

УДК 550.344.42, 551.510.535, 537.87

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ НА НИЖНЮЮ ИОНОСФЕРУ

Рожной А.А.<sup>1</sup>, Соловьева М.С.<sup>1</sup>, Шалимов С.Л.<sup>1</sup>, Левин Б.В.<sup>2</sup>, Шевченко Г.В.<sup>2</sup>, Лоскутов А.В.<sup>2</sup>,  
Чебров Д.В.<sup>3</sup>, Копылова Г.Н.<sup>3</sup>, Коркина Г.М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт Физики Земли РАН, г. Москва, rozhnoi@ifz.ru

<sup>2</sup>Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск

<sup>3</sup>Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский

### Введение

После Великого землетрясения вблизи о-ва Суматры в декабре 2004 года и последующего разрушительным цунами, усилился интерес к альтернативным методам удаленного океанического мониторинга для повышения надежности обнаружения цунами и его оценки. Одним из таких методов является ионосферный мониторинг на основе электромагнитных волн. Теоретические исследования, выполненные в 70-е годы прошлого века [2, 4] показали, что цунами генерирует внутренние гравитационные волны (ВГВ), которые распространяются вверх в атмосферу, где их амплитуда усиливается вследствие уменьшения плотности воздуха с высотой. Когда эти волны достигают ионосферных высот, они диссипируют и, таким образом, вызывают возмущения плотности плазмы, которые могут быть зарегистрированы электромагнитными волнами как посредством спутников GPS, так и методом очень низкочастотного (ОНЧ) просвечивания ионосферы. Волны от передатчиков, работающих на частотах 10-50 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 около 70 км, а ночью ~ 90 км. Характер распространения ОНЧ/НЧ сигналов зависит главным образом от высоты отражения, которая определяется величиной и градиентом электронной плотности около границы атмосфера-ионосфера [3]. Модификация ионосферной плотности приводит к изменениям в амплитуде и фазе регистрируемых сигналов. Такие сигналы распространяются на расстояния в тысячи и десятки тысяч километров практически без потерь, что дает возможность контролировать состояние верхней атмосферы и нижней ионосферы в пределах больших регионов. При этом, хотя приемники и передатчики расположены на суше, возможно, например, отслеживать изменения в электронной плотности нижней ионосферы над огромной территорией Тихого океана.

В данной работе дается краткий обзор результатов наблюдений эффектов в нижней ионосфере, вызванных Индонезийским катастрофическим цунами 2004г., Курильским цунами 2006 г., Японским цунами 2011 г. и Чилийским цунами 2010 г. методом ОНЧ зондирования.

### Исходные данные и методика наблюдений

Работа основана на регистрации ОНЧ/НЧ сигналов (~20-40 кГц) на станциях, расположенных в Петропавловске-Камчатском, Южно-Сахалинске и Мошири (Япония). Приемники измеряют одновременно амплитуду и фазу сигналов от нескольких передатчиков: JJY (40 кГц) и JJI (22.2 кГц) в Японии, NWC (19.8 кГц) в Австралии и NPM (21.4 кГц) на Гавайских островах с шагом дискретизации 20 сек. Данные ОНЧ измерений сравнивались с данными, полученными на глубоководных станциях (DART), установленных Национальным океаническим и атмосферным агентством США, а также на GPS станциях, установленных Японской информационной сетью об океанических волнах для портов и заливов (NOWPHAS). Сигнал анализировался в ночное время, когда ионосфера более чувствительна к внешним воздействиям.

### Результаты наблюдений

#### Индонезийское катастрофическое цунами 2004 года

Подводное землетрясение произошло 26 декабря 2004 г. в 00:58:53 UT к северо-западу от Индонезийского острова Суматры на глубине 30 км. Магнитуда землетрясения составила 9.0 (NEIC/USGS). Землетрясение вызвало цунами, которое было признано самым смертоносным стихийным бедствием в современной истории. Для анализа этого цунами были использованы данные суб-ионосферных сигналов, принимаемых на станции в Петропавловске-Камчатском (рис. 1).

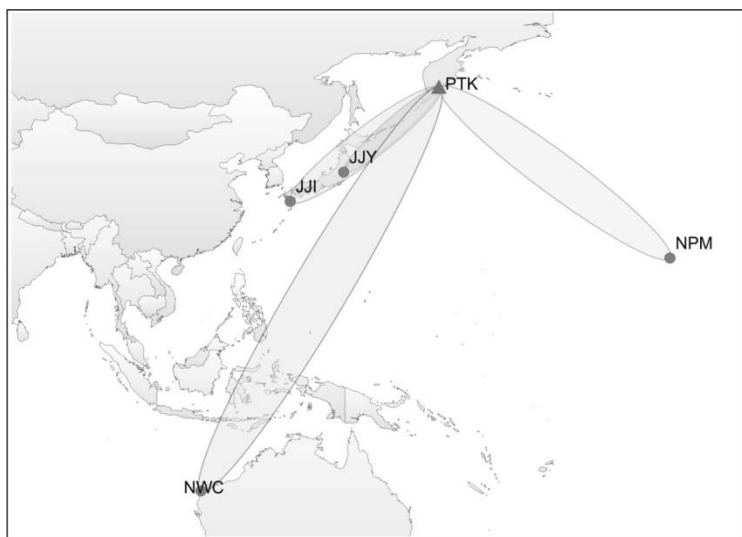


Рис. 1. Положение приемника в Петропавловске-Камчатском (РТК) и передатчиков (черные кружки): NWC (19,8 кГц) в Австралии, NPM (21,4 кГц) на Гавайских островах, JJY (40 кГц) и JJI (22,2 кГц) в Японии. Закрашенные эллипсы показывают зоны чувствительности трасс.

Цунами было записано различными прибрежными мареографами, но система DART буев еще не была создана. Поэтому, как базовая линия, при анализе это цунами была использована работа [7] где было показано, что основная энергия цунами была направлена на юг и запад от Суматры. В Тихий океан, где расположена наша система ОНЧ наблюдений, волны цунами попали, обогнув Австралию и пройдя через Индонезию. Распространение волн в некоторой степени совпало с распространением ОНЧ сигнала вдоль трассы NWC-РТК (рис.1). Цунами также пересекло под большим углом всю трассу NPM-РТК и JJI-РТК.

Данные о цунами в дальней зоне показали, что, в отличие от проявления вблизи источника, максимальная амплитуда волн не была

связана с лидирующей волной [7]. В Тихом океане максимальные высоты волн наблюдались с задержкой от нескольких часов до суток после вступления фронта цунами.

Результаты анализа амплитуды сигналов от NWC передатчика показаны на рис. 2. Следует отметить, что в период анализа (26-28 декабря) магнитное поле было спокойным ( $Dst$  близко к 0), не наблюдалось экстремальных погодных условий и сейсмической активности.

Землетрясение произошло 26 декабря утром по местному времени и вызвало волну цунами, которая через 5 часов достигла Австралии, т.е. зоны чувствительности трассы NWC-РТК. В это время почти вся трасса находилась в дневном секторе. Возмущение в амплитуде NWC сигнала наблюдаются после 12 UT с началом местной ночи. Отрицательная аномалия достигает значений 6-7 дБ. Примерно через сутки после землетрясения, в 2 UT 27 декабря цунами достигает Японии и Гавайских островов, а еще через 4 часа лидирующая волна приходит в Северо-Курильск и на Камчатку [7]. В это время трасса находилась полностью в дневном секторе. Наиболее заметные возмущения (около 6 дБ) совпадают с приходом второй, максимальной волны цунами в Северо-Курильск. Самая сильная и длительная отрицательная аномалия амплитуды NWC сигнала (до 10 дБ) была зарегистрирована в течение всей ночи 28 декабря, когда наблюдались наиболее значительный колебания уровня моря в Северо-Курильске.

На трассе NPM – РТК значительные ночные отрицательные аномалии амплитуды сигнала (7-8 дБ) наблюдались 27 и 28 декабря во время местной ночи. Записи амплитуды по трассе JJI – РТК 27 и 28 декабря весьма похожи на поведение амплитуды NWC сигнала.

Анализ JJY сигнала не выявил заметных аномалий. Хотя сигнал был довольно возмущенный как по амплитуде, так и по фазе, но уровень возмущений не превышал  $\pm 2$ . Скорее всего, это вызвано большой разницей в частотах анализируемых сигналов (JJY сигнал по частоте почти в два раза превышает остальные сигналы), и, следовательно, различной высотой отражения. Таким образом, можно отметить, что наиболее отчетливо ночные отрицательные аномалии в амплитуде сигнала наблюдались на трассе NPM-РТК 27 и 28 декабря и на трассах NWC-РТК и JJI-РТК 28 декабря. Аномалии 28 декабря хорошо согласуются с данными записей мареографов вблизи Камчатки. По результатам анализа можно предположить, что эффекты в ионосфере в дальней зоне, вызванные цунами, были связаны не с лидирующей, относительно небольшой волной, а с более поздней максимальной волной цунами.

#### Курильское цунами 15 ноября 2006 г.

Сильное землетрясение произошло 15 ноября 2006 г. вблизи о. Симушир (Курильские острова) в 11:14 UT ( $M_w=8.3$ ,  $h=34$ км) (NEIC/USGS). Землетрясение породило цунами, которое было зарегистрировано мареографами Центра по предупреждению цунами. Для анализа вариаций ОНЧ сигнала после землетрясения была выбрана трасса NPM – РТК, поскольку направление этой трассы

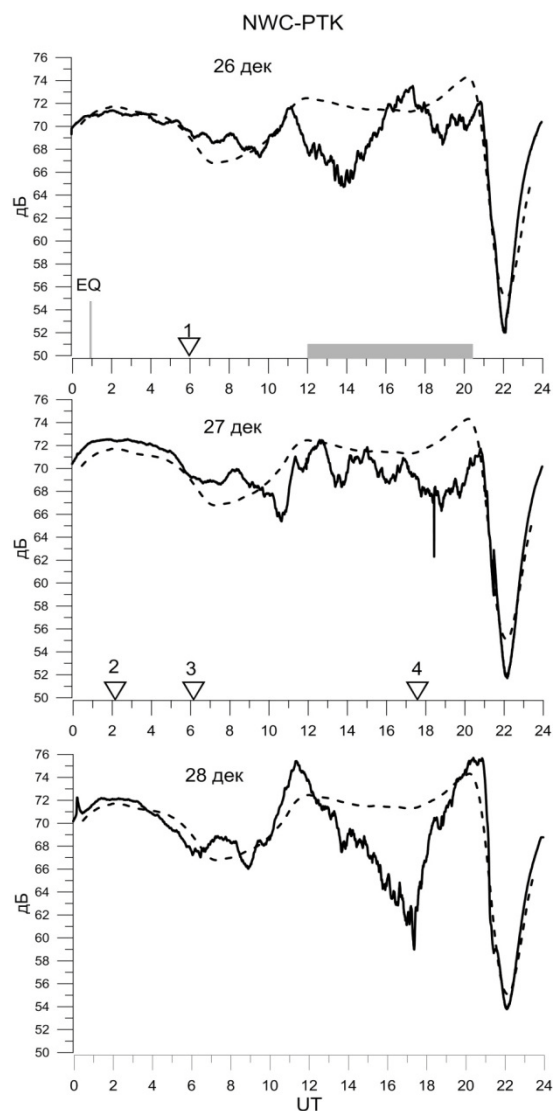


Рис. 2. Записи амплитуды NWC (19.8 кГц) сигнала в Петропавловске-Камчатском 26-28 декабря 2004 года (сплошная линия) и среднемесячные значения сигнала (пунктирная линия). На верхнем графике символом EQ отмечен момент землетрясения, серый прямоугольник на оси X показывает ночной интервал времени для этой трассы (т.е. трасса находится полностью в ночном секторе). На рисунке треугольниками с цифрами показаны примерные времена, когда цунами достигло: 1- Австралии 2- Гавайских островов и Японии, 3- Северо-Курильска и Камчатки. 4 – время прихода второй, максимальной волны в Северо-Курильск.

станциях во время местной ночи 11 марта 2011 г. Отрицательные аномалии в амплитуде сигнала достигали 10-15 дБ, а фазовые вариации составили 40 градусов относительно их нормальных значений. Аномалии наблюдались в течение всей местной ночи (8-16 часов UT) в амплитуде сигнала, и они несколько короче для фазы. Максимум аномалии сигнала наблюдается примерно через 3 часа после землетрясения. Это больше, чем в предыдущем случае. Этот факт был рассмотрен подробно в работе [5]. Землетрясение в Тохоку произошло во время вечернего терминатора, когда происходит резкое изменение высоты границы нижней ионосферы, что приводит к сильным возмущениям в ОНЧ сигнале, и реальное начало аномалии может быть неразличимо на этом фоне.

совпало с направлением распространения цунами (станция в Южно-Сахалинске была установлена в 2009 г.). Результаты сравнивались с сигналами, распространяющимися вдоль трасс JY-PTK, и NWC-PTK (рис. 3). На рисунке показаны разностные значения амплитуды и фазы сигналов (рассчитанные как разница между текущими и среднемесячными значениями), зарегистрированные ночью 15 ноября 2006 г. в Петропавловске-Камчатском. Из рисунка видно, что амплитуды и фазы сигналов от всех передатчиков, за исключением NPM передатчика, очень близки к средним значениям сигнала, и отклонение реального сигнала, зарегистрированного 15 ноября, от среднего находится внутри дисперсионных границ. Однако значительное уменьшение величины амплитуды сигнала (около 10-15 дБ) с одновременными фазовыми вариациями (до 40 градусов) явно наблюдаются для NPM передатчика. Время от землетрясения до максимума аномалии сигнала составляет около 1 - 1,5 часов. Необходимо отметить, что резкое падение величины амплитуды и увеличение фазы за несколько часов до землетрясения вызваны выключением передатчика. Также передатчик отключился примерно через 5 часов после землетрясения.

Вейвлет-анализ амплитуды и фазы значений NPM сигнала от 15 ноября 2006 г., отфильтрованных в диапазоне 0.3-15 МГц (или от 1 до 55 мин), показал, что частотный максимум спектра сигнала находится в интервале 8-30 мин, что соответствует периодам ВГВ (т.е. волн с периодами более 6 мин).

#### Японское цунами 11 марта 2011 г.

Землетрясение с магнитудой  $M_w=9.0$  произошло 11 марта 2011 г. в 05:46 UT вблизи Тохоку (Япония) (NEIC/USGS). Это землетрясение вызвало разрушительное цунами, высота которого достигала 10-15 м (в некоторых местах до 20 м). Цунами было зарегистрировано Центром по предупреждению цунами приборами DART, установленными по всей акватории Тихого океана. Для анализа использовались данные, полученные с двух станций: Южно-Сахалинск и Мошири. Направление распространения цунами в данном случае совпало с направлением трасс NPM-YSH и NPM-MSR (рис. 4). Значительные аномалии амплитуды и фазы сигнала наблюдались на обеих

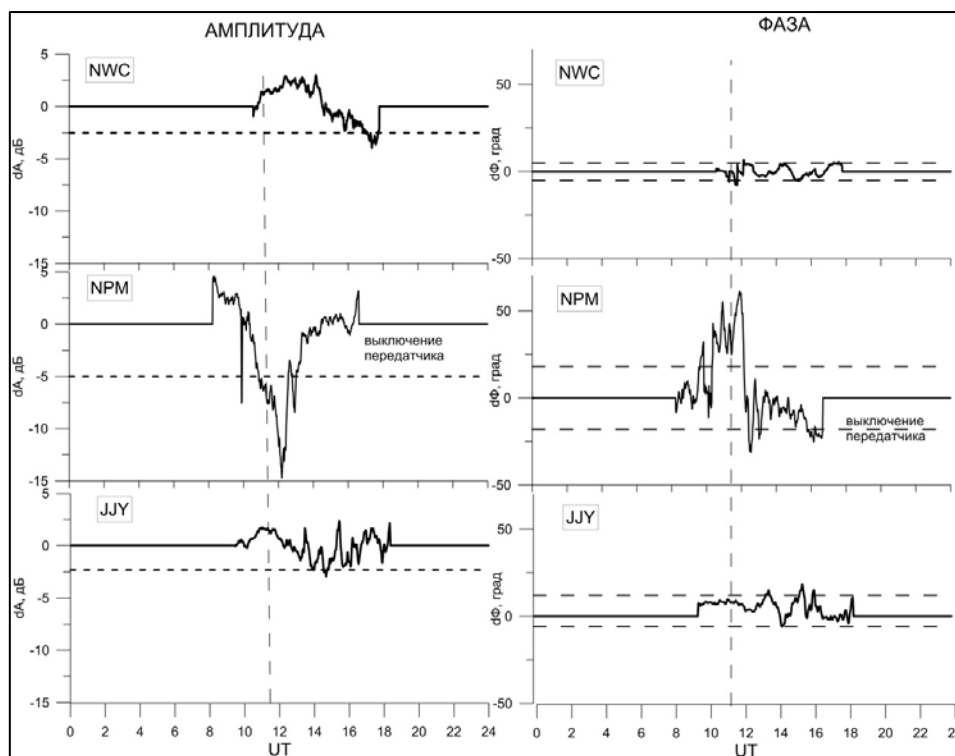


Рис. 3. Разностные амплитуды (слева) и фазы (справа) сигналов от передатчиков NWC, NPM и JJY, зарегистрированные в ночное время 15 ноября 2006 г. на станции в Петропавловске-Камчатском. Нулевая линия относится к дневному интервалу суток. Горизонтальные пунктирные линии на всех графиках показывают средние значения  $\pm 2\sigma$  для разностной фазы и средние значения минус  $2\sigma$  для разностной амплитуды. Пунктирная вертикальная линия показывает время землетрясения.

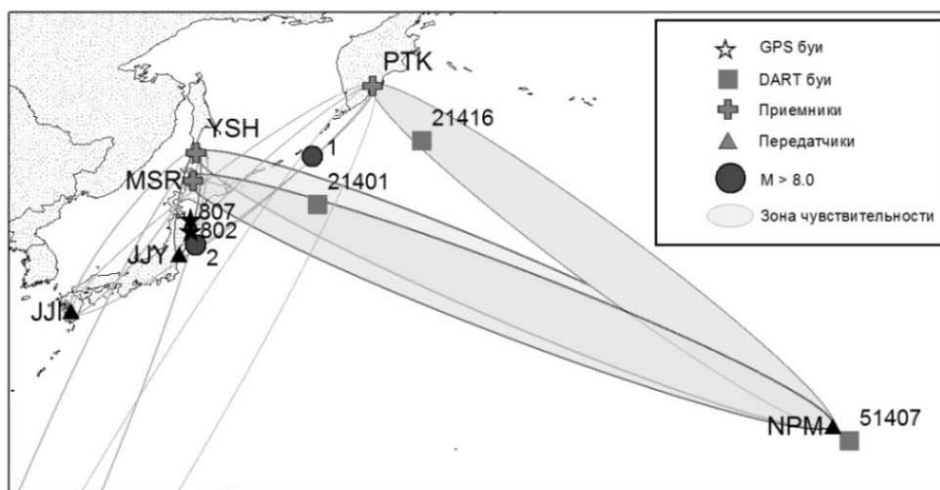


Рис. 4. Взаимное расположение приемников в Петропавловске-Камчатском (РТК), Южно-Сахалинске (YSH) и Мошири (MSR) и передатчиков JJY (40 кГц) и JJI (22.2 кГц) в Японии и NPM (21.4 кГц) на Гавайских островах. Для передатчика NWC (19.8 кГц) в Австралии показана только часть зоны чувствительности. Сплошные кружки показывают положение эпицентров землетрясений на Курильских островах 15 ноября 2006 г. (1) и в Японии 11 марта 2011 г. (2) (NEIC/USGS). Квадратами показаны DART буи и звездочками GPS буи, данные которых были использованы в работе. Эллипсы отображают зоны чувствительности различных трасс. Цветом выделены трассы от NPM передатчика, направление которых совпадало с направлением распространения цунами.

На рис. 5 показаны вейвлеты NPM сигнала (отфильтрованные в диапазоне от 1 до 55 мин), которые были зарегистрированы в Мошири 11 марта 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. Из рисунка видно, что гравитационные волны начинают взаимодействовать с нижней

ионосферой примерно через 1-1.5 часа после землетрясения во время прохода вечернего терминатора. Поэтому, это взаимодействие не столь эффективно, и максимум в ОНЧ аномалии наблюдается с задержкой около 2 часов после начала местной ночи. Из рисунка видно, что все время, пока цунами распространялось от Японии до Гавайских островов, ОНЧ сигнал оставался возмущенным. Подобный анализ, сделанный для NPM сигнала, зарегистрированного в это же время в Южно-Сахалинске, показал похожие результаты.

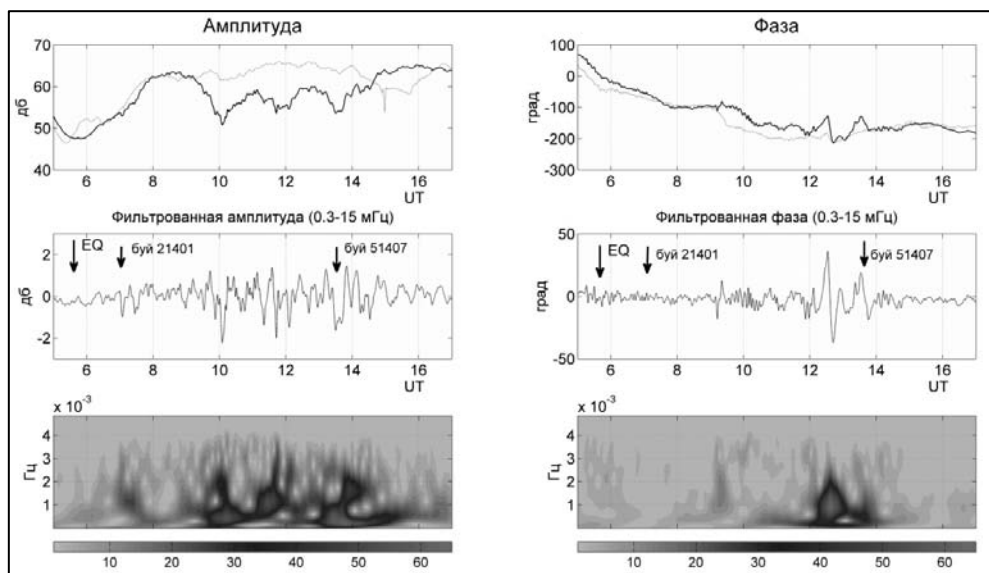


Рис. 5. На верхних графиках показаны амплитуда (слева) и фаза (справа) NPM сигнала, записанного 11 марта 2011 г. на станции Мошири. Серые линии – среднемесячные значения. Средние графики представляют отфильтрованные сигналы. Стрелками отмечены момент землетрясения (EQ) и регистрация волны цунами на DART буйах 21401 и 51407. На нижних графиках показаны вейвлет спектры фильтрованных сигналов.

Результаты анализа ОНЧ сигнала были сопоставлены со спектральными характеристиками колебаний уровня моря, зарегистрированных на GPS станциях NOWPHAS (буй 802 и 807). Максимальная энергия колебаний находилась в интервале от 25 мин до 55 мин на буйе 807 и в интервале 15-55 мин на буйе 802 с более слабыми максимумами в диапазоне 8-20 мин (буй 807) и 6-15 мин (буй 802). 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  $M_w = 8.8$  (глубина 35 км) произошло 27 февраля 2010 г. в 06:34 UT вблизи побережья Чили (NEIC/USGS). Время распространения цунами до Гавайских островов составило около 14 часов, и оно достигло побережья Камчатки и Курильских островов еще через 7 часов. В Петропавловске-Камчатском первая волна была зафиксирована в 3:48 UT, в Северо-Курильске – в 4:24 UT [6]. Для анализа вариаций ОНЧ сигнала после землетрясения была использована трасса NPM-РТК (см. рис. 4). Трасса NPM-YSH не была включена в анализ, поскольку сигнал на станции в Южно-Сахалинске был нестабильным, начиная с 23 февраля по 1 марта, после чего произошло выключение передатчика.

В отличие от предыдущих цунами, в данном случае приход первой волны в зону чувствительности трассы пришелся на дневное время, что не могло повлиять на поведение ОНЧ сигнала. Однако приход второй (отраженной) волны на следующий день во время местной ночи вызвал сильные возмущения в сигнале. Возмущения в сигнале совпали с моментом регистрации второй волны на DART буйе 51407 на Гавайских островах.

Две волны были зарегистрированы на DART 51407 с 18 UT 27 февраля до 18 UT 28 февраля и на DART 21416 с 00 UT 28 февраля 2010 г. При этом периоды второй (отраженной) волны (около 13 UT 28 февраля) находятся в диапазоне 30-60 мин с более слабыми колебаниями около 10 мин. Колебания уровня моря, зарегистрированные на DART 21416, начинаются около 3 часов UT и продолжаются почти до конца дня. Усиление колебаний с основным периодом в диапазоне 20-40 мин наблюдается в интервале времени 9-11 UT.

На рис. 6 показаны вейвлет спектры фильтрованного сигнала (в том же формате, как на рис. 5). Как видно из рисунка, максимум спектральной амплитуды находится в диапазоне периодов 8-55 мин, что близко к периодам, зарегистрированным на DART буях, расположенных в начале и конце трассы распространения ОНЧ сигнала, а также соответствует периодам внутренних гравитационных волн. Следует отметить, что взаимодействие гравитационных волн с нижней ионосферой начинается примерно в 9-11 UT, что совпадает с усилением колебаний, зарегистрированных на DART бую 21416. Однако максимальные возмущения в сигнале наблюдаются после 13 UT, когда вторая волна цунами достигает Гавайских островов.

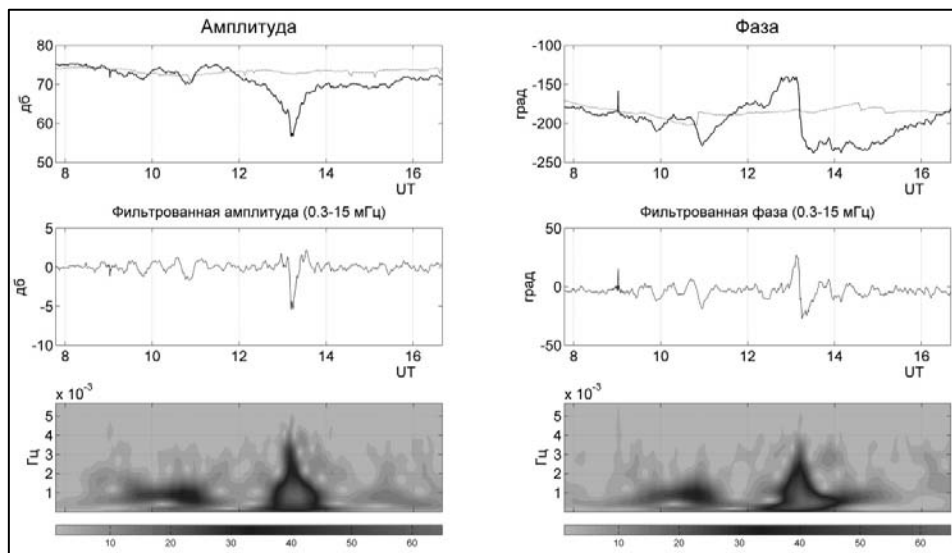


Рис. 6. То же, что на рис.5, но для сигнала, записанного 28 февраля 2010 г. в Петропавловске-Камчатском во время местной ночи.

### Заключение

Представленные результаты, показали, что возмущения в нижней ионосфере, обусловленные атмосферными внутренними гравитационными волнами, возбуждаемыми цунами, могут быть обнаружены с помощью суб-ионосферных ОНЧ сигналов. 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 в работах [1, 5]. Было показано, что атмосферные гравитационные волны, генерируемые цунами, по условию излучения опережают их, что может быть использовано в системе раннего оповещения о приближении цунами.

### Список литературы

1. Шалимов С.Л. Ионосфера над цунами // Научно-техническая революция. 2013. Т. 92. № 4. С. 3–18.
2. Hines C.O. Gravity waves in the atmosphere // Nature. 1972. V. 239. P. 73–78.
3. Barr R., Jones D. Llanwyn, Rodger C. J. ELF and VLF radio waves // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2000. V. 62. P. 1689–1718.
4. 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:10.1029/0JGREA000081000C12001995000001.
5. 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. 2012. V. 117. P. A09313. doi:10.1029/2012JA017761.
6. Shevchenko Georgy, Ivelskaya Tatiana, Loskutov Artem, Shishkin Alexander. The 2009 Samoan and 2010 Chilean Tsunamis Recorded on the Pacific Coast of Russia // Pure Appl. Geophys. 2012. V. 170. No 9-10. P. 1511–1527. doi 10.1007/s00024-012-0562-9.
7. Titov V., Rabinovich A. B., Moffeld H. O., Thomson R. E., González F.I. The Global Reach of the 26 December 2004 Sumatra Tsunami // Science. 2005. V. 309. No. 5743. P. 2045–2048.