

УДК 550.344.42, 551.510.535, 537.87

ВОЗМУЩЕНИЯ АМПЛИТУДЫ И ФАЗЫ СУБИОНОСФЕРНОГО ОНЧ СИГНАЛА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ВОЛН ЦУНАМИ

© 2016 г. М.С. Соловьева¹, А.А. Рожной¹, С.Л. Шалимов^{1,2}, Б.В. Левин³, Г.В. Шевченко³, В.Б. Гурьянов³

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

³ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия

Данные очень низкочастотных (ОНЧ) наблюдений на нескольких принимающих станциях в России (г.г. Петропавловск-Камчатский, Южно-Сахалинск) и Японии (г. Мошири) использованы для анализа отклика нижней ионосферы на цунами, вызванные Курильским 2006 г., Японским 2011 г. и Чилийским 2010 г. землетрясениями. После названных землетрясений при распространении цунами вдоль трассы “передатчик–приемник” были обнаружены аномалии в рядах ночных наблюдений амплитуды и фазы ОНЧ сигналов, фиксируемых станциями. Анализ спектральных характеристик вариаций ОНЧ сигналов показал хорошее совпадение их частотных максимумов с максимумами на записях колебаний уровня моря, зарегистрированных станциями *DART* и *GPS*, расположенными вблизи приемников и передатчика.

Результаты работы подтверждают вероятность того, что обнаруженные возмущения в нижней ионосфере вызываются внутренними гравитационными волнами, создаваемыми цунами.

Ключевые слова: цунами, субионосферные электромагнитные сигналы, нижняя ионосфера, внутренние гравитационные волны.

Введение

В последнее десятилетие получено достаточное количество доказательств существования ионосферных эффектов, вызванных прохождением волн цунами. Экспериментальные наблюдения отклика ионосферы на цунами основаны на теоретических работах о распространении гравитационных волн в атмосфере, опубликованных в 70-е годы прошлого столетия (см., например, [Hines, 1972; Najita, Weaver, Yuen, 1974; Peltier, Hines, 1976]). Цунами генерируют внутренние гравитационные волны (ВГВ), которые распространяются вверх в атмосферу, где их амплитуда усиливается вследствие уменьшения с высотой плотности воздуха. Достигая ионосферных высот, эти волны диссипируют и вызывают таким образом возмущения плотности плазмы, которые могут быть зарегистрированы как посредством спутников *GPS*, так и методом ОНЧ просвечивания ионосферы.

Впервые подобные возмущения в ионосфере были обнаружены в 2005 г. [Artru *et al.*, 2005] по данным измерений общей плотности ионосферы *TEC* (от англоязычного *Total Electron Content*), выполненных сетью станций *GPS* в Японии и использованных для анализа цунами, вызванного землетрясением в Перу 23.06.2001 г. Для подтверждения цунамигенной гипотезы возникновения наблюдаемых возмущений в ионосферной плазме авторы работы [Occhipinti *et al.*, 2006] с использованием трехмерного моделирования взаимодействия океана, атмосферы и ионосферы воспроизвели возмущения в *TEC* для цунами, вызванного землетрясением 2004 г. вблизи Суматры. Подобные

возмущения в *TEC* были обнаружены и для нескольких других сильных цунами в Тихом океане [Galvan et al., 2011; Komjathy et al., 2012]. Авторы работы [Rolland et al., 2010], сравнив спектральные характеристики вариаций *TEC* с данными о колебаниях уровня моря вблизи Гавайских островов, подтвердили гипотезу, что по *GPS* данным можно выявлять аномалии, связанные с цунами.

Анализируя цунами, вызванное землетрясением, произошедшим в Японии в 2011 г., авторы работы [Makela et al., 2011] с помощью фотометрических измерений обнаружили вариации свечения в ионосфере. Ранее модельные исследования показали, что значительная модуляция интенсивности свечения в линии 630.0 нм может быть вызвана гравитационными волнами, генерируемыми при прохождении цунами [Hickey, Schubert, Walterscheid, 2010]. Результаты, полученные в [Makela et al., 2011], были успешно промоделированы и воспроизведены в [Occhipinti et al., 2011], обеспечив объяснение генерации гравитационных волн от цунами. В основном ионосферные возмущения наблюдаются в дальней зоне (более 500 км от эпицентра землетрясения), где они отчетливо заметны, поскольку в этой зоне формируются гравитационные волны, создаваемые цунами.

Описанные выше методы и наблюдения относятся к отклику верхней ионосферы (*F*-области) на прохождение цунами. Как было показано, этот отклик инициируется ВГВ, проникающими в *F*-область. Однако, прежде чем достичь этой области, гравитационные волны распространяются через нижнюю ионосферу, где помимо создания возмущений в ионизации они вызывают изменения химического состава термосферы. Следует отметить, что возмущения в *E*-области ионосферы, вызванные цунамигенными гравитационными волнами, были исследованы и численно [Occhipinti, Kherani, Lognonné, 2008], и теоретически [Coisson et al., 2011].

Один из немногих экспериментальных методов, позволяющий регистрировать изменения в ионизации нижней ионосферы, – это метод очень низкочастотного (ОНЧ) зондирования. Волны ОНЧ диапазона (3–30 кГц) распространяются между Землей и ионосферой как в сферическом волноводе, нижней стенкой которого является Земля, а верхней – нижний слой ионосферы. Эффективная высота отражения сигнала обычно составляет днем ~70 км, а ночью ~90 км. Характер распространения ОНЧ сигналов зависит главным образом от высоты отражения, которая определяется величиной и градиентом электронной плотности вблизи границы атмосфера–ионосфера [Barr, Jones, Rodger, 2000]. Модификация ионосферной плотности приводит к изменениям амплитуды и фазы регистрируемых ОНЧ сигналов. Их распространение на расстояния тысяч и десятков тысяч километров дает возможность контролировать состояние верхней атмосферы и нижней ионосферы в пределах больших регионов. При этом, хотя приемники и передатчики расположены на суше, возможно, например, отслеживание изменений в электронной плотности нижней ионосферы над огромной территорией Тихого океана. Отклик нижней ионосферы на распространение цунами впервые был рассмотрен в работах [Rozhnoi et al., 2012, 2014].

В данной работе приводятся результаты использования метода ОНЧ зондирования для наблюдения отклика нижней ионосферы на цунами, вызванные тремя землетрясениями – Курильским 2006 г., Японским 2011 г., Чилийским 2010 г.

Исходные данные и методика наблюдений

Работа основана на регистрации ОНЧ/НЧ сигналов (~20–40 кГц) на станциях, расположенных на территории России в г.г. Петропавловске-Камчатском и Южно-Сахалинске, а также на территории Японии в г. Мошири. Приемники станций одновременно измеряют амплитуду (в дБ) и фазу (в градусах) сигналов, поступающих с шагом

дискретизации 20 с от нескольких передатчиков, расположенных в Японии (*JJY*, 40 кГц и *JJI*, 22.2 кГц), Австралии (*NWC*, 19.8 кГц) и на Гавайских островах (*NPM*, 21.4 кГц). Для японского передатчика *JJI* регистрируется только амплитуда, поскольку поступающий с него сигнал не является *MSK* модулированным (*Minimum Shift Keying*), в связи с чем не может приниматься используемой аппаратурой.

Данные ОНЧ измерений сравнивались с данными, полученными на глубоководных станциях *DART* (*Deep-ocean Assessments and Reporting of Tsunamis*), установленных Национальным океаническим и атмосферным агентством США (<http://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml>), а также на станциях *GPS* Японской информационной сети *NOWPHAS* (<http://www.pari.go.jp/unit/kaisy/nowphas/>).

Схема исследуемого региона с указанием местоположения эпицентров двух землетрясений с $M > 8$ (Японского 11.03.2011 г. и Курильского 15.11.2006 г.), станций *DART* и *GPS*, а также приемников и передатчиков приведена на рис. 1. На схеме обозначены зоны чувствительности разных трасс.

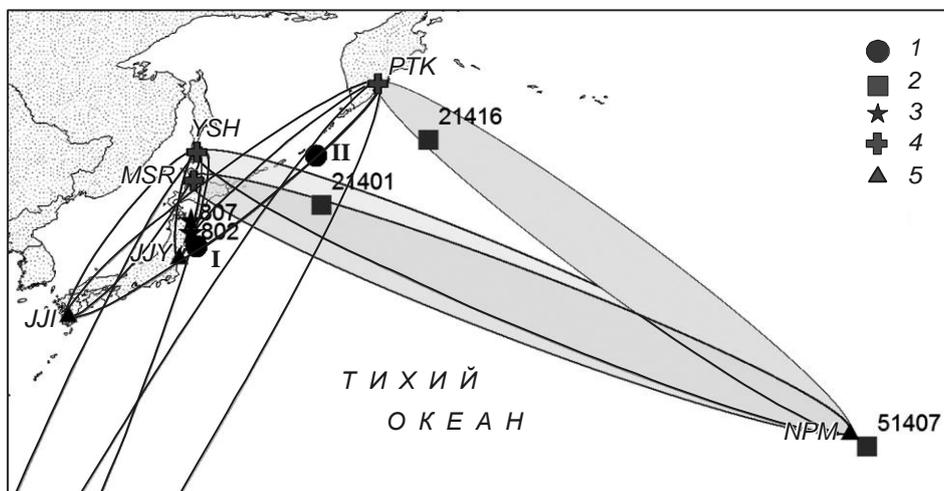


Рис. 1. Схема исследуемого региона с указанием местоположения эпицентров двух землетрясений с $M > 8$ (1), станций *DART* (2) и *GPS* (3) с указанием их номеров, а также приемников (4) и передатчиков (5). Эллипсы с серой заливкой – зоны чувствительности трасс от передатчика *NPM*; без заливки – от передатчиков *JJY*, *JJI*, *NWC*. Подробнее см. в тексте

На схеме и далее в тексте используются следующие обозначения и англоязычные аббревиатуры:

I – эпицентр Курильского землетрясения 15.11.2006 г.;

II – эпицентр Японского 11.03.2011 г.;

PTK – приемник, расположенный в г. Петропавловск-Камчатский;

YSH – приемник, расположенный в г. Южно-Сахалинск;

MSR – приемник, расположенный в г. Мошири;

JJY (40 кГц) и *JJI* (22.2 кГц) – передатчики, находящиеся в Японии;

NPM (21.4 кГц) – передатчики, находящиеся на Гавайских островах.

Для передатчика *NWC* (19.8 кГц), расположенного в Австралии (на схеме не показан), обозначена только часть зоны чувствительности (по данным *USGS/NEIC* http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_global.html).

Зоны чувствительности трасс, отображаемые на схеме в виде эллипсов, соответствуют пяти зонам Френеля. Координаты проекции первой зоны на поверхность Земли рассчитывались по формуле $y = [\lambda^2/4 + \lambda x(1-x/D)]^{1/2}$, где λ – длина волны; x – координата

вдоль трассы распространения сигнала; D – расстояние между приемником и передатчиком. Эллипсы с серой заливкой – зоны чувствительности трасс от передатчика *NPM*, направление которых совпадало с направлением распространения цунами. Другие субионосферные трассы использовались в качестве контрольных. Сигнал анализировался в ночное время, когда ионосфера более чувствительна к внешним воздействиям. Характеристики дневной и ночной ионосферы существенно различны. Состояние освещенной Солнцем ионосферы определяется исключительно солнечной активностью. Как было сказано выше, высота дневной ионосферы значительно ниже, чем ночной, за счет образования спорадического слоя, вызванного солнечной радиацией. В дневное время в ионосфере возможно появление внезапных ионосферных возмущений, вызванных рентгеновским излучением во время солнечных вспышек на дневной стороне Земли. Эти возмущения хорошо отслеживаются ОНЧ/НЧ сигналами в виде внезапных фазовых аномалий. Остальные внешние воздействия – магнитные бури, протонные вспышки, потоки электронов, тайфуны, сейсмическая и вулканическая активность (особенно на средне- и низкоширотных трассах) – могут вызывать возмущения в ионосфере и, следовательно, в характеристиках субионосферных НЧ сигналов только в ночное время.

Результаты анализа

Курильское цунами 15 ноября 2006 г.

Первое из выбранных для анализа землетрясений произошло 15.11.2006 г. вблизи о. Симушир (Курильские острова) в 11:14 UT ($M_w=8.3$, $h=34$ км). Землетрясение породило цунами, которое было зарегистрировано мареографами Центра по предупреждению цунами [<http://wcatwc.arh.noaa.gov/about/tsunamimain.php>]. Для анализа вариаций ОНЧ сигнала после землетрясения была выбрана трасса *NPM* – Петропавловск-Камчатский (*PTK*), поскольку ее направление совпадало с направлением распространения цунами. Станция в Южно-Сахалинске была установлена в 2009 г. и, следовательно, на момент рассматриваемого землетрясения были доступны только данные со станции в Петропавловске-Камчатском.

При анализе сравнивались сигналы, распространяющиеся вдоль трасс *JJY-PTK*, *JJI-PTK* и *NWC-PTK*. На рис. 2 показаны разностные значения амплитуды и фазы сигналов на Камчатской станции во время местной ночи 15.11.2006 г., определенные как разница между текущим и модельным сигналом. При этом в качестве модели использовалось значение среднемесячного сигнала, рассчитанного по невозмущенным (“спокойным”) дням для каждого месяца.

Поскольку ночные амплитудные аномалии ОНЧ/НЧ сигналов, вызываемые разными факторами (геомагнитной активностью, потоками элементарных космических частиц, атмосферной циркуляцией, цунами, сейсмической и вулканической активностью и др.), всегда отрицательны вследствие потери сигнала на ионосферных неоднородностях, на этом и последующих рисунках для амплитудных графиков нанесены только отрицательные стандартные отклонения (среднее значение, составляющее -2σ).

Фазовые аномалии могут быть как полностью отрицательными или положительными, так и “синусоидальными” (могут иметь переменные знаки), в связи с чем на соответствующих графиках отмечены значения $\pm 2\sigma$.

На рис. 2 можно видеть, что разностные значения амплитуд и фаз сигналов от всех передатчиков во время местной ночи 15.11.2006 г. (за исключением передатчика *NPM*) находятся внутри дисперсионных границ. Однако для передатчика *NPM* наблюда-

ется значительное (почти на 10 дБ ниже уровня стандартного отклонения) уменьшение

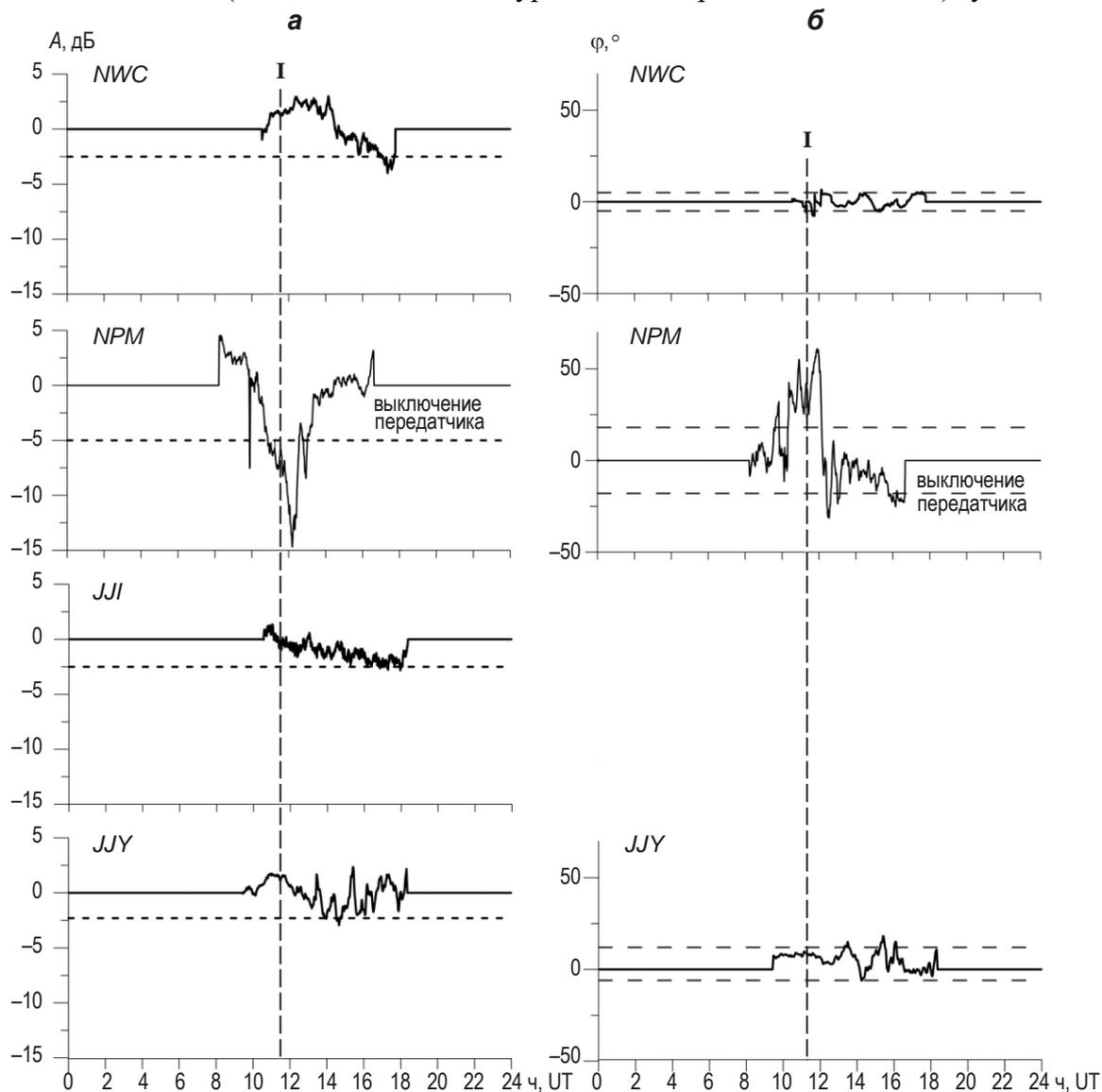


Рис. 2. Разностные амплитуды (*а*) и фазы (*б*) сигналов от передатчиков *NWC* (19.8 кГц), *NPM* (21.4 кГц), *JJI* (22.2 кГц) и *JYU* (40.0 кГц), зарегистрированных в ночное время 15.11.2006 г. на станции *РТК*, расположенной в г. Петропавловск-Камчатский. Нулевые линии относятся к дневному времени суток. Горизонтальные штриховые линии на графиках разностной амплитуды – средние значения $-\sigma$; на графиках разностной фазы – средние значения $\pm 2\sigma$. Вертикальная штриховая линия показывает время землетрясения *I*, произошедшего 15.11.2006 г. вблизи о. Симушир

разностной амплитуды. При этом в разностной фазе того же сигнала заметны фазовые аномалии, превышающие на 40° уровень 2σ . Временной промежуток между моментом землетрясения и максимумом аномалии сигнала составляет около 1–1.5 ч. Необходимо отметить, что резкое падение амплитуды и увеличение фазы примерно за час до землетрясения вызваны выключением передатчика. Передатчик отключился также примерно через 5 ч после землетрясения, когда в записях сигнала наблюдался электромагнитный шум.

Значения амплитуды и фазы сигнала от передатчика *NPM*, зарегистрированного 15.11.2006 г., были отфильтрованы в диапазоне 0.3–15 МГц (период от 1 до 55 мин). Вейвлет-анализ фильтрованного сигнала показал, что частотный максимум его спектра находится в интервале 8–30 мин, что соответствует внутренним гравитационным волнам (волнам с периодами более 6 мин).

Японское цунами 11 марта 2011 г.

Землетрясение с магнитудой $M_w=9.0$ произошло 11.03.2011 г. в 05:46 UT в Японии вблизи г. Тохоку. По данным каталога *NEIC/USGS*, эпицентр основного толчка имел координаты 38.322° с.ш. и 142.369° в.д.; глубина очага составила 24 км. Это землетрясение вызвало разрушительное цунами, высота волны которого достигала 10–15 м (в некоторых местах до 20 м). Цунами, зарегистрированное приборами Центра по предупреждению цунами, размещенными по всей акватории Тихого океана, нанесло серьезный ущерб северо-восточному побережью о. Хонсю, привело к многотысячным человеческим жертвам, вызвало обширные разрушения, включая техногенную катастрофу на атомной станции Фукусима 1.

Авторами для анализа использовались данные, полученные с двух станций, расположенных в г. Южно-Сахалинск (*YSH*) и г. Мошири (*MSR*). Направление распространения цунами в данном случае совпало с направлением трасс *NPM–YSH* и *NPM–MSR* (см. рис. 1). На рис. 3 показаны разностные значения амплитуды и фазы *NPM* сигнала, зарегистрированного 11.03.2011 г. станциями *YSH* и *MSR*.

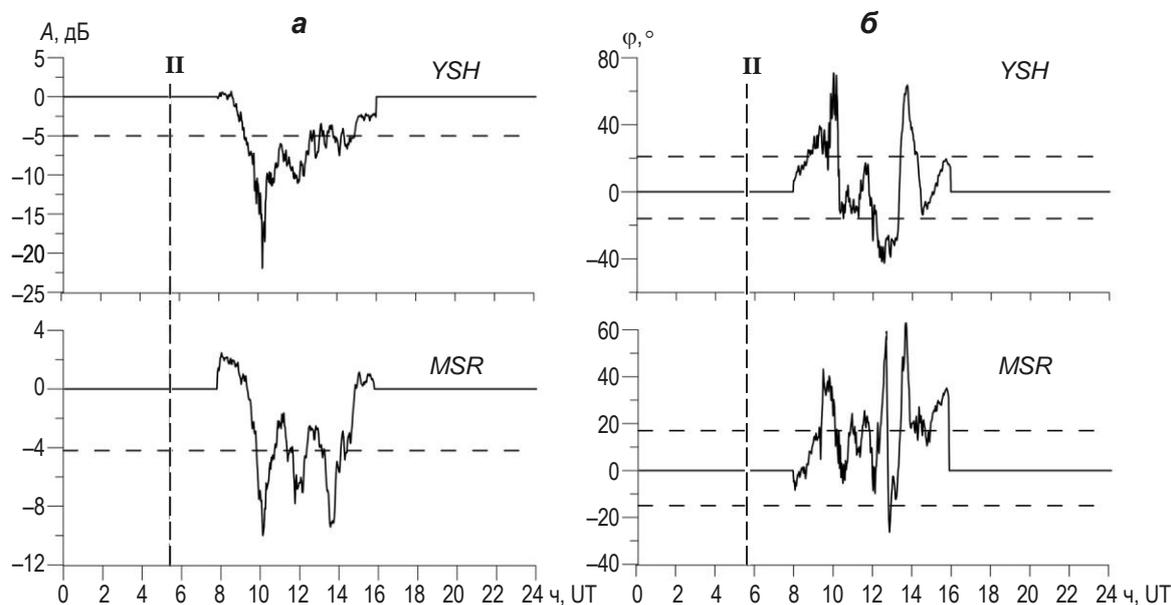


Рис. 3. Разностные амплитуды (а) и фазы (б) сигналов от передатчика *NPM* (21.4 кГц), зарегистрированных станциями в Южно-Сахалинске (*YSH*) и Мошири (*MSR*) в ночное время 11.03.2011 г. Условные обозначения см. на рис. 2

На записях обеих станций уверенно прослеживаются сильные отрицательные аномалии амплитуды сигнала, превышающие уровень 2σ на 6–15 дБ, и положительные фазовые вариации, достигающие 40° относительно уровня 2σ . Следует отметить, что на записях сигналов от остальных передатчиков (*JJY*, *JJI* и *NWC*), полученных в тот же день, не обнаружено каких-либо заметных возмущений. Аномалии на рис. 3 наблюда-

ются в течение всей местной ночи (8–16 UT). Максимум аномалии сигнала отмечен более чем через 3 ч после землетрясения (в предыдущем случае – 1–1.5 ч). Отмеченный факт подробно рассмотрен в работе [Rozhnoi et al., 2012]. Землетрясение в Тохоку произошло во время вечернего терминатора при резком изменении высоты границы нижней ионосферы, приводящем к сильным возмущениям ОНЧ сигнала, на фоне которых реальное начало аномалии может быть неразличимо.

На рис. 4, *д*, *е* показаны вейвлет-спектры *NPM* сигнала (отфильтрованные в диапазоне от 1 до 55 мин), зарегистрированного в Мошири 11.03.2011 г. в течение местной ночи. Максимум спектра сигнала находится в диапазоне частот 0.3–2 мГц (или 8–55 мин) как для амплитуды, так и для фазы сигнала. Цунами приходит на буй 21401 во время вечернего терминатора (переход от дня к ночи). Поэтому взаимодействие внутренних гравитационных волн с ионосферой не столь эффективно, и максимум ОНЧ аномалии наблюдается с задержкой около 2 часов после начала местной ночи. Можно видеть, что гравитационные волны начинают взаимодействовать с нижней ионосферой примерно через 1–1.5 ч после землетрясения во время прохода вечернего терминатора.

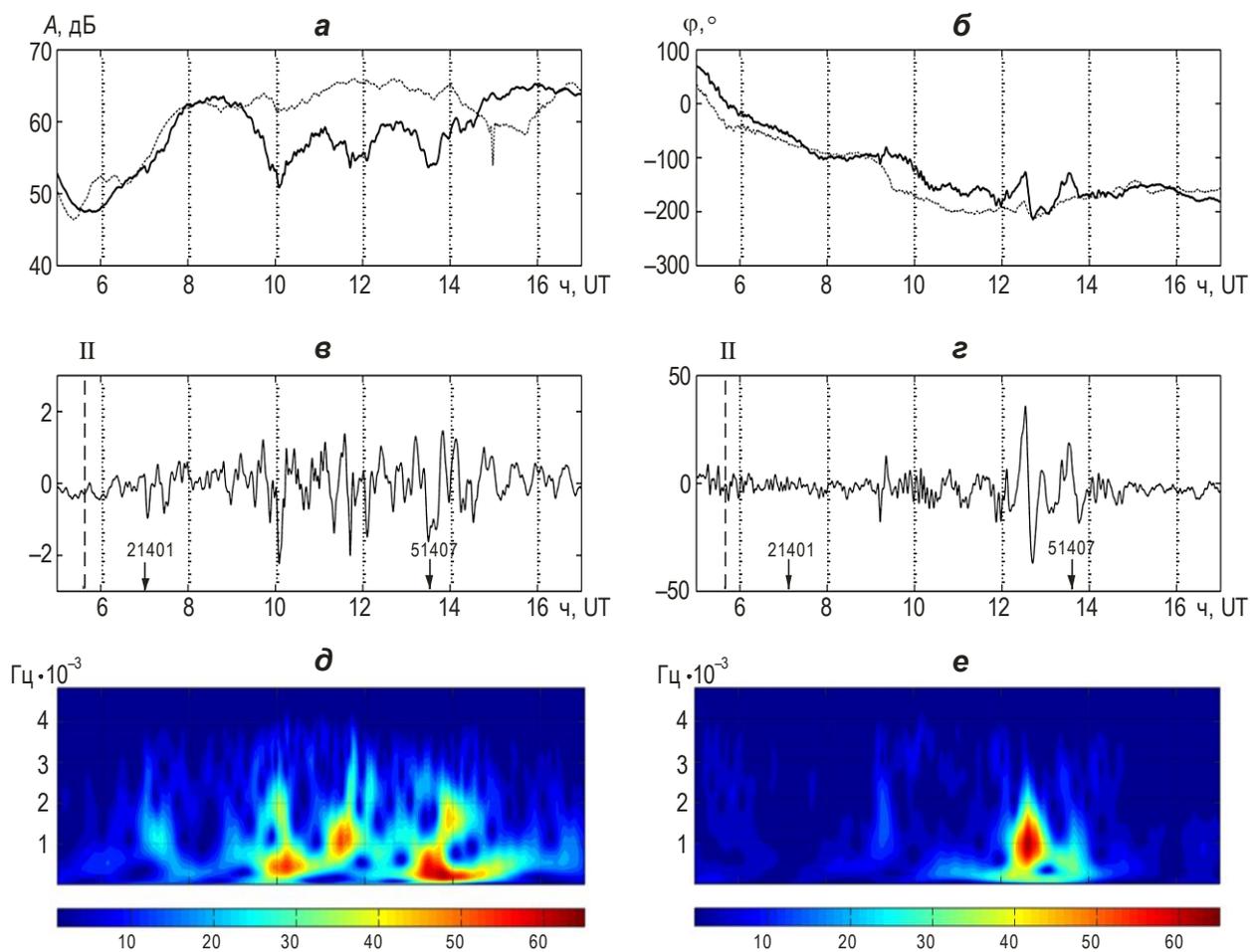


Рис. 4. Амплитуда (*а*) и фаза (*б*) *NPM* сигнала, записанного 11.03.2011 г. на станции Мошири (серые линии – среднемесячные значения рассматриваемого параметра); они же после фильтрации (*в*, *з*). Вертикальной штриховой линией отмечен момент землетрясения II, произошедшего 11.03.2011 г.; стрелками – время прихода волны цунами на буй 21401 и 51407; *д*, *е* – вейвлет-спектры фильтрованных сигналов

На рис. 4, б отмечены времена прихода волны цунами на буй 21401, расположенный внутри зоны чувствительности трасс *NPM–YSH* и *NPM–MSR* на расстоянии ~1000 км от приемников, и на буй 51407, находящийся вблизи Гавайских островов. Все время, пока цунами распространялось от Японии до Гавайских островов, ОНЧ сигнал оставался возмущенным. Подобный анализ, сделанный для *NPM* сигнала, зарегистрированного в то же время в Южно-Сахалинске, показал похожие результаты.

Результаты анализа ОНЧ сигнала были сопоставлены со спектральными характеристиками колебаний уровня моря, зарегистрированных на японских *GPS* станциях *NOWPHAS*. Были выбраны станции на буях 802 и 807 (см. рис. 1), расположенных ближе всех к ОНЧ станции в Мошири. Соответствующие вейвлет-спектры представлены на рис. 5. На бую 802 волна цунами была зарегистрирована около 6:00 UT, на бую 807 – около 6:15 UT, т.е. примерно через 15 мин (буй 807) и 30 мин (буй 802) после землетрясения. Максимум энергии колебаний приходился на интервал от 25–55 мин на бую 807 и 15–55 мин на бую 802; более слабые максимумы отмечены на интервале 8–20 мин (буй 807) и 6–15 мин (буй 802).

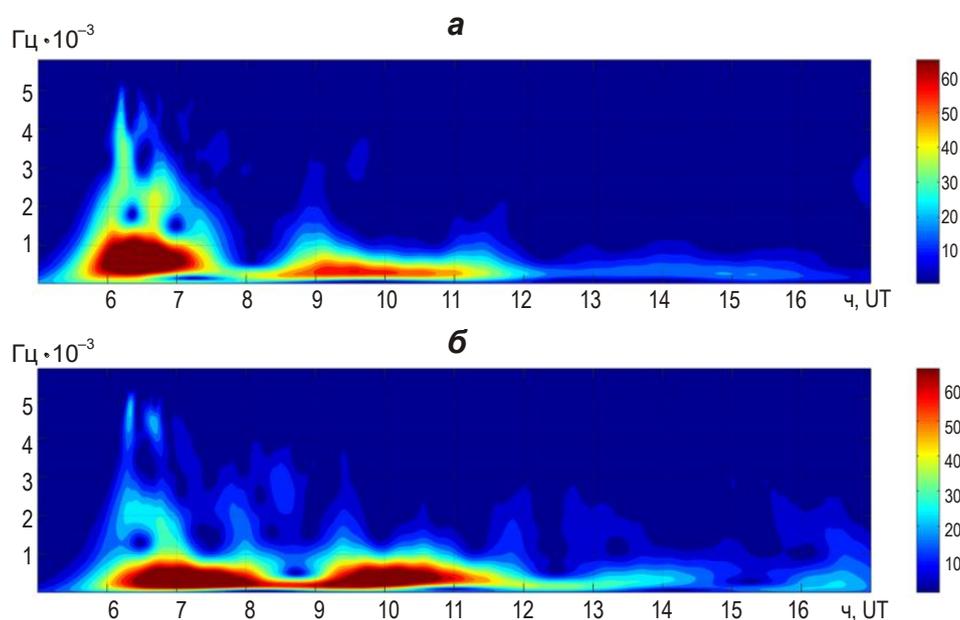


Рис. 5. Вейвлет-спектры колебаний уровня моря, зарегистрированных 11.03.2011 г. с 5 до 17 UT *GPS* станциями на буях 802 (а) и 807 (б). Данные Японской информационной сети *NOWPHAS*

Таким образом, спектры колебаний уровня моря хорошо согласуются со спектрами возмущенного ОНЧ сигнала, наблюдавшегося после землетрясения. Найденные периоды также соответствуют периодам внутренних гравитационных волн.

Чилийское цунами 27–28 февраля 2010 г.

Сильное землетрясение с $M_w=8.8$ произошло 27.02.2010 г. в 06:34 UT вблизи побережья Чили. По данным каталога *USGS/NEIC*, эпицентр основного толчка имел координаты 35.846° ю.д. и 72.719° з.ш., глубина очага составила 35 км. Землетрясение вызвало сильное цунами, которое привело к значительным разрушениям вдоль Чилийского побережья и представляло серьезную угрозу для всего Тихоокеанского побережья, включая российский Дальний Восток. Время распространения цунами до Гавайских островов составило около 14 ч; побережья Камчатки и Курильских островов оно достигло еще через 7 ч. В Петропавловске-Камчатском первая волна была зафиксирована

в 3:48 UT, в Северо-Курильске – в 4:24 UT, в Мало-Курильске – в 4:52 UT [Shevchenko et al., 2012]. Для анализа вариаций ОНЧ сигнала после землетрясения использована трасса *NPM–PTK* (см. рис. 1). Трасса *NPM–YSH* не была включена в анализ, поскольку с 23.02 по 01.03.2010 г. сигнал на станции в Южно-Сахалинске был возмущенным, после чего произошло выключение передатчика. Такие длительные возмущения в ОНЧ сигнале на трассе *NPM–YSH*, возможно, связаны с наблюдаемой в этот период в зоне чувствительности трассы серией землетрясений, самое сильное из которых произошло 06.03.2010 г. с $M=5.7$.

В отличие от двух рассмотренных выше цунами, в этом случае приход первой волны в зону чувствительности трассы произошел в дневное время, что не могло повлиять на поведение ОНЧ сигнала. Однако приход второй (отраженной) волны на следующий день во время местной ночи вызвал в сигнале сильные возмущения, которые совпали с моментом регистрации второй волны цунами станцией *DART* на буе 51407, расположенном на Гавайских островах. Эта станция, находящаяся в начале трассы *NPM–PTK*, зарегистрировала приход цунами 27.02.2010 г. примерно в 21:00 UT; станция *DART* на буе 21416, находящаяся в конце трассы, зарегистрировала приход цунами в 02:44 UT 28.02.2010 г. [Shevchenko et al., 2012]. В течение всего этого периода трасса *NPM–PTK* была освещена Солнцем.

На рис. 6 приведены СВАН-диаграммы записи колебаний уровня моря, зафиксированных приемниками *DART* на тех же буях: запись на буе 51407 сделана в течение суток с 1800 UT 27.02.2010 г. по 18:00 UT 28.02.2010 г., а на буе 21416 – начиная с 00:00 UT 28.02.2010 г.

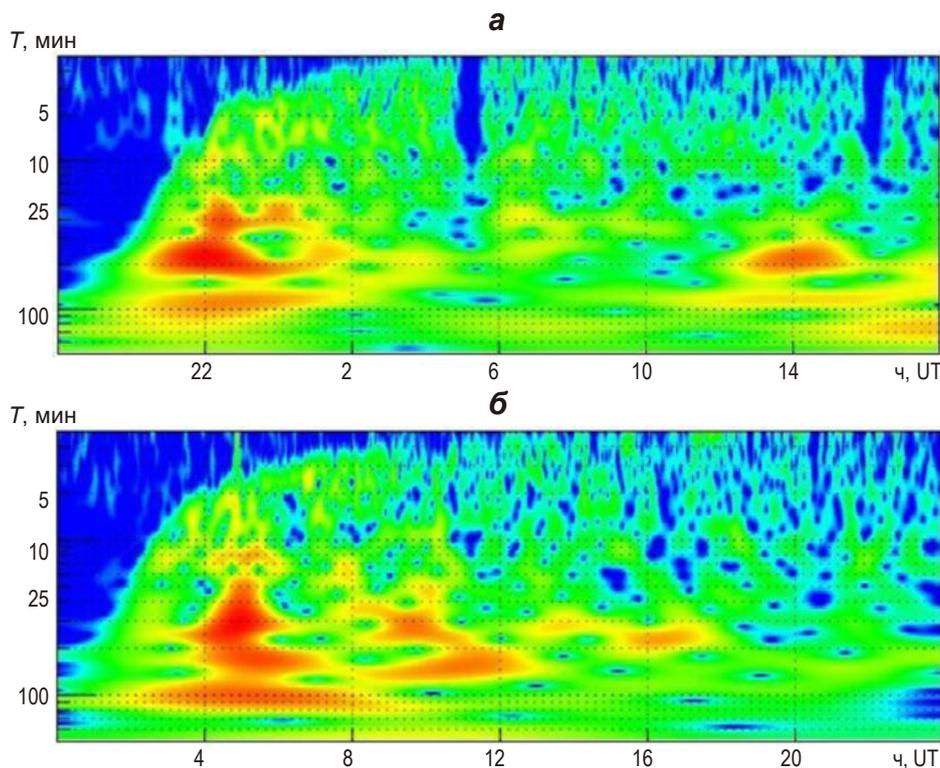


Рис. 6. СВАН-диаграммы записи колебаний уровня моря, зафиксированных приемниками *DART* на буях 51407 (а) и 21416 (б). Пояснения см. в тексте

На записях *DART* станции на буе 51407 (см. рис. 6, б) могут быть уверенно прослежены две волны, первая из которых (главная, время прихода 21:00 UT 27.02.2010 г.) имеет основные частотные максимумы с периодами 45–50 мин и ~100 мин, более сла-

бый максимум на периодах 20–25 мин и незначительные колебания в высокочастотной области (периоды менее 10 мин). Периоды второй (отраженной) волны (около 13:00 UT 28.02.2010 г.) лежат в диапазоне 30–60 мин. Колебания уровня моря, зарегистрированные на бую 21416, начинаются около 03:00 UT и продолжаются почти до конца дня. При этом усиление колебаний с основным периодом в диапазоне 20–40 мин наблюдается в интервале от 09:00 до 11:00 UT.

На рис. 7 показаны вейвлет-спектры фильтрованного сигнала амплитуды и фазы *NPM* сигнала, записанного в Петропавловске-Камчатском во время местной ночи 28.02.2010 г. Можно видеть, что максимум спектральной амплитуды находится в диапазоне периодов 0.3–2.5 мГц или 7–55 мин. Это близко к периодам, зарегистрированным на *DART* буюх, расположенных в начале и конце трассы распространения ОНЧ сигнала, а также соответствует периодам внутренних гравитационных волн.

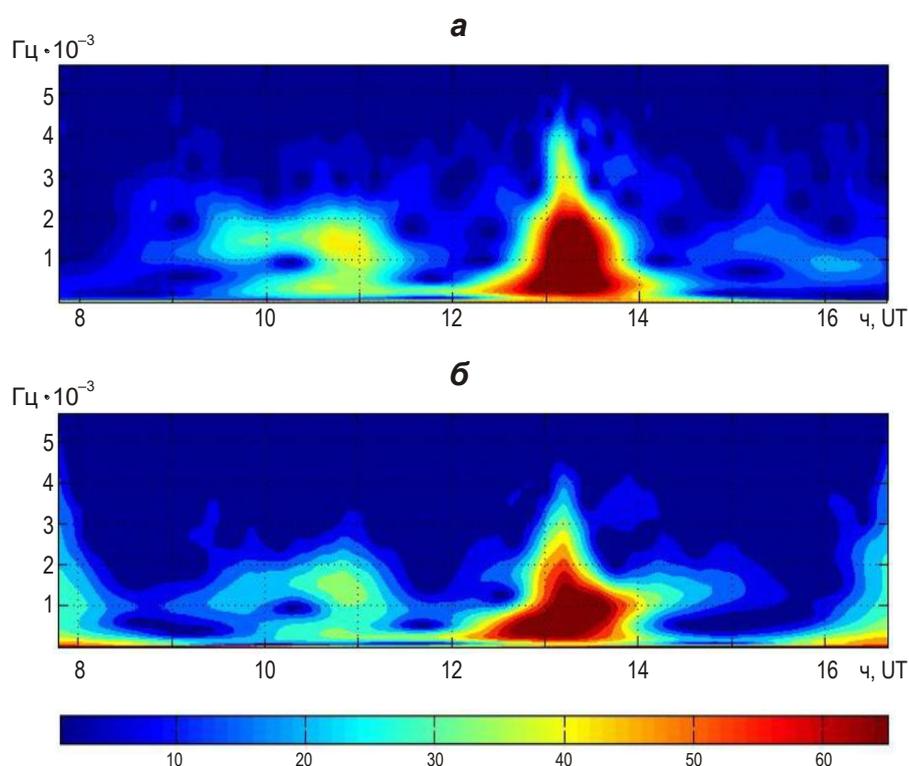


Рис. 7. Вейвлет спектры амплитуды (*а*) и фазы (*б*) *NPM* сигнала, записанного 28.2.2010 г. в Петропавловске-Камчатском во время местной ночи. Выполнена частотная фильтрация в полосе 0.3–15 мГц. Комментарии см. в тексте

Следует отметить, что взаимодействие гравитационных волн с нижней ионосферой начинается примерно в 9–11 UT, совпадая с усилением колебаний, зарегистрированных приемником *DART* на бую 21416. Затем следует приблизительно часовой интервал без возмущений (11:00–12:00 UT), после которого, начиная с 13:00 UT, наблюдаются максимальные возмущения – в это время вторая волна цунами достигает Гавайских островов.

Выводы

Результаты, представленные в работе, показали, что возмущения в нижней ионосфере, обусловленные атмосферными внутренними гравитационными волнами, возбуждаемыми цунами, могут быть обнаружены с помощью субионосферных ОНЧ сиг-

налов. Было найдено соответствие между частотными характеристиками возмущенных ОНЧ сигналов, зарегистрированных во время распространения цунами, и частотными максимумами спектров *in situ* измерений колебаний уровня моря.

Подробная количественная интерпретация наблюдаемых эффектов в терминах взаимодействия внутренних гравитационных волн с нижней ионосферой была сделана ранее в работах [Rozhnoi *et al.*, 2012; Шалимов, 2013], где показано, что атмосферные гравитационные волны, генерируемые цунами, по условию излучения опережают их. Отмеченное может быть использовано в системе раннего оповещения о приближении цунами.

Таким образом, ионосферный мониторинг разными методами, включая *GPS* наблюдения, загоризонтные радары, регистрацию свечений в ионосфере, распространение ОНЧ сигналов и др., могут быть полезным инструментом при мониторинге распространения и предупреждения цунами.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 14-05-00099, 13-05-92602_КО).

Авторы благодарны профессору М. Хайакава из Университета электрокоммуникаций г. Чофу (Япония) и сотруднику Национального геофизического центра данных при NOAA в г. Боулдере (США) С. Мунгова за предоставление *GPS* и *DART* данных о колебаниях уровня моря высокого разрешения.

Литература

- Шалимов С.Л. Ионосфера над цунами // НТР. 2013. Т. 92, № 4. С.3–18.
- Artru J., Ducic V., Kanamori H., Lognonne P., Murakami M. Ionospheric detection of gravity waves induced by tsunamis // *Geophys. J. Int.* 2005. V. 160. P.840–848. doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02552.x.
- Barr R., Jones D.L., Rodger C.J. ELF and VLF radio waves // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2000. V. 62. P.1689–1718.
- Coisson P., Occhipinti G., Lognonné P., Rolland L. M. Tsunami signature in the ionosphere: the innovative role of OTH radar // *Radio Sci.* 2011. V. 46. RS0D20. doi: 10.1029/2010RS004603.
- Galvan D.A., Komjathy A., Hickey M.P., Mannucci A.J. The 2009 Samoa and 2010 Chile tsunamis as observed in the ionosphere using GPS total electron content // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. A06318. doi: 10.1029/2010JA016204.
- Hickey M.P., Schubert G., Walterscheid R.L. Atmospheric airglow fluctuations due to a tsunami-driven gravity wave disturbance // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. A06308. doi: 10.1029/2009JA014977.
- Hines C.O. Gravity waves in the atmosphere // *Nature.* 1972. V. 239. P.73–78.
- Komjathy A., Galvan D.A., Stephens P., Butala M.D., Akopian V., Wilson B., Verkhoglyadova O., Mannucci A.J., Hickey M. Detecting ionospheric TEC perturbations caused by natural hazards using a global network of GPS receivers: The Tohoku case study // *Earth Planets Space.* 2012. V. 64, N 12. P.1287–1294. doi: 10.5047/eps.2012.08.003.
- Makela J., Lognonne P., Hébert H., Gehrels T., Rolland L., Allgeyer S., Kherani A., Occhipinti G., Astafyeva E., Coisson P., Loevenbruck A., Clévéde E., Kelley M.C., Lamouroux J. Imaging and modeling the ionospheric airglow response over Hawaii to the tsunami generated by the Tohoku earthquake of 11 March 2011 // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L00G02. doi: 10.1029/2011GL047860.
- Najita K., Weaver P., Yuen P. A tsunami warning system using an ionospheric technique // *Proc. IEEE.* 1974. V. 62, N 5. P.563–577.

- Occhipinti G., Lognonné P., Kherani E.A., Hébert H.* Three dimensional waveform modeling of ionospheric signature induced by the 2004 Sumatra tsunami // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. L20104. doi: 10.1029/2006GL026865.
- Occhipinti G., Kherani A., Lognonné P.* Geomagnetic dependence of ionospheric disturbances induced by tsunamigenic internal gravity waves // *Geophys. J. Int.* 2008. V. 173, N 3. P.753–765. doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03760.x.
- Occhipinti G., Coïsson P., Makela J.J., Allgeyer S., Kherani A., Hébert H., Lognonne P.* Three-dimensional numerical modeling of tsunami-related internal gravity waves in the Hawaiian atmosphere // *Earth Planet. Sci.* 2011. V. 63. P.847–851. doi: 10.5047/eps.2011.06.051.
- Peltier W.R., Hines C.O.* On the possible detection of tsunamis by a monitoring of the ionosphere // *J. Geophys. Res.* 1976. V. 81. P.1995–2000. doi: 10.1029/OJGREA000081000C12001995000001.
- Rolland L.M., Occhipinti G., Lognonné P., Loevenbruck A.* Ionospheric gravity waves detected offshore Hawaii after tsunamis // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. L17101. doi: 10.1029/2010GL044479.
- Rozhnoi A., Shalimov S., Solovieva M., Levin B.W., Hayakawa M., Walker S.N.* Tsunami-induced phase and amplitude perturbations of subionospheric VLF signals // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2012. V. 117. A09313. doi: 10.1029/2012JA017761.
- Rozhnoi A., Shalimov S., Solovieva M., Levin B., Shevchenko G., Hayakawa M., Hobara Y., Walker S.N., Fedun V.* Detection of tsunami-driven phase and amplitude perturbations of subionospheric VLF signals following the 2010 Chile earthquake // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2014. V. 119. P.5012–5019. doi: 10.1002/2014JA019766.
- Shevchenko G., Ivelskaya T., Loskutov A., Shishkin A.* The 2009 Samoan and 2010 Chilean Tsunamis Recorded on the Pacific Coast of Russia // *Pure Appl. Geophys.* 2012. V. 170, N 9/10. P.1511–1527. doi: 10.1007/s00024-012-0562-9.

Сведения об авторах

СОЛОВЬЕВА Мария Сергеевна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли РАН, им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-93-95. E-mail: rozhnoi@ Rambler.ru

РОЖНОЙ Александр Александрович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли РАН, им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-93-95. E-mail: rozhnoi@ifz.ru

ШАЛИМОВ Сергей Львович – доктор физико-математических наук, зав. лабораторией, Институт физики Земли РАН, им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-91-50. E-mail: pmsk7@mail.ru

ЛЕВИН Борис Вульфович – член-корреспондент РАН, Директор, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН. 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 1Б. Тел.: +7(424) 279-15-17. E-mail: nauka@imgg.ru

ШЕВЧЕНКО Георгий Владимирович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН. 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 1Б. Тел.: +7(424) 279-15-17. E-mail: shevchenko@imgg.ru

ГУРЬЯНОВ Вячеслав Борисович – научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН. 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 1Б. Тел.: +7(424) 279-15-17. E-mail: volcano@imgg.ru

THE LOWER IONOSPHERE ELECTROMAGNETIC RESPONSE TO TSUNAMI PROPAGATION

M.S. Solovieva¹, A.A. Rozhnoi¹, S.L. Shalimov^{1,2}, B.W. Levin³,
G.V. Shevchenko³, V.B. Gurianov³

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³ *Institute of Marine Geology and Geophysics, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

Abstract. The observations of the very low frequency (VLF) electromagnetic signals at stations in Russia (Petropavlovsk-Kamchatsky and Yuzhno-Sakhalinsk) and Japan (Moshiri) have been used to analyze the response of the lower ionosphere to the tsunamis triggered by the Kuril, 2006, Japan, 2011 and Chile, 2010, earthquakes. A significant decrease in the amplitude (about 10–15 dB) together with phase variations of up to 40 degrees relative to the normal signal level have been found after the earthquakes during the tsunami wave propagation along the path transmitter–receiver. The analysis of the VLF signal was carried out for nighttime observations when the ionosphere is more sensitive to external factors than the sunlit ionosphere. The results of analysis of the VLF observations were compared to the sea-level measurements from Japanese network of GPS buoys situated along Japan coastline for the Japan tsunami and with data from the Deep-ocean Assessments and Reporting of Tsunamis (DART) stations situated in the Pacific Ocean near Hawaiian Islands and offshore Kamchatka for the Chilean tsunami. The analysis of spectral characteristics of VLF variations has shown good coincidence of the frequency maxima with in-situ data of sea-level oscillations (8–50 min). The results of the work confirm that the detected lower ionosphere perturbations are likely generated by the tsunami-driven internal gravity waves.

Keywords: tsunami, sub-ionospheric electromagnetic signals, the lower ionosphere, internal gravity waves.

References

- Artru J., Ducic V., Kanamori H., Lognonne P., and Murakami M. Ionospheric detection of gravity waves induced by tsunamis, *Geophys. J. Int.*, 2005, vol.160, pp. 840–848, doi:10.1111/j.1365-246X.2005.02552.x.
- Barr R., Jones D. Llanwyn, and Rodger C. J. ELF and VLF radio waves, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2000, vol.62, pp. 1689–1718.
- Coïsson P., Occhipinti G., Lognonné P., and Rolland L. M. Tsunami signature in the ionosphere: the innovative role of OTH radar, *Radio Sci.*, 2011, vol. 46. RS0D20, doi:10.1029/2010RS004603.
- Galvan D.A., Komjathy A., Hickey M. P., and Mannucci A. J. The 2009 Samoa and 2010 Chile tsunamis as observed in the ionosphere using GPS total electron content, *J. Geophys. Res.*, 2011, vol. 116. A06318, doi:10.1029/2010JA016204.
- Hickey M. P., Schubert G., Walterscheid R. L. Atmospheric airglow fluctuations due to a tsunami-driven gravity wave disturbance, *J. Geophys. Res.*, 2010, vol. 115. A06308, doi:10.1029/2009JA014977.
- Hines C. O. Gravity waves in the atmosphere, *Nature*, 1972, vol. 239, pp. 73–78.
- Komjathy A., Galvan D. A., Stephens P., Butala M. D., Akopian V., and Wilson B., Verkhoglyadova O., Mannucci A. J., Hickey M. Detecting ionospheric TEC perturbations caused by natural hazards using a global network of GPS receivers: The Tohoku case study, *Earth Planets Space*, 2012, vol. 64, N 12, pp. 1287–1294, doi:10.5047/eps.2012.08.003.
- Makela J., Lognonne P., Hébert H., Gehrels T., Rolland L., Allgeyer S., Kherani A., Occhipinti G., Astafyeva E., Coïsson P., Loevenbruck A., Clévéde E., Kelley M. C., and Lamouroux J. Imaging and modeling the ionospheric airglow response over Hawaii to the tsunami generated by the Tohoku earthquake of 11 March 2011, *Gephys. Res. Lett.*, 2011, vol. 38. L00G02, doi:10.1029/2011GL047860.
- Najita K., Weaver P., and Yuen P. A tsunami warning system using an ionospheric technique, *Proc. IEEE*, 1974, vol. 62, no. 5, pp. 563–577.

- Occhipinti G., Coisson P., Makela J. J., Allgeyer S., Kherani A., Hébert H., and Lognonne P. Three-dimensional numerical modeling of tsunami-related internal gravity waves in the Hawaiian atmosphere, *Earth Planet. Sci.*, 2011, vol. 63, pp. 847–851, doi:10.5047/eps.2011.06.051.
- Occhipinti G., Kherani A., and Lognonné P. Geomagnetic dependence of ionospheric disturbances induced by tsunamigenic internal gravity waves, *Geophys. J. Int.*, 2008, vol. 173, N 3, pp. 753–765, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03760.x.
- Occhipinti G., Lognonné P., Kherani E. A., and Hébert H. Three dimensional waveform modeling of ionospheric signature induced by the 2004 Sumatra tsunami, *Geophys. Res. Lett.*, 2006, vol. 33. L20104, doi:10.1029/2006GL026865.
- Peltier W. R. and Hines C. O. On the possible detection of tsunamis by a monitoring of the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 1976, vol. 81, pp. 1995–2000, doi:10.1029/OJGREAO00081000C12001995000001.
- Rolland L. M., Occhipinti G., Lognonné P., and Loevenbruck A. Ionospheric gravity waves detected offshore Hawaii after tsunamis, *Geophys. Res. Lett.*, 2010, vol. 37. L17101, doi:10.1029/2010GL044479.
- Rozhnoi A., Shalimov S., Solovieva M., Levin B. W., Hayakawa M., and Walker S. N. Tsunami-induced phase and amplitude perturbations of subionospheric VLF signals, *J. Geophys. Res.*, Space Physics 2012, vol. 117. A09313, doi:10.1029/2012JA017761.
- Rozhnoi A., Shalimov S., Solovieva M., Levin B., Shevchenko G., Hayakawa M., Hobara Y., Walker S. N., and Fedun V. Detection of tsunami-driven phase and amplitude perturbations of subionospheric VLF signals following the 2010 Chile earthquake, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2014, vol. 119, 5012–5019, doi:10.1002/2014JA019766.
- Shalimov S.L., Ionosphere above tsunamis, *Nauchno-tehnicheskaya revolutsia* (Scientific-Technical Revolution), 2013, vol.92, no. 4, pp. 3–18.
- Shevchenko Georgy, Ivelskaya Tatiana, Loskutov Artem, and Shishkin Alexander. The 2009 Samoan and 2010 Chilean Tsunamis Recorded on the Pacific Coast of Russia, *Pure Appl. Geophys.*, 2012, vol. 170, N 9–10, pp. 1511–1527, doi 10.1007/s00024-012-0562-9.