

КОМПЛЕКСНАЯ ДИАГНОСТИКА ДЕФОРМАЦИЙ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ПОРОД В СЕЙСМОАКТИВНОМ РЕГИОНЕ НА ПОЛУОСТРОВЕ КАМЧАТКА

А.А. Солодчук

COMPLEX DIAGNOSTICS OF NEAR-SURFACE ROCK DEFORMATIONS IN A SEISMICALLY ACTIVE REGION OF KAMCHATKA PENINSULAR

A.A. Solodchuk

В сейсмоактивном регионе на полуострове Камчатка в двух пунктах наблюдений проводится комплексная диагностика деформаций приповерхностных пород. Она включает в себя совместные геоакустические и деформационные наблюдения. Для регистрации геоакустической эмиссии используются акустические системы, созданные на базе пьезо-керамических гидрофонов, установленные у дна природных и искусственных водоемов. Деформации земной поверхности измеряются с помощью лазерного деформографа-интерферометра и инклинометра (наклонометра). В ходе исследований выявлена связь между активизацией деформационных процессов в приповерхностных осадочных породах и геоакустическими аномалиями в диапазоне частот от единиц до первых десятков кГц.

Complex diagnostics of near-surface rock deformations is carried out at two observation sites in a seismically active region of Kamchatka peninsular. It includes joint geoaoustic and deformation observations. To register geoaoustic emission acoustic systems developed on the basis of piezoceramic hydrophones and installed by the bottom of natural and artificial reservoirs are used. Deformations of the earth surface are measured by a laser strainmeter-interferometer and an inclinometer (tiltmeter). During the investigations, the relation between intensification of deformation processes in the near-surface sedimentary rocks and geoaoustic anomalies in the range from units to the first tens of kilohertz was discovered.

С целью развития методов исследования природных сред и изучения характеристик деформационных процессов в сейсмоактивном регионе на полуострове Камчатка проводится комплексная диагностика деформаций приповерхностных пород. Поскольку явление акустической эмиссии связано с процессом перестройки внутренней структуры твердых сред при пластических деформациях, диагностика предусматривает совместные геоакустические и деформационные наблюдения.

Регистрация геоакустической эмиссии (ГАЭ) осуществляется с помощью акустических систем, созданных на базе широкополосных пьезо-керамических гидрофонов, установленных у дна искусственных и природных водоемов. Использование приемников такого типа позволяет, по сравнению со стандартными геофонами, расширить частотный диапазон регистрации от 0.1 Гц до 11 кГц. Структурная схема системы регистрации ГАЭ приведена на рис. 1. Сигналы с выходов гидрофонов усиливаются, оцифровываются с частотой дискретизации 44 кГц и записываются на жесткий диск персонального компьютера в стандартном формате звуковых данных типа «wave». Далее с использованием параллельных вычислений на графических процессорах осуществляется цифровая фильтрация данных в семи частотных поддиапазонах: 0.1–10, 30–60, 70–200, 200–600, 600–2000, 2000–6500, 6500–11000 Гц, с последующим детектированием, интегрированием и синхронной записью отсчетов с частотой 1 Гц по каждому из каналов. Такие системы регистрации установлены в пунктах наблюдений ИКИР ДВО РАН «Карымшина» с 1999 г. и «Микижа» с 2001 г.



Рис. 1. Структурная схема системы регистрации геоакустической эмиссии.

В пункте «Карымшина» геоакустическая эмиссия регистрируется одиночными гидрофонами, установленными в пространственно разнесенных искусственных водоемах с размерами 1×1×1 м³. В пункте «Микижа» регистрация сигналов ГАЭ осуществляется у дна озера с помощью системы, включающей в себя четыре совмещенных разнонаправленных гидрофона [Марапулец и др., 2012]. Для исследования пространственной структуры геоакустической эмиссии там же установлена приемная система на базе 4-х компонентного комбинированного приемника, разработанного в ЗАО «Геоакустика» при ФГУП ВНИИФТРИ. Приемник позволяет одновременно регистрировать акустическое давление и три взаимно ортогональных проекции его градиента в диапазоне частот 5–11000 Гц [Гордиенко и др., 2006] и реализовывать приемы векторно-фазовых методов для определения направления прихода акустической волны [Гордиенко и др., 2008].

В пункте «Микижа» для оценки деформаций приповерхностных пород в 150 м от места установки гидрофонов, на берегу озера в укрытой сверху яме с размерами 0.5×0.5×0.5 м³ установлен инклинометр (наклономер) Leica Nivel 220. Чувствительность прибора составляет 0.001 мрад. Для регистрации данных используется отдельная система на базе персонального компьютера, частота измерений составляет 0.5 Гц.

Для измерения деформаций пород в пункте «Карымшина» в 2005 г. на удалении 50 м от акустической системы на обсадных трубах двух пятиметровых сухих скважин, разнесенных на 18 м, установлен по схеме интерферометра Майкельсона лазерный деформограф равноплечевого типа, разработанный в ТОИ ДВО РАН. На одной из скважин размещен укрытый боксом интерференционный узел с частотно-стабилизированным гелий-неоновым лазером, а на другой – защищенный контейнером угловой 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 направлено на юго-восток, перпендикулярно разлому в зоне субдукции. Частота измерений прибора составляет 860 Гц, а их точность, с учетом влияния вибраций и метеоусловий, не хуже 10^{-8} [Larionov et al., 2014].

Оба пункта наблюдений оборудованы метеостанциями, регистрирующими атмосферное давление, температуру воздуха, его относительную влажность, скорость ветра и интенсивность осадков, и охвачены системами связи по радиомодемам и синхронизации времени с использованием приемников GPS.

Анализ геоакустического сигнала показывает, что он состоит из комбинаций релаксационных импульсов различной амплитуды и длительности, с ударным возбуждением и частотой заполнения от сотен герц до десятков килогерц. Частота их следования составляет 0.1–0.5 импульсов в секунду в сейсмически спокойные периоды и может достигать десятков и даже сотен в секунду в моменты активизации пластического процесса, в том числе и перед землетрясениями. Как показано в [Марапулец и др., 2012] наблюдаемые геоакустические сигналы генерируются сдвиговыми источниками с размерами от миллиметров до единиц метров, расположенными на расстоянии до первых десятков метров от приемника.

Совместный мониторинг геоакустической эмиссии и наклона земной поверхности в пункте «Микижа» позволяет исследовать фоновые характеристики деформации приповерхностных пород, в том числе поведение суточных составляющих как в сейсмически спокойные периоды [Солодчук, 2013], так и при подготовке землетрясений.

Аномалии эмиссии, регистрируемые в виде резкого увеличения амплитуды геоакустического излучения продолжительностью до нескольких часов, в килогерцовом диапазоне частот наблюдаются при значительном увеличении скорости деформирования как при сжатии (рис. 2, а), так и при растяжении (рис. 2, б) приповерхностных пород. Это подтверждают результаты совместных исследований геоакустической эмиссии и деформаций в пункте «Карымшина». На рис. 2 видно, что геоакустические возмущения возникают во время многочисленных подвижек приповерхностных пород различной амплитуды. Наиболее ярко эта зависимость наблюдается около 7 ч 15 октября (LT) и в 18–19 ч 16 октября (LT), 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 более 10^{-8} (рис. 2). Данные, приведенные на рис. 2, получены в сейсмически спокойные периоды, когда на расстояниях до 250 км не регистрировались землетрясения с энергетическим классом более 10.

Наиболее ярко влияние деформаций на поведение геоакустической эмиссии проявляется на заключительной стадии подготовки землетрясений. На рис. 3 приведен пример одновременной аномалии

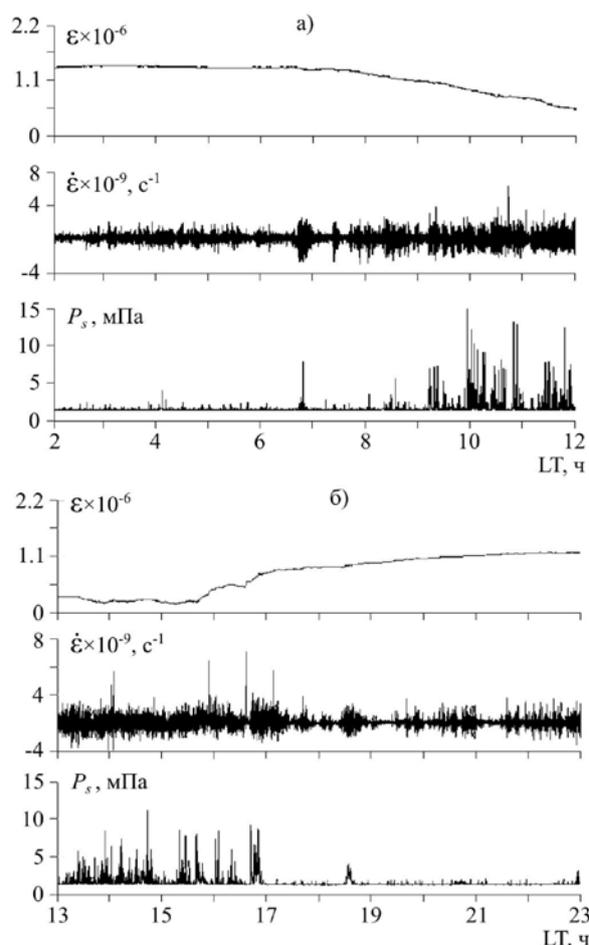


Рис. 2. Примеры аномалий геоакустической эмиссии при сжатии приповерхностных пород 15 октября 2009 г. (а) и при растяжении 16 октября 2009 г. (б); ϵ – относительная деформация пород, $\dot{\epsilon}$ – скорость деформирования, P_s – суммарное за 4 с акустическое давление в диапазоне частот 0.6–2.0 кГц.

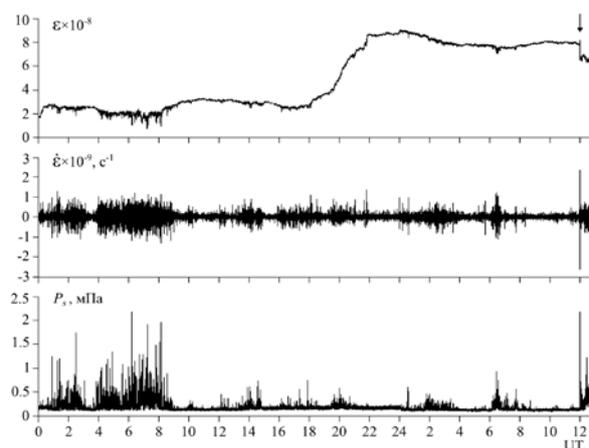


Рис. 3. Пример одновременной аномалии геоакустической эмиссии и деформаций пород, зарегистрированной 1 мая 2007 г. перед землетрясением, произошедшим 2 мая 2007 г. в 12:00 UT; ϵ – относительная деформация пород, $\dot{\epsilon}$ – скорость деформирования, P_s – суммарное за 4 с акустическое давление в диапазоне частот 0.6–2.0 кГц.

ГАЗ и деформаций пород, зарегистрированной 1 мая 2007 г. за 25 ч до землетрясения с энергетическим классом 12.1, произошедшего 2 мая 2007 г. в 12:00 UT

на эпицентральной дистанции 154 км [Larionov et al., 2014]. Данные по землетрясениям взяты из оперативного каталога КФ ГС РАН.

Таким образом, с помощью систем геоакустических наблюдений обнаружены аномальные возмущения ГАЭ, возникающие как в сейсмически спокойные периоды, так и перед землетрясениями. Комплексы деформационных наблюдений позволили исследовать характеристики деформационных процессов в среде. Результаты совместных исследований эмиссии и деформаций подтвердили наличие связи между активизацией деформационных процессов в приповерхностных осадочных породах и аномалиями в геоакустических сигналах в диапазоне частот от единиц до первых десятков кГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Краснописцев Н.В. и др. Об особенностях векторно-фазовой структуры поля высокочастотных геоакустических предвестников землетрясений // *Акустический журнал*. 2008. Т. 54, № 1. С. 97–109.

Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Купцов А.В. и др. Геоакустическая локация областей подготовки землетрясений // *ДАН*. 2006. Т. 407, № 5. С. 669–672.

Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М., Ларионов И.А. и др. Отклик геоакустической эмиссии на активизацию деформационных процессов при подготовке землетрясений // *Тихоокеанская геология*. 2012. Т. 31, № 6. С. 59–67.

Солодчук А.А. О суточных вариациях геоакустической эмиссии на озере Микижа в период 2006–2011 гг. // *Международная байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике: Труды XIII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом»*, Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2013. С. 256–258

Larionov I.A., Marapulets Yu.V., and Shevtsov B.M. Features of the Earth surface deformations in the Kamchatka peninsula and their relation to geoacoustic emission // *Solid Earth*. 2014. N 5. P. 1293–1300.

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия