

УСИЛЕНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ТАЙФУНОВ В НОЧНОЕ ВРЕМЯ

¹А.С. Полякова, ^{1,2}Ю.В. Ясюкевич

ENHANCEMENT OF TOTAL ELECTRON CONTENT DISTURBANCES IN THE REGION OF TYPHOONS AT NIGHTTIME

¹A.S. Polyakova, ^{1,2}Yu.V. Yasyukevich

С использованием данных полного электронного содержания (ПЭС) по измерениям GPS/ГЛОНАСС были проанализированы ионосферные возмущения в зоне действия мощных тайфунов Neuguri и Halong в регионе Японии. Показано, что интенсивность возмущений ПЭС с периодом 2–20 мин, генерируемых при прохождении вечернего солнечного терминатора, значительно увеличивается в дни быстрой интенсификации тайфунов, а также в периоды их нахождения над сушей. Амплитуда вариаций ПЭС составляет более 0.5 TECU, что в 3–5 раз превышает аналогичные значения в спокойное время. При этом характер возмущений (период, направление распространения, время появления) не изменяется и соответствует характеру вариаций, наблюдаемых до и после действия тайфунов.

Ionospheric disturbances were analyzed in the region of Japan during the action of powerful typhoons Neuguri and Halong. The data of total electron content (TEC) from Japan network of GPS/GLONASS receivers were used. The intensity of TEC variation with a period of 2–20 minutes, generated by passing the evening sun terminator, is shown to increase significantly during stages of fast cyclone intensification and landfall. The amplitude of TEC variations is meanwhile more than 0.5 TECU, which is up to 3–5 times higher than the same values at a quiet time. The pattern of registered disturbances (period, propagation direction, and the time of occurrence) is not changed and corresponds to the pattern of the variations observed before and after typhoons.

Введение

Тропические циклоны (ТЦ) представляют собой мощные вихревые структуры в тропосфере, скорость ветра в которых в стадии тайфуна/урагана составляет более 33 м/с. ТЦ являются источниками акустико-гравитационных волн (АГВ) в тропосфере [Přfister, 1993], которые, достигая ионосферных высот, регистрируются там как перемещающиеся ионосферные возмущения [Hocke, Schlegel, 1996].

Ионосферные эффекты тропических циклонов наблюдались различными радиофизическими методами [Huang et al., 1985; Xiao et al., 2007]. Серьезный прогресс в таких исследованиях обеспечили глобальные навигационные системы GPS/ГЛОНАСС. На основе их данных стало возможно проводить изучение динамики вариаций полного электронного содержания (ПЭС) с достаточно высоким пространственно-временным разрешением [Afraimovich et al., 2013]. Так, надежное доказательство связи возмущений ПЭС с действием ТЦ с использованием разнесенных в пространстве пунктов GPS/ГЛОНАСС и данных NCEP/NCAR Reanalysis получено в работах [Polyakova, Perevalova, 2011; Полякова, Перевалова, 2015]. Авторами установлено, что интенсивность волновых вариаций ПЭС различных диапазонов периодов существенно возрастает в те моменты, когда мощный циклон находится вблизи станции. Однако пространственная картина ионосферных возмущений, связанных с действием циклонов до сих пор не исследована.

Летом 2014 г. в северо-западной части Тихого океана было зарегистрировано два мощных тропических циклона (категории «супертайфун»), траектория которых пересекла территорию Японии, причем интенсивность данных циклонов в момент выхода на сушу была достаточно высока. ТЦ Neuguri наблюдался со 2 по 13 июля. 4 июля в ТЦ произошел резкий рост скорости ветра – циклон достиг стадии

тайфуна, а 6 июля была зарегистрирована максимальная скорость ветра в ТЦ, более 70 м/с. 9 июля воздушные массы тайфуна достигли территории Японии. ТЦ Halong действовал в акватории северо-западной части Тихого океана в период с 28 июля по 11 августа. Стадии тайфуна циклон достиг 1 августа, а максимальная скорость ветра в ТЦ, более 75 м/с, зарегистрирована 3 августа. Выход ТЦ Halong на сушу произошел 8 августа. Оба циклона действовали в спокойной геомагнитной обстановке: значения индекса K_p не превышали 3.5.

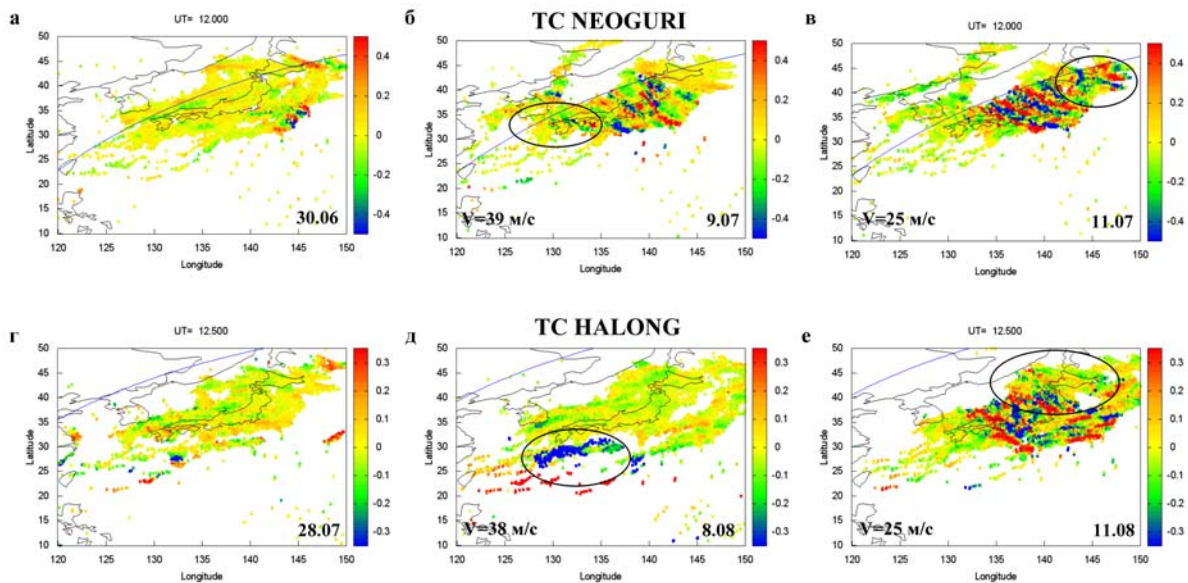
Тот факт, что траектория указанных циклонов пересекла территорию Японии, позволил использовать для исследования ионосферы данные уникальной сети GEONET [ftp://terras.gsi.go.jp/data] фазовых двухчастотных приемников GPS/ГЛОНАСС, насчитывающей более 1200 станций [Miyazaki et al., 1998]. Беспрецедентно высокая плотность станций сети дает возможность получить пространственную структуру ионосферных возмущений различного происхождения.

Методика анализа

Для анализа состояния ионосферы использовался метод ирасчета полного электронного содержания I на основе двухчастотных фазовых измерений сигналов GPS/ГЛОНАСС [Hofmann-Wellenhof et al., 1992]:

$$I = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + K + nL]$$

где f_1, f_2 – рабочие частоты спутниковой системы; $L_1 \lambda_1, L_2 \lambda_2$ – дополнительные пути радиосигналов, обусловленные фазовым запаздыванием в ионосфере, L_1, L_2 – число оборотов фазы на рабочих частотах системы; λ_1, λ_2 – длины волн, K – постоянная величина, обусловленная неоднозначностью определения фазы; nL – погрешность определения фазового пути. Для нормировки амплитуды ряды значений наклонного ПЭС приводились к эквивалентному вер-



Пространственная структура вариаций ПЭС в зоне действия тайфунов Neoguri (а–в) и Halong (г–е). Окружность отображает положение тайфуна. Цвет точек отмечает значение амплитуды колебаний ПЭС с периодом 2–20 мин. Синей линией показано положение вечернего терминатора на высоте ионосферы.

тикальному по формуле Клубучара [Клубучар, 1986]. После чего осуществлялась фильтрация методом скользящего среднего с окном 2–20 мин. Для построения распределений интенсивности ионосферных вариаций для каждого текущего временного отсчета на карту наносились положения ионосферных точек таким образом, чтобы цвет точки соответствовал текущему значению величины амплитуды отфильтрованных колебаний ПЭС на данном луче «приемник-спутник».

Экспериментальные результаты

На рисунке цветом показаны пространственные распределения интенсивности вариаций ПЭС в периоды действия ТЦ Neoguri (а–в) и ТЦ Halong (г–е). Представлены распределения, полученные в вечернее время (~21 LT), в момент прохождения над территорией Японии солнечного терминатора (положение терминатора отмечено на рисунках синей линией). Приведены примеры колебаний ПЭС в спокойные дни, в отсутствии циклонов (панели а, г рисунка), а также в дни выхода (панели б, д рисунка) и прохождения (панели в, е рисунка) тайфунов над сушей. Скорость ветра в ТЦ в рассматриваемые дни подписана на панелях. Окружностями нанесены области действия ТЦ. Положение и размер ТЦ определялись на основе данных метеоархива NCEP/NCAR Reanalysis (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/reanalysis/>).

Видно, что для обоих исследуемых циклонов, в периоды их выхода и прохождения над сушей интенсивность среднемасштабных вариаций ПЭС существенно возрастает (панели б, в, д, е рисунка). При этом область, в которой наблюдаются повышенные значения амплитуды колебаний ПЭС, расположена вблизи зоны действия тайфуна. Усиление интенсивности вариаций ПЭС начинает реги-

стрироваться во время прохождения вечернего терминатора в регионе и наблюдается в течение всей местной ночи, более 5–6 ч.

Аналогичный рост интенсивности возмущений ПЭС относительно величин, наблюдаемых в метеоспокойные дни, регистрировался также в моменты быстрой интенсификации ТЦ Neoguri и Halong – 4 июля и 1 августа, соответственно. Это согласуется с результатами, полученными в работе [Захаров, Куниц, 2012], в которой показано, что возбуждение АГВ в циклоне более эффективно происходит в моменты быстрого роста/спада интенсивности ТЦ, а также в периоды нахождения воздушных масс циклона над сушей.

Следует отметить, что в дневное время, а также после прохождения утреннего терминатора подобного увеличения интенсивности вариаций ПЭС не регистрировалось.

Заключение и обсуждение

Характеристики ночных среднемасштабных ионосферных возмущений широко обсуждаются в литературе [Tsugawa et al., 2007]. В работе [Afraimovich et al., 2009] была высказана одна из возможных причин генерации ионосферных возмущений – влияние солнечного терминатора. Было показано, что подобные возмущения наблюдаются регулярно, при этом их амплитуда достаточно мала: наиболее вероятное значение составляет ~0.15–0.2 TECU. На панелях а, г в отсутствии влияния тайфунов такие небольшие возмущения также наблюдаются. Однако в периоды действия ТЦ амплитуда этих вариаций значительно выше: ≥ 0.5 TECU. Стоит при этом отметить, что структура и направление распространения возмущений в дни действия тайфуна сходно с тем, что наблюдается в его отсутствии и типична для

колебаний, наблюдаемых при прохождении солнечного терминатора [Tsugawa et al., 2007; Afraimovich et al., 2009]. Кроме того, регистрируется достаточно большое число длин волн колебаний (до 5–10), что не характерно для АГВ такого масштаба [Hocke, Schlegel, 1996], а присуще для волн магнитогидродинамической природы, возбуждение которых происходит в период прохождения солнечного терминатора [Afraimovich et al., 2009]. Это свидетельствует о том, что основным источником генерации наблюдаемых возмущений остается солнечный терминатор. Однако, увеличение амплитуды колебаний в периоды действия ТЦ, указывает на существенное влияние тайфуна и, по всей вероятности, является проявлением взаимодействия на высотах ионосферы двух типов внутренних волн, сгенерированных различными источниками в нейтральной атмосфере.

Авторы признательны Агентству геопространственных данных Японии (Geospatial Information Authority of Japan – GSI) за данные сети GEONET, использованные в работе, а также центру изучения атмосферы National Centers for Environmental Prediction (NCEP) за метеоданные архива NCEP/NCAR Reanalysis. Работа выполнена в рамках гранта № НШ-2942.2014.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Захаров В.И., Куницын В.Е. Региональные особенности атмосферных проявлений тропических циклонов по данным наземных GPS-сетей // Геомагнетизм и аэронавигация. 2012. Т. 52, № 4. С. 562–574.

Полякова А.С., Первалова Н.П. Сравнительный анализ возмущений ПЭС над зонами действия тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 1. DOI:10.12737/6594.

Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Voeykov S.V., et al. Spatio-temporal structure of the wave packets generated by the solar terminator // Adv. Space Res. 2009. V. 44, N 7. P. 824–835.

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V., et al. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena // J. Space Weather Space Clim. 2013. V. 3. P. A27.

Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982–1995 // Ann. Geophys. 1996. V. 14. P. 917–940.

Hofmann-Wellenhof B. Global Positioning System: Theory and Practice / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger // J. Collins. New York. Springer-Verlag Wien. 1992. 327 p.

Huang Y.N., Cheng K., Chen S.W. On the detection of acoustic gravity waves generated by typhoon by use of real time HF Doppler frequency shift sounding system // Radio Sci. 1985. V. 20. P. 897–906.

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/

Miyazaki S., Hatanaka Y., Sagiya T., Tada T. The nationwide GPS array as an earth observation system, Bull // Geogr. Surv. Inst. 1998. V. 44. P. 11–22.

Polyakova A.S., Perevalova N.P. Investigation into impact of tropical cyclones on the ionosphere using GPS sounding and NCEP/NCAR Reanalysis data // Adv. in Space Res. 2011. V. 48. P. 1196–1210.

Tsugawa T., Kotake N., Otsuka Y., Saito A. Medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS receiver network in Japan: a short review // GPS Solutions. 2007, V. 11, n 2. P. 139–144.

ftp://terras.gsi.go.jp/data

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

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия