

ИОНОСФЕРНЫЙ ОТКЛИК НА ПОДВОДНЫЕ КУРИЛЬСКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ СО СПУТНИКОВ GPS

© 2011 г. М. Б. Гохберг*, В. М. Лапшин, Г. М. Стеблов, С. Л. Шалимов

Учреждение Российской академии наук Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва

*E-mail: gmb@ifz.ru

Поступила в редакцию 18.03.2010 г.

По измерениям вариаций полного электронного содержания ионосферы на сети российских станций GPS рассмотрено воздействие на ионосферу двух подводных землетрясений, произошедших в районе Курильских о-вов 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. Благодаря удачному расположению станций, исследован отклик ионосферы на эти землетрясения как вблизи, так и вдали от эпицентров (до расстояний порядка 1000 км). Обнаружено, что кажущаяся скорость распространения возмущений в ионосфере (1–3 км/с) значительно превышает скорость распространения волн цунами, вызванных землетрясениями, что может быть использовано в целях прогноза цунами. Показано, что наряду с известной формой ионосферного отклика на землетрясения в виде N -волны наблюдается отклик в виде инвертированной N -волны как вблизи, так и вдали от эпицентра. Дана интерпретация причин появления отклика в виде инвертированной N -волны.

Ключевые слова: землетрясения, ионосферные возмущения, вариации полного электронного содержания ионосферы, GPS

ВВЕДЕНИЕ

Исследование атмосферных возмущений, обусловленных произошедшими землетрясениями, имеет достаточно долгую историю и начинается с известных работ по обнаружению отклика атмосферы на Аляскинское землетрясение 1964 г. (Davies, Baker, 1965). Источниками атмосферных возмущений в этом случае, как принято считать, служат вертикальные смещения в эпицентре, а также распространяющиеся на значительные расстояния от эпицентра поверхностные сейсмические волны Релея. Для землетрясений, произошедших в океане, источниками атмосферных возмущений, в дополнение к названным, могут стать волны цунами (Голицын, Кляцкин, 1967). Генерируемые этими источниками атмосферные акустико-гравитационные волны (АГВ) могут распространяться до высот ионосферы, где посредством столкновений нейтральных и заряженных частиц приводят в движение ионосферную плазму. Регистрируемые радиофизическими методами ионосферные возмущения в таких ситуациях свидетельствуют о переносе энергии и импульса от литосферного источника (землетрясения) на ионосферные высоты (Афраймович, Первалова, 2006; Гохберг, Шалимов, 2008).

Использование спутников GPS для исследования ионосферного отклика на сейсмические события началось сравнительно недавно и теперь представляет собой быстро развивающееся направление в науках о Земле. В последнее время

именно благодаря этим исследованиям получена определенная информация о различных типах отклика ионосферы на сейсмические события, генерирующие АГВ.

Это, во-первых, отклик ионосферы на приходящую ударную акустическую волну, регистрируемую в ионосфере вблизи эпицентра и распространяющуюся приблизительно со скоростью звука (~800–1000 м/с для высот ионосферной F -области). Отклик имеет форму волны N -типа, состоящую из фаз сжатия и разряжения, разделенную линейной зоной перехода. Параметры отклика такого типа, по наблюдениям полного электронного содержания ионосферы (total electron content, TEC) со спутников GPS, были описаны в работах (Calais, Minster, 1995, 1998; Afraimovich et al., 2001a, 2006; Heki, Ping, 2005; Heki et al., 2006).

Во-вторых, зарегистрирован ионосферный отклик, обусловленный поверхностной сейсмической волной Релея. Здесь наблюдения осуществлялись как посредством GPS (Ducic et al., 2003; Garcia et al., 2005), так и с помощью доплеровского зондирования ионосферы (Artru et al., 2004; Liu et al., 2006a). Возмущения в ионосфере при этом распространялись со скоростью около 3.3 км/с и наблюдались достаточно далеко от эпицентра.

Цунами также могут стать источником ионосферных возмущений (Liu et al., 2006b; Artru et al., 2005). Такие возмущения, согласно наблюдениям, распространяются с кажущейся скоростью около 190 м/с (близкой к скорости волны цунами).

Наконец, необходимо упомянуть еще один тип атмосферных возмущений – так называемые сейсмические воздушные волны (Bolt, 1964). Предполагают, что они обусловлены вертикальными движениями в эпицентре, после чего распространяются в атмосфере со скоростью около 300 м/с, однако их ионосферные проявления остаются дискуссионными.

Недавно с помощью плотной сети японских станций GPS (GEONET) был зарегистрирован отклик ионосферы на подводное Курильское землетрясение в октябре 1994 г. (Astafyeva et al., 2009). Было обнаружено интересное явление расщепления ионосферного отклика на две моды по мере распространения возмущения от области над эпицентром. Скорости этих мод в ионосфере соответствовали распространению волн Релея (около 3 км/с) и акустической волны (около 1 км/с), пришедшей из эпицентра на ионосферные высоты.

В настоящей работе рассмотрены подводные Курильские землетрясения 2006 и 2007 гг. по данным российских GPS станций.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В отличие от континентальных землетрясений, когда энергия литосферного возмущения передается в ионосферу посредством акустических волн, генерируемых непосредственно в эпицентре, а также сейсмическими волнами Релея, воздействие на ионосферу от подводных событий может осуществляться посредством АГВ, источником которых выступает возмущенная поверхность океана. В начальный момент возмущение поверхности океана над эпицентром, по-видимому, генерирует акустическую волну (АВ), а уже релаксация этого возмущения приводит к формированию волн цунами, которые генерируют атмосферные внутренние волны, иными словами, внутренние гравитационные волны (ВГВ). В результате от подводных землетрясений можно ожидать в ионосфере отклики двух типов: обусловленные приходом АВ и ВГВ. При этом АВ достигает F -слоя приблизительно через 10 мин, тогда как для прихода ВГВ на те же высоты потребуется около одного часа. В данной работе изучен ионосферный отклик на приход АВ.

Рассмотрим воздействие на ионосферу от двух подводных землетрясений, произошедших в районе Курильских о-вов 15 ноября 2006 г. в 11:14 UT ($M = 8.3$, глубина гипоцентра $h = 28$ км, координаты эпицентра 46.5° с.ш., 153.2° в.д.) и 13 января 2007 г. в 04:23 UT ($M = 8.1$, $h = 10$ км, 46.3° с.ш., 154.5° в.д.). Далее будем называть эти события по номерам: № 1 и № 2 соответственно.

Вариации ТЕС в ионосфере от этих двух землетрясений получены по сети российских станций GPS (рис. 1), организованной совместно Ин-

ститутом физики Земли РАН, Институтом морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН, Колумбийским университетом США и Аляскинским университетом в Фэрбанксе, США.

На рис. 1 нанесены проекции на ионосферу траекторий спутников, по которым анализировались вариации ТЕС для первого землетрясения 15 ноября 2006 г. (№ 1). Из рисунка видно, что проекции траекторий различных спутников во время возмущения в ионосфере от первого землетрясения 2006 г. достаточно хорошо перекрывают всю эпицентральною область и в радиусе ~ 1000 км от эпицентра. При этом следует подчеркнуть, что удачное расположение станций GPS в эпицентральной области позволяет зондировать вариации ТЕС в ионосфере не по наклонным лучам с достаточно больших расстояний, а по лучам, близким к вертикали, что существенно улучшает качество локального зондирования.

На рис. 2а представлены вариации ТЕС от землетрясения № 1, полученные на различных расстояниях от эпицентра, а на рис. 2б – их веивлет-анализ, который наиболее четко показывает распространение локализованного ионосферного возмущения. Вертикальное расположение графиков соответствует последовательному удалению мест регистрации возмущения от эпицентра, приходящегося на центральную область рисунка. Слева нанесены названия станций GPS и номера спутников, с которых получены данные. Справа указано положение эпицентра возмущения в ионосфере, которое сдвинуто к северо-востоку от эпицентра землетрясения. Рассмотренный временной интервал соответствует 11:00–12:00 UT (стрелка – момент землетрясения), а время по оси абсцисс оцифровано в долях часа.

На рис. 3 дана двумерная картина распространения фазы ионосферного возмущения. Цифры на изолиниях означают время от момента землетрясения в минутах. Точки и цифры возле них означают место и время, где фиксировались максимальные амплитуды возмущения. Видно, что возмущение в ионосфере начинается через 8.5 мин после события, причем предполагаемая область начального возмущения смещена к северо-востоку от эпицентра землетрясения на расстояние около 300 км и находится вблизи северо-восточного окончания очага землетрясения. Рисунки 2 и 3 показывают, что можно достаточно надежно проследить распространение возмущения от области начального возмущения в ионосфере на юго-запад в форме N -волны нормальной полярности. Сделать вывод о скорости распространения и полярности возмущения, распространяющегося на север, труднее из-за малой амплитуды сигнала. Кажущаяся скорость N -волны меняется от 2 км/с вблизи от области начального возмуще-

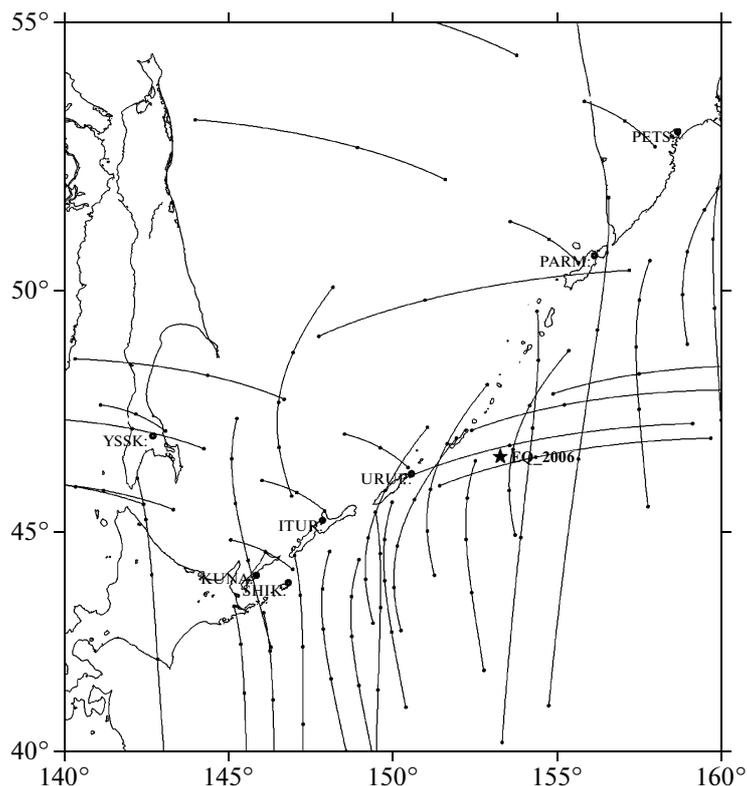


Рис. 1. Размещение станций GPS в районе Сахалино-Курило-Камчатской зоны.

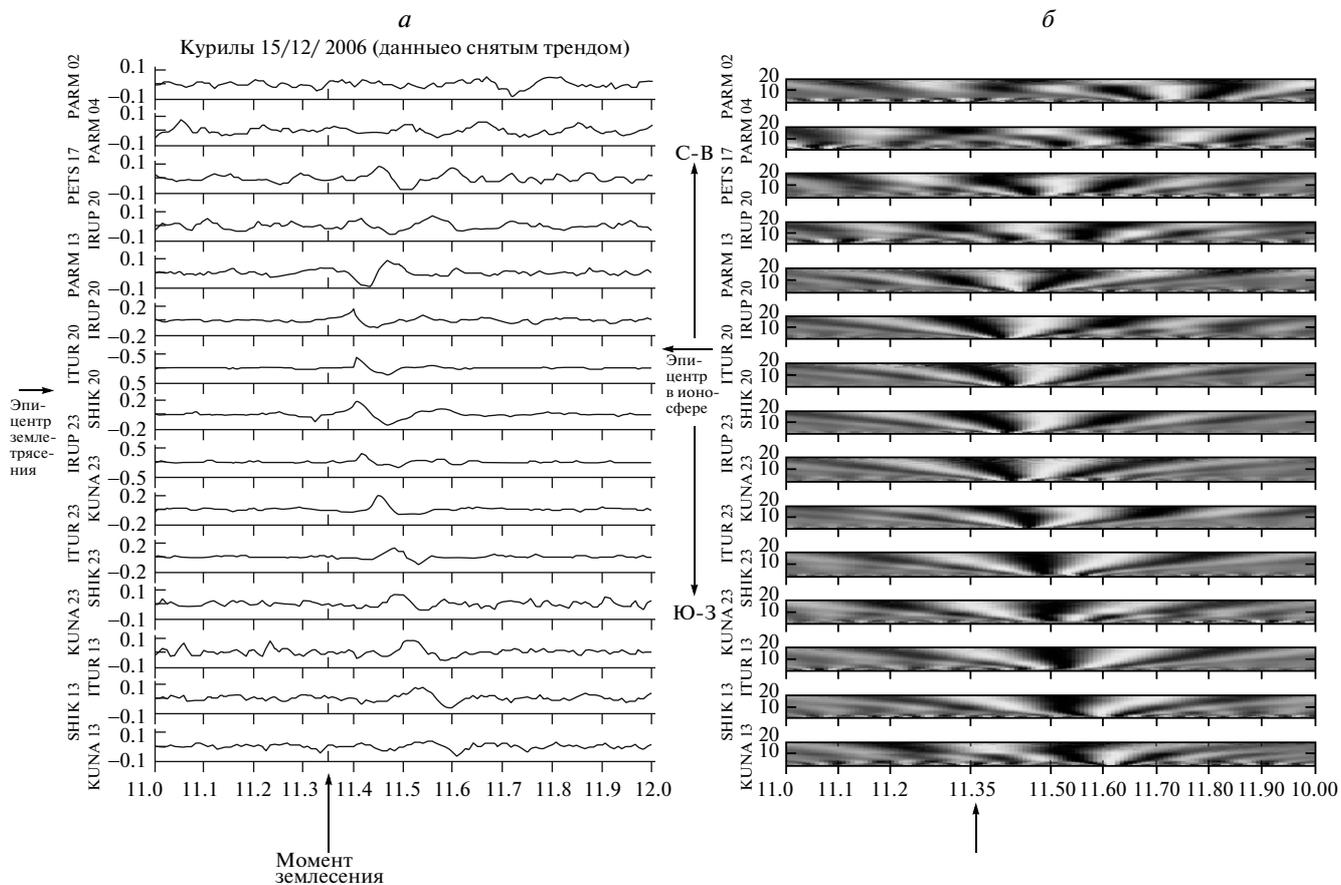


Рис. 2. *a* – Вариации ТЕС со снятым трендом для землетрясения № 1; *б* – вейвлет-анализ для вариаций ТЕС.

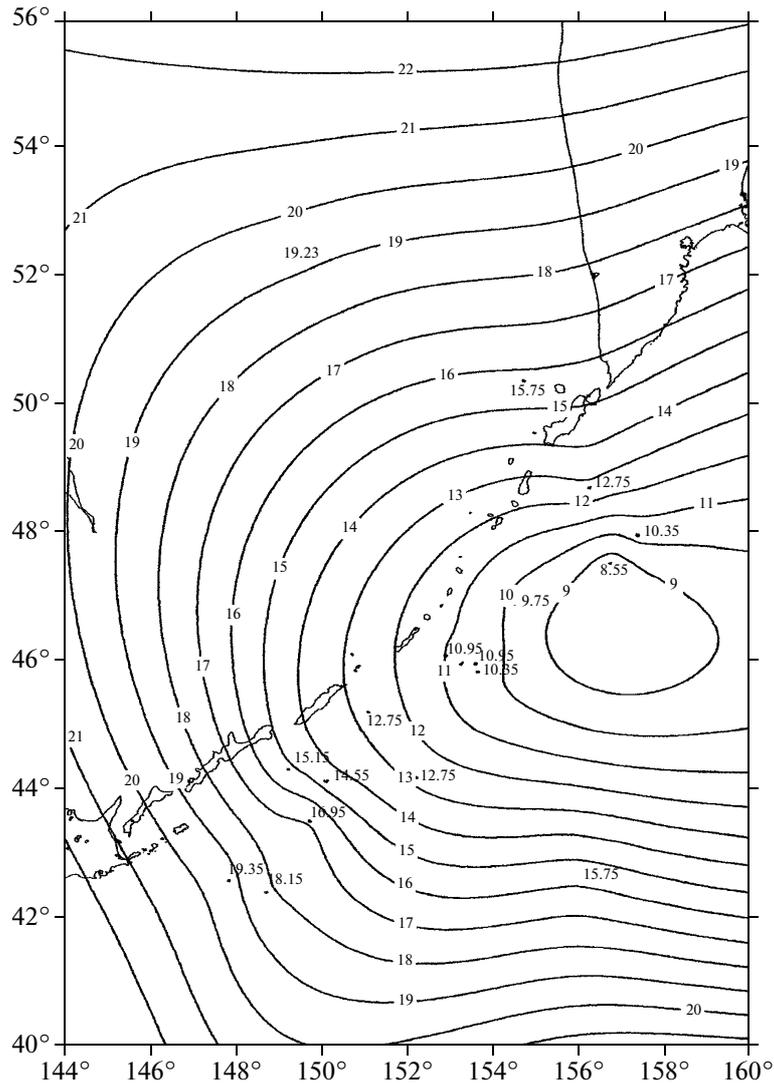


Рис. 3. Карты изолиний времен запаздывания возмущения ТЕС в ионосфере от момента землетрясения № 1.

ния до 1 км/с вдали от нее (вдоль цепочки станций в юго-западном направлении).

Изменение амплитуды возмущения (в единицах ТЕС) в направлении с северо-востока на юго-запад представлено на рис. 4. По оси абсцисс отложено расстояние в километрах. Местоположение начального возмущения в ионосфере отмечено вертикальной пунктирной линией, а распространение в обе стороны обозначено стрелками с горизонтальным пунктиром. Положение эпицентра землетрясения отмечено стрелкой на оси абсцисс. Видно, что хотя возмущение в ионосфере начинается в стороне от эпицентра землетрясения, максимальная амплитуда возмущения достигается в области над эпицентром.

Картина распространения фазы ионосферного возмущения от землетрясения № 2 показана на рис. 5. Возмущение регистрируется через 7.5 мин

после землетрясения. Видно, что скорости распространения в направлении юго-запада (около 0.7 км/с) и к северу (около 3 км/с) существенно различаются. Область начального возмущения в ионосфере, по-видимому, вытянута в направлении юго-восток–северо-запад перпендикулярно простиранию очага (со смещением на 300 км в северо-восточном направлении от эпицентра). Такой вывод о форме начального возмущения представляется естественным, поскольку кажущаяся скорость распространения возмущения в направлении юго-восток–северо-запад (более 10 км/с) трудно связать с каким-либо ионосферным возмущением (за исключением магнитогидродинамической волны, в которую, при распространении в ионосфере, может трансформироваться акустическое возмущение). Однако этот вывод не окончательный, поскольку может быть обусловлен малым числом станций GPS в этом регионе.

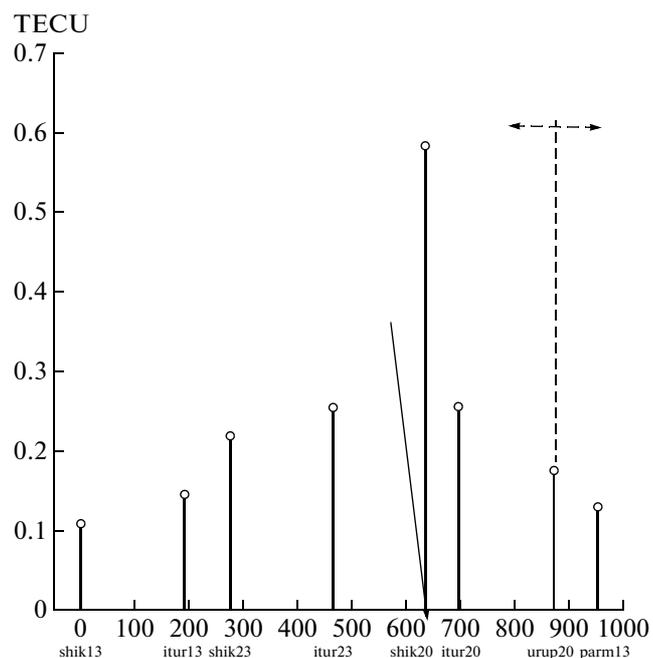


Рис. 4. Распределение максимальных амплитуд вариаций ТЕС (в единицах ТЕС) вдоль профиля, параллельного гряде Курильских о-вов в направлении СВ–ЮЗ.

На рис. 6 представлены вариации ТЕС на различных расстояниях от эпицентра. Видно, что возмущение, близкое по форме к N -волне, распространяется от области начального возмущения в ионосфере на север с инвертированной фазой, а на юго-запад – в форме нормальной N -волны. На расстоянии около 850 км от начальной

области возмущения (между проекциями трасс спутника 11, регистрируемых со станций ITUR и KUNA) фаза распространяющейся моды становится отрицательной и далее она распространяется со скоростью около 0.7 км/с.

Распределение амплитуд возмущения ТЕС для события № 2 вдоль профиля север–юго-запад представлено на рис. 7 с учетом инверсий фаз возмущения.

В отличие от первого случая максимум амплитуды связан не с эпицентром землетрясения, а приходится на эпицентр начального возмущения в ионосфере, сдвинутого на восток на расстояние ~300 км от местонахождения протяженного очага второго землетрясения. При этом инверсия фазы N -волны происходит именно в области максимума амплитуды начального возмущения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Расположение станций GPS вблизи эпицентров данных землетрясений позволило детально изучить распространение возмущения в ионосфере, как вблизи эпицентральной области, так и на больших расстояниях порядка 1000 км в различных направлениях.

Картины распространения ионосферных возмущений имеют как схожие особенности, так и резкие различия.

В обоих случаях возмущения в ТЕС хорошо выделяются из фоновых вариаций и прослеживаются до расстояний порядка 1000 км. При этом кажущиеся скорости распространения (1–3 км/с) соответствуют скоростям распространения ионо-

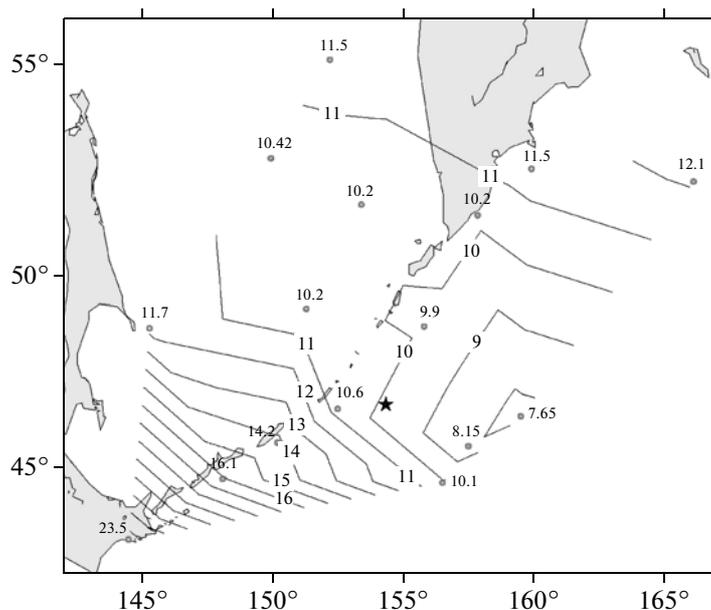


Рис. 5. Аналогичная рис. 3 картина времен запаздывания для землетрясения № 2.

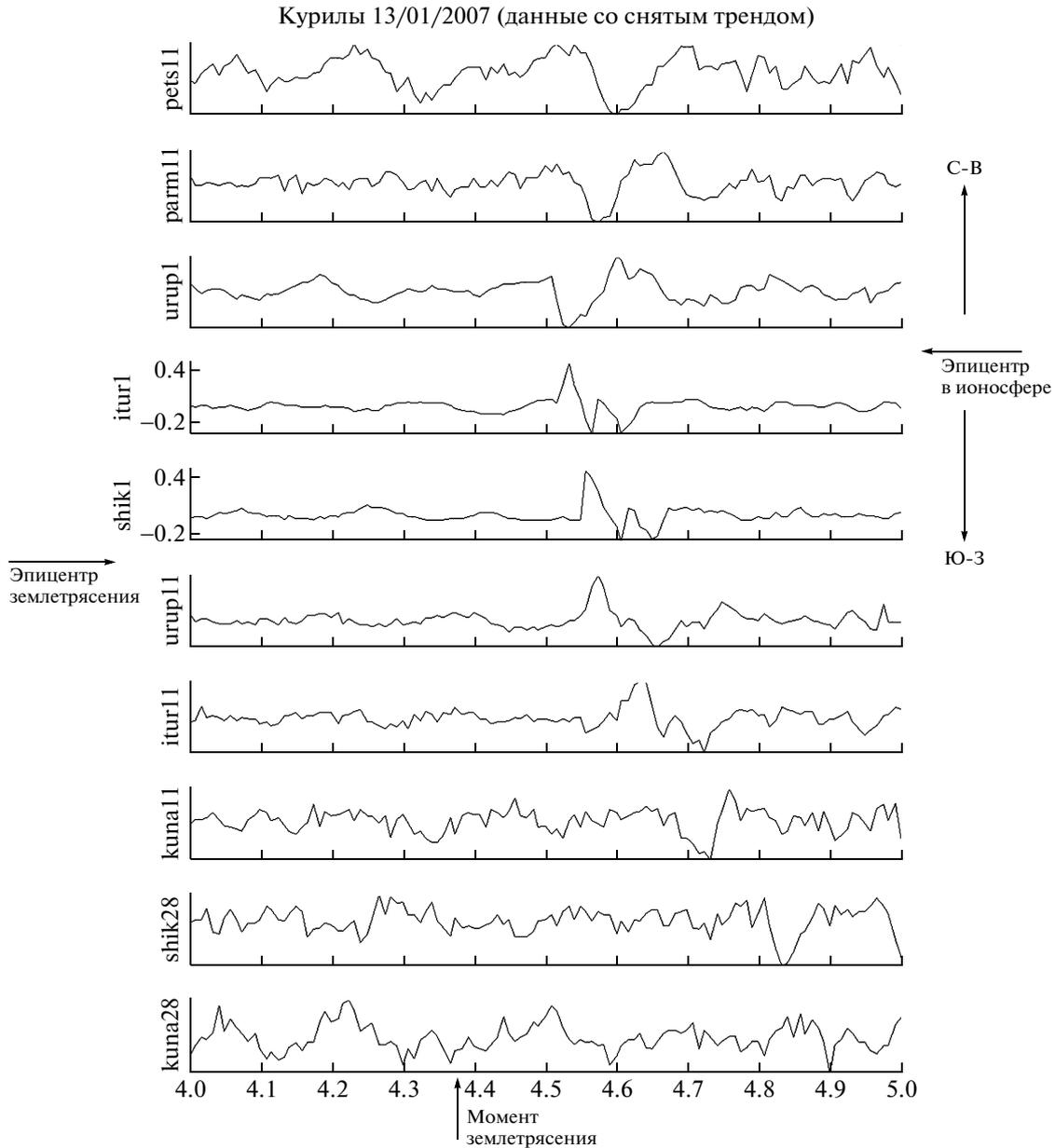


Рис. 6. Графики вариаций ТЕС для землетрясения № 2, по аналогии с рис. 2а.

сферных возмущений, регистрируемым в предыдущих исследованиях, и на порядок превышают скорости собственно волн цунами, которые составляют первые сотни метров в секунду.

Действительно, из рис. 4, 5 видно, что возмущение по ионосфере до о. Сахалин и о. Хоккайдо доходит через время порядка 20 мин после момента землетрясения. Волна цунами (при скоростях 100–200 м/с) пройдет это же расстояние только через 1.5–2.5 ч. Такая разница во времени прихода возмущений открывает новые возможности в службе раннего оповещения цунами.

Области начального возмущения в ионосфере смещены от эпицентров землетрясений к северо-востоку и востоку на расстояние порядка 300 км. Данные батиметрии не дают основания связывать эти смещения с особенностями дна океана в эпицентральных областях. Вместе с тем характер протяженных очаговых зон в обоих случаях имеет северо-восточное продолжение от эпицентров параллельно гряде Курильских о-вов.

Кроме того, решение обратной задачи по регистрируемым короткопериодным *P*-волнам (Lay et al., 2009) приводит к выводу, что для обоих событий максимум выделенной сейсмической

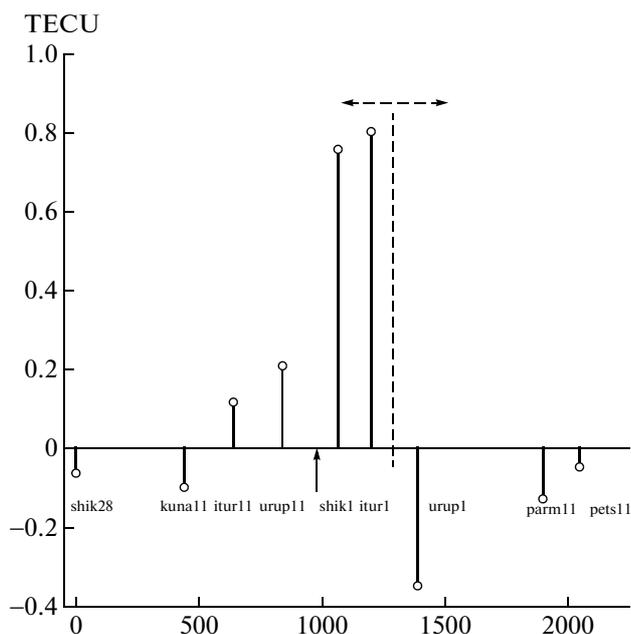


Рис. 7. Распределение максимальных амплитуд вариаций TECU для землетрясения № 2, по аналогии с рис. 4.

энергии имел место северо-восточнее эпицентра на расстояниях около 150 км от него, что согласуется с нашими результатами.

Более подробно остановимся на существенных различиях в характере ионосферных возмущений от данных землетрясений.

Для события № 1 область начального возмущения в ионосфере локальна, распространение возмущения имеет приблизительно изотропный

характер без резкого изменения фазы. При распространении к северу положительная фаза волны выражена менее отчетливо и не имеет резкого фронта начального вступления.

Для события № 2 область начального возмущения вытянута перпендикулярно простиранию очага землетрясения, и распространение возмущения от этой области в северо-восточном и юго-западном направлениях происходят с разной полярностью первого вступления и с разными скоростями. Скорость волны к северу существенно выше и, как указывалось, достигает 3 км/с. Следует заметить, что момент второго землетрясения приходится на ночное время, в отличие от первого случая, когда момент события приходится на дневное время. Возможно, что резкая анизотропия скорости в дневное время в северном и южном направлениях связана с ориентацией внешнего магнитного поля, существенно влияющего на анизотропию тензора проводимости ионосферной плазмы.

Далее, для события № 2, в северо-восточном направлении полярность отрицательна, что указывает на инвертированную N -волну, тогда как в юго-восточном направлении полярность первого вступления положительна, возмущение имеет вид нормальной N -волны до расстояния от эпицентра около 850 км, где происходит новая смена полярности.

Следует заметить, что механизмы очагов данных землетрясений резко различны.

Для события № 1 имеет место пологая плоскость скольжения, с относительным вертикальным поднятием дна океана на 2.8 м в южной оконечности очага (рис. 8а), а для события № 2 про-

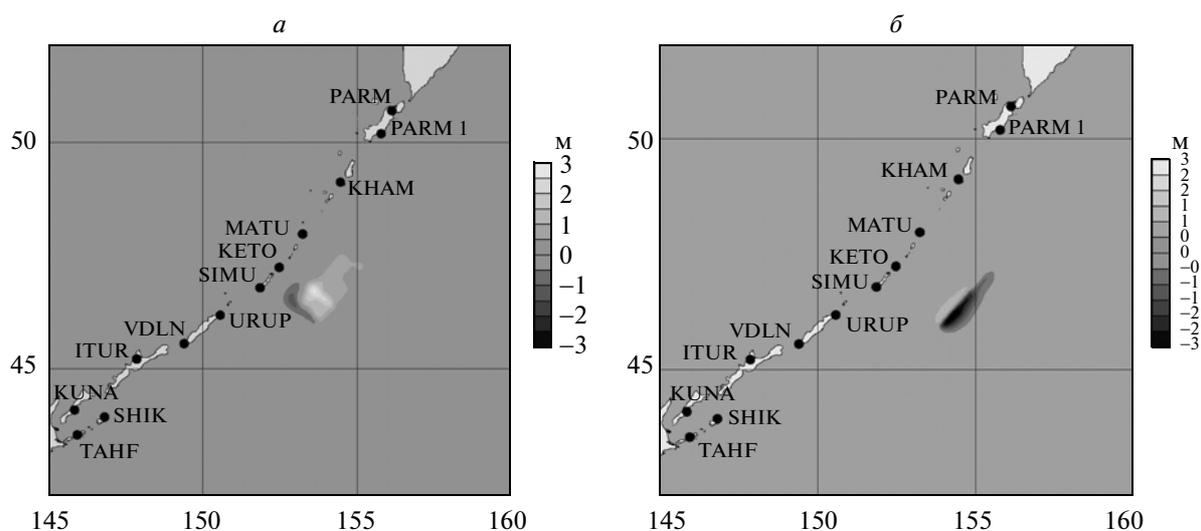


Рис. 8. Распределение вертикальных смещений дна океана: а – при землетрясении № 1, построенных на основании смещений земной поверхности на приведенных станциях GPS; б – при землетрясении № 2, построенных аналогично событию № 1.

изошел вертикальный сброс восточного крыла с максимальной относительной амплитудой опускания дна на 7.1 м (рис. 8б), что, вообще говоря, могло повлиять на конфигурацию области начального возмущения.

Казалось бы, положительная и отрицательная полярности ионосферного возмущения могут быть связаны с поднятием или опусканием дна океана, приводящим к соответствующим искажениям океанической поверхности. Именно к таким выводам приходят авторы статьи (Astafyeva, Neki, 2009), анализируя ионосферные возмущения от данных землетрясений по наклонным трассам для достаточно удаленных японских станций GPS. Однако такое объяснение наталкивается на трудности: даже если возмущение поверхности океана содержит участки с движением вниз и возникнет волна разряжения, она будет механически неустойчивой (Зельдович, Райзер, 1966) и не достигнет ионосферы в первоначальном виде. Тем более, опусканием поверхности океана трудно объяснить появление инвертированной N -волны на расстояниях порядка 850 км от эпицентра.

Нам известно еще только одно событие (Курильское землетрясение 1994 г.), также рассмотренное в работе (Astafyeva, Neki, 2009), когда вблизи эпицентра была зарегистрирована инвертированная N -волна. С нашей точки зрения, возмущение, напоминающее инвертированную N -волну, которое наблюдается вблизи эпицентра, и отрицательная фаза возмущения, наблюдаемая вдали от него, имеют разное происхождение. Дело в том, что в отношении возмущения ионосферы в области входа акустического импульса в ионосферу обычно предполагается относительно быстрая релаксация плазмы к равновесию. Это, вообще говоря, может не иметь места, если учесть, что во вращающейся атмосфере с исчезновением возмущающей силы происходит процесс геострофической адаптации (Обухов, 1949), при котором часть энергии первоначального возмущения уносится акустико-гравитационными волнами, а другая часть остается локализованной в области первоначального возмущения и в ее окрестностях. Соответственно в месте начального возмущения ионосферы должны существовать долгоживущие локализованные вихри, исчезающие под влиянием сравнительно медленных диссипативных процессов. Форма этих вихрей может быть рассчитана так, как описано в работе (Гохберг, Шалимов, 2008). В частности, профиль таких возмущений напоминает инвертированную N -волну. Что касается наблюдений отрицательной фазы ионосферных возмущений вдали от эпицентра (по оценке, на расстояниях около 850 км от эпицентра), то ее происхождение можно рассматривать как результат эволюции нормальной N -волны, состоящей из высокочастотной положительной фазы и срав-

нительно низкочастотной отрицательной. При распространении вдоль лучевых траекторий на большие расстояния от источника положительная фаза подвержена большей диссипации, чем отрицательная, поэтому в результате остается только последняя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по результатам измерений со спутников GPS вариаций ионосферного ТЕС можно отметить следующие особенности ионосферного отклика на подводные землетрясения, произошедшие в районе Курильских о-вов 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. Во-первых, для обоих событий (№ 1 и № 2 соответственно) область начального возмущения в ионосфере смещена на северо-восток на расстояние около 300 км, но форма области начального возмущения для этих двух землетрясений различна (локальная для события № 1 и вытянутая в направлении ЮВ–СЗ для события № 2). Во-вторых, ионосферное возмущение от обоих землетрясений распространяется как на север, так и на юг, причем максимальная амплитуда возмущения для события № 1 (несмотря на смещение области начального возмущения) достигается над эпицентром, тогда как для события № 2 – в области начального возмущения в ионосфере. В-третьих, если для события № 1 ионосферный отклик наблюдается в форме нормальной N -волны, то для события № 2 отмечено присутствие инвертированной N -волны к северу от области начального возмущения, а для возмущения, распространяющегося на юг, инверсия фаз имеет место на некотором расстоянии (около 850 км) от области начального возмущения.

Наконец, отметим, что кажущаяся скорость распространения ионосферного возмущения на порядок величины превосходит скорость волн цунами, что можно использовать в службе раннего оповещения о цунами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афраймович Э.Л., Первалова Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск, 2006. 480 с.
- Голицын Г.С., Кляцкин В.И.* Колебания в атмосфере, вызываемые движениями земной поверхности // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1967. Т. 3. № 10. С. 1044.
- Гохберг М.Б., Шалимов С.Л.* Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. М.: Наука, 2008. 296 с.
- Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 686 с.
- Обухов А.М.* К вопросу о геострофическом ветре // Изв. АН СССР. Сер. географ. и геофиз. 1949. Т. 13. № 4. С. 281.

- Afraimovich E.L., Perevalova N.P., Plotnikov A.V., Uralov A.M.* The shock-acoustic waves generated by the earthquakes // *Ann. Geophys.* 2001. V. 19. № 4. P. 395–409.
- Afraimovich E.L., Astafieva E.I., Kirushkin V.V.* Localization of the source of ionospheric disturbance generated during an earthquake // *Int. J. Geomagnet. Aeron.* 2006. V. 6. № 2, doi:10.1029/2004GI000092.
- Artru J., Farges T., Lognonne P.* Acoustic waves generated from seismic surface waves: propagation properties determined from Doppler sounding observations and normal-mode modeling // *Geophys. J. Int.* 2004. V. 158. № 6. P. 1067–1077.
- Artru J., Lognonné P., Occhipinti G., Crespon F., Garcia R., Jeansou E., Murakami M.* Tsunami detection in the ionosphere // *Space Res. Today.* 2005. № 163. P. 23–27.
- Astafyeva E., Heki K., Kiryushkin V., Afraimovich E., Shalimov S.* Two-mode long-distance propagation of coseismic ionosphere disturbances // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. № A10307. doi: 10.1029/2008.JA013853.
- Astafyeva E., Heki K.* Dependence of waveform of near-field coseismic ionospheric disturbances on focal mechanisms // *EPS.* 2009. № 61. P. 939.
- Bolt B.A.* Seismic air waves from the great 1964 Alaskan earthquake // *Nature.* 1964. № 202. P. 1094–1095.
- Calais E., Minster J.B.* GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. № 9. P. 1045–1048.
- Calais E., Minster J.B.* GPS, earthquakes, the ionosphere, and the Space Shuttle // *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* 1998. № 105. P. 167–181.
- Davies K., Baker D.* Ionospheric effects observed around the time of the Alaska earthquake of March, 1964 // *J. Geophys. Res.* 1965. V. 70. № 9. P. 2251.
- Ducic V., Artru J., Lognonne P.* Ionospheric remote sensing of the Denali earthquake Rayleigh surface waves // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 18. P. 1951. doi:10.1029/2003GL017812.
- Garcia R., Crespon F., Ducic V., Lognonne P.* Three-dimensional ionospheric tomography of post-seismic perturbations produced by the Denali earthquake from GPS data // *Geophys. J. Int.* 2005. № 163. P. 1049–1064.
- Heki K., Ping J.* Directivity and apparent velocity of the coseismic ionospheric disturbances observed with a dense GPS array // *Earth Planet Sci. Lett.* 2005. № 236. P. 845–855.
- Heki K., Otsuka Y., Choosakul N., Hemmakorn N., Komolmis T., Maruyama T.* Detection of ruptures of Andaman fault segments in the 2004 great Sumatra earthquake with coseismic ionospheric disturbances // *J. Geophys. Res.* 2006. № 111. doi:10.1029/2005JB004202.
- Lay T., Kanamori H., Ammon C.J., Hutko A.R., Furlong K., Rivera L.* The 2006–2007 Kuril Islands great earthquake sequence // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. № B11308. doi:10.1029/2008JB006280.
- Liu J.Y., Tsai Y.B., Chen S.W., Lee C.P., Chen Y.C., Yen H.Y., Chang W.Y., Liu C.* Giant ionospheric disturbances excited by the M9.3 Sumatra earthquake on 26 December 2004 // *Geophys. Res. Lett.* 2006a. V. 33. № L02103. doi:10.1029/2005GL023963.
- Liu J.Y., Tsai Y.B., Ma K.F., Chen Y.I., Tsai H.F., Lin C.H., Kamogawa M., Lee C.P.* Ionospheric GPS total electron content (TEC) disturbances triggered by the 26 December 2004 Indian Ocean tsunami // *J. Geophys. Res.* 2006b. V. 111. № A05303. doi:10.1029/2005JA011200.

Ionospheric Response to Kuril Undersea Earthquakes from GPS Satellite Data

M. B. Gokhberg, V. M. Lapshin, G. M. Steblov, S. L. Shalimov

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow

Using GPS total electron content (TEC) measurements by the net of Russian GPS receivers the ionospheric response of two great Kuril undersea earthquakes of 15 November 2006 and 13 January 2007 has been considered. Due to favorable net arrangement the ionospheric response has been investigated both close to and far from the epicenters (up to 1000 km). We observed that the apparent propagation velocity of the ionospheric disturbances (1–3 km/s) exceeds considerably the speed of tsunami wave, caused by an earthquake, the fact that can be used as tsunami warning. We showed that along with known type of the ionospheric response in the form of *N*-wave the one in the form of inverse *N*-wave can be observed both close to and far from the epicenter. The interpretation of the inverse *N*-wave response has been suggested.

Key words: earthquakes, ionospheric disturbances, TEC variations, GPS