

УДК 550.388.2

**ВОЗМУЩЕНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ,
СОПРОВОЖДАВШИЕ МОЩНОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 11 МАРТА 2011 г. В ЯПОНИИ**

¹Е.С. Воейкова, ²С.В. Воейков, ²Н.П. Перевалова, ²А.Б. Ишин, ³И.В. Живетьев

**TOTAL ELECTRON CONTENT DISTURBANCES AFTER THE POWERFUL EARTHQUAKE
IN JAPAN ON MARCH 11, 2011**

¹E.S. Voeykova, ²S.V. Voeikov, ²N.P. Perevalova, ²A.B. Ishin, ³I.V. Zhivetyev

В работе представлены результаты исследования возмущений полного электронного содержания (ПЭС), сопровождавших мощное землетрясение 11 марта 2011 г. в Японии, по данным GPS-измерений на плотной японской сети станций GEONET. Был проведен анализ двумерной пространственной картины возмущений ПЭС, а также поля скоростей и направлений их перемещения.

We present the results of investigation into the total electron content (TEC) disturbances detected after powerful earthquake on March 11, 2011 in Japan as deduced from GPS measurements on dense Japanese network GEONET. The analysis of a 2-dimensional spatial distribution of TEC disturbances as well as velocities and directions of their propagation has been carried out.

Землетрясение в Японии (05:46:24 UT, 11 марта 2011 г., магнитуда $M_w=9.0$), получившее название Tohoku, вошло в число наиболее сильных и разрушительных землетрясений. Эпицентр землетрясения располагался на границе Тихоокеанской и Охотской плит. Скорость сближения этих двух плит достигает 90 мм/град [Bird, 2003]. Разлом начался на глубине около 24.4 км [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; www.gsi.go.jp/cais/topic110422-index-e.html]. 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, включающая 60 толчков с магнитудой $M_w>6.0$ и три толчка с $M_w>7.0$ [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/usc0001xgp/#summary]. Исследования отклика ионосферы выполнены по данным измерений сети GEONET в Японии [ftp://terras.gsi.go.jp/data/GPS_products]. С целью нормировки амплитуды возмущений ПЭС исходные значения «наклонного» ПЭС, полученные на станциях, были преобразованы в эквивалентное «вертикальное» значение. Для выделения возмущений, вызванных землетрясением, нормированные ряды ПЭС подвергались сглаживанию с временным окном 2 мин и удалению линейного тренда с использованием скользящего временного окна 10 мин. Определение динамических характеристик зарегистрированных ПИВ выполнено с помощью метода SADM-GPS [Afraimovich et al., 1998; Afraimovich et al., 2004].

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. 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. 1). Концентрические кольцевые линии на рис. 1 соответствуют линиям равного расстояния от эпицентра с шагом 100 км. Эти линии отмечают теоретическое положение кольцевого волнового фронта в предположении радиального распространения возмущения от эпицентра. В используемой картографической проекции линии имеют форму эллипсов.

Анализ временной последовательности карт вариаций ПЭС позволил выявить возмущения двух типов, близких по форме к кольцевым волнам, расходящимся из эпицентра. Примеры таких возмущений, зарегистрированных с помощью спутника PRN-18, приведены на рис. 1, а–г. Первыми (05:50–06:25 UT) наблюдались перемещающиеся с большой скоростью крупномасштабные возмущения (рис. 1, а, 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. 1, в, г). Скорость среднемасштабных возмущений была значительно ниже скорости крупномасштабных волн.

Не для всех спутников картина наблюдаемых возмущений была близка к кольцевым волнам, бегущим из эпицентра, как для PRN-18 (рис. 1, а–г). Форма фронта возмущения, зарегистрированного с помощью спутника PRN-09 (рис. 1, д), близка кольцевой, но ее центр не совпадает с эпицентром землетрясения. Представляют интерес возмущения, зарегистрированные с помощью спутника PRN-26 (рис. 1, е). Эти возмущения имеют почти плоскую форму фронта. Такой волновой фронт может образоваться либо от близкого вытянутого, либо от очень далекого источника. Анализ последовательности карт вариаций ПЭС показал, что в данном случае реализуется первый вариант: на рис. 1, е изображено перемещение среднемасштабных волн в юго-западном и северо-восточном направлениях от источника, вытянутого по долготе и расположенного

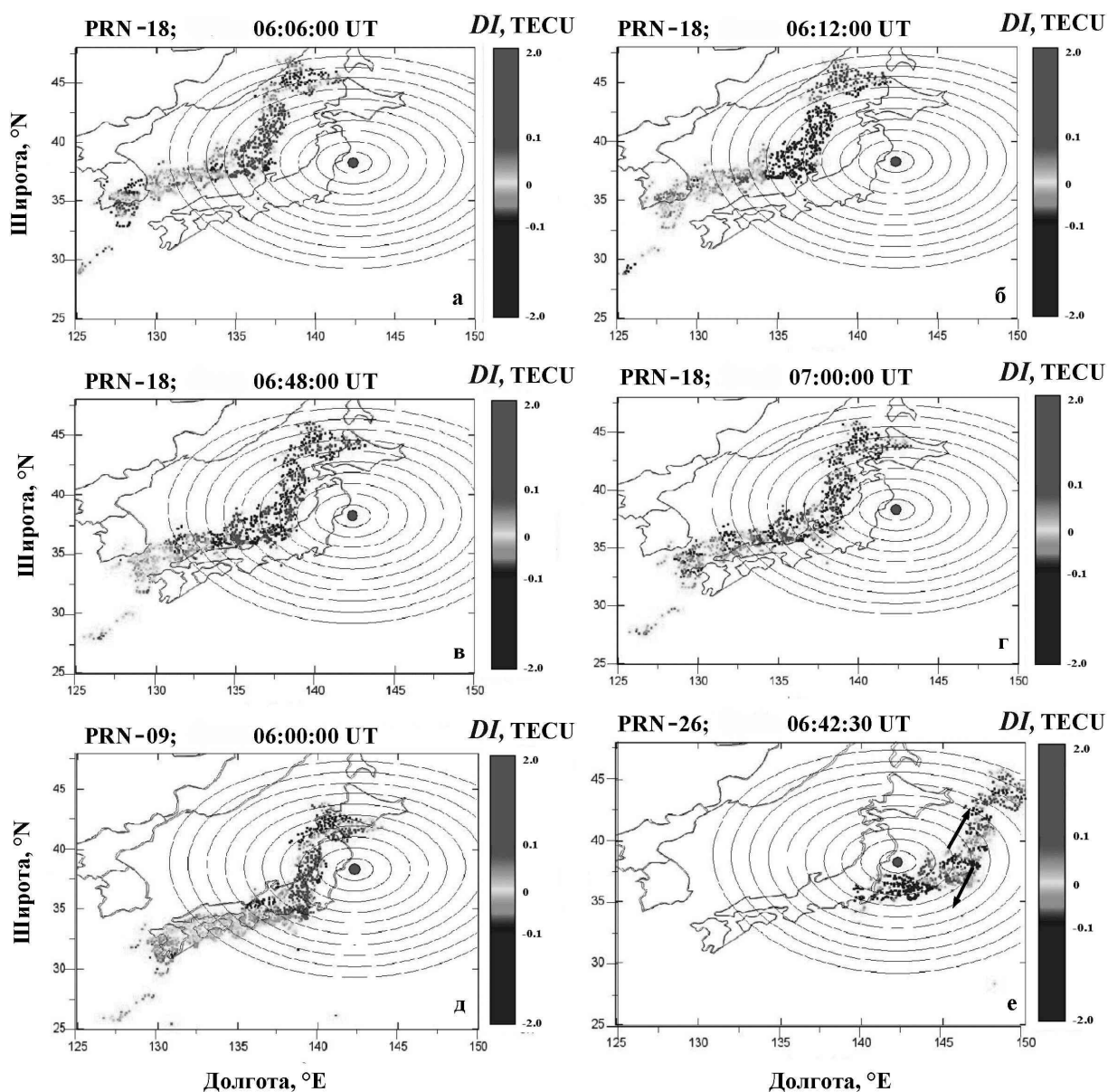


Рис. 1. Пространственные вариации возмущений ПЭС после землетрясения в Японии 11.03.2011, полученные для спутников GPS PRN-18 (а–г), PRN-09 (д), PRN-26 (е). Крупной точкой показан эпицентр землетрясения. Справа даны шкалы интенсивности возмущений ПЭС.

на широте $\sim 37^\circ$ N (направление перемещения показано стрелками). Отметим, что, в отличие от PRN-18, лучи для спутника PRN-26 проходят непосредственно над эпицентром землетрясения. Возможно, наблюдаемые с помощью спутника PRN-26 возмущения обусловлены серией афтершоков, зарегистрированных после главного толчка.

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 различных комбинаций GPS-решеток для 05:52:30–07:16:30 UT составило 112.

На рис. 2 представлены пространственные распределения скорости и направления перемещения крупномасштабных (05:52:30–06:25:30 UT) и сред-

немасштабных (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 верхнем левом углу. Из рис. 2 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 около 900 м/с. Для среднемасштабных ПИВ величина средней скорости – порядка 200 м/с.

Таким образом, по данным GPS-измерений на плотной японской сети станций GEONET исследованы возмущения ПЭС, сопровождавшие мощное землетрясение 11 марта 2011 г. в Японии. Построены

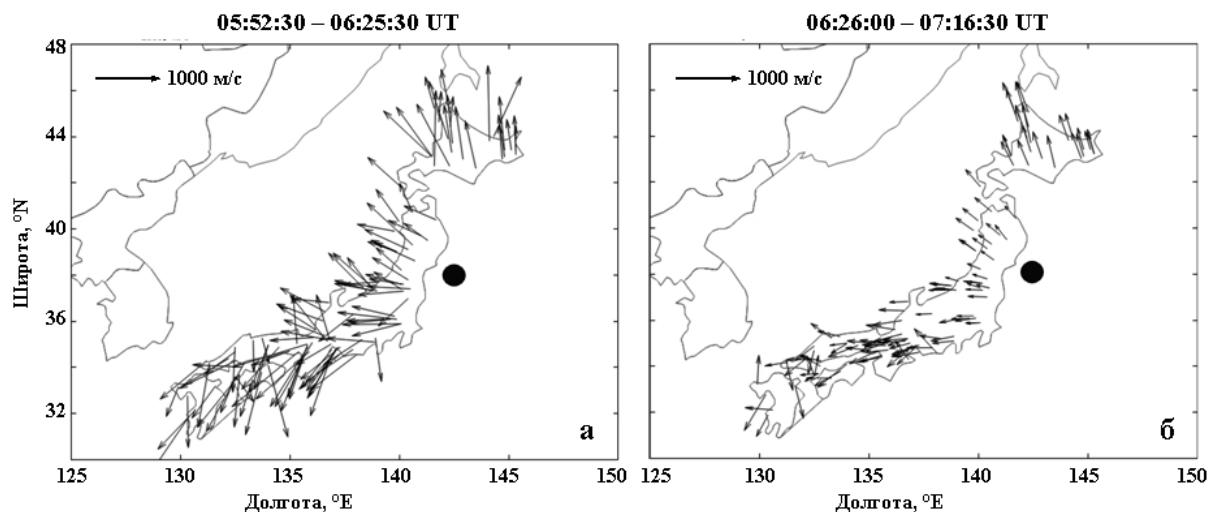


Рис. 2. Пространственные распределения скорости и направления перемещения возмущений ПЭС 11.03.2011 для двух интервалов времени: 05:52:30–06:25:30 UT (а) и 06:26:00–7:16:30 UT (б). Точкой показан эпицентр землетрясения.

двумерные пространственные картины возмущений ПЭС и карты поля скоростей ПИВ, отражающие эволюцию сейсмических возмущений в ионосфере. В результате проведенного анализа выявлены возмущения ПЭС двух типов, близких по форме кольцевым волнам, расходящимся из эпицентра. Крупномасштабные ПИВ регистрировались 05:50–06:25 UT, имели длину волны $\lambda \approx 600$ км и распространялись со средней скоростью $V_h \sim 900$ м/с. Среднемасштабные ПИВ наблюдались позднее (после 06:25 UT), их длина волны $\lambda \approx 200$ км, а средняя горизонтальная скорость распространения ($V_h \sim 200$ м/с) была значительно ниже скорости крупномасштабных волн.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 10-05-00113), Министерства образования и науки Российской Федерации (ГК 14.740.11.0078), а также гранта Президента РФ МК-3094.2010.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Afraimovich E.L., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P. GPS radio interferometry of travelling ionospheric disturbances // J. Atmos. Terr. Phys. 1998. V. 60, N 12. P. 1205–1223.

Afraimovich E.L., Astafieva E.I., Voyeikov S.V. Isolated ionospheric disturbances as deduced from global GPS network // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 47–62.

Bird P. An updated digital model of plate boundaries // Geochem. Geophys. Geosyst. 2003. V. 4, N 3. P. 1027. doi:10.1029/2001GC000252.

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

²Иркутский государственный университет, Иркутск

³Институт космических исследований и распространения радиоволн, Петропавловск-Камчатский