

УДК 550.388.2

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ
НАД ЗОНАМИ ДЕЙСТВИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ
В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА**

А.С. Полякова, Н.П. Первалова

**INVESTIGATION INTO TEC DISTURBANCES OVER TROPICAL CYCLONE ZONES
IN NORTH-WEST PACIFIC OCEAN**

A.S. Polyakova, N.P. Perevalova

На основе данных фазовых измерений наземными двухчастотными приемниками GPS и метеорологических данных архива NCEP/NCAR Reanalysis исследованы волновые возмущения полного электронного содержания (ПЭС) над зонами действия тропических циклонов (ТЦ). Исследование проводилось для шести циклонов различной мощности, действовавших в северо-западной части Тихого океана в сентябре–ноябре 2005 г. Показано, что в периоды максимального развития циклонов над зонами их действия в ионосфере наблюдается усиление интенсивности колебаний ПЭС различных диапазонов периодов. При этом амплитуда длиннопериодных колебаний превышает амплитуду короткопериодных более чем в два раза, однако динамика изменения интенсивности колебаний разных периодов совпадает. Наибольшая амплитуда вариаций ПЭС регистрируется, когда давление в центре ТЦ опускается до минимального значения, а площадь области пониженного давления максимальна. Интенсивность вариаций ПЭС оказывается выше, если в регионе действует несколько циклонов одновременно. Выявлено, что отклик ионосферы на ТЦ наблюдается только в те моменты, когда циклон достигает стадии тайфуна.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-3094.2010.5, Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт № 14.740.11.0078), Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-05-00113-а).

Wave disturbances of Total Electron Content (TEC) over tropical cyclones (TC) zones were investigated. The TEC data from international network of two-frequency ground-based GPS receivers and NCEP/NCAR meteorological archive data were used. The research was carried out for six different power cyclones acted in North-West Pacific ocean in September–November 2005. It is shown that intensification of wave TEC variation of different period ranges is observed during maximum cyclones stage. Long-period variation amplitude more than twice exceeds short-period variation one; however the dynamics of variation intensity changes coincides. The greatest TEC variation amplitude is registered when pressure in cyclone center has a minimal value and low-pressure area is maximal. The increase of TEC disturbance intensity appears more evident if several cyclones act in a region simultaneously. It is revealed that ionospheric response on TC is only observed when cyclone reaches the typhoon stage.

This work was supported by the Russian Federation President Grant МК-3094.2010.5, the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project 14.740.11.0078) and the RFBR Project No. 10-05-00113-a.

Введение

Тропические циклоны (ТЦ) представляют собой мощные вихревые структуры, зарождающиеся в тропосфере вблизи экватора. В развитии тропического циклона выделяют несколько стадий [Покровская, Шарков, 2006]: тропическая депрессия (скорость ветра в циклоне $V < 18$ м/с), тропический шторм ($V \approx 18–23$ м/с), сильный тропический шторм ($V \approx 23–33$ м/с), ураган ($V > 33$ м/с), внетропическое возмущение (область низкого приземного давления в умеренных широтах, $V < 15$ м/с). В юго-восточной Азии ТЦ в стадии урагана носят название тайфунов.

Исследование воздействия ТЦ на ионосферу проводилось с помощью измерений доплеровского сдвига частоты и фарадеевского вращения плоскости поляризации зондирующего сигнала [Huang et al., 1985; Xiao et al., 2007], вертикального и наклонного зондирования [Perevalova, Polekh, 2008; Черниговская и др., 2010] и GPS [Афраймович, Первалова, 2006; Бондур и др., 2008; Первалова и др., 2009, 2010; Polyakova, Perevalova, 2011]. Было показано, что тропические циклоны могут генерировать внутренние атмосферные волны, которые проявляются в ионосфере как перемещающиеся ионосферные возмущения с периодами от 2 до 90 мин. В настоящей работе продолжены исследования откликов ионосферы на ТЦ с помощью сравнительного анализа данных GPS и NCEP/NCAR Reanalysis, начатые в [Первалова и др., 2010; Polyakova, Perevalova,

2011]. На примере ураганов, действовавших вблизи Атлантического побережья США, в [Первалова и др., 2010; Polyakova, Perevalova, 2011] установлено, что в период наивысшей стадии развития ТЦ в ионосфере регистрируется увеличение амплитуды вариаций полного электронного содержания (ПЭС) с периодами 02–20 и 20–60 мин, при этом амплитуда длиннопериодных колебаний возрастает сильнее, чем короткопериодных. Наибольшее усиление вариаций ПЭС наблюдается в те моменты, когда скорость ветра в циклоне достигает максимального значения.

Данные и метод исследования

Исследование отклика ионосферы на ТЦ проводилось для шести циклонов различной мощности, действовавших в северо-западной части Тихого океана в сентябре–ноябре 2005 г.: Damrey (20–27.09.05), Saola (20–26.09.2005), Longwang (25.09–2.10.2005), Kirogi (10–19.10.2005), Tembin (7–11.11.2005), Bolaven (13–20.11.2005). Использовались данные по вариациям ПЭС, полученные на глобальной сети наземных двухчастотных приемников GPS (<http://sopac.ucsd.edu>), расположенных в зоне действия указанных циклонов. Исходные ряды данных фильтровались в двух диапазонах периодов: 02–20 и 20–60 мин. В [Первалова и др., 2010] было показано, что ионосферный отклик на ТЦ следует искать в спокойной геомагнитной обстановке в ве-

черные/ночные часы местного времени, когда отсутствует влияние экваториальной аномалии ионизации.

Для выявления ионосферных возмущений, связанных с действием ТЦ, был разработан метод картирования интенсивности возмущений ПЭС [Polyakova, Perevalova, 2011]. Метод заключается в том, что на карты распределения приземных метеорологических параметров наносятся координаты ионосферных точек лучей «приемник–спутник GPS». Размер каждой точки пропорционален абсолютному значению амплитуды колебаний ПЭС $dlI(t)$, зарегистрированному на данном луче в данный момент времени. Указанный метод позволяет оценить пространственную локализацию возмущений ПЭС в сравнении с распределениями метеорологических величин. Для построения карт метеопараметров использовались 6-часовые данные архива NCEP/NCAR Reanalysis (<http://www.esrl.noaa.gov/psd>).

Возмущения ПЭС в периоды действия циклонов

В период с 20 сентября по 3 октября в исследуемом регионе одновременно действовало три мощных циклона (рис. 1, а). ТЦ Damrey наблюдался с 20 сентября, 24 сентября ТЦ достиг стадии тайфуна, 25 сентября в циклоне регистрировалась наибольшая скорость ветра (около 45 м/с). ТЦ Saola возник 20 сентября, 22–25 сентября циклон находился в стадии тайфуна, максимальная скорость ветра в циклоне была зарегистрирована 24 сентября и превысила 50 м/с. ТЦ Longwang возник 25 сентября, в стадии тайфуна циклон пребывал с 27 сентября по 2 октября, наибольшая скорость ветра в циклоне (66 м/с) наблюдалась 29 сентября. Геомагнитная обстановка во время действия указанных циклонов была спокойной (данные о поведении индексов K_p и D_{st} получены на сайте [<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp>] и [<http://clust1.wdcb.ru/spidr/>]).

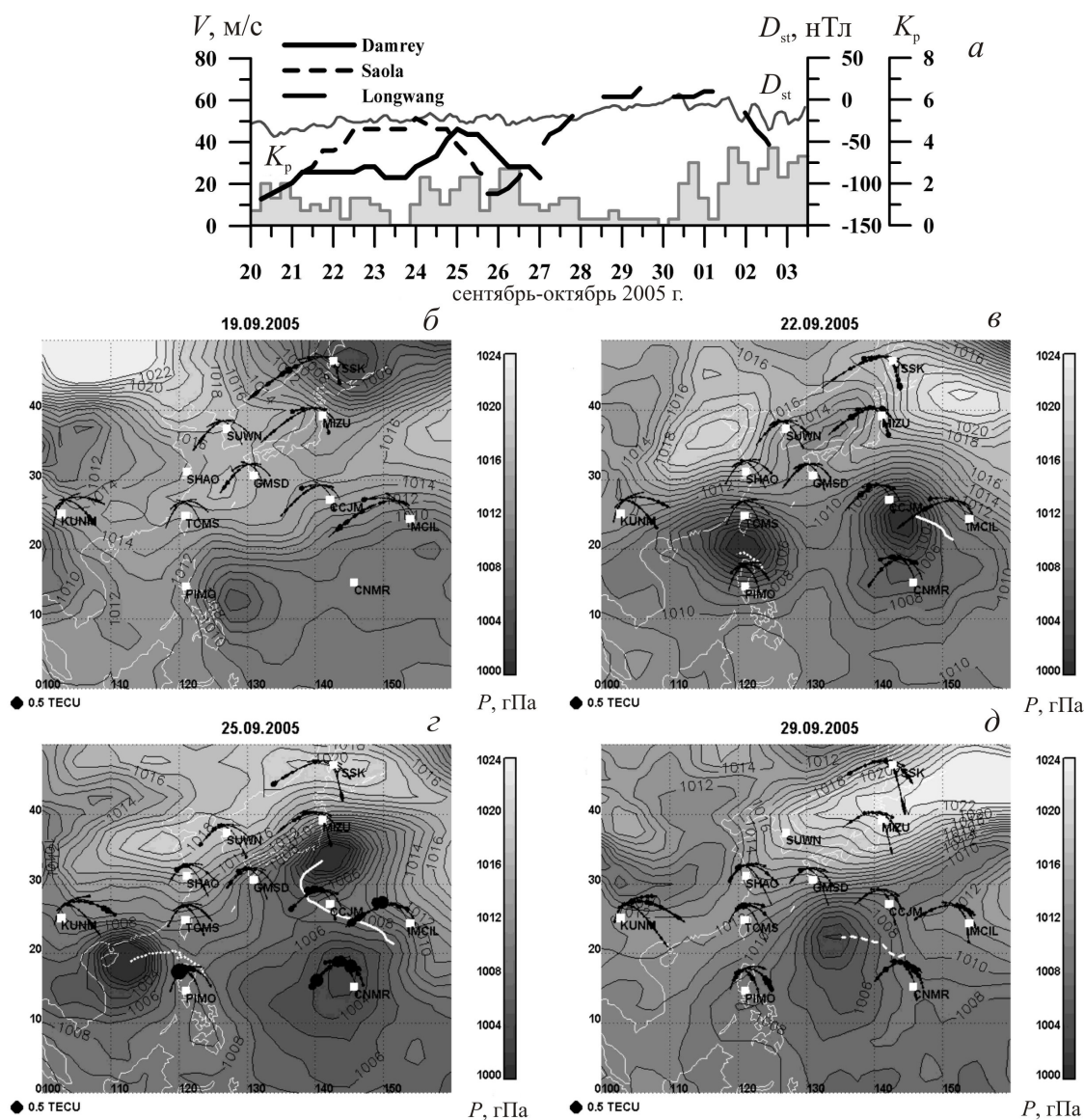


Рис. 1. Скорость ветра в ТЦ Saola, Damrey, Longwang и поведение индексов геомагнитной активности в период действия циклонов (а). Пространственно-временное распределение интенсивности колебаний ПЭС с периодами 02–20 мин (черные линии переменной толщины) в зоне действия трех ТЦ (б–д). Заливкой показано распределение приземного давления P по данным NCEP/NCAR Reanalysis. Толстыми белыми линиями изображены траектории циклонов с момента зарождения до указанной даты: сплошная – ТЦ Saola, короткие штрихи – ТЦ Damrey, длинные штрихи – ТЦ Longwang. Квадратами отмечено положение станций GPS.

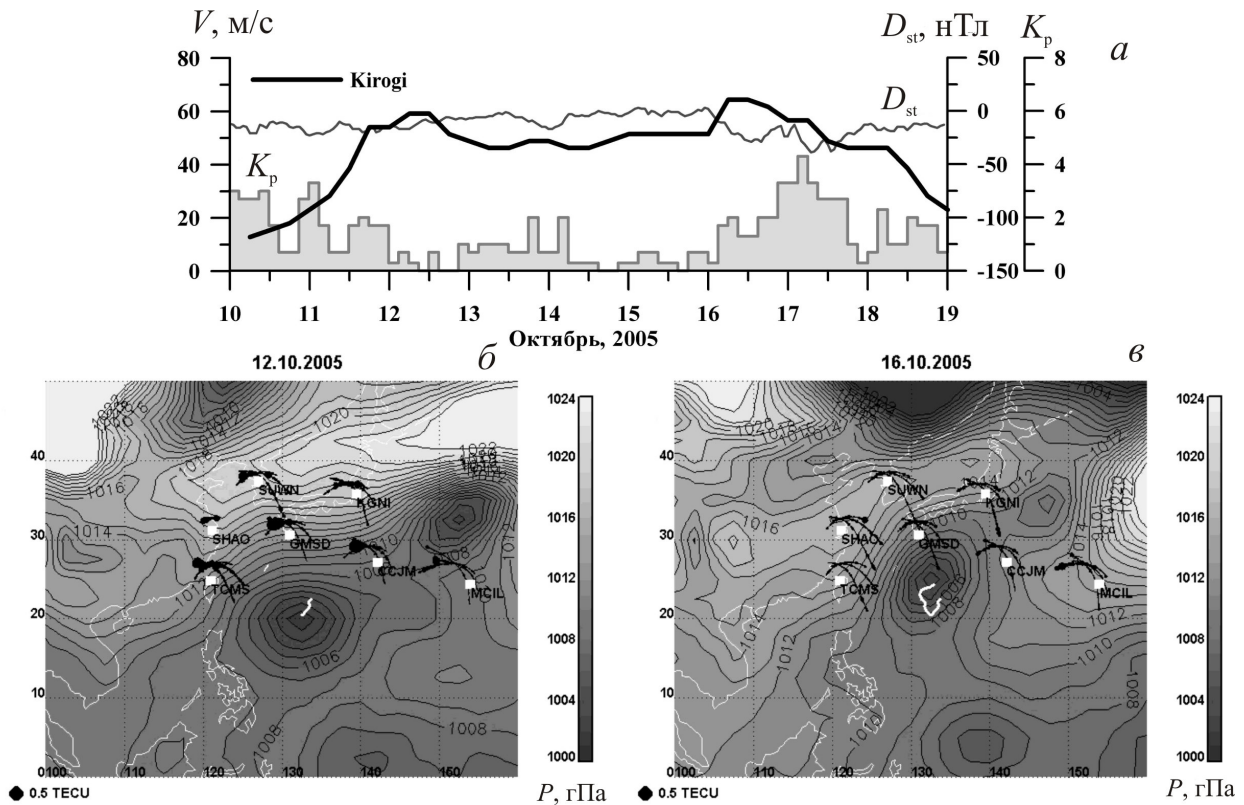


Рис. 2. Скорость ветра в ТЦ Кироги и поведение индексов геомагнитной активности в период действия циклона (а). Пространственно-временное распределение интенсивности колебаний ПЭС с периодами 02–20 мин (черные линии переменной толщины) в зоне действия циклона (б–в). Заливкой показано распределение приземного давления P по данным NCEP/NCAR Reanalysis. Толстая белая линия отображает траекторию циклона с момента зарождения до указанной даты. Квадратами отмечено положение станций GPS.

На рис. 1, б–д показана пространственно-временная динамика колебаний ПЭС с периодами 02–20 мин и вариации приземного давления (сплошная заливка) в период действия указанных циклонов. Черными линиями переменной толщины нанесены траектории ионосферных точек для спутников PRN02, PRN04, PRN10, наблюдавшихся в вечернее/ночное время на одиннадцати станциях GPS. В левом нижнем углу каждой панели в качестве масштаба показан круг, соответствующий $|dI(t)| = 0.5 \text{ TECU}$ ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$). Наиболее спокойной была метеорологическая обстановка в регионе 19 сентября. Амплитуда колебаний ПЭС в этот день на всех станциях незначительна (рис. 1, б). Усиление амплитуды вариаций ПЭС на станциях, расположенных вблизи центра циклона (CNMR, CCJM, MIZU, рис. 1, в), регистрировалось 22 сентября, когда ТЦ Saola достиг стадии тайфуна. Максимальная амплитуда вариаций ПЭС, превышающая амплитуду флуктуаций ПЭС в спокойных условиях более чем в два раза, наблюдалась 25 сентября, когда в регионе одновременно действовало три циклона, два из которых находились на максимальной стадии развития (рис. 1, г). При этом амплитуда вариаций ПЭС была наибольшей на тех станциях, которые находились ближе к зонам действия ТЦ (CNMR, CCJM, MIZU, PIMO). Двадцать девятого сентября, когда скорость ветра в ТЦ Longwang достигла максимального значения, повышенные значения амплитуды вариаций ПЭС регистрировались на станциях, расположенных вблизи центра ТЦ. Однако

интенсивность возмущений ПЭС оказалась меньше, чем 25 сентября. На остальных станциях величина амплитуды колебаний ПЭС опустилась до невозмущенного уровня (рис. 1, д).

Динамика изменения интенсивности колебаний ПЭС с диапазоном 20–60 мин повторяла динамику колебаний с периодом 2–20 мин, однако амплитуда длиннопериодных колебаний превышала амплитуду короткопериодных более чем в два раза, что соответствует результатам, полученным в [Перевалова и др., 2010; Polyakova, Perevalova, 2011].

ТЦ Кироги возник 10 октября, в стадии тайфуна циклон находился с 11 по 18 октября. Циклон имел два пика скорости ветра (рис. 2, а): 60 м/с (12 октября) и 65 м/с (16 октября). На рис. 2, б–в показаны пространственно-временная динамика колебаний ПЭС с периодами 02–20 мин и вариации приземного давления (сплошная заливка) во время действия циклона. Наибольшая амплитуда колебаний ПЭС регистрировалась 12–14 октября, когда скорость ветра в ТЦ была высокой, давление в центре циклона имело минимальное значение, а область пониженного давления охватывала максимальную площадь (рис. 2, б). Несмотря на новое увеличение скорости ветра в ТЦ (до 65 м/с), 16 октября усиления интенсивности возмущений ПЭС не зарегистрировано (рис. 2, в). Вероятно, это связано с тем, что давление в центре циклона в этот день оставалось высоким.

ТЦ Tembin и Volaven наблюдались 7–12 и 13–20 ноября соответственно. ТЦ Tembin не достиг стадии тайфуна. В период действия этого циклона

не удалось выявить заметного увеличения интенсивности возмущений ПЭС. ТЦ Volaven в стадии тайфуна находился 17–18 ноября, максимальная скорость ветра в циклоне составила 38 м/с. Усиление колебаний ПЭС было зарегистрировано 17–18 ноября на станциях, расположенных вблизи центра циклона.

Полученные результаты согласуются с данными работ [Perevalova, Polekh, 2008; Первалова и др., 2009], зарегистрировавших усиления интенсивности колебаний критической частоты и высоты основания слоя F2 с периодами 1.5–6 ч и возмущений ПЭС с периодами 60–90 мин в период наивысшего развития ТЦ Damrey, Saola, Longwang. Сравнительный анализ вариаций ПЭС и карт метеопараметров позволяет сделать вывод, что наблюдаемые возмущения ионосферных параметров обусловлены воздействием ТЦ.

Заключение

На основе сравнительного анализа интенсивности волновых возмущений ПЭС и поведения метеорологических параметров во время действия шести ТЦ различной мощности было выявлено, что в периоды максимального развития циклонов над зонами их действия в ионосфере наблюдается усиление интенсивности колебаний ПЭС различных диапазонов периодов. При этом амплитуда длиннопериодных колебаний превышает амплитуду короткопериодных. Увеличение интенсивности колебаний ПЭС регистрируется только тогда, когда циклон достигает стадии тайфуна. Наибольшая амплитуда возмущений ПЭС наблюдается, когда скорость ветра в ТЦ максимальна, а давление в центре циклона опускается до минимального значения. Интенсивность вариаций ПЭС оказывается выше, если в регионе действует несколько циклонов одновременно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.

Бондур В.Г., Пулинец С.А., Узунов Д. Воздействие крупномасштабных атмосферных вихревых процессов на ионосферу на примере урагана Katrina // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 6. С. 3–11.

Первалова Н.П., Полех Н.М., Воейков С.В. Исследование связи ионосферных возмущений в Восточно-Сибирском и Дальневосточном регионах с циклонической активностью // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сборник научных статей. М.: ООО «Азбука-2000». 2009. Вып. 6, Т. 2. С. 287–295.

Первалова Н.П., Полякова А.С., Ишин А.Б., Воейков С.В. Исследование волновых возмущений ионосферной плазмы по данным дистанционного зондирования во время урагана Katrina // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 1. С. 190–200.

Покровская И.В., Шарков Е.А. Тропические циклоны и тропические возмущения Мирового океана. Версия 3.1 (1983–2005). М.: Полиграф-сервис, 2006. 728 с.

Черниговская М.А., Куркин В.И., Орлов И.И. и др. Исследование связи короткопериодных временных вариаций параметров ионосферы в северо-восточном регионе России с проявлениями тропических циклонов // Исследования Земли из космоса. 2010. № 5. С. 32–41.

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.

Perevalova N.P., Polekh N.M. An investigation of the upper atmosphere response to cyclones using ionosonde data in Eastern Siberia and the Far East // Proceedings of SPIE. 2008. V. 7296. P. 72960J.

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

Xiao Z., Xiao S., Hao Y., Zhang D. Morphological features of ionospheric response to typhoon // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. A04304. doi:10.1029/2006JA011671.

<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp>

<http://clust1.wdcb.ru/spidr>

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск