

УДК 550.344

СЕЙСМО-ДЕФОРМАЦИОННЫЙ И АКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗНЕСЕННЫМИ ПРИБОРАМИ В СЕЙСМОЭНЕРГОАКТИВНОЙ И АСЕЙСМИЧЕСКОЙ ЗОНАХ

© 2019 г. Д. В. Александров¹, М. Н. Дубров^{1, *}, И. А. Ларионов²,
Ю. В. Марапулец², Б. М. Шевцов²

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН

141190 Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

²Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН
684034 с. Паратунка Елизовского р-на Камчатского края, ул. Мирная, 7

*e-mail: mnd139@ire216.msk.su

Поступила в редакцию 12.12.2017 г.

Приводятся результаты наблюдений широкополосных геофизических процессов с помощью лазерных интерферометров-деформографов и специальной геоакустической аппаратуры. Демонстрируются примеры синхронной регистрации сейсмо-деформационных и геоакустических колебаний земной поверхности на Камчатке и в Подмосковье, а также результаты параллельного анализа полученных данных, показывающего возможность применения предложенной методики для разделения локальных и глобальных возмущений исследуемых процессов.

Ключевые слова лазерный деформограф, гидрофон, землетрясения, тропические циклоны.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019372-80>

ВВЕДЕНИЕ

Регистрация деформационных и сейсмоакустических процессов в земной коре является перспективным методом инструментального исследования геодинимических явлений, предваряющих и сопровождающих такие мощные стихийные бедствия, как землетрясения, извержения вулканов, тайфуны, цунами и другие явления [Долгих, 2000; Марапулец и др., 2012].

Практически неограниченная широкополосность лазерно-интерферометрических измерителей деформаций позволяет проводить с их помощью сейсмо-деформационные наблюдения в широких динамическом и частотном диапазонах [Дубров, Матвеев, 1998; Долгих, 2011; Barbour, Agnew, 2012]. По своему характеру и временным свойствам регистрируемые этими инструментами процессы разделяются на акустические, сейсмические, деформационно-барические, приливные и термоупругие деформации.

Геоакустические процессы в земной коре занимают самую высокочастотную область

спектра от единиц герц до десятков килогерц. Для их изучения используются специально разрабатываемые геофоны, гидрофоны и другие высокочувствительные инструменты [Harrop, Attenborough, 2002; Щербина и др., 2005]. Сопоставление характера сигналов, регистрируемых сейсмо-деформационными и геоакустическими датчиками представляет интерес для изучения и выделения процессов, связанных с подготовкой крупных землетрясений, зарождением и развитием мощных тропических циклонов (тайфунов, ураганов) и других природоопасных явлений.

Сравнительный анализ деформационных и геоакустических сигналов, регистрируемых в сейсмоэнергoактивной и асейсмической зонах позволяет выявить характерные особенности и природу наблюдаемых процессов. При этом применение пространственно разнесенных приборов для их регистрации открывает возможность разделения процессов, носящих характер локальных фоновых помех, от явлений регионального и глобального масштаба.

ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Приводимые в данной работе результаты получены с использованием двух типов пространственно разнесенных приборов: лазерных интерферометров-деформографов (разнесение около 6.8 тыс. км) и системы широкополосных гидрофонов (разнесение около 20 км).

Для наблюдений в асейсмической зоне (Подмосковье) применялись лазерные интерферометры с длиной плеча от 0.5 м до 400 м, установленные на подземной лучевой линии ФИРЭ во Фрязино [Дубров и др., 2013; Александров и др., 2018] (рис. 1). Ниже приводятся результаты измерений, выполненных с помощью двух инструментов, построенных по схеме неравноплечего интерферометра Майкельсона с длиной измерительного плеча около 3 м и 100 м.

Деформационные измерения в сейсмоактивной зоне (Камчатская обл., с. Паратунка) выполнялись лазерным интерферометром-деформографом наземного типа с измерительным плечом длиной 32 м, построенным по трехзеркальной схеме [Александров, 2012; Александров и др., 2013]. Новый усовершенствованный вариант лазерного деформографа длиной 18 м разработан в ИКИР ДВО РАН и функционирует с января 2016 г. [Ларионов, Непомнящий, 2016].

По сравнению с системами широкополосных сейсмических наблюдений, выполняемых приборами типа STS-1 и STS-2 [Комаров и др., 2000], применение высокочувствительных лазерных деформографов, измеряющих пространственные производные в поле сейсмической волны, позволяет получить дополнительную информацию

о характере движения геофизической среды. Это открывает новые возможности повышения достоверности определения параметров сейсмических процессов, в том числе природного и искусственного происхождения [Николаев и др., 2010; Дубров и др., 2017].

Изучение геоакустических сигналов в сейсмоактивной зоне выполняется с помощью специально разработанной геоакустической аппаратуры, применяемой для исследования геоакустической эмиссии на различных стадиях развития процесса подготовки землетрясений [Марапулец и др., 2012; Щербина и др., 2005]. Приборы установлены в пунктах наблюдения “Карымшина” и “Микижа” (Камчатская обл.), разнесенных на расстояние около 20 км друг от друга. Система измерения реализована направленными широкополосными пьезоэлектрическими гидрофонами, установленными в укрытых сверху искусственных водоемах, расстояния между гидрофонами от 5 до 50 м, частотный диапазон от сотен герц до первого десятка килогерц.

Лазерно-интерферометрические измерения деформаций земной коры проводятся по специально разработанной методике. В качестве источника когерентного излучения используются стабилизированные или управляемые He-Ne лазеры с длиной волны излучения $\lambda = 633$ нм [Александров и др., 2015]. Измерительное плечо интерферометра-деформографа защищено металлической трубой, обеспечивающей для инструмента при средней длине плеча $L = 10$ м стабильность интерференционного сигнала на уровне 0.5–1 мкм/сутки при установке под землей [Дубров и др., 2013; Александров и др., 2018] и 5–10 мкм/час при наземной установке [Александров и др., 2013]. Для измерения и обработки интерференционного сигнала использовались следящая аналоговая и цифровая системы регистрации с автоматическим переносом начала отсчета на целое число периодов интерферограммы $n\lambda/2$, $n = 1, 2, \dots, 8$. Разрешающая способность аналоговой и цифровой систем регистрации при измерении вариаций длины ΔL оценивается величинами порядка 0.1 нм и 1 нм соответственно. Аналоговая и цифровая системы регистрации снабжены устройствами вывода данных на персональный компьютер.

С помощью лазерных интерферометров-деформографов подземной и наземной установок выполнен цикл геофизических наблюдений, включающих регистрацию сейсмических, геоакустических и деформационно-барических процессов. На рис. 2 приведены примеры записей, полученных с помощью 3-метрового интерферометра, установленного в подземном помещении на глубине около 5 м во Фрязино и наземного 32-метрового интерферометра в Паратунке.

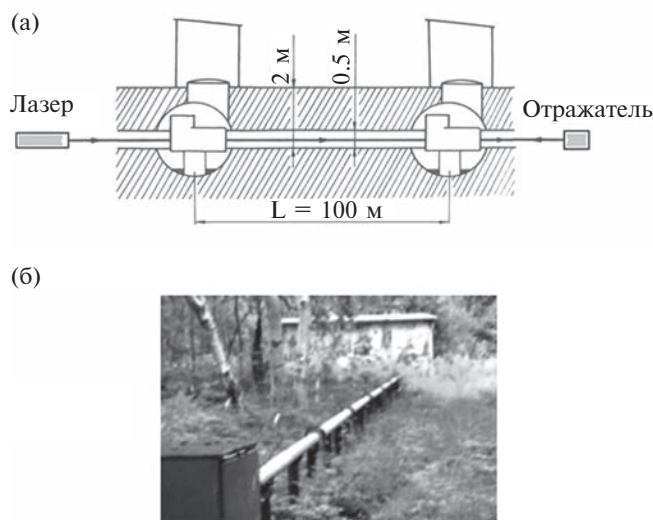


Рис. 1. Схема установки лазерных интерферометров-деформографов на подземной лучевой линии во Фрязино (а) и общий вид 32-метрового лазерного деформографа в Паратунке (б).

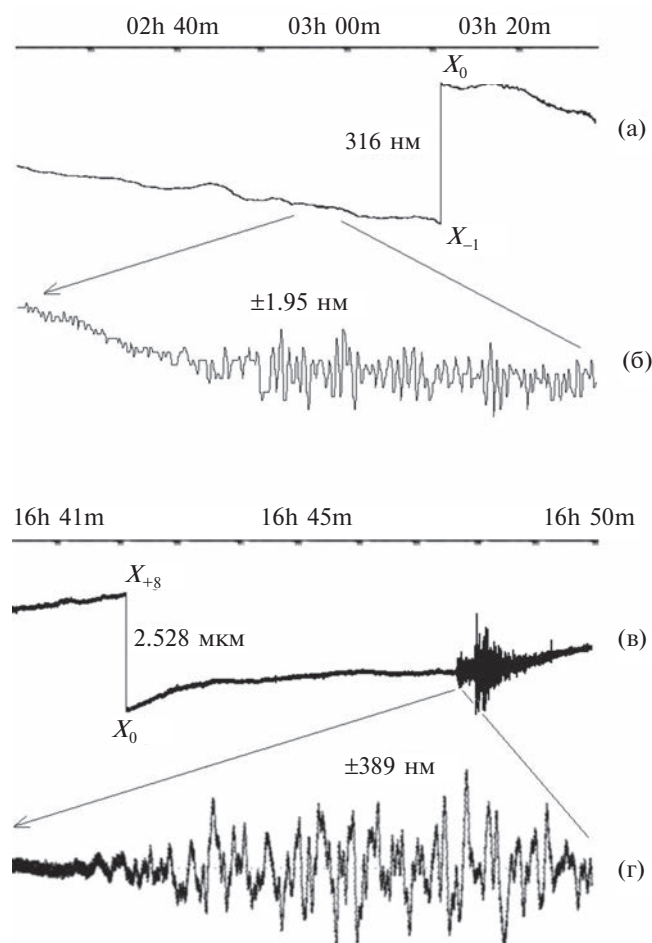


Рис. 2. Регистрация удаленного землетрясения 16.08.2005 (Япония, $M_w = 7.2$) деформографом с базой 3 м во Фрязино (а, б) и локального землетрясения 31.07.2010 (у побережья Камчатки, $K = 10$) деформографом с базой 32 м в Паратунке (в, г).

На записи рис. 2а длительностью около одного часа показан автоматический сброс следящей аналоговой системы регистрации из точки захвата X_1 в нулевое положение X_0 . Амплитуда “ступеньки” соответствует смещению интерферограммы на один период или на $\lambda/2 = 316$ нм. При программном увеличении масштаба записи в 50 раз на рис. 2б видны зарегистрированные лазерным деформографом объемные сейсмические волны от сильного удаленного землетрясения 16.08.2005 (Япония, магнитуда $M_w = 7.2$). Эпицентрального расстояния составляет около $D = 7.5$ тыс. км, максимальная амплитуда зарегистрированных сейсмических деформаций в диапазоне периодов 20–50 секунд достигает 1.95 нм, уровень фоновых колебаний не превышает ± 0.2 нм.

На рис. 2в приведен пример регистрации локального сейсмического события с помощью наземного 32-метрового деформографа в Паратунке. Землетрясение 31.07.2010

(энергетический класс $K = 10$, время в очаге $t_0 = 16h47m10s$ UTC) произошло у побережья Камчатки, расстояние от эпицентра до пункта регистрации $D = 164$ км. Величина автоматического переноса начала отсчета составляет восемь периодов интерферограммы $8\lambda/2 = 2.528$ мкм.

Максимальная амплитуда записанных поверхностных сейсмических волн составляет около ± 1.2 мкм, амплитуда первого цуга колебаний с характерными периодами 0.2–0.6 с и длительностью около 7 с (см. рис. 2г) достигает ± 389 нм, фоновые колебания в этом диапазоне периодов находятся на уровне $\pm(1-2)$ нм. Таким образом, относительная разрешающая способность данного сравнительно простого прибора при измерении сейсмических деформаций оценивается величиной $\Delta L/L = 3 \cdot 10^{-11}$ и оказывается сопоставимой с лучшими зарубежными установками лазерных стрейн-сейсмографов как большой протяженности $L = 400-700$ м наземного типа [Barbour, Agnew, 2012], так и сравнительно коротких $L < 100$ м, устанавливаемых на большой глубине [Amoruso et al., 2018].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В данном разделе представлены результаты наблюдений и методика выделения сейсмо-деформационных и геоакустических процессов регионального и глобального характера при их параллельной регистрации лазерными деформографами и геоакустическими приборами, разнесенными в пространстве на значительные расстояния (Камчатка–Подмосковье, около 6.8 тыс. км).

На рис. 3 приведены фрагменты синхронной записи сигналов, зарегистрированных 18-метровым лазерным интерферометром на Камчатке (см. рис. 3а) и 100-метровым интерферометром во Фрязино (см. рис. 3б) в период сильного землетрясения $M_s = 7.6$ в Индийском океане 2 марта 2016 г. Длительность каждого фрагмента составляет 5 часов: с 11h 00m до 16h 00m UTC. Обои инструментами с 13h до 14h отчетливо регистрируются поверхностные сейсмические волны, вызванные этим землетрясением (эпицентр находился Юго-Западнее Суматры, Индонезия, время в очаге по данным геофизической обсерватории ФИЦ ЕГС РАН в Обнинске $t_0 = 12h49m45s$). Различие в зарегистрированных сейсмо-деформационных сигналах обусловлено разными величинами эпицентральных расстояний, азимутальными ориентациями инструментов и локальными условиями. Время прихода поверхностных волн на каждый из пунктов регистрации сдвинуто относительно t_0 на 30–40 минут, что соответствует скоростям распространения этих волн 2.7–3.6 км/с

[Karmaleyeva et al., 1970]. Приведенные на рис. 3 записи демонстрируют широкополосность применяемых деформографов в длиннопериодном диапазоне 0.1–0.001 Гц и величину отношения сигнал/шум в этой области спектра, которое в нашем случае характеризует соотношение амплитуд сейсмических и деформационно-барических процессов, регистрируемых данными приборами.

Максимальные величины сверхдлиннопериодных вариаций ΔL , зарегистрированных в течение 5 часов интерферометрами в Паратунке и во Фрязино (см. рис. 3а, 3б), составляют 7 мкм и 40 мкм соответственно, что согласуется с примерно пятикратным различием измеряемых базисов $L_1 = 18$ м и $L_2 = 100$ м. Сравнительно большие величины наблюдаемых вариаций обусловлены незначительным заглублением используемых инструментов (1–2 м), а также влиянием атмосферных, метеорологических и других факторов.

Важно подчеркнуть, что на обеих записях, кроме случайных нерегулярных деформационно-барических и термоупругих вариаций, отмечаются также и коррелированные составляющие зарегистрированных деформаций. Коэффициент R корреляции Пирсона, вычисленный для этих двух 5-часовых реализаций, приведенных на рис. 3а и 3б, является положительным и равен 0.381, квадрат коэффициента корреляции $R^2 = 0.145$, что свидетельствует о наличии значимой корреляции наблюдаемых процессов (критическое значение для данной выборки $R_{\text{крит}} = 0.25$, уровень значимости или вероятность ошибки $p = 0.05$). Интересно отметить, что для фрагментов записей зарегистрированных процессов длительностью порядка 2.5 часа после момента землетрясения, т.е. с 13h30m до 16h00m (см. рис. 3а, 3б), коэффициент R корреляции возрастает до 0.678 (квадрат коэффициента корреляции $R^2 = 0.46$). Это можно объяснить одновременным возбуждением длиннопериодных волн в твердой Земле и коррелированных с ними колебаний в атмосфере, вызванных этим сильным землетрясением. Аналогичное явление наблюдалось после землетрясения 25.09.2003 (Хоккайдо, $M = 8.3$), когда в атмосфере и ионосфере Земли были зарегистрированы коррелированные колебания с периодами 20–50 минут [Дубров, Смирнов, 2013].

Полученные результаты могут представлять интерес для исследования взаимодействия и выявления корреляции глобальных геофизических процессов в земной коре, атмосфере и Мировом океане [Головачев и др., 2011]. В частности, в случае рассматриваемого землетрясения следует отметить, что развитие процесса его подготовки сопровождалось интенсивной циклонической активностью в Южной части Тихого океана: 7–25 февраля мощный тропический

циклон WINSTON (<http://www.weather.unisys.com/hurricane/>) наивысшей категории 5 SSHWS, перемещаясь по петлеобразной траектории в районе Тонга – Фиджи, развернулся в западном направлении и 26 февраля, войдя в зону Австралийского региона, разрешился ливневыми осадками, прекратив свое существование 03 марта 2016 г. Исследование статистической и пространственно-временной взаимосвязи землетрясений и тропических циклонов (тайфунов, ураганов), являющихся самыми мощными и разрушительными геофизическими явлениями, важно для выяснения физических механизмов наблюдаемых процессов [Dubrov et al., 2014], понимание которых имеет большое практическое значение для разработки методов их прогнозирования.

Другой пример параллельной регистрации сейсмоакустических процессов, выполненной пространственно разнесенными лазерными деформографами (Подмосковье) и геоакустическими приборами (Камчатка) показан на рис. 4. Здесь демонстрируются результаты анализа геоакустических сигналов (см. рис. 4а, 4б) и микросейсмических колебаний земной поверхности (см. рис. 4в) в течение семи суток, предшествующих сильнейшему землетрясению 2015 г., которое произошло 16 сентября на побережье Центрального Чили, $M_s = 8.3$ ($t_0 = 22h54m$). На двух верхних диаграммах приведены фрагменты непрерывной регистрации геоакустических сигналов при одновременном осуществлении их цифровой фильтрации в диапазонах частот: 2.5–6.5 кГц (см. рис. 4а, пункт наблюдения “Микижа”) и 7–11 кГц (см. рис. 4б, пункт наблюдения “Карымшина”). Временное разрешение при осреднении составляет около одной секунды. В третьем и четвертом ряду (см. рис. 4в, 4г) представлены последовательность спектрально-временных СВАН-диаграмм и соответствующие спектральные распределения $S(f)$ для микросейсмических колебаний земной поверхности, зарегистрированных в этот же период 100-метровым лазерным деформографом во Фрязино. Анализируемый диапазон частот 0.5–2.5 Гц, временное разрешение для каждой из приведенных СВАН-диаграмм и спектральных распределений около одной минуты.

Сопоставление геоакустических данных, полученных на двух разнесенных пунктах: “Микижа” (см. рис. 4а) и “Карымшина” (см. рис. 4б), позволяет разделить локальные и региональные возмущения в характере регистрируемых сигналов. В частности, значительное возрастание интенсивности геоакустического сигнала 12 и 13 сентября на рис. 4а связано с ухудшением локальных погодных условий (усиление ветра и выпадением осадков) в пункте наблюдения “Микижа”.

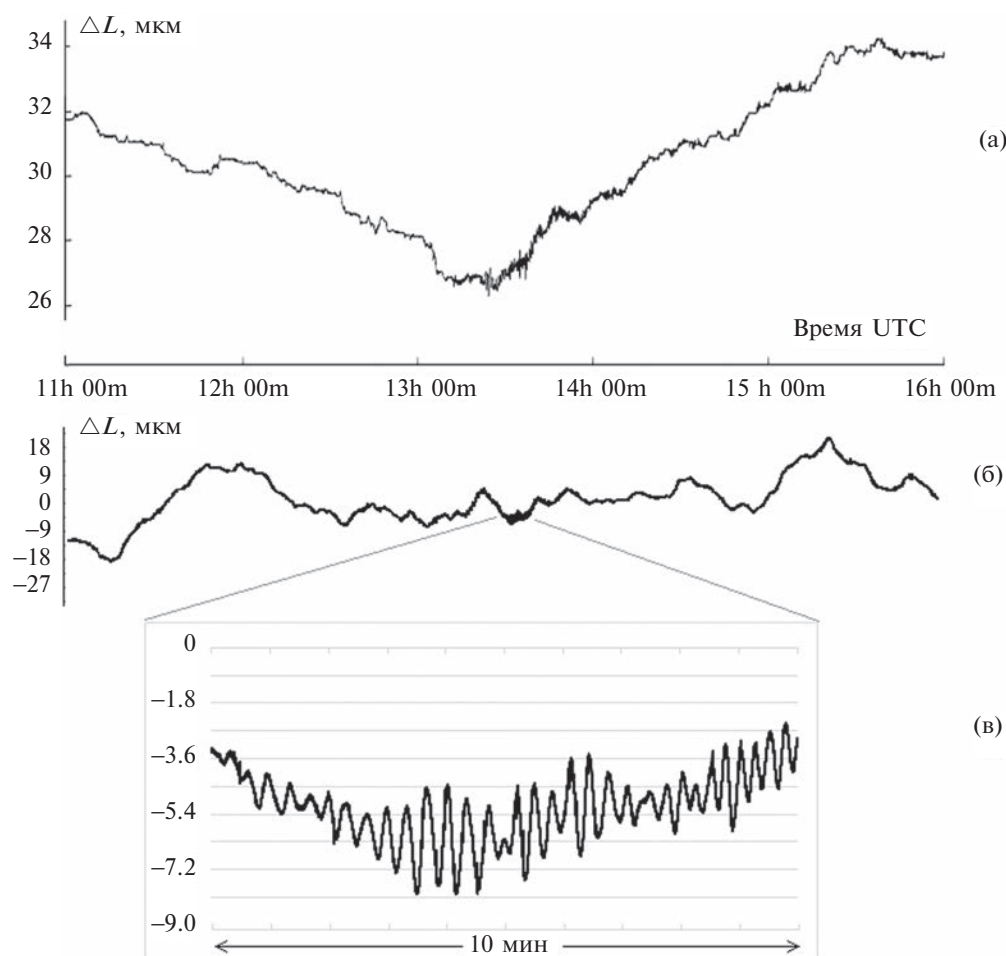


Рис. 3. Сейсмо-деформационные процессы, сопровождающие землетрясение Юго-западнее Суматры 02.03.2016, $M_s = 7.6$, зарегистрированные лазерными деформографами на Камчатке (а) и в Подмоскowie (б); внизу показан 10-минутный фрагмент регистрации поверхностных сейсмических волн (в).

В пункте “Карымшина” (см. рис. 4б), расположенном на 20 км южнее, геоакустический сигнал 12 и 13 сентября находится на уровне фоновых значений. В то же время, согласованный рост интенсивности сигналов, зарегистрированных одновременно на обоих пунктах в последующие двое суток 14–15.09.2015 г., может свидетельствовать о его, как минимум, региональном происхождении. Коэффициент R корреляции Пирсона, вычисленный для указанных 2-суточных фрагментов, составляет 0.39 (квадрат коэффициента корреляции $R^2 = 0.15$), что приблизительно вдвое ниже по сравнению с предыдущим примером (см. рис. 3). Однако, корреляция зарегистрированных геоакустических сигналов возрастает в 2–3 раза при их сдвиге во времени относительно друг друга — геоакустический сигнал в пункте “Мижижа” (см. рис. 4а) опережает сигнал в пункте “Карымшина” (см. рис. 4б). Зависимость коэффициента R^2 от величины временного сдвига τ фактически описывает функцию взаимной корреляции исследуемых

процессов. Рассчитанная зависимость $R^2(\tau)$ для двух указанных фрагментов геоакустических сигналов приведена на рис. 5 (кривая 1).

Результаты наблюдения микросейсмических деформаций земной поверхности в Подмоскowie за рассматриваемый период с 11 по 17 сентября 2018 г. (см. рис. 4в, 4г) также обнаруживают значимые вариации, которые проявляются в виде изменений интенсивности и перестройки спектрального состава регистрируемых сигналов во времени. Относительная интенсивность компонента сигнала на спектрально-временных СВАН-диаграммах (см. рис. 4в) изображена уровнями серого цвета от 0 (белый цвет) до 1.0 (черный цвет). Абсолютные же значения интенсивностей для каждой СВАН-диаграммы задаются масштабными коэффициентами, которые приведены под этими диаграммами. На рис. 4г приведены соответствующие спектральные распределения $S(f)$ зарегистрированных сигналов за этот же период в стандартном графическом представлении.

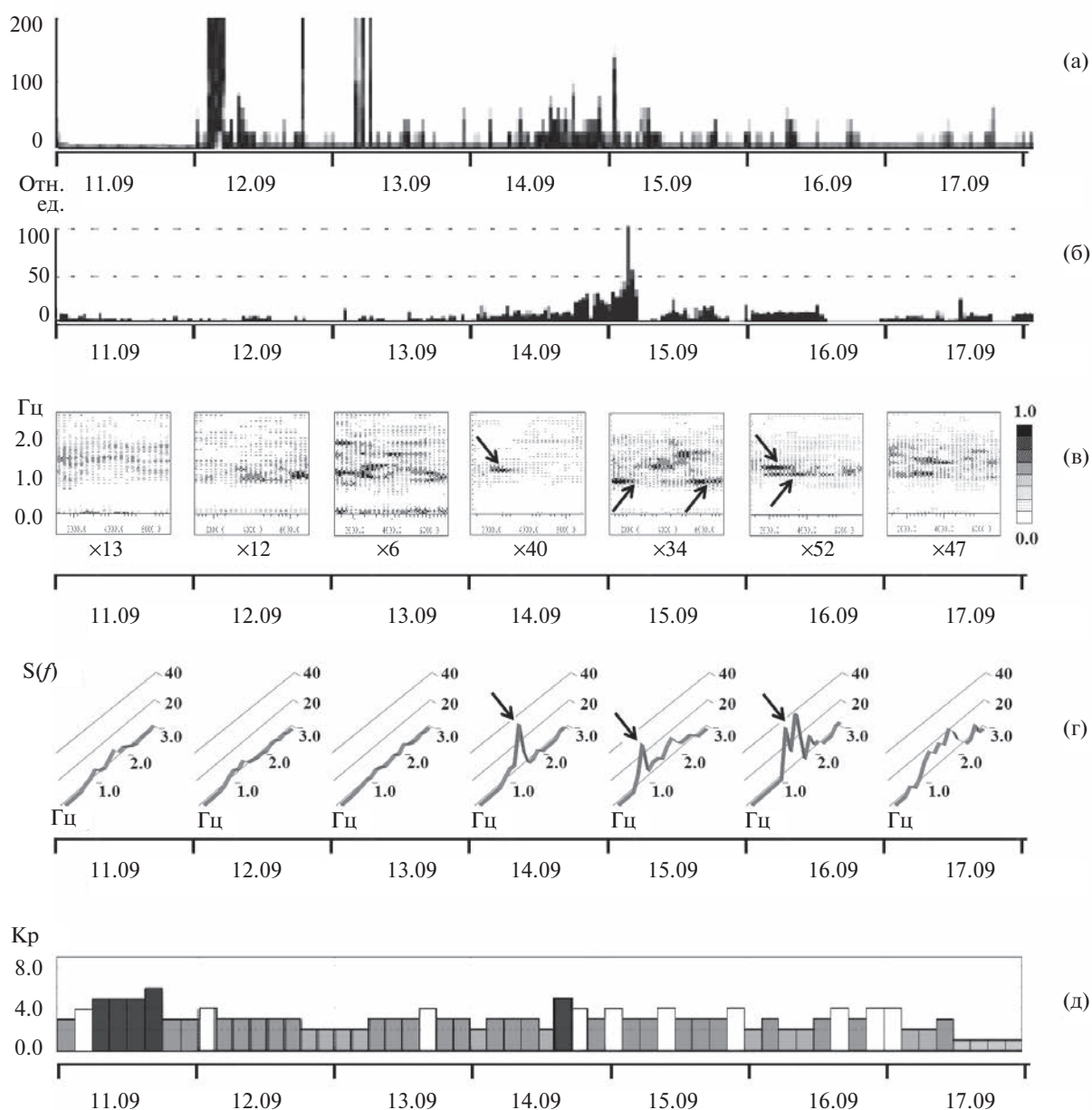


Рис. 4. Геоакустические сигналы, зарегистрированные на Камчатке 11–17 сентября 2015 г. (а, б), а также микросейсмические деформации земной поверхности (в, г) и геомагнитная активность (д), зарегистрированные в Подмосковье в тот же период.

Нерегулярные случайные вариации интенсивности слабых микросейсмических сигналов в диапазоне частот 1–2 Гц наблюдаются 11–13 сентября как на СВАН-диаграммах (см. рис. 4в), так и на спектральных распределениях $S(f)$ (см. рис. 4г). Их уровень не превышает 12–13 абсолютных единиц 11–12 сентября и снижается до 6 абсолютных единиц 13 сентября. Резкое возрастание микросейсмических сигналов происходит в последующие сутки — масштабные коэффициенты увеличиваются в 3–5 раз 14–17 сентября, а интенсивность спектральных линий достигает 52 относительных единиц. Наблюдается резкое

сужение спектральных линий при одновременном возрастании их абсолютной интенсивности, что проявляется наиболее отчетливо 14 и 16 сентября (показано стрелками, см. рис. 4в, 4г). Так, если 11–13 и 17 сентября эффективная ширина спектрального распределения $S(f)$ составляет около 1 Гц (занимаемая сигналом область находится в пределах от 1 Гц до 2 Гц), то 14 и 16 сентября эта область сужается до 0.1–0.2 Гц и сосредоточена в районе мощного спектрального пика около 1.3 Гц. Более того, 16 сентября происходит даже расщепление этого пика на две компоненты.

Отмеченные рост и перестройка сейсмо-деформационных сигналов во Фрязино зарегистрированы за 20–50 часов до чилийского землетрясения 16.09.2015. В этот же промежуток времени 14–15 сентября зарегистрирован также согласованный рост интенсивности геоакустических сигналов приборами на Камчатке (см. рис. 4а, 4б). К сожалению, значительное различие в частотных диапазонах исследуемых микросейсмических и геоакустических процессов, а также в используемых методических приемах обработки данных не позволяет нам провести здесь какие-либо количественные оценки корреляции, поэтому можно говорить только о качественно установленной взаимозависимости зарегистрированных процессов.

Следует отдельно сказать о возможных механизмах возрастания интенсивности геоакустических и перестройки микросейсмических сигналов, параллельно наблюдаемых в пунктах, разнесенных на большое (до 10^4 км) расстояние. Механизм возбуждения колебаний как отклик геоакустической эмиссии на активизацию деформационных процессов при подготовке землетрясения [Марапулец и др., 2012] в данном случае маловероятен вследствие быстрого затухания высокочастотных колебаний в среде на расстояниях, значительно превышающих характерные размеры активной зоны подготовки землетрясения. Удовлетворительным объяснением наблюдаемых явлений могут служить коррелированные возмущения земной поверхности, атмосферы и ионосферы Земли, подробно исследованные в работе [Дубров, Смирнов, 2013], которые могут быть взаимосвязанными с ростом циклонической активности в Мировом океане в периоды, предшествующие и сопровождающие сильные землетрясения [Головачев и др., 2011; Dubrov et al., 2014]. Физические аспекты возбуждения квазипериодических осцилляций и явления их синхронизации перед сильными землетрясениями подробно рассмотрены в работе [Sobolev, 2011]. Отмечается, что фазы неустойчивого равновесия энерго-насыщенной среды могут сопровождаться стохастическими колебаниями и их синхронизацией (в том числе — на нескольких частотах), фликкер-шумом, возникновением шумовых импульсов взрывного характера и другими явлениями. В работе [Sobolev, 2011] приведены примеры наблюдения “взрывов” квазипериодических колебаний и их синхронизации в длиннопериодном и сверх длиннопериодном диапазонах частот 10^{-2} – 10^{-4} Гц, зарегистрированных разнесенными сейсмостанциями сети IRIS за несколько суток до землетрясений с магнитудами $M = 7.8$ – 9.2 .

Квазипериодические высокочастотные (1–30 Гц) микросейсмические деформации антропо-

генного происхождения и явления роста их когерентности (выражающегося в сужении спектральных линий и расщеплении их на отдельные компоненты), предваряющие удаленные землетрясения с магнитудами $M = 6.5$ – 7.9 , впервые были отмечены разнесенными широкополосными лазерными деформографами [Дубров и др., 1987; Dubrov et al., 1989]. В частности, было показано, что расщепление узких спектральных пиков на отдельные компоненты может являться следствием их амплитудной модуляции, например, под действием штормовых микросейсм, возбуждаемых в морях и океанах. Источником когерентных микросейсм на частотах $50/n$ Гц (n — целое число), как было установлено в работе [Дубров и др., 1987], являются мощные электроэнергетические установки (главным образом, тепловые, атомные и гидроэлектростанции).

Таким образом, зарегистрированный согласованный рост интенсивности геоакустических сигналов на частотах 2.5–11 кГц и совпадающая с ним перестройка сейсмо-деформационных сигналов на частотах 1.1–1.4 Гц (см. рис. 4а–4г) условно может представляться здесь высокочастотным аналогом синхронизации сверхнизкочастотных микросейсм [Sobolev, 2011], наблюдаемой перед сильными землетрясениями.

Дополнительным подтверждением того, что геоакустические и микросейсмические процессы, зарегистрированные нами одновременно приборами на Камчатке и в Подмоскowie, не являются случайными локальными возмущениями, а носят глобальный характер, могут служить данные наблюдения за состоянием магнитосферы Земли за этот же период. Интенсивные геомагнитные вариации величиной 80–150 нТ (индекс геомагнитной активности $K_p = 5$ – 6) отмечены 11 и 14 сентября 2015 г. станциями Восточного

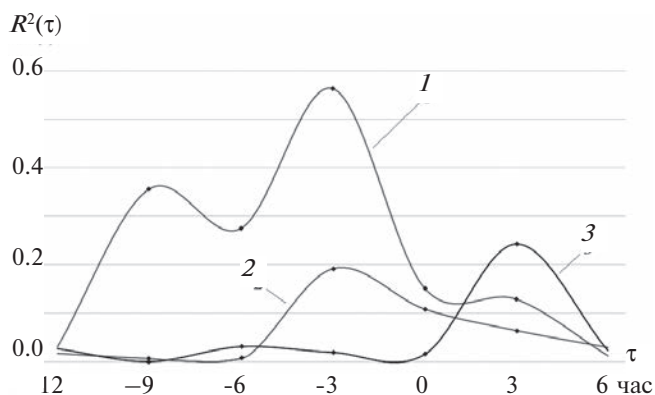


Рис. 5. Взаимная корреляция геофизических процессов 14–15 сентября: 1 — геоакустических сигналов в пунктах “Микижа” и “Карымшина” (Камчатка); 2 — геоакустических сигналов в пункте “Микижа” (Камчатка) и геомагнитной активности в Подмоскowie; 3 — геоакустических сигналов в пункте “Карымшина” (Камчатка) и геомагнитной активности в Подмоскowie.

и Западного полушария (www.intermagnet.org), а также геостационарными спутниками GOES NOAA (<ftp.swpc.noaa.gov>). Ход геомагнитного индекса Кр по данным Геофизической обсерватории ИЗМИРАН (Москва, г. Троицк <http://forecast.izmiran.ru/>) приведен на рис. 4д. Результаты вычисления коэффициентов корреляции Пирсона для геомагнитной активности 14–15 сентября в Подмоскowie и геоакустических процессов на Камчатке со сдвигом по времени показаны на рис. 5 (кривые 2 и 3). Полученные максимальные значения коэффициентов корреляции 0.44 и 0.49 (квадраты коэффициентов R^2 равны 0.19 и 0.24, соответственно) свидетельствуют о значимой взаимозависимости анализируемых процессов. Взаимная временная задержка геоакустических сигналов и геомагнитной активности находится в пределах ± 3 часа. Небезинтересно заметить, что 14.09.2015 – день первой регистрации гравитационно-волнового излучения, произведенной двумя пространственно разнесенными лазерными интерферометрами LIGO [Abbott et al., 2016].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена новая методика и оригинальные результаты наблюдений сейсмо-деформационных и геоакустических процессов при их параллельной регистрации лазерными деформографами и геоакустическими приборами, разнесенными в пространстве на значительные расстояния (Камчатка–Подмоскowie, около 6.8 тыс. км). Показана возможность применения предложенной методики для разделения локальных и глобальных возмущений исследуемых процессов.

Впервые выполнен сравнительный анализ деформационных и геоакустических сигналов в широкой области спектра от единиц герц до десятков килогерц, регистрируемых в сейсмоактивной и асейсмической зонах.

При сопоставлении данных, полученных разнесенными приборами, отмечены значимый рост геоакустических и перестройка микросейсмических колебаний земной поверхности, происходившие за 20–50 часов до удаленного землетрясения 16.09.2015, $M_s = 8.3$.

Проведенные исследования показывают возможность применения разработанных методов в современных системах геофизического мониторинга для повышения достоверности определения параметров сейсмических процессов природного и искусственного происхождения, а также для выделения глобальных геофизических эффектов, связанных с процессами подготовки сильных землетрясений с магнитудой $M > 7$, прохождением мощных тропических

ураганов (тайфунов, цунами) и других явлений на поверхности Земли и в околоземном пространстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александров Д.В. Особенности работы трехзеркального интерферометра и использование его для регистрации деформаций земной поверхности // Нелинейный мир. 2012. № 2. С. 114–115.
- Александров Д.В., Кравцов В.В., Ларионов И.А. Предварительные результаты испытаний трехзеркального лазерного интерферометра на Камчатском геополигоне // Труды 23-ей Международной конференции “Лазеры, измерения, информация”, 5–6 июня 2013 г., Санкт-Петербург. СПб., 2013. С. 105.
- Александров Д.В., Кравцов В.В., Дубров М.Н. Изучение работы управляемых лазер-интерферометров на больших базах // Нелинейный мир. 2015. Т. 13. № 2. С. 5–6.
- Александров Д.В., Кравцов В.В., Дубров М.Н. Результаты испытаний лазерных интерферометров-деформографов на Фрязинском Лучеводном полигоне // Нелинейный мир. 2018. № 2. С. 44–46.
- Головачев С.П., Дубров М.Н., Волков В.А. Взаимосвязь тропического циклогенеза и сейсмической активности по данным спутниковых и наземных измерительных комплексов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 232–238.
- Долгих Г.И. Исследование волновых полей океана и литосферы лазерно-интерференционными методами. Владивосток: Дальнаука, 2000. 160 с.
- Долгих Г.И. Принципы построения однокоординатных лазерных деформографов // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 5. С. 24–30.
- Дубров М.Н., Яковлев А.П., Алешин В.А. О связи высокочастотных микросейсмических деформаций с напряженным состоянием литосферы // Докл. АН СССР. 1987. Т. 293. № 5. С. 1085–1089.
- Дубров М.Н., Матвеев Р.Ф. Разработка и исследование многокомпонентных геофизических лазерных интерферометров-деформографов // Радиотехника и электроника. 1998. Т. 43. № 9. С. 1147–1152.
- Дубров М.Н., Смирнов В.М. Взаимосвязанные возмущения земной поверхности, атмосферы и ионосферы Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. 2013. Т. 53. № 1. С. 53–63.
- Дубров М.Н., Александров Д.В., Кравцов В.В. Лазерные интерферометры-деформографы: новые разработки и применение // Электронный журнал “Исследовано в России”. 2013. № 025. С. 354–359. URL http://cplire.ru:8080/6260/1/zhurnal_article_2013_025.pdf (дата обращения: 15.10.2018)
- Дубров М.Н., Луканенков А.В., Николаев А.В. Перспективы развития сейсмического мониторинга // Физика ядерного взрыва. Т. 5. Контроль ядерных испытаний / Под ред. В.М. Лоборева и др. М.: Физматлит, 2017. С. 161–185.
- Комаров И.И., Синева З.И., Михайлова Н.Н., Абдрахманова Г.С. Модель сейсмического шума по

наблюдениям геофизической обсерватории “Маканчи” // Вестник НЯЦ РК. Геофизика и проблемы нераспространения. 2000. Вып. 2. С. 17–23.

Ларионов И.А., Непомнящий Ю.А. Особенности геодеформационных измерений приповерхностных осадочных пород // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2016. № 3(14). С. 85–90.

Маранулец 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. С. 59–67.

Николаев А.В., Луканенков А.В., Дубров М.Н. Новые возможности совместной обработки данных регистрации смещений и деформаций в поле сейсмической волны // ДАН. 2010. Т. 430. № 6. С. 816–819.

Щербина А.О., Мищенко М.А., Ларионов И.А. Аппаратно-программный комплекс мониторинга геоакустической эмиссии // Вестник КРАУНЦ. Серия Науки о Земле. 2005. №2(6). С. 128–132.

Abbott B.P., Abbott R., Abbott T.D. et al. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 116. Iss. 6. P. 061102.

Amoruso A., Crescentini L., Bayo A. et al. Two High-Sensitivity Laser Strainmeters Installed in the Canfranc Underground Laboratory (Spain): Instrument Features

from 100 to 0.001 mHz // Pure and Applied Geophysics. 2018. V. 175. Iss. 5. P. 1727–1737.

Barbour A.J., Agnew D.C. Detection of Seismic Signals Using Seismometers and Strainmeters // Bulletin of the Seismological Society of America. 2012. V.102. № 6. P. 2484–2490.

Dubrov M.N., Alyoshin V.A., Yakovlev A.P. Wideband laser strainmeters as a new instrument for geophysical research // Gerlands Beitr. Geophysik. Leipzig. 1989. V. 98(4). P. 292–300. ISSN: 0016-8696.

Dubrov M.N., Volkov V.A., Golovachev S.P. Earthquake and hurricane coupling is ascertained by ground-based laser interferometer and satellite observing techniques // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss. 2014. V. 2(1). P. 935–961. (Discussion part of the Interactive Open Access Journal of EGU). doi: 10.5194/nhessd-2-935-2014.

Harrop N., Attenborough K. Laser-Doppler vibrometer measurements of acoustic-to-seismic coupling in unconsolidated soils // Applied Acoustics. 2002. V. 63. № 4. P. 419–429.

Karmaleeva R.M., Latynina L.A., Savarensky E.F. On the Observation of Long-Period Waves with Quartz Extensometers // Pure and Applied Geophysics. 1970. V. 82. № 1. P. 85–97.

Sobolev G. A. Seismicity dynamics and earthquake predictability // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. № 11. P. 445–458. doi: 10.5194/nhess-11-445-2011.

SEISMIC-STRAIN AND ACOUSTIC MONITORING OF GEODYNAMICAL PROCESSES BY HIGH SENSITIVE AND SPATIALLY DISTANCED INSTRUMENTS IN SEISMO-ENERGY-ACTIVE AND ASEISMIC ZONES

D. V. Aleksandrov¹, M. N. Dubrov^{1, *}, I. A. Larionov², Yu. V. Marapulets²,
B. M. Shevtsov²

¹Fryazino Branch, Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Vvedensky sq. 1, Fryazino, Moscow Region, 141190 Russia

²Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Far Eastern Branch, Mirnaya str., 7, Paratunka set., Elizovo district, Kamchatka region, 684034 Russia

*e-mail: mnd139@ire216.msk.su

Received December 12, 2017

The results of wideband geophysical processes observations by means of laser strainmeters and special geo-acoustic equipment are presented. The examples of synchronous registering of strain-seismic and geo-acoustic earth oscillations in Kamchatka and Moscow region as well as parallel analysis of the obtained data are shown. These results reveal the possibility of the introduced technics application for local and global disturbances of investigated processes separation.

Key words: laser strainmeter, hydrophone, earthquakes, tropical cyclones.