Исследование распространения ионосферных возмущений, вызванных землетрясением Tohoku, в дальней от очага зоне

Н.П. Перевалова¹, Н.В. Шестаков^{2,3}, С.В. Воейков¹,
В.Г. Быков⁴, М.Д. Герасименко³, Р.Н. Park⁵

¹ Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 664033, Россия

E-mails: pereval@iszf.irk.ru, serg3108@iszf.irk.ru

² Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690950, Россия

E-mail: shestakov.nv@dvfu.ru

³ Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток, 690041, Россия

E-mail: mdg@iam.dvo.ru

⁴ Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, Хабаровск, 680000, Россия

E-mail: bykov@itig.as.khb.ru

⁵ Korea Astronomy & Space Science Institute, Daejeon, 305–348, South Korea

E-mail: phpark@kasi.re.kr

Приведены результаты исследования характера распространения основных типов перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), вызванных землетрясением в Японии 11 марта 2011 г., на больших расстояниях от очаговой области. Для анализа использовались данные фазовых двухчастотных измерений, полученные на нескольких сетях GPS, действующих в Азиатско-Тихоокеанском регионе: Комплексной геодинимической сети ДВО РАН, Курильской сети ГС РАН, Южно-Корейской сети, международной сети IGS (<http://sopac.ucsd.edu>), а также сети GEONET в Японии (<http://mekira.gsi.go.jp>). Установлены направление и дальность распространения для различных типов ПИВ. Выявлена асимметрия затухания возмущений в различных направлениях от эпицентра: в северо-западном направлении ПИВ прослеживаются до 2000–2200 км от эпицентра; в северо-восточном направлении затухают на расстоянии ~1300 км. Быстрее всего ПИВ затухают в секторе азимутов 10–45° от эпицентра (на расстоянии ~800 км). Быстрые ПИВ ($V \sim 2000\text{--}3000$ м/с) эффективно распространяются в юго-западном направлении, менее выражены в северо-западном и отсутствуют в северо-восточном. ПИВ, обусловленные акустическими волнами ($V \sim 600\text{--}1000$ м/с), распространяются во всех направлениях, но затухают на расстояниях 800–1500 км от эпицентра. В северо-восточном секторе наблюдается только данный тип ПИВ. Медленные ПИВ ($V \sim 150\text{--}300$ м/с) распространяются в юго-западном и северо-западном направлениях.

Ключевые слова: GPS ПЭС, перемещающиеся ионосферные возмущения, землетрясение Tohoku

Одобрена к печати: 06.10.2015

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-186-196

Введение

Разнообразные эффекты, вызванные одним из наиболее мощных и разрушительных землетрясений в Японии 11 марта 2011 г. (05:46:24 UT, магнитуда $M_w = 9,0$) в разных средах (литосфера, гидросфера, атмосфера), продолжают интенсивно изучаться. Данное сейсмическое событие, получившее название Tohoku, послужило источником значительных движений и деформаций земной коры, привело к образованию цунами и генерации волновых возмущений в атмосфере и ионосфере Земли.

Динамика ионосферных возмущений, инициированных землетрясением Tohoku, достаточно подробно изучена в ближней от очага зоне (Tsugawa et al., 2011; Rolland et al., 2011; Куницын и др., 2011; Перевалова и др., 2012; и др.). Установлено, что землетрясение вызвало образование спектра волновых перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) с длинами волн от 200 до 600 км и скоростями от 150 до 3000 м/с. Выделено три основных типа (моды) ПИВ: быстрая мода перемещается со скоростью 2200–3000 м/с и связана с распространением поверхностной волны Релея (Tsugawa et al., 2011; Rolland et al., 2011; Куни-

цын и др., 2011); акустическая мода имеет скорость 600–1000 м/с, сравнимую со скоростью звука на высотах ионосферы, и отождествляется с акустическими волнами, генерируемыми в эпицентре (Tsugawa et al., 2011; Rolland et al., 2011; Куницын и др., 2011; Перевалова и др., 2012); медленная мода распространяется со скоростью 150–300 м/с, что близко к скорости звука в нижней атмосфере, и обусловлена гравитационной модой атмосферных волн (Tsugawa et al., 2011; Rolland et al., 2011; Перевалова и др., 2012).

Большой интерес вызывает исследование характера распространения ПИВ в дальней от эпицентра Tohoku зоне. Используя данные GPS-сетей в Японии, Корее и на Тайване, (Chen et al., 2011) проследили распространение ПИВ со скоростями 1000–1700 м/с до расстояний ~1500 км в юго-западном направлении от эпицентра. По измерениям GPS станций международной сети IGS в Тихоокеанском регионе, в публикации (Гохберг и др., 2011) приводятся данные о регистрации на расстоянии ~1500 км к юго-востоку от эпицентра возмущения ПЭС двух типов: в форме уединенной волны длительностью около 60 мин (через 1 ч после землетрясения) и колебания с периодом ~30 мин (через 2 ч после землетрясения). В работе (Kakinami et al., 2013) по данным сети GEONET в Японии показано, что на расстояниях 500–1500 км от эпицентра быстрые ПИВ ($V \sim 3000$ м/с) наблюдаются только в юго-западном направлении, а возмущения со скоростями меньше 1200 м/с распространяются концентрически от области генерации цунами. В работе (Jin et al., 2014) по данным GEONET установлено, что амплитуда возмущений ПЭС зависит от направления их распространения: в ближней зоне (0–500 км от эпицентра) в первые полчаса наибольшая амплитуда наблюдалась в южном и юго-западном направлениях, а затем – в северо-западном; в дальней зоне (500–1500 км) наиболее интенсивные ПИВ регистрировались в восточном (в первые полчаса) и северо-западном (после 06:20 UT) направлениях.

Имеются отдельные сообщения о регистрации ПИВ, вызванных землетрясением Tohoku, на сверхбольших удалениях от эпицентра: по данным доплеровского зондирования над Чехией (~9000 км) (Chum et al., 2012), по данным спутников GRACE на Аляске (~6000 м) (Yang et al., 2014), по данным квазивертикального зондирования над Иркутском (~3400 км) (Berngardt et al., 2015). Во всех указанных работах авторы связывают зарегистрированные ПИВ с прохождением поверхностных волн Рэлея.

В настоящей работе представлены результаты анализа характера распространения ионосферных возмущений, вызванных землетрясением Tohoku, на больших (1000–2500 км) расстояниях от эпицентра. Особое внимание уделено возмущениям, распространявшимся к северу, которые до сих пор оставались мало изученными ввиду малого количества наблюдательных данных в этой области.

Данные и методы анализа

Исследование распространения ионосферных возмущений в дальней от очага землетрясения Tohoku зоне выполнено на основе данных, полученных на нескольких

сетях GPS, действующих в Азиатско-Тихоокеанском регионе (рис. 1): Комплексной геодинимической сети ДВО РАН, Курильской сети ГС РАН, Южно-Корейской сети, международной сети IGS (<http://sopac.ucsd.edu>), а также сети GEONET в Японии (<http://mekira.gsi.go.jp>). С помощью стандартной методики (Афраймович, Перевалова, 2006; Куницын и др., 2011; Tsugawa et al., 2011) по фазовым двухчастотным измерениям GPS-приемников рассчитывались вариации «наклонного» ПЭС вдоль луча «приемник-спутник GPS».

Рис. 1. Сети приемников GPS в Азиатско-Тихоокеанском регионе, данные которых использовались в анализе. Звездочкой отмечен эпицентр землетрясения Tohoku

Исходные ряды «наклонного» ПЭС были преобразованы в эквивалентное «вертикальное» значение $I(t)$ по известному соотношению (Klobuchar, 1986), подвергались сглаживанию с временным окном 2 мин и удалению линейного тренда с временным окном 10 мин (Перевалова и др., 2012). Для пространственной привязки вариаций ПЭС проводился расчет координат ионосферных точек. Поскольку основной вклад в вариации ПЭС дает область ионосферы, расположенная вблизи главного максимума ионизации, в первом приближении принято считать, что ПЭС формируется в ионосферной точке (ИТ), т.е. точке пересечения луча «приемник-спутник» с тонким слоем на высоте $h_{\max}$ максимума ионизации (Афраймович, Перевалова, 2006; Куницын и др., 2011; Tsugawa et al., 2011). В настоящем анализе полагалось $h_{\max} = 300$ км.

Распространение возмущений ПЭС в дальней от эпицентра зоне

Использование удаленных от эпицентра станций GPS позволило исследовать характер распространения каждой из выделенных ранее мод ПИВ на больших (более 1000 км) расстояниях от эпицентра землетрясения. С этой целью были проанализированы возмущения ПЭС, которые наблюдались для различных спутников GPS вдоль нескольких цепочек станций: Курильской (вытянута в северо-восточном направлении от эпицентра), Сахалинской (в северном), Зейской (в северо-западном). На *рис. 1* выбранные цепочки станций выделены серой заливкой. Пунктирными линиями показаны траектории ИТ GPS-спутников G12, G14, G18, G22, G27, находившихся в зоне видимости станций Курильской цепочки в период 06:00-09:00 UT. Примеры временных вариаций ПЭС, полученных на станциях трех указанных цепочек для спутника G14 приведены на *рис. 2а-в*. В левом углу каждой панели указано расстояние от эпицентра до ИТ, в которой был зарегистрирован минимум колебаний ПЭС, отмеченный черной точкой.

Рис. 2. Вариации ПЭС на Зейской (а), Сахалинской (б) и Курильской (в) цепочках станций для GPS-спутника G14. Вариации ПЭС на Курильской цепочке для GPS-спутников G12 и G27 (г-д). Вертикальным пунктиром отмечен момент землетрясения

Согласно полученным результатам можно считать, что возмущение, вызванное землетрясением, распространяется от эпицентра. На удаленных станциях оно начинает наблюдаться после 06:00 UT. Амплитуда возмущения в целом уменьшается с ростом расстояния от эпицентра. На Зейской цепочке (*рис. 2а*) возмущение уверенно прослеживается на всех станциях. На наиболее удаленных станциях ОКНВ и ОКНТ Сахалинской цепочки (*рис. 2б*) амплитуда возмущения близка к уровню фоновых колебаний ПЭС. Начиная со станции КНАР на Курильской цепочке (*рис. 2в*) возмущений, обусловленных землетрясением, выделить не удается.

Необходимо отметить, что для некоторых спутников (например, спутники G12 и G27 на Курильской цепочке станций, *рис. 2г-д*) наряду с возмущениями, вызванными землетрясением, зарегистрированы достаточно интенсивные ПИВ, распространявшиеся с севера (на *рис. 2г-д* такие возмущения выделены пунктиром). Они начинают регистрироваться на наиболее удаленных от эпицентра Tohoku станциях, часто еще до момента землетрясения. На центральных станциях цепочки (MATU, KETO, URUP, *рис. 2г-д*) возмущения, идущие с севера, накладываются на возмущения, вызванные землетрясением. Распространяющиеся с севера ПИВ могут быть связаны с геомагнитной активностью в авроральной зоне. Природа этих возмущений требует отдельного исследования. В настоящем анализе такие ПИВ были исключены из рассмотрения.

Чтобы получить пространственную картину возмущений ПЭС, вызванных землетрясением, мы нанесли на карту положения ИТ, в которых были зарегистрированы минимумы и максимумы возмущений ПЭС, превышающие 0,15 TECU (серые точки на *рис. 3*). Видна хорошо выраженная асимметрия затухания возмущений, вызванных землетрясением Tohoku, в различных направлениях от эпицентра. В северо-западном направлении возмущение прослеживается до 2000–2200 км от эпицентра. В северо-восточном направлении возмущение в ионосфере затухает на расстоянии ~1400 км. Быстрее всего ПИВ затухают в секторе азимутов 10–45° от эпицентра (на расстоянии ~800 км).

Расчет скорости и азимута перемещения зарегистрированных возмущений ПЭС был выполнен по измерениям ПЭС на трех GPS-станциях с помощью метода разнесенного приема D1-GPS (Афраймович, Перевалова, 2006). Использование различных комбинаций лучей «приемник-спутник» дало возможность построить карты скоростей перемещения ПИВ (*рис. 3*, черные стрелки). Длинные стрелки на *рис. 3* соответствуют скоростям ~600 м/с (акустическая мода), короткие – скоростям ~300 м/с (медленная мода). При использованном разрешении данных (30 с) метод D1-GPS позволяет определить скорости этих двух мод. Средние скорости умеренной и медленной мод составили 552 ± 159 м/с и 185 ± 27 м/с, соответственно.

Как видно из *рис. 3*, в северо-восточном секторе присутствует только акустическая мода, и она затухает на расстояниях около 1400 км. В северо-западном направлении от эпицентра наблюдаются медленная и акустическая моды. Причем медленная мода распространяется гораздо дальше – до расстояний 1800–2000 км.

Рис. 3. Пространственное распределение минимумов (светло-серые точки) и максимумов (темно-серые точки) возмущений ПЭС, вызванных землетрясением Тохоки и зарегистрированных в период 06:00-09:00 UT на сетях удаленных станций GPS. Черными стрелками показаны скорости перемещения возмущений ПЭС. Звездочкой отмечен эпицентр землетрясения, треугольниками – станции GPS. Концентрическими пунктирными линиями показано расстояние от эпицентра с шагом 200 км

На рис. 4 представлены диаграммы «дальность – время», построенные по данным всех сетей GPS в Азиатско-Тихоокеанском регионе, которые были в нашем распоряжении. Диаграммы отображают амплитуду колебаний ПЭС в зависимости от времени и расстояния между точкой регистрации и эпицентром. Диаграммы получены по данным GPS-спутников G18, G27, G22 и станций GPS, расположенных к северо-востоку (Курильские острова), северо-западу (Дальний Восток РФ), юго-западу (Китай, Корея) от эпицентра. Видны уже описанные ранее моды колебаний. Но анализ полученных диаграмм позволяет сделать новые выводы о характере и дальности распространения различных мод в разных направлениях.

Быстрая мода ($V \sim 2200\text{--}3000$ м/с) эффективно распространяется в юго-западном направлении (до расстояний ~ 2500 км), менее выражена в северо-западном (но видна также до расстояний более 2000 км) и отсутствует в северо-восточном. Полученный результат согласуется с нашими предыдущими исследованиями (Перевалова и др., 2012), выявившими аналогичную картину распространения быстрых ПИВ на расстояниях до 1500 км от эпицентра, а также с данными (Kakinami et al., 2013), зарегистрировавшими быстрые ПИВ только в юго-западном направлении. Следует отметить, что авторы этой работы не проводили анализ данных в северо-западном секторе.

Акустическая мода ($V \sim 600\text{--}1000$ м/с) распространяется во всех направлениях, но затухает на расстояниях 800–1500 км от эпицентра. В северо-восточном секторе от эпи-

центра наблюдается практически только данная мода (рис. 4а). Спутник G22 (рис. 4б), видимый на станциях северо-восточного региона, зарегистрировал умеренную моду фактически к северу и северо-западу от эпицентра (рис. 1). Концентрическое распространение данного типа волн до расстояний 1000–1500 км отмечено в нескольких работах (Tsugawa et al., 2011; Chen et al., 2011; Перевалова и др., 2012; Kakinami et al., 2013). Однако ввиду отсутствия данных оставалось неясным, распространяются ли эти ПИВ на большие расстояния. Использование данных удаленных станций в настоящем исследовании позволило установить, что на расстояниях более 1500 км от эпицентра акустическая мода не наблюдается.

Рис. 4. Диаграммы «дальность-время» для GPS-спутников G18, G22, G27 и станций GPS, расположенных: к северо-востоку (а, б), северо-западу (в, г), юго-западу (д, е) от эпицентра. Кривые получены по данным удаленных от эпицентра GPS-сетей (зеленая заливка) и по данным сети GEONET в Японии (вне зеленой заливки)

Медленная мода ($V \sim 150\text{--}300$ м/с) распространяется в юго-западном и северо-западном направлениях до расстояний 1500–2000 км. Эта мода наблюдается наиболее длительное время – около 3 ч (06:15–09:20 UT). Согласно предыдущим исследованиям (Tsugawa et al., 2011; Куницын и др., 2011; Перевалова и др., 2012), медленные ПИВ появляются на расстоянии около 300 км от эпицентра и распространяются концентрически до 1000–1300 км. Как показано в настоящей работе, на расстояниях больше 1500 км уже нельзя говорить о концентрическом характере распространения этих ПИВ, т.к. в северном и северо-восточном направлениях они не регистрируются.

Заключение

По данным нескольких сетей приемников GPS, действующих в Азиатско-Тихоокеанском регионе, проведены исследования характера распространения ионосферных возмущений, вызванных землетрясением Tohoku 11 марта 2011 г., на больших расстояниях от его эпицентра. Показано, что в дальней от очага зоне наблюдается асимметрия распространения возмущений ПЭС в различных направлениях, при этом характер распространения основных типов ПИВ неодинаков.

Быстрые ПИВ (скорость 2000–3000 м/с), обусловленные волнами Релея, регистрируются по данным GPS-наблюдений до расстояний более 2000 км в юго-западном и северо-западном направлениях. В северо-западном секторе интенсивность данных ПИВ существенно ниже. В северо-восточном направлении они не наблюдаются. ПИВ со скоростями 600–1000 м/с (средняя скорость 552 ± 159 м/с), связанные с акустическими волнами, сгенерированными в эпицентре, распространяются во всех направлениях, затухая на расстояниях 800–1500 км от эпицентра. Отмечено, что в северо-восточном секторе регистрируется только этот тип ПИВ. Медленные ПИВ (скорости 150–300 м/с), обусловленные гравитационными атмосферными волнами, наблюдаются наиболее длительное время (около трех часов) и распространяются до расстояний 1500–2000 км в юго-западном и северо-западном направлениях. Впервые показано, что в секторе азимутов $10\text{--}45^\circ$ на расстояниях больше 800 км от эпицентра возмущений, вызванных землетрясением, по данным GPS выявить не удастся.

Полученные результаты согласуются и дополняют картину ионосферных возмущений, зарегистрированных вблизи эпицентра (Tsugawa et al., 2011; Rolland et al., 2011; Куницын и др., 2011) и на расстояниях до 1500 км от него (Chen et al., 2011; Перевалова и др., 2012; Kakinami et al., 2013; Jin et al., 2014).

Авторы выражают глубокую благодарность Институту физики Земли РАН (г. Москва) и лично Г.М. Стеблову, Институту морской геологии и геофизики ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск) и Геофизической службе РАН за предоставление данных Курильской сети GPS; Korea Astronomy & Space Science Institute (Daejeon, Republic of Korea) за предоставление данных сети GPS в Южной Корее; Geospatial Information Authority of Japan за предоставление данных сети GEONET; Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC) за предостав-

ление данных глобальной сети приемников GPS. Работа выполнена при поддержке проекта 14-37-00027 Российского научного фонда (Перевалова Н.П.), проекта 14-08-01-05_м Дальневосточного федерального университета (Шестаков Н.В.) и гранта РФФИ 15-37-20269_мол_а_вед (Шестаков Н.В.).

Литература

1. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
2. Гохберг М.Б., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л., Вейс В.А., Грехова Е.А. Ионосферный отклик на подводное землетрясение в Японии 11.03.2011 г. по наблюдениям со спутников GPS // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10. № 1. С. 47–63.
3. Куницын В.Е., Нестеров И.А., Шалимов С.Л. Мегаземлетрясение в Японии 11 марта 2011 г.: регистрация ионосферных возмущений по данным GPS // Письма в ЖЭТФ. 2011. Т. 63. № 8. С. 657–661.
4. Перевалова Н.П., Воейков С.В., Ясюкевич Ю.В., Ишин А.Б., Воейкова Е.С., Саньков В.А. Исследование ионосферных возмущений, вызванных землетрясением в Японии 11 марта 2011 г., по данным сети GEONET // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 172–180.
5. Berngardt O.I., Kotovich G.V., Mikhailov S.Ya., Podlesnyi A.V. Dynamics of vertical ionospheric inhomogeneities over Irkutsk during 06:00–06:20UT 11/03/2011 caused by Tohoku earthquake // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2015. Vol. 132. P. 106–115.
6. Chen C.H., Saito A., Lin J., Liu J.Y., Tsai H.F., Tsugawa T., Otsuka Y., Nishioka M., Matsumura M. Long-distance propagation of ionospheric disturbances generated by the 2011 Tohoku Earthquake // Earth, Planets and Space. 2011. Vol. 63. No. 7. P. 881–884.
7. Chum J., Hruska F., Zednik J., Lastovicka J. Ionospheric disturbances (infrasound waves) over the Czech republic excited by the 2011 Tohoku earthquake // J. Geophys. Res. 2012. Vol. 117. A08319.
8. Jin S., Jin R., Li J.H. Pattern and evolution of seismo-ionospheric disturbances following the 2011 Tohoku earthquakes from GPS observations // J. Geophys. Res. Space Phys. 2014. Vol. 119. P. 7914–7927.
9. Kakinami Y., Kamogawa M., Watanabe S., Odaka M., Mogi T., Liu J.-Y., Sun Y.-Y., Yamada T. Ionospheric ripples excited by superimposed wave fronts associated with Rayleigh waves in the thermosphere // J. Geophys. Res. Space Phys. 2013. Vol. 118. P. 905–911.
10. Klobuchar J.A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users // IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System. 1986. Vol. 23. No. 3. P. 325–331.
11. Rolland L.M., Lognonné P., Astafyeva E., Kherani E.A., Kobayashi N., Mann M., Munekane H. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // Earth, Planets and Space. 2011. Vol. 63. No. 7. P. 853–857.
12. Tsugawa T., Saito A., Otsuka Y., Nishioka M., Maruyama T., Kato H., Nagatsuma T., Murata K.T. Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 Tohoku Earthquake // Earth, Planets and Space. 2011. Vol. 63. No. 7. P. 875–879.
13. Yang Y.-M., Meng X., Komjathy A., Verkholyadova O., Langley R.B., Tsurutani B.T., Mannucci A.J. Tohoku-Oki Earthquake Caused Major Ionospheric Disturbances at 450 km Altitude Over Alaska // Radio Science. 2014. Vol. 49. No. 12. P. 1206–1213. doi: 10.1002/2014RS005580.

Studying far-field propagation of ionospheric disturbances generated by the Tohoku earthquake

N.P. Perevalova¹, N.V. Shestakov^{2,3}, S.V. Voeykov¹,
V.G. Bykov⁴, M.D. Gerasimenko³, P.H. Park⁵

¹ Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch, RAS, Irkutsk 664033, Russia

E-mails: pereval@iszf.irk.ru, serg3108@iszf.irk.ru

² Far Eastern Federal University, Vladivostok 690950, Russia

E-mail: shestakov.nv@dyfu.ru

³ Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Branch, RAS, Vladivostok 690041, Russia

E-mail: mdg@iam.dvo.ru

⁴ Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch, RAS, Khabarovsk 680000, Russia

E-mail: bykov@itig.as.khb.ru

⁵ Korea Astronomy & Space Science Institute, Daejeon, 305–348, South Korea

E-mail: phpark@kasi.re.kr

The paper presents results of the study of far-field propagation of the main types of traveling ionospheric disturbances (TIDs) caused by the March 11, 2011, Japan earthquake. The study relies on double frequency phase data acquired by several GPS networks operating in the Asia-Pacific region: the FEB RAS complex geodynamic network, the GS RAS Kuril network, the Southern Korean network, the international IGS network (<http://sopac.ucsd.edu>), and the GEONET networks in Japan (<http://mekira.gsi.go.jp>). We have determined the direction and distance of propagation for various TID types and have revealed TID attenuation asymmetry in different directions from the epicenter: the TIDs are registered up to 2000–2200 km from the epicenter northwestward, but they fade at a distance of 1300 km northeastward. The TIDs damp rapidly in the azimuth sector of 10–45° from the epicenter (at ~800 km). Fast TIDs (V~2000–3000 m/s) effectively propagate southwestward from the epicenter; they are less pronounced northwestward and are absent northeastward. The TIDs caused by acoustic waves (V~600–1000 m/s) are propagating symmetrically in all directions, but almost disappear at 800–1500 km from the epicenter. Only this type of TIDs is observed northeastward. Slow TIDs (V~150–300 m/s) move largely southwestward and northwestward.

Keywords: GPS-TEC, traveling ionospheric disturbances, Tohoku earthquake

Accepted: 06.10.2015

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-186-196

References

1. Afraimovich E.L., Perevalova N.P., *GPS-monitoring verkhnei atmosfery Zemli* (GPS-monitoring of the Earth's upper atmosphere), Irkutsk: Izd-vo GU NTs RVKh VSNTs SO RAMN, 2006, 480 p.
2. Gokhberg M.B., Steblov G.M., Shalimov S.L., Veic V.A., Grekhova E.A., Ionosfernyi otklik na podvodnoe zemletryasenie v Yaponii 11.03.2011 g. po nablyudeniya so sputnikov GPS (Ionospheric disturbances triggered by the undersea earthquake in Japan of March 11, 2011 and observed by using GPS satellites), *Geofizicheskie protsessy i biosfera*, 2011, Vol. 10, No. 1, pp. 47–63.
3. Kunitsyn V.E., Nesterov I.A., Shalimov S.L., Megazemletryasenie v Yaponii 11 marta 2011 g.: registratsiya ionosfernykh vozmushchenii po dannym GPS (Japan megathrust earthquake on March 11, 2011: GPS-TEC evidence for ionospheric disturbances), *Pis'ma v ZhETF*, 2011, Vol. 63, No. 8, pp. 657–661.
4. Perevalova N.P., Voeykov S.V., Yasyukevich Yu.V., Ishin A.B., Voeykova E.S., San'kov V.A., Issledovanie ionosfernykh vozmushchenii, vyzvannykh zemletryaseniem v Yaponii 11 marta 2011 g., po dannym seti GEONET (Investigation into ionospheric disturbances caused by earthquake of 11 March 2011 in Japan, using GEONET data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 3, pp. 172–180.
5. Bergardt O.I., Kotovich G.V., Mikhailov S.Ya., Podlesnyi A.V., Dynamics of vertical ionospheric inhomogeneities over Irkutsk during 06:00–06:20UT 11/03/2011 caused by Tohoku earthquake, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2015, Vol. 132, pp. 106–115.
6. Chen C.H., Saito A., Lin J., Liu J.Y., Tsai H.F., Tsugawa T., Otsuka Y., Nishioka M., Matsumura M., Long-distance propagation of ionospheric disturbances generated by the 2011 Tohoku Earthquake, *Earth, Planets and Space*, 2011, Vol. 63, No. 7, pp. 881–884.
7. Chum J., Hruska F., Zednik J., Lastovicka J., Ionospheric disturbances (infrasound waves) over the Czech republic excited by the 2011 Tohoku earthquake, *J. Geophys. Res.*, 2012, Vol. 117, A08319.
8. Jin S., Jin R., Li J.H., Pattern and evolution of seismo-ionospheric disturbances following the 2011 Tohoku earthquakes from GPS observations, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2014, Vol. 119, pp. 7914–7927.
9. Kakinami Y., Kamogawa M., Watanabe S., Odaka M., Mogi T., Liu J.-Y., Sun Y.-Y., Yamada T., Ionospheric ripples excited by superimposed wave fronts associated with Rayleigh waves in the thermosphere, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2013, Vol. 118, pp. 905–911.

10. Klobuchar J.A., Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System*, 1986, Vol. 23, No. 3, pp. 325–331.
11. Rolland L.M., Lognonné P., Astafyeva E., Kherani E.A., Kobayashi N., Mann M., Munekane H., The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth, Planets and Space*, 2011, Vol. 63, No. 7, pp. 853–857.
12. Tsugawa T., Saito A., Otsuka Y., Nishioka M., Maruyama T., Kato H., Nagatsuma T., Murata K.T., Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 Tohoku Earthquake, *Earth, Planets and Space*, 2011, Vol. 63, No. 7, pp. 875–879.
13. Yang Y.-M., Meng X., Komjathy A., Verkholyadova O., Langley R.B., Tsurutani B.T., Mannucci A.J., Tohoku-Oki Earthquake Caused Major Ionospheric Disturbances at 450 km Altitude Over Alaska, *Radio Science*, 2014, Vol. 49, No. 12, pp. 1206–1213, doi: 10.1002/2014RS005580.