35.+d, 91.30.-f, 91.30.Px, 91.60.Lj.

Keywords: geoaoustic emission, deformations, hydrophone, laser deformograph-interferometer.

Received 28.10.2014.

#### Сведения об авторах

1. Юрий Валентинович Марапулец — канд. техн. наук., доцент, заместитель директора по научной работе; тел.: 8 (415-31) 3-31-93, e-mail: marpl@ikir.ru
2. Игорь Александрович Ларионов — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: 8 (415-31) 3-31-93, e-mail: igor@ikir.ru
3. Михаил Александрович Мищенко — научный сотрудник; тел.: 8 (415-31) 3-31-93, e-mail: micle@ikir.ru
4. Альберт Олегович Щербина — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: 8 (415-31) 3-31-93, e-mail: albert@ikir.ru
5. Александра Андреевна Солодчук — младший научный сотрудник; тел.: 8 (415-31) 3-31-93, e-mail: aleksandra@ikir.ru
6. Борис Михайлович Шевцов — докт. физ.-мат. наук, директор ИКИР ДВО РАН; тел.: 8 (415-31) 3-31-93, e-mail: bshev@ikir.ru