

## Исследование ионосферных возмущений, вызванных землетрясением в Японии 11 марта 2011 г., по данным сети GEONET

Н.П. Перевалова<sup>1</sup>, С.В. Воейков<sup>1</sup>, Ю.В. Ясюкевич<sup>1,2</sup>, А.Б. Ишин<sup>1</sup>,  
Е.С. Воейкова<sup>2</sup>, В.А. Саньков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН),  
664033, Иркутск, Лермонтова, 126а,  
e-mail: pereval@iszf.irk.ru

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет (ИГУ),  
664003, Иркутск, бул. Гагарина, 20,  
e-mail: yasukevich@iszf.irk.ru

<sup>3</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН),  
664033, Иркутск, Лермонтова, 128,  
e-mail: Sankov@crust.irk.ru

По данным GPS-измерений на плотной сети станций GEONET исследованы возмущения полного электронного содержания (ПЭС), сопровождавшие мощное землетрясение 11 марта 2011 г. в Японии. Построены и проанализированы двухмерные пространственные распределения возмущений ПЭС, карты поля скоростей перемещения ионосферных возмущений, а также диаграммы дальность — время, отражающие эволюцию отклика ионосферы на сейсмическое воздействие. В результате изучения пространственной картины распределения ПЭС выявлены перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) двух типов, близких по форме к кольцевым волнам, расходящимся из эпицентра. Крупномасштабные ПИВ регистрировались в период времени 05:50–06:25 UT, имели длину волны около 600 км и распространялись со средней скоростью 724 м/с. Среднемасштабные ПИВ наблюдались позднее (после 06:25 UT), их длина волны составляла ~200 км, а средняя горизонтальная скорость распространения (359 м/с) была значительно ниже скорости крупномасштабных волн. Диаграммы дальность — время позволили выделить несколько мод возмущений, распространявшихся с скоростями от 159 до 2,6 км/с. Скорости мод в различных направлениях от эпицентра достаточно близки, в то время как амплитуда возмущений ПЭС зависит от направления их распространения.

**Ключевые слова:** ионосферные возмущения, ПЭС, GPS, землетрясения.

### Введение

Землетрясение в Японии 11 марта 2011 г. (05:46:24 UT, магнитуда  $M_w = 9,0$ ), получившее название Tohoku, вошло в число наиболее сильных и разрушительных. Эпицентр землетрясения располагался на границе Тихоокеанской и Охотской плит. Скорость сближения этих двух плит достигает 90 мм/год (Bird, 2003). Разлом начался на глубине около 24,4 км ([www.iris.edu/news/events/japan2011](http://www.iris.edu/news/events/japan2011)). По модельным оценкам длина разлома достигала 380...400 км, а протяженность поля афтершоков — около 450 км ([http://tectonics.caltech.edu/slip\\_history/2011\\_tohoku-oki-tele](http://tectonics.caltech.edu/slip_history/2011_tohoku-oki-tele); [www.gsi.go.jp/cais](http://www.gsi.go.jp/cais)). Вдоль линии разлома наблюдался обратный сброс с амплитудой 25...30 м. Главному толчку землетрясения предшествовали несколько крупных ( $M_w > 6,0$ ) форшоков. После основного землетрясения зарегистрирована сильная афтершоковая активность, включавшая 60 толчков с магнитудой  $M_w > 6,0$  и три толчка с  $M_w > 7,0$  (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011>). Эпицентры основного толчка и афтершоков с магнитудой  $M_w > 6,6$ , зарегистрированных в интервале 05:00–09:00 UT 11 марта 2011 г., показаны звездочками на рис. 1а.

Землетрясение Tohoku оказало оно заметное влияние на ионосферу Земли. Эффекты сильных землетрясений в вариациях ионосферных параметров регистрировались неоднократно: после крупных землетрясений на Аляске (28.03.1964,  $M_w = 8,5$ ) (Davies, Baker,

1965), в Перу (23.06.2001,  $M_w = 8,4$ ) (Artru et al., 2005; Lognonné et al., 2006), в Японии (25.09.2003,  $M_w = 8,3$ ) (Heki, Ping, 2005; Afraimovich et al., 2006; Lognonné et al., 2006; Rolland et al., 2011a), у о-ва Суматра (26.12.2004,  $M_w = 9,0$ ) (Astafyeva, Afraimovich, 2006; Heki et al., 2006; Lognonné et al., 2006; Shinagawa et al., 2007; и др.), вблизи Курильских островов (15.11.2006,  $M_w = 8,3$ ; 13.01.2007,  $M_w = 8,1$ ) (Astafyeva, Heki, 2009; Rolland et al., 2010; Гохберг и др., 2011a). Чаще всего ионосферный отклик наблюдался вблизи эпицентра землетрясения через 10...15 мин после основного толчка. Периоды откликов варьировались в пределах 190...600 с. В ряде случаев отклик имел N-образную форму, которая соответствует классической форме ударной акустической волны (волны сжатия-разряжения) (Heki, Ping, 2005; Afraimovich et al., 2006; Astafyeva, Afraimovich, 2006; Astafyeva, Heki, 2009; Rolland et al., 2011a). Авторы статей (Afraimovich et al., 2006; Rolland et al., 2011a) показали, что ионосферное возмущение, вызванное мощным землетрясением 25 сентября 2003 г. вблизи о-ва Хоккайдо, представляло собой кольцевую волну, расходящуюся от эпицентра.

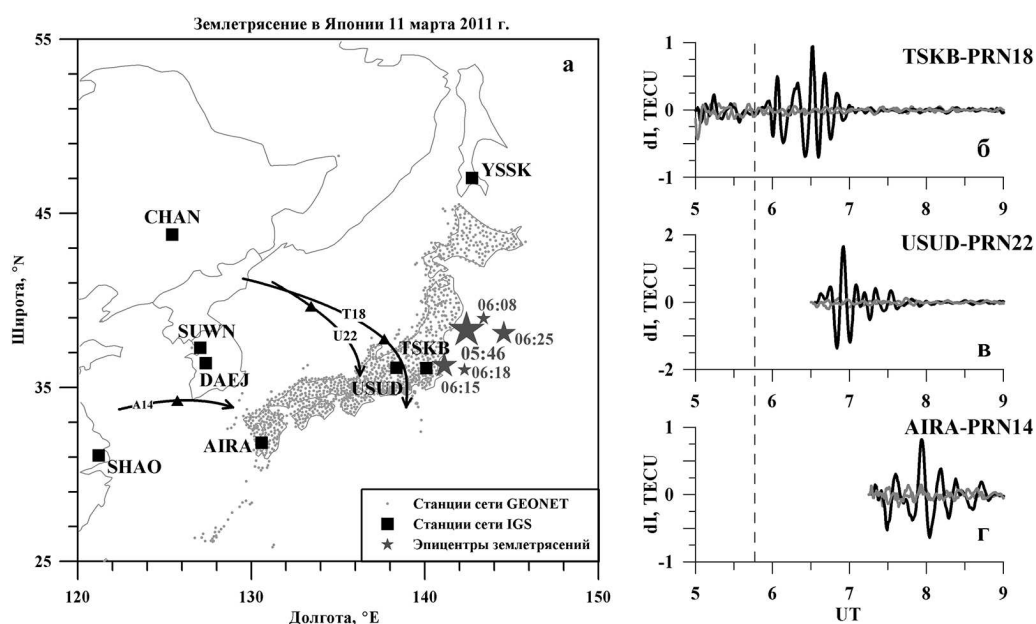


Рис. 1. Геометрия измерений (а) и примеры вариаций ПЭС (б–г) во время землетрясения в Японии 11.03.2011. Черными линиями на панелях (б–г) показаны вариации ПЭС 11.03.2011, серыми — 10.03.2011, пунктирной линией отмечен момент главного толчка 11.03.2011

Ионосферным эффектам землетрясения 11 марта 2011 г. посвящено уже довольно много работ (Гохберг и др., 2011б; Tsugawa et al., 2011; Rolland et al., 2011b; Chen et al., 2011; Куницын и др., 2011, Astafyeva et al., 2011; Heki, 2011; Xu et al., 2011; и др.). Первые результаты исследования отклика ионосферы на землетрясение в Японии 11 марта 2011 г. (Гохберг и др., 2011б; Tsugawa et al., 2011; Rolland et al., 2011b; Куницын и др., 2011) установили наличие нескольких типов перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). В большинстве работ отмечено наличие кольцевых волн, распространявшихся от эпицентра. Авторам (Astafyeva et al., 2011) используя 1-с данные GPS сети GEONET удалось наиболее точно определить время появления ПИВ: первые возмущения в ионосфере зарегистрированы спустя 464 с (~7,73 мин) после землетрясения. Изучение параметров и свойств ионосферных возмущений, вызванных землетрясением Tohoku продолжается. В настоящей работе представлены результаты регистрации возмущений полного электронного содержания (ПЭС), обусловленных землетрясением 11 марта 2011 г., при этом основное внимание уделяется детальному анализу характера движения и интенсивности возмущений ПЭС различных типов.

## Данные и методы анализа

Исследования отклика ионосферы на землетрясение в Японии 11 марта 2011 г. выполнены по данным измерений двухчастотных GPS-приемников сети GEONET в Японии ([ftp://terras.gsi.go.jp/data/GPS\\_products](ftp://terras.gsi.go.jp/data/GPS_products)). Использовались также данные расположенных в зоне землетрясения станций международной сети IGS: USUD, TSKB, AIRA, CHAN, DAEJ, SUWN, SHAO, YSSK. Геометрия измерений показана на рис. 1а. Исходными данными являлись ряды вариаций «наклонного» ПЭС, рассчитанного вдоль луча «приемник – спутник GPS», а также ряды значений азимута  $\alpha_s(t)$  и угла места  $\theta_s(t)$  спутника GPS. Для анализа отбирались непрерывные ряды длительностью не менее 2,3 ч. По известным значениям  $\alpha_s(t)$ ,  $\theta_s(t)$  рассчитывались координаты ионосферных точек (точек пересечения лучей «приемник – спутник» со сферой, расположенной на высоте  $h_{\max}$  главного максимума ионизации) для  $h_{\max} = 300$  км. С целью нормировки амплитуды возмущений ПЭС исходные значения «наклонного» ПЭС преобразовывались в эквивалентное «вертикальное» значение  $I(t)$  по известному соотношению (Klobuchar, 1986). Для выделения возмущений, вызванных землетрясением, нормированные ряды ПЭС подвергались сглаживанию с временным окном 2 мин (для удаления высокочастотных колебаний) и удалению линейного тренда с временным окном 10 мин.

Определение динамических характеристик ионосферных возмущений выполнялось с помощью метода SADM-GPS (Афраймович, Перевалова, 2006), суть которого заключается в следующем. Для расчета скорости и направления движения перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) из большого числа станций GPS выбираются три пункта, расстояния между которыми не превышает половины длины волны возмущения. Такая конфигурация приемников GPS представляет собой GPS-решетку с минимально необходимым количеством элементов. На основе измерений пространственных и временной производных ПЭС, выполненных на GPS-решетке, производится вычисление средних за выбранный интервал времени величин горизонтальной компоненты фазовой скорости и азимута распространения ПИВ.

### Возмущения полного электронного содержания после землетрясения 11 марта 2011 г. в Японии

Через 8...10 мин после основного толчка и в течение нескольких часов (вплоть до 12:00 UT) на лучах «приемник – спутник», проходивших вблизи зоны землетрясения, регистрировались волновые возмущения ПЭС с периодами 5...15 мин. Амплитуда колебаний варьировалась от 0,1 до 1,8 TECU, что существенно превышало амплитуду фоновых флуктуаций. Значения максимальной амплитуды  $A_{\max}$  и время ее регистрации  $UT_{\max}$  для некоторых лучей «приемник – спутник» приведены в таблице, где также указано расстояние  $D$  от эпицентра, на котором была зарегистрирована максимальная амплитуда отклика ПЭС. Примеры возмущений ПЭС, вызванные мощным землетрясением Tohoku и зарегистрированные на станциях TSKB, USUD, AIRA (лучи TSKB-PRN18, USUD-PRN22, AIRA-PRN14, где PRN отмечает номер спутника GPS), показаны черными толстыми линиями на рис. 1б–г. Серыми кривыми изображены вариации ПЭС на указанных лучах в предыдущий (10 марта) и последующий (12 марта) дни. Траектории ионосферных точек лучей TSKB-PRN18, USUD-PRN22, AIRA-PRN14 в интервал времени 05:00–09:00 UT показаны на рис. 1а (линии T18, U22, A14, соответственно). Точка, в которой зарегистрирован максимум амплитуды отклика ПЭС, отмечена треугольником на соответствующей траектории. Возмущения ПЭС, вызванные землетрясением Tohoku регистрировались на расстояниях более 1000 км от эпицентра.

Максимальная амплитуда  $A_{\max}$  возмущений ПЭС и время ее регистрации  $UT_{\max}$

Станция GPS	Спутник GPS	$A_{\max}$ , TECU	$UT_{\max}$	D, км
TSKB	PRN15	0,47	05:58	227
TSKB	PRN18	0,95	06:32	419
TSKB	PRN22	1,83	06:49	720
USUD	PRN15	0,51	06:00	355
USUD	PRN18	0,71	06:40	544
USUD	PRN22	1,66	06:56	789
AIRA	PRN14	0,82	07:57	1558

При изучении пространственно-временной картины отклика ионосферы на землетрясение 11 марта 2011 г. был использован специальный метод картирования возмущений ПЭС. Для каждого текущего временного отсчета на карту наносилось положение ионосферных точек, при этом цвет точек соответствовал текущему значению амплитуды вариаций ПЭС на луче «приемник – спутник» (рис. 2). Концентрические кольцевые линии на рис. 2 соответствуют линиям равного расстояния от эпицентра с шагом 100 км. Эти линии отмечают теоретическое положение сферического волнового фронта в предположении радиального распространения возмущения от эпицентра. В используемой картографической проекции линии имеют форму эллипсов.

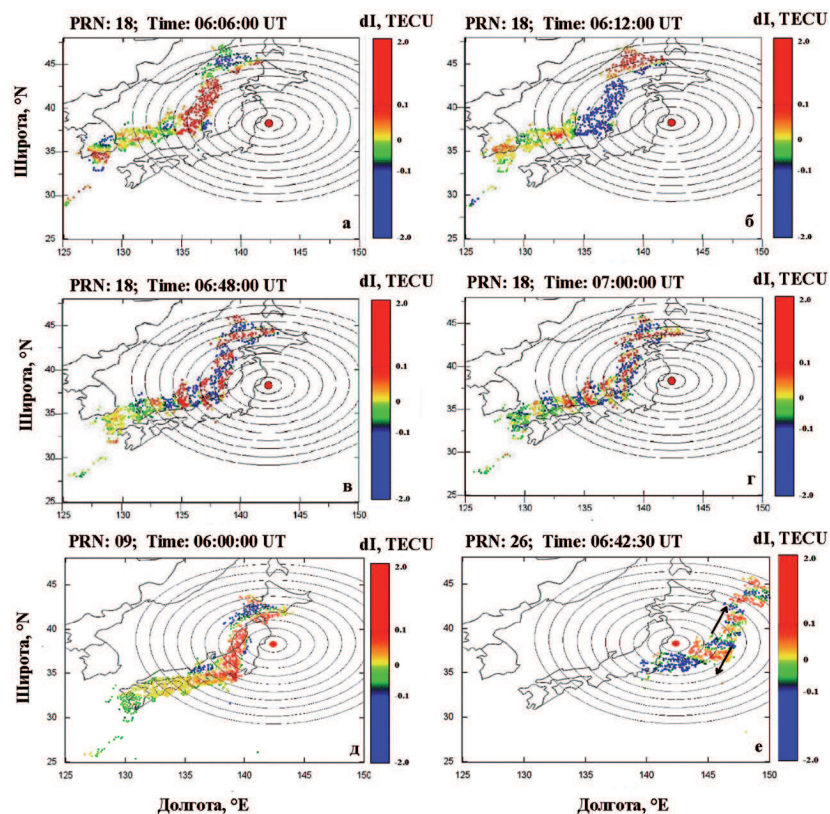


Рис. 2. Пространственные вариации интенсивности возмущений ПЭС после землетрясения в Японии 11.03.2011, полученные для спутников GPS PRN18 (а–г), PRN09 (д), PRN26 (е). Крупной точкой показан эпицентр землетрясения. Справа от панелей даны шкалы интенсивности возмущений ПЭС

Анализ временной последовательности карт позволил выявить возмущения ПЭС двух типов, близких по форме к кольцевым волнам, расходящимся из эпицентра. Примеры таких возмущений, зарегистрированных с помощью спутника PRN18, приведены на рис. 2а–г.



Первыми (в период времени 05:50–06:25 UT) наблюдались перемещающиеся с большой скоростью крупномасштабные возмущения (рис. 2а, б) с длиной волны  $\lambda \approx 600$  км. После 06:25 UT на записях стали регистрироваться среднемасштабные возмущения с длиной волны  $\lambda \approx 200$  км (рис. 2в, г). Скорость среднемасштабных возмущений была значительно ниже скорости крупномасштабных волн.

Обработка данных GPS-решеток в районе Японии с использованием метода SADM-GPS позволила получить значения основных динамических параметров (скорость перемещения, азимут волнового вектора) возмущений, зарегистрированных после землетрясения Tohoku. Общее число  $S$  различных комбинаций GPS-решеток для интервала времени 05:52:30–07:16:30 UT составило 112. Средние значения скорости и направления перемещения возмущений, рассчитанных на различных GPS-решетках, показали хорошее совпадение в пределах среднеквадратического отклонения, что свидетельствует об устойчивости получаемых данных независимо от конфигурации GPS-решетки.

На рис. 3а, в представлены пространственные распределения скорости и направления перемещения крупномасштабных (интервал времени 05:52:30–06:25:30 UT) и среднемасштабных (интервал времени 06:26:00–7:16:30) возмущений ПЭС. Длина стрелок соответствует величине скорости возмущений, а направление стрелок отмечает направление перемещения ПИВ. Масштаб скорости дан в правом нижнем углу. Гистограммы скоростей крупномасштабных и среднемасштабных ПИВ приведены на рис. 3(б, г), соответственно. Видно, что в целом, оба типа ПИВ перемещаются радиально от эпицентра землетрясения. Исключение составляет юго-западная оконечность Японии (расстояние от эпицентра 1200...1500 км), где наблюдается смена направления распространения ПИВ на юго-восточное. Средняя горизонтальная скорость  $V_h$  перемещения крупномасштабных возмущений составляет  $724 \pm 18$  м/с. Для среднемасштабных ПИВ величина средней скорости равна  $359 \pm 9$  м/с. Рассчитанные нами значения скоростей согласуются с результатами, которые были получены в работах (Tsunami et al., 2011; Rolland et al., 2011b; Гохберг и др., 2011б; Куницын и др., 2011).

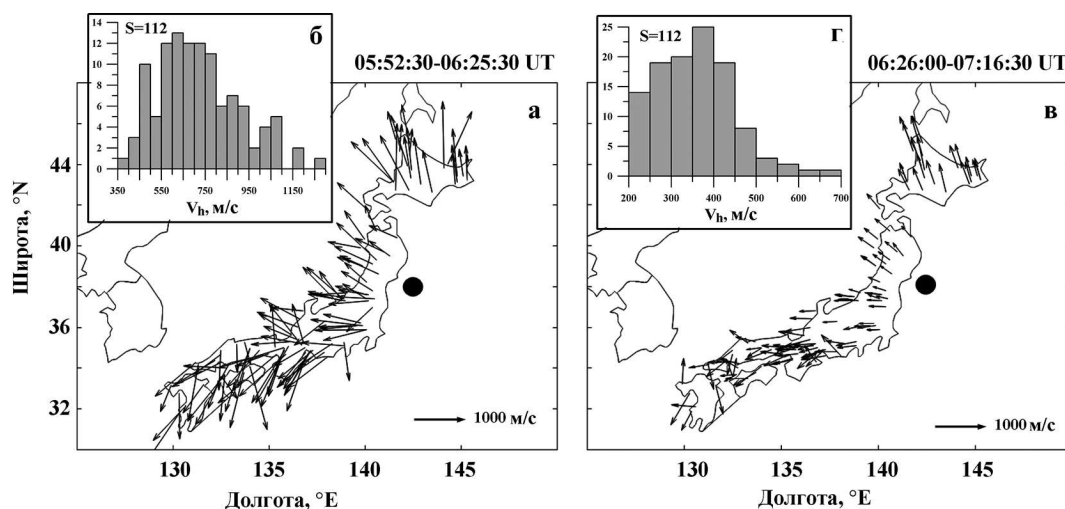


Рис. 3. Пространственные распределения скорости и направления перемещения возмущений ПЭС 11.03.2011 для двух интервалов времени: 05:52:30–06:25:30 UT (а) и 06:26:00–7:16:30 UT (в).

Точкой показан эпицентр землетрясения.

Гистограммы скоростей крупномасштабных (б) и среднемасштабных (г) ПИВ

Не для всех спутников картина наблюдаемых возмущений была близка к кольцевым волнам, бегущим из эпицентра, как для PRN18 (рис. 3а–г). Форма фронта возмущения, зарегистрированного с помощью спутника PRN09 (рис. 3д), близка к кольцевой, но ее центр не совпадает с эпицентром землетрясения, а находится около  $37,8^\circ$  с.ш.,  $144,5^\circ$  в.д. Представляют интерес возмущения, зарегистрированные с помощью спутника PRN26 (рис. 3е).

Эти возмущения имеют почти плоскую форму фронта. Такой волновой фронт может образоваться либо от близкого вытянутого, либо от очень далекого источника. Анализ последовательности карт возмущений ПЭС показал, что в данном случае реализуется первый вариант: на рис. 3е наблюдается перемещение среднемасштабных волн в юго-западном и северо-восточном направлениях от источника вытянутого по долготе и расположенного на широте  $\sim 37^\circ$  с.ш. (направление перемещения показано стрелками на рис. 3е). Отметим, что, в отличие от PRN18, лучи для спутника PRN26 проходят непосредственно над эпицентром землетрясения. Возможно, наблюдаемые с помощью спутника PRN26 возмущения обусловлены серией афтершоков, зарегистрированных после главного толчка.

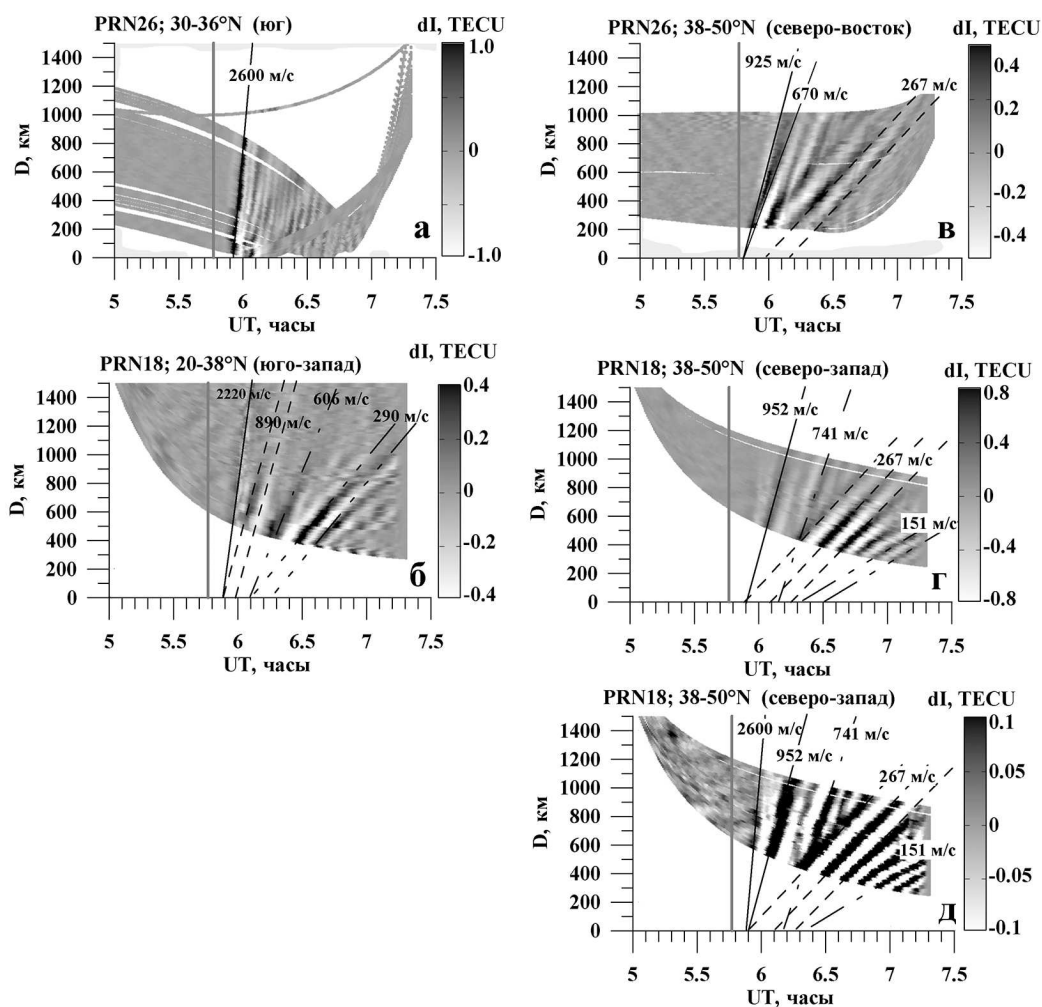


Рис. 4. Диаграммы дальность – время для станций GPS, расположенных южнее (а–б) и севернее (в–д) эпицентра землетрясения в Японии 11.03.2011. Черными линиями отмечены различные моды возмущений, цифрами указана скорость их распространения. Вертикальной серой линией показано время землетрясения

### Характеристики возмущений ПЭС в различных направлениях от эпицентра

Одним из эффективных методов детектирования ионосферных возмущений, вызванных землетрясениями, является анализ диаграмм «дальность – время». Для построения диаграммы «дальность – время» на график наносятся ионосферные точки выбранного спутника и всех доступных станций GPS в зависимости от времени (UT) и дальности ( $D$ ) от эпицентра до этих точек. Цвет точки определяет амплитуду возмущений ПЭС, зарегистрированную на данном луче в каждый момент времени. На рис. 4 представлены диаграммы «дальность – время» полученные по данным спутников PRN18, PRN26 для станций расположенных юж-

нее (диапазон широт станций 20...38° N, рис. 4а, б) и севернее (диапазоне широт 38...50° N, рис. 4в–д) эпицентра. Анализ диаграмм позволяет выделить несколько мод, распространяющихся с различными скоростями. Самая быстрая мода имеет скорость  $V \approx 2,2...2,6$  км/с. Данная мода может быть связана с распространением поверхностной волны Релея (Tsugawa et al., 2011; Куницын и др., 2011). В южном от эпицентра направлении быстрая мода выражена достаточно хорошо (рис. 4а–б). В северном направлении интенсивность быстрой моды очень низка. При этом для станций GPS расположенных к северо-западу от эпицентра (спутник PRN18, рис. 4г), быстрая мода не различима на фоне случайных вариаций ионосферной плазмы. Однако увеличение динамического диапазона для амплитуды позволяет выделить данную моду (рис. 4д). Для станций, расположенных к северо-востоку от эпицентра (спутник PRN26, рис. 4в), даже увеличение динамического диапазона не дает возможности зарегистрировать быструю моду, что свидетельствует об отсутствии таких возмущений в данном направлении.

Далее выделяются моды со скоростями от 700 до 1000 м/с. Эти скорости сравнимы со скоростью звука на высотах ионосферы. Авторы (Tsugawa et al., 2011; Куницын и др., 2011) связывают данную моду с акустическими волнами, сгенерированными в эпицентре. Наконец, имеются моды со скоростями от 150 до 300 м/с, близкими к скорости звука в нижней атмосфере. Эти волны, по всей вероятности, обусловлены гравитационной модой атмосферных волн, вызванных землетрясением (Tsugawa et al., 2011).

По нашим оценкам скорости каждой из мод возмущений в различных направлениях от эпицентра достаточно близки. В тоже время, интенсивность вариаций ПЭС в разных направлениях от эпицентра заметно отличается. Амплитуды вариаций вертикального ПЭС (определяемые по положительному гребню возмущения) южнее и севернее эпицентра составляют, соответственно, 0,2 и 0,1 TECU для быстрой моды (имеющей скорость  $\sim 2,5$  км/с); 0,6 и 1,5 TECU для медленной моды (имеющей скорость  $\sim 300$  м/с). Таким образом, интенсивность медленной моды в северном направлении от эпицентра существенно выше, чем в южном; быстрая мода, наоборот, имеет более высокую интенсивность к югу от эпицентра.

## Заключение

Как показали проведенные исследования, отклик ионосферы на мощное землетрясение в Японии 11 марта 2011 г. достаточно сложен и интересен. Землетрясение вызвало образование целого спектра перемещающихся ионосферных возмущений с длинами волн от 200 до 600 км и скоростями от 150 до 2600 м/с.

По данным карт возмущений ПЭС, а также карт поля скоростей ПИВ определены характеристики двух типов возмущения ПЭС, близких по форме к кольцевым волнам, расходящимся из эпицентра. Крупномасштабные ПИВ регистрировались в период времени 05:50–06:25 UT, имели длину волны  $\lambda \approx 600$  км и распространялись со средней скоростью  $\sim 724$  м/с. Среднемасштабные ПИВ наблюдались позднее (после 06:25 UT), их длина волны  $\lambda \approx 200$  км, а средняя горизонтальная скорость распространения ( $\sim 359$  м/с) была значительно ниже скорости крупномасштабных волн. Анализ диаграмм «дальность – время» позволил выделить несколько мод возмущений, распространявшихся со скоростями от 159 м/с до 2,6 км/с. Показано, что скорости каждой из мод в различных направлениях от эпицентра достаточно близки, в то время как амплитуда возмущений ПЭС зависит от направления их распространения. Таким образом, плотные сети наземных двухчастотных приемников GPS открывают новые возможности для детального изучения откликов ионосферы на сейсмические события. Построение карт интенсивности возмущений ПЭС и карт скоростей ПИВ дает возможность визуализировать картину ионосферных возмущений и проследить ее пространственно-временную динамику. Диаграммы «дальность – время» обеспечивает реги-

страцию всех мод возмущений (в том числе и достаточно слабых), что может быть полезным при изучении откликов на землетрясения малой интенсивности.

Работа выполнена при поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 11, проекта РФФИ № 10-05-00113-а, а также Министерства образования и науки Российской Федерации (Госконтракты 14.740.11.0078, 16.518.11.7097).

## Литература

1. *Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
2. *Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л.* (2011а) Ионосферный отклик на подводные Курильские землетрясения по наблюдениям со спутников GPS // Исследование Земли из космоса. 2011. № 1. С. 30–38.
3. *Гохберг М.Б., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л., Вейс В.А., Грехова Е.А.* (2011б) 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.
4. *Куницын В.Е., Нестеров И.А., Шалимов С.Л.* Мегаземлетрясение в Японии 11 марта 2011 г.: регистрация ионосферных возмущений по данным GPS // Письма в Журн. экспериментальной и теоретической физики. 2011. Т. 63. № 8. С. 657–661.
5. *Afraimovich E.L., Astafieva E.I., Kirushkin V.V.* Localization of the source of ionospheric disturbance generated during an earthquake // Intern. J. Geomagnetism and Aeronomy. 2006. V. 6. N. 2. doi:10.1029/2004GI000092.
6. *Artru J., Ducic V., Kanamori H., Lognonné P., Murakami M.* Ionospheric detection of gravity waves induced by tsunamis // Geophysical J. International. 2005. V. 160. N. 3. P. 840–848.
7. *Astafyeva E.I., Afraimovich E.L.* Long-distance propagation of traveling ionospheric disturbances caused by the great Sumatra-Andaman earthquake on 26 December 2004 // Earth, Planets and Space. 2006. V. 58. N. 8. P. 1025–1031.
8. *Astafyeva E., Heki K.* Dependence of waveform of near-field coseismic ionospheric disturbances on focal mechanisms // Earth, Planets, Space. 2009. V. 61. P. 939–943.
9. *Astafyeva E., Lognonné P., Rolland L.M.* First ionospheric images of the seismic fault slip on the example of the Tohoku-oki earthquake // Geophysical Research Letters. 2011. V. 38. P. L22104. doi:10.1029/2011GL049623.
10. *Bird P.* An updated digital model of plate boundaries // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2003. V. 4. N. 3. P. 1027. doi:10.1029/2001GC000252.
11. *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. V. 63. N. 7. P. 881–884.
12. *Davies K., Baker D.M.* Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964 // J. Geophysical Research. 1965. V. 70. P. 2251–2253.
13. *Heki K., Ping J.* Directivity and apparent velocity of the coseismic ionospheric disturbances observed with a dense GPS array // Earth Planet Sci. Lett. 2005. V. 236. P. 845–855.
14. *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. Geophysical Research B: Solid Earth. 2006. V. 111. N. 9. P. B09313.
15. *Heki K.* Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake // Geophysical Research Letters. 2011. V. 38. P. L17312. doi:10.1029/2011GL047908.
16. *Klobuchar J.A.* Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users // IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System. 1986. V. 23. N. 3. P. 325–331.
17. *Lognonné P., Artru J., Garcia R., Crespon F., Ducic V., Jeansou E., Occhipinti G., Helbert J., Moreaux G., Godet P.-E.* Ground-based GPS imaging of ionospheric post-seismic signal // Planetary and Space Science. 2006. V. 54. N. 5. P. 528–554.



18. *Rolland L.M., Occhipinti G., Lognonné P., Loevenbruck A.* Ionospheric gravity waves detected offshore Hawaii after tsunamis // *Geophysical Research Letters*. 2010. V. 37. N. 17. P. L17101.
19. *Rolland L.M., Lognonné P., Munekane H.* 2011a. Detection and modeling of Rayleigh wave induced patterns in the ionosphere // *J. Geophysical Research*. 2011. V. 116. doi:10.1029/2010JA016060.
20. *Rolland L.M., Lognonné P., Astafyeva E., Kherani E.A., Kobayashi N., Mann M., Munekane H.* 2011b. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // *Earth, Planets and Space*. 2011. V. 63. N. 7. P. 853–857.
21. *Shinagawa H., Iyemori T., Saito S., Maruyama T.* A numerical simulation of ionospheric and atmospheric variations associated with the Sumatra earthquake on December 26, 2004 // *Earth, Planets and Space*. 2007. V. 59. N. 9. P. 1015–1026.
22. *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. V. 63. N. 7. P. 875–879.
23. *Xu T., Chen Z., Li C., Wu J., Hua Y., Wu Z.* GPS total electron content and surface latent heat flux variations before the 11 March 2011 M9.0 Sendai earthquake // *Advances in Space Research*. 2011. V. 48. P. 1311–1317.

## **Investigation into ionospheric disturbances caused by the earthquake of 11 March 2011 in Japan, using GEONET data**

**N.P. Perevalova <sup>1</sup>, S.V. Voeykov <sup>1</sup>, Yu.V. Yasyukevich <sup>1,2</sup>, A.B. Ishin<sup>1</sup>,  
E.S. Voeykova <sup>2</sup>, V.A. Sankov <sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
664033, Irkutsk, Lermontova, 126a,  
e-mail: pereval@iszf.irk.ru*

<sup>2</sup> *Irkutsk State University, 664003, Irkutsk, Blvd. Gagarina, 20,  
e-mail: yasukevich@iszf.irk.ru*

<sup>3</sup> *Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
664033, Irkutsk, Lermontova, 128,  
e-mail: Sankov@crust.irk.ru*

Disturbances of the total electron content (TEC) accompanying the powerful earthquake of 11 March 2011 in Japan were examined using GPS-data from the dense GPS network GEONET. We constructed and analyzed two-dimensional spatial patterns of TEC disturbances, maps of the velocity field of ionospheric disturbances, and time-distance diagrams. They reflect evolution of the ionospheric response to seismic effect. The analysis of TEC spatial patterns allowed us to reveal traveling ionospheric disturbances (TIDs) of two types whose form was close to the annular waves propagating from the epicenter. Large-scale TIDs were recorded at 05:50–06:25 UT; their wavelength was about 600 km, and their average propagation velocity was about 724 m/s. Medium-scale TIDs were observed later (after 06:25 UT); their wavelength was about 200 km, whereas the average horizontal velocity of their propagation (359 m/s) was much less than that of large-scale waves. Time-distance diagrams indicated some TID modes traveling at different speeds (from 159 to 2.6 km/s). Velocities of modes are fairly close in various directions from the epicenter, whereas the amplitude of TEC disturbances depends on the direction of their propagation.

**Keywords:** ionospheric disturbances, TEC, GPS, earthquakes.