

Изменения интенсивности волновых вариаций ПЭС различных периодов во время действия тропических циклонов

А. С. Ясюкевич¹, А. М. Падохин^{2,*}, А. А. Мыльникова¹, Ю. В. Ясюкевич^{1,3}, С. В. Воейков¹, Н. А. Терешин²

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Россия,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 126а, а/я 291

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики атмосферы
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

³Иркутский государственный университет, физический факультет
Россия, 664003, г. Иркутск, бульвар Гагарина, д. 20

(Статья поступила 09.02.2018; Подписана в печать 12.03.2018)

Представлены результаты исследования вариаций полного электронного содержания (ПЭС) во время действия интенсивных тропических циклонов, наблюдавшихся в конце августа–начале октября 2016 г. в Северо-западной акватории Тихого океана. Показано, что на станциях, расположенных вблизи региона действия циклонов, регистрируется увеличение интенсивности волновых вариаций ПЭС, соответствующих периодам внутренних гравитационных волн. Наиболее существенное возрастание амплитуды волновых вариаций наблюдается для колебаний малого и среднего масштабов (2–50 мин), преимущественно, в дневное время. Для колебаний с большими периодами (до 4 ч) усиление интенсивности вариаций ПЭС наблюдается, преимущественно, в утренние и вечерние часы местного времени, в периоды прохождения солнечного терминатора. Сделано предположение о взаимодействии ионосферных возмущений, сгенерированных тропическими циклонами и движением солнечного терминатора, кратко обсужден возможный механизм такого взаимодействия.

PACS: 94.20.-y

УДК: 533.9

Ключевые слова: полное электронное содержание, тропические циклоны, ионосферные возмущения, глобальные навигационные спутниковые системы.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению атмосферно-ионосферных связей, в том числе обнаружению и анализу ионосферных эффектов, источники которых находятся в нейтральной атмосфере, постоянно возрастает. Это обусловлено все повышающейся необходимостью учета тонких эффектов, определяющих состояние ионосферы, как в теоретических, так и прикладных задачах. Современные исследования показывают, что нестационарные процессы в нижней атмосфере могут оказывать значительное влияние на поведение электронной концентрации ионосферы. Изменчивость ионосферных параметров, вызванная влиянием метеорологических факторов, в спокойных геомагнитных условиях может достигать до 35% от фонового уровня ионизации [1].

Считается, что основным механизмом передачи энергии возмущения от нижней нейтральной атмосферы на ионосферные высоты являются внутренние атмосферные волны различных масштабов (приливы, планетарные волны, внутренние гравитационные волны (ВГВ)) [2]. Так известно, что ВГВ, при благоприятных условиях могут достигать высот ионосферы и вызывать там возмущения электронной концентрации, проявляющиеся как перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) [3]. Источниками ВГВ могут являться разнообразные нестационарные процессы в нейтральной

атмосфере: струйные течения, торнадо, атмосферные фронты и т.д.

Тропические циклоны (ТЦ) представляют собой высокоорганизованные и энергичные структуры, которые, вследствие развития процессов атмосферной турбулентности и конвекции, могут генерировать гравитационные волны различного масштаба. В экспериментальных [4–6] и теоретических работах [7–8] показано, что над тропическими циклонами в области мезосферы/нижней термосферы могут существовать гравитационные волны с периодами от 2 мин до 6 ч и длинами волн от 15 до 1000 км. Кроме этого, в мезосфере/нижней термосфере возможно возбуждение вторичных внутренних гравитационных волн вследствие поглощения на этих высотах мелкомасштабных и среднемасштабных волн, сгенерированных в нижней атмосфере циклоном [8].

Волновые возмущения в ионосфере над зонами действий тропических циклонов с периодами от 2 до 90 мин регистрировались различными радиофизическими методами [9–14]. Возмущения оказывались более интенсивными, когда циклон достигал побережья или находился над материком [9], а размер области, в которой наблюдался рост интенсивности ионосферных вариаций, достигал 2000 км от циклона [14]. В работе [11] показано, что ионосферные возмущения, связываемые с действием тропического циклона, распространялись преимущественно против направления фонового ветра на высоте ионосферы, что является свидетельством связи этих возмущений с распространением ВГВ в среде.

*E-mail: padokhin@physics.msu.ru

Развитие технологий зондирования ионосферы сигналами глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), таких как GPS и ГЛОНАСС, позволило получить новые сведения об ионосферной реакции на прохождение ТЦ. На основе GPS-интерферометрии [15] установлено, что генерация волновых возмущений, связанных с ТЦ, возможна в период обтекания береговой линии воздушными массами циклона; причем возбуждение происходит более эффективно в моменты быстрого роста/спада интенсивности циклона. Использование данных плотной сети приемников GPS в регионе острова Тайвань, позволило получить пространственные карты перемещающихся ионосферных возмущений во время прохождения тайфунов Nepartak и Meranti [16–17].

В настоящей работе проведено исследование вариаций ионосферных параметров во время трех интенсивных тайфунов, наблюдавшихся в конце августа - сентябре 2016 г. в Северо-западной акватории Тихого океана. Особенностью данного исследования является то, что одновременно анализировались интенсивности ионосферных вариаций для различных периодов.

1. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Исследование состояния ионосферы в период действия ТЦ проводилось на основе данных полного электронного содержания (ПЭС), определяемого по фазовым двухчастотным измерениям GPS/ГЛОНАСС приемниками международной сети IGS [18]. Для исследования выбрано 10 приемных станций, находящихся в регионе действия тайфунов. Критерием для отбора станций являлось наличие длинного ряда измерений с наименьшим количеством пропусков в данных.

Для выделения ионосферных возмущений, связанных с действием ТЦ, рассчитывались индексы ионосферной возмущенности, отражающие интенсивность ионосферных вариаций с периодами внутренних гравитационных волн малого и среднего (до 50 мин), а также крупного (0.5–4 ч) масштабов.

Из исходных данных ПЭС рассчитывались ряды «вертикального» ПЭС $I_V(t)$ по методике, подробно описанной в [19]. Используемая модель ПЭС представляет собой разложение вертикального ПЭС в ряд Тейлора второго порядка в точке над станцией. Достоинством данной методики является то, что она позволяет получать длительные ряды вертикального ПЭС с корректным учетом дифференциальных кодовых задержек. Временное разрешение получаемых данных ПЭС составляет 15 мин.

В качестве показателя, характеризующего уровень ионосферной возмущенности, выбран коэффициент вариаций $vrTEC$, представляющий собой нормированную дисперсию ПЭС в заданное время:

$$vrTEC(t) = \frac{\sqrt{\langle (I_V(t) - \langle I_V \rangle)^2 \rangle}}{\langle I_V \rangle} \cdot 100\% \quad (1)$$

где $\langle I_V \rangle$ — усреднение вертикального ПЭС, которое проводилось на четырехчасовом временном интервале. Таким образом, из (1) следует, что изменения коэффициента $vrTEC$ описывают вариации ПЭС с периодами $0.5 < T < 4$ ч. Источником вариаций параметров ионосферы с периодами несколько часов, в основном, являются ПИВ, связанные с распространением ВГВ. Таким образом, коэффициент $vrTEC$ отражает уровень ВГВ-возмущенности в ионосфере. Аналогичный подход использовался, в частности, в работах [20–21] для изучения сезонной динамики ВГВ, на основе данных ПЭС и foF2.

Для оценки интенсивности ионосферных вариаций с меньшими периодами в работе использовался индекс W_{tec} , который рассчитывается путем построения многодневных рядов усредненного модуля амплитуды колебаний ПЭС по измерениям на одной двухчастотной приемной станции GPS/ГЛОНАСС [22]. Отсечка по углу места спутника для исходных измерений ПЭС составляла 15° . Для получения значений индекса W_{tec} исходные данные ПЭС, полученные на отдельном луче спутник-приемник, фильтруются в заданном диапазоне периодов (нами рассматривались вариации ПЭС с периодами 2–50 мин). Затем проводится усреднение модулей амплитуды полученных вариаций ПЭС (dI) по всему набору спутников (N), видимых на станции в данный момент времени:

$$W_{tec}(t) = \sum_N dI(t) \quad (2)$$

В результате получается непрерывный ряд значений усредненной интенсивности ионосферных колебаний в ограниченном радиусе ~ 1000 км. над выбранной станцией.

В рассматриваемый период имелась также возможность проведения исследования вариаций ПЭС на основе сигналов геостационарных навигационных спутников. Подионосферная точка для геостационарных спутников практически неподвижна, что является преимуществом для непрерывного мониторинга параметров ионосферы, прежде всего ПЭС, вдоль заданного направления спутник - приемник. Использование геостационарных спутников наиболее оправдано в приэкваториальных широтах, где их углы возвышения близки к максимальным. В работе использовались измерения, полученные с помощью китайской навигационной системы COMPASS/BeiDou. Как показано в [23], оценки ПЭС по двухчастотным фазовым измерениям сигналов геостационарных спутников данной системы обладают наилучшими шумовыми характеристиками среди всех доступных в настоящее время геостационарных систем (положения подионосферных точек спутников показаны черными кругами на рис. 1).

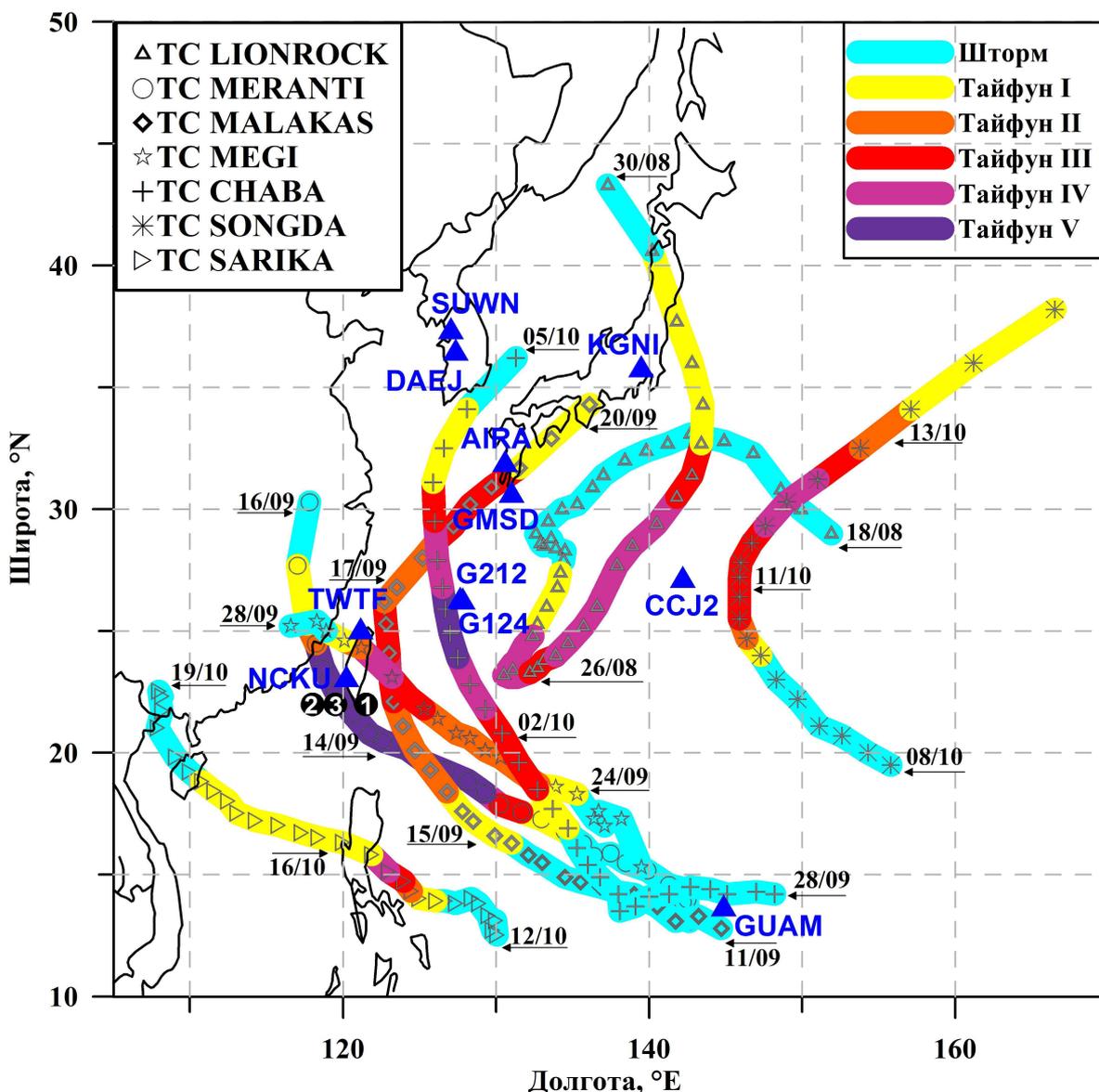


Рис. 1: Траектории исследуемых циклонов (различные символы). Разными цветами обозначены стадии интенсивности циклона. Синие треугольники отображают положение приемников ГНСС, используемых в исследовании. Черными кругами с соответствующими номерами показаны положения подионосферных точек для геостационарных спутников COMPASS/BeiDou C1, C2 и C3

Временное разрешение исходных данных 30 с. Обработка исходных данных осуществлялась по следующей методике:

1. по фазовым измерениям, аналогично GPS/ГЛОНАСС, рассчитывались значения относительного наклонного ПЭС [23,24]; скачки ПЭС, вызванные срывами сопровождения фазы, устранялись исходя из условия непрерывности ПЭС, пропуски данных (в случае отсутствия наблюдений менее 15 мин) интерполировались с использованием кубических сплайнов;
2. производилось удаление низкочастотной ком-

поненты изменчивости ПЭС с использованием фильтра Савицкого-Голая с шириной окна 90 мин и весовой функцией третьего порядка [25];

3. рассчитывался локальный спектр вариаций ПЭС в диапазоне периодов 5-50 мин с использованием вейвлета Морле [26].

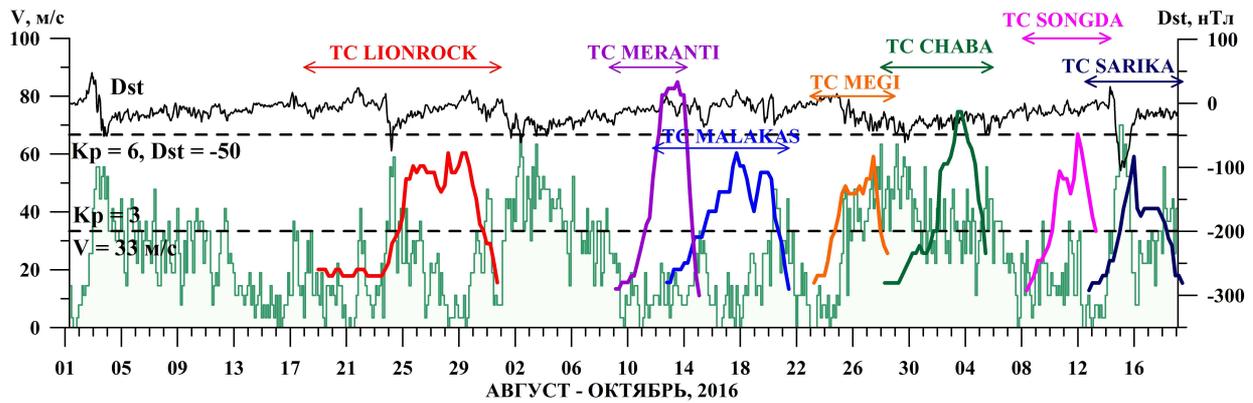


Рис. 2: Вариации скорости ветра в циклонах (цветные линии), а также геомагнитных индексов Dst (черная линия) и Kp (столбчатая диаграмма)

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

Рассматриваемый в работе период характеризовался большим количеством тропических циклонов, возникавших в Северо-западной акватории Тихого океана один за другим и достигавших высокой интенсивности. Рассмотрено шесть тропических циклонов, наблюдавшихся в регионе в конце августа–октябре 2016 г. Указанные циклоны во время своей эволюции достигали стадии тайфуна (т.е. скорость ветра в ТЦ превышала 33 м/с). Данные об эволюции и движении ТЦ получены с сервиса National Environmental Satellite Data and Information service NOAA [27]. Траектории движения ТЦ показаны на рис. 1, а распределения скоростей ветра в циклонах приведены на рис 2.

Тайфун Lionrock действовал вблизи побережья Японии в период с 18 по 30 августа 2016 г. Отличительными особенностями данного тропического циклона (ТЦ) являлись большая продолжительность его существования, а также нетипичная траектория движения при высокой интенсивности тайфуна (скорость ветра в тайфуне V_{max} достигала 60 м/с). Тайфун Meranti действовал в регионе 8–16 сентября и явился одним из самых мощных тайфунов за всю историю наблюдения — циклон находился в наивысшей пятой категории более двух суток (скорость ветра в циклоне достигала 85 м/с). Тайфун Chaba (28 сентября – 5 октября) также достигал 5 категории 3 октября, однако его интенсивность была ниже (до 75 м/с). ТЦ Malakas наблюдался в период 11–22 сентября с максимальной скоростью ветра до 60 м/с. Также в рассматриваемый период наблюдались циклоны Megi (23–28 сентября, $V_{max} = 59$ м/с), Songda (8–13 октября, $V_{max} = 66$ м/с) и Sarika (12–19 октября, $V_{max} = 59$ м/с).

Отметим, что воздушные массы ТЦ Malakas, Chaba и Lionrock совершили выход на сушу в регионе Японии, при этом циклоны находились в стадии тайфуна. Тайфуны Meranti и Megi в наивысшей фазе развития (тайфун 5 и 4 категории, соответственно) пересекли

территорию острова Тайвань, а затем достигли побережья Китая. Траектория ТЦ Songda проходила только над акваторией океана, данный циклон не совершил выхода на сушу.

Значительное влияние на интенсивность волновых вариаций ионосферной плазмы оказывают возмущения геомагнитного поля Земли и связанные с ними процессы. Поэтому оценка уровня геомагнитной активности является обязательным условием при проведении исследований влияния прочих источников на ионосферу. На рис. 2 приведены распределения индексов геомагнитной активности, характеризующих геомагнитную обстановку во время действия рассматриваемых циклонов [28]. В период существования ТЦ Meranti, Malakas и ТЦ Songda геомагнитные условия были спокойными: значения индекса Kp не превышали 3, а величина индекса Dst составляла более 50 нТл. Время существования циклонов Lionrock, Megi и Chaba совпадало с геомагнитными возмущениями умеренной интенсивности. Изменения состояния ионосферы во время действия этих циклонов следует рассматривать с особым вниманием. Также отметим, что в период действия ТЦ Sarika была зарегистрирована геомагнитная буря (14 октября, $Dst < -100$ нТл), поэтому возможные ионосферные вариации в этот период не могут быть интерпретированы как воздействие циклона.

3. ВАРИАЦИИ ПЭС В ДИАПАЗОНЕ 2–50 МИН

На рис. 3 приведены вариации индекса Wtec (цветная заливка), величина которого отображает среднюю интенсивность волновых вариаций ПЭС в диапазоне периодов 2–50 мин над определенной станцией. Также на панелях нанесены изменения индекса Kp (серая гистограмма) и скорости ветра в циклонах (розовые кривые). По вертикальной шкале отложено местное время, по горизонтальной — дни с августа по октябрь 2016 г.

Видно, что в течение сентября–октября наблюдает-

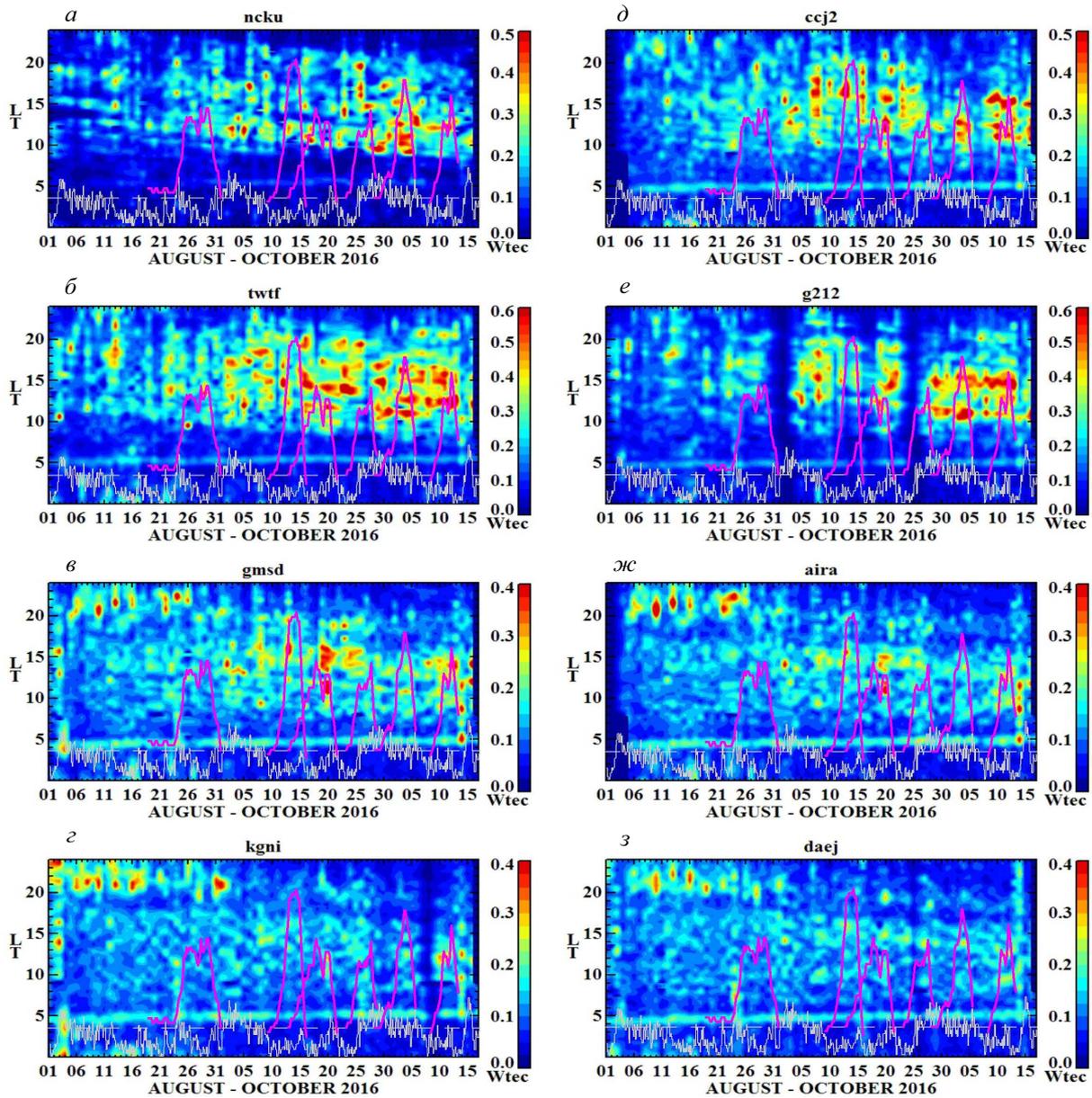


Рис. 3: Вариации индекса Wtec (цветная заливка) для разных приемников ГНСС, представленных на рис. 1; вариации геомагнитного индекса Kp (серая гистограмма) и скорости ветра в циклонах (розовые кривые). Горизонтальным пунктиром отмечен уровень Kp=3

ся существенное увеличение интенсивности волновых вариаций ПЭС на станциях, расположенных вблизи региона действия тайфунов. Наибольший рост, при этом, регистрируется в дневное время. Отметим, что изменения величины индекса волновых вариаций, регистрирующиеся в дни геомагнитных возмущений (например, 31 августа – 8 сентября, 25 сентября – 6 октября), связаны, скорее всего, с геомагнитной обстановкой. Однако повышенные значения амплитуды вариаций ПЭС наблюдаются также в геомагнитно спокойные периоды — во время ТЦ Meranti, Malakas и Songda. Наиболее интенсивные вариации регистрируются на

станциях, расположенный в области радиусом порядка 2000 км, где рассматриваемые циклоны находились в максимальной стадии развития ($\sim 120 - 140^\circ\text{E}$, $20 - 30^\circ\text{N}$). На станциях GMSD и AIRA (рис. 3, в, ж) изменения интенсивности вариаций ПЭС менее выражены, а на более удаленных станциях KGNI, DAEJ (рис. 3, г, з) и SUWN (не показана) роста величины Wtec не наблюдается. Таким образом, для тайфунов, действовавших в спокойной геомагнитной обстановке, отчетливо наблюдается увеличение амплитуды колебаний ПЭС в диапазоне периодов ВГВ малого и среднего масштабов в области до 2000 км от траектории

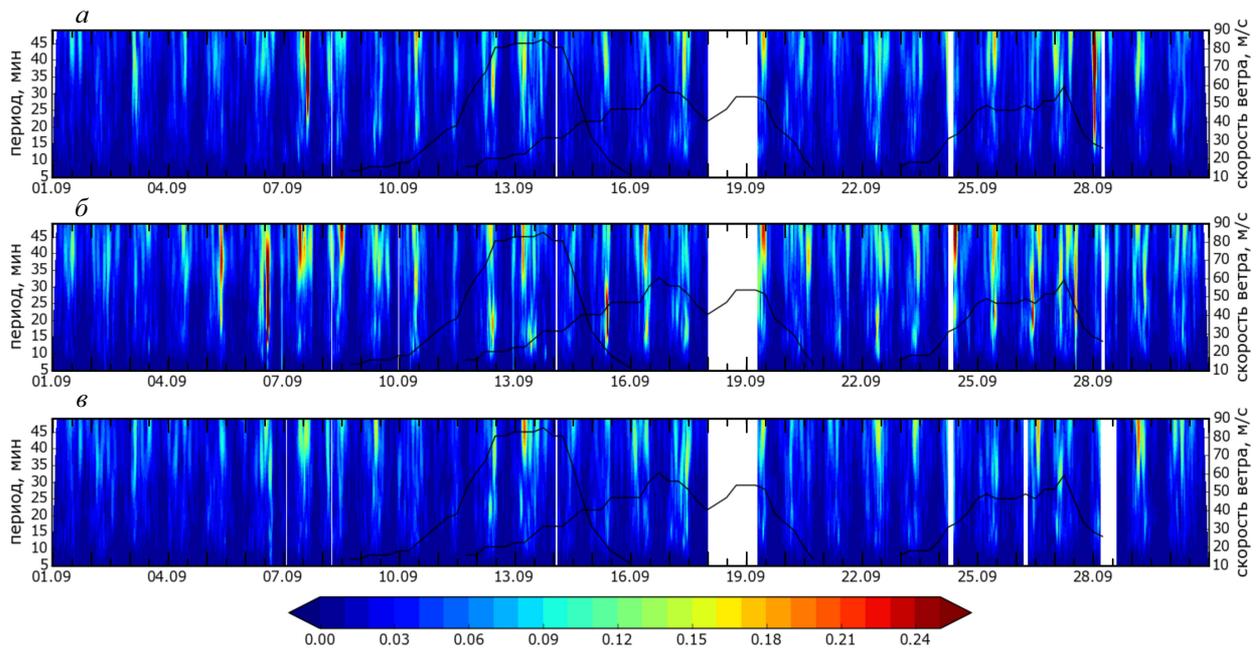


Рис. 4: Вейвлет-спектры вариаций ПЭС по данным сигналов геостационарных спутников COMPASS/BeiDou C01 (а), C02 (б) и C03 (в) на станции NCKU. Черные кривые на панелях показывают изменения скорости ветра в ТЦ Meranti, Malakas и Megi

циклона. Это соответствует результатам, полученным в работах [14, 29].

На рис. 4 цветной заливкой показаны вейвлет-спектры вариаций ПЭС, полученные на основе сигналов геостационарных спутников для станции NCKU. Приведены результаты для спутников COMPASS/BeiDou C01, C02 и C03 (рис. 4,а-в, соответственно). Данные рассчитаны для диапазона дней 1–30 сентября, белые области соответствуют случаям отсутствия данных. В этот период наблюдалось три тайфуна: ТЦ Meranti, ТЦ Malakas и ТЦ Megi. Траектории тайфунов пролегли вблизи станции NCKU (рис. 1).

Как и для индекса W_{tes} , в вейвлет-спектрах вариаций ПЭС наблюдается существенное усиление амплитуды колебаний 5–8, 20–21 и 27–30 сентября, в геомагнитно-возмущенные дни. Наиболее сильное увеличение амплитуды при этом наблюдается для колебаний с периодами > 25 мин. Интересно также отметить, что 1–4 сентября, в период наиболее сильных возмущений геомагнитного поля, в спектрах ПЭС не регистрировался рост интенсивности вариаций.

Увеличение амплитуды колебаний ПЭС наблюдается также в спокойной геомагнитной обстановке, в дни максимумов ТЦ Meranti, ТЦ Malakas и ТЦ Megi (12–13, 15–17 и 24–26 сентября). Как и для индекса W_{tes} этот рост регистрируется преимущественно в дневное время. В целом, интенсивность колебаний ПЭС во время тайфунов ниже, чем в геомагнитно-возмущенные периоды. Однако отметим, что во время действия циклонов на спутниках C02 и C03, в отличие от дней геомагнитных возмущений, наблюдается также уси-

ние более короткопериодных вариаций (в диапазоне 10–25 мин). Это, в целом, согласуется с результатами, полученными в работе [16], в которой авторы зарегистрировали увеличение колебаний ПЭС с периодами 8–20 мин во время прохождения ТЦ Meranti над территорией о. Тайвань (12–13 сентября).

4. ВАРИАЦИИ ПЭС В ДИАПАЗОНЕ 0,5-4 ЧАСА

На рис. 5 приведены вариации индекса v_{rTEC} (цветная заливка), величина которого отображает интенсивность ВГВ крупного масштаба (0,5–4 ч) над определенной станцией. Также на панелях нанесены изменения индекса K_p (серая гистограмма) и скорости ветра в циклонах (розовые кривые). По вертикальной шкале отложено местное время, по горизонтальной — дни с августа по октябрь 2016 г.

Видно, что в среднем уровень ВГВ-возмущенности ПЭС для рассматриваемых периодов составляет около 5–7%. Значительное усиление уровня возмущенности во все дни регистрируется около 05 ч и 20 ч местного времени (LT) и связано с прохождением солнечного терминатора. В работе [30] показано, что движение солнечного терминатора является источником генерации отдельного вида ионосферных возмущений — волновых пакетов, проявляющиеся в форме узкополосных колебаний ПЭС, а также был предложен механизм генерации возмущений. Интенсивность этих возмущений в индексе v_{rTEC} составляет 35–40%, а продолжительность — около 2-х часов.

Во время действия тайфунов регистрируется увели-

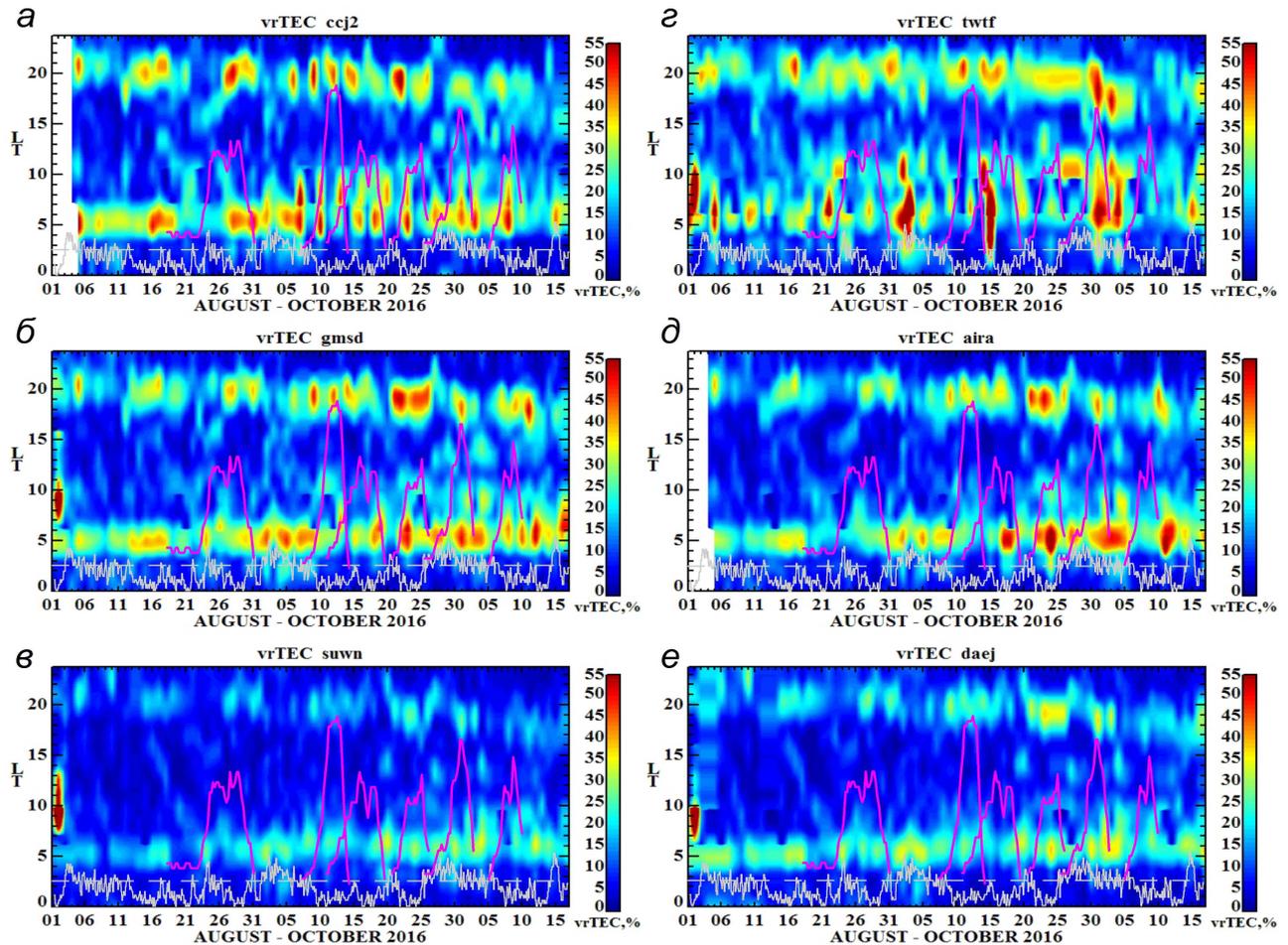


Рис. 5: Вариации индекса $vrTEC$ (цветная заливка), геомагнитного индекса K_p (серая гистограмма) и скорости ветра в циклонах (розовые кривые). Горизонтальным пунктиром отмечен уровень $K_p=3$

чение уровня ВГВ-возмущенности ПЭС как в утренние (более 50%), так и в вечерние часы. Это увеличение наиболее выражено на станциях, расположенных в регионе прохождения циклонов (рис. 5, *a, б, в*). В утреннее время также наблюдается возникновение второго пика интенсивности вариаций ПЭС, около 07–09 ЛТ. На станциях, расположенных на большем удалении от траектории циклонов, величина наблюдаемых изменений уровня ВГВ-возмущенности ниже (рис. 5, *д*), либо эти изменения вообще не регистрируются (рис. 5, *е, е*).

Данный результат указывает на возможное взаимодействие ионосферных возмущений, сгенерированных двумя различными источниками: тропическими циклонами и движением солнечного терминатора. В работе [31] показано, что движение солнечного терминатора порождает в ионосфере волны магнитогидродинамического типа. Амплитуда этих волн зависит, в том числе, от градиента плотности заряженной компоненты среды, в которой распространяется волна. Резкие градиенты фоновой электронной плотности могут приводить к росту амплитуды волны. С другой сторо-

ны, тропические циклоны являются источником ВГВ, проявляющихся в ионосфере в виде перемещающихся ионосферных возмущений. Такие возмущения приводят к возрастанию градиентов электронной концентрации ионосферы. Таким образом, в периоды действия ТЦ действительно можно ожидать возрастания интенсивности ионосферных колебаний, сгенерированных прохождением солнечного терминатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование вариаций ПЭС во время действия шести интенсивных тайфунов, наблюдавшихся в конце августа – начале октября 2016 г. в Северо-западной акватории Тихого океана. Одновременно анализировались ионосферные вариации различных периодов. Показано, что на станциях, расположенных в регионе до 2000 км от ТЦ, наблюдается увеличение интенсивности волновых вариаций ПЭС. При этом более существенное возрастание амплитуды волновых

вариаций регистрируется для колебаний малого и среднего масштабов (2–50 мин) и наблюдается, преимущественно, в дневное время. В спектрах вариаций ПЭС во время максимальной фазы тайфунов на отдельных лучах отмечено также усиление вариаций с периодами 10–20 мин, не наблюдаемое в периоды геомагнитных возмущений. Для колебаний с большими периодами (до 4ч) усиление интенсивности вариаций ПЭС наблюдается, преимущественно, в утренние и вечерние часы местного времени. Данный результат указывает на возможное взаимодействие ионосферных возмущений, сгенерированных тропическими циклонами и движением солнечного терминатора. Механизмом такого взаимодействия может являться возрастание градиентов электронной концентрации ионосферы, вызванное ВГВ, распространяющимися от циклона. Рост градиентов фоновой электронной плотности приводит к уве-

личению амплитуды магнитогидродинамических волн, сгенерированных движением солнечного терминатора, что в свою очередь, отражается в вариациях ПЭС.

Авторы признательны рецензенту за полезные замечания, позволившие повысить качество статьи. Авторы выражают благодарность International GNSS Service за доступ к данным ГНСС, использованным в настоящем исследовании; National Environmental Satellite Data and Information service NOAA за информацию об эволюции тропических циклонов, а также сервису OMNIWeb Plus NASA/Goddard Space Flight Center за данные геомагнитных индексов.

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 16-35-00027 и 16-35-00607. Исследование проводилось с использованием методик, разработанных в рамках базового финансирования программы ФНИ П-16.

-
- [1] Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. J. *Atm. Solar-Terr. Phys.* 2000. **62**. P. 685.
- [2] Lastovicka J. J. *Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006. **68**. P. 479.
- [3] Kazimirovsky E. S. *Ann. of Geophys.* 2002. **45**. N 1. P. 1.
- [4] Chane-Ming F., Ro? G., Robert L., Leveau J. *Geophys. Res. Lett.* 2002. **29**, N 6. P. 1094.
- [5] Pfister, L., Chan K. R., Bui T. P., Bowen S., Legg M., Gary B., Kelly K., Proffitt M., Starr W. J. *Geophys. Res.* 1993. **98**. N D5. P. 8611.
- [6] Kim S.-Y., Chun H.-Y., Baik J.-J. *Geophys. Res. Lett.* 2005. **32**. P. L24816.
- [7] Kuester M. A., Alexander M. J., Ray E. A. *J. Atmosphere Sci.* 2008. **65**. N 10. P. 3231.
- [8] Vadas S.L., Liu H. J. *Geophys. Res.* 2009. **114**. P. A10310.
- [9] Xiao Z., Xiao S., Hao Y., Zhang D. *J. Geophys. Res.* 2007. **112**. P. A04304.
- [10] Vadas S.L., Crowley G. J. *Geophys. Res.* 2010. **115**. P. A07324.
- [11] Bertin F., Testud J., Kersley L. *Planet. Space Sci.* 1975. **23**. P. 493.
- [12] Huang Y.N., Cheng K., Chen S. W. *Radio Sci.* 1985. **20**. P. 897.
- [13] Bishop R.L., Aponte N., Earle G.D., Sulzer M., Larsen M.F., Peng G.S. *J. Geophys. Res.* 2006. **111**. P. A11320.
- [14] Polyakova A.S., Perevalova N.P. *Adv. in Space Res.* 2001. **48**. P. 1196.
- [15] Zakharov V.I., Kunitsyn V.E. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2012. **52**. N 4. P. 533.
- [16] Chou M.Y., Lin C.C.H., Yue J., Tsai H.F., Sun Y.Y., Liu J.Y., Chen C.H. *Geophys. Res. Lett.* 2017. **44**. P. 1219.
- [17] Chou M.Y., Lin C.H., Yue J., Chang L.C., Tsai H.F., Chen C.H. *Geophys. Res. Lett.* 2017. **44**. P. 7569.
- [18] Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C. *J Geod.* 2009. **83**. P. 191.
- [19] Yasyukevich Yu.V., Mylnikova A.A., Polyakova A.S. *Results in Physics.* 2015. **5**. P. 32.
- [20] Ясюкевич А.С., Черниговская М.А., Мильникова А.А., Шпынев Б.Г., Хабитуев Д.С. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2017. **14**, № 4. С. 249.
- [21] Черниговская М.А., Ратовский К.Г., Шпынев Б.Г. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2015. **12**, № 3. С. 39.
- [22] Voeykov S.V., Bergardt O.I., Shestakov N.V. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2016. **56**, N 2. P. 219.
- [23] Kunitsyn V.E., Padokhin A.M., Kurbatov G.A., Yasyukevich Y.V., Morozov Y.V. *GPS Solutions.* 2016. **20**, N 4. P. 877.
- [24] Kunitsyn V.E., Kurbatov G.A., Yasyukevich Yu.V., Padokhin A.M. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.* 2015. **12**, N 3. P. 547.
- [25] Savitzky A., Golay M.J.E. *Analytical chemistry.* 1965. **36**, N 8. P. 1627.
- [26] Morlet J. Sampling theory and wave propagation, in: Chen C.H. (Ed.), *Issues in Acoustic Signal/Images Processing and Recognition*, NATO ASI Series. 1983. 1. P. 233.
- [27] <http://rammb.cira.colostate.edu>
- [28] <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>
- [29] Полякова А.С., Перевалова Н.П. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2013. **10**, № 2. С. 197.
- [30] Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Leonovich A.S., Leonovich L.A., Voeykov S.V., Yasyukevich Y.V. *Geophys. Res. Lett.* 2009. **36**. P. L15106.
- [31] Leonovich A.S., Kozlov D.A., Edemskiy I.K. *Planetary and Space Science.* 2010. **58**, N 11. P. 1425.
-

Changes in the intensity of TEC variations with different timescales during tropical cyclones

A. S. Yasyukevich¹, A. M. Padokhin^{2,a}, A. A. Mylnikova¹, Yu. V. Yasyukevich^{1,3}, S. V. Voeykov¹,
N. A. Tereshin²

¹*Institute of solar-terrestrial physics SB RAS, Irkutsk 664033, Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Department of Atmospheric Physics
Moscow 119991 Russia*

³*Irkutsk State University, Physics department, Irkutsk 664003, Russia
E-mail: ^apadokhin@physics.msu.ru*

The paper presents results of studying total electron content (TEC) variations during the intense tropical cyclones occurred in late August-early October 2016 in the North-Western Pacific Ocean. An increase in the intensity of TEC variations within internal gravity waves periods is observed at stations located near the cyclone region. The most significant growth in the amplitude is registered for small- and medium-scale variations (2–50 min) mainly at the daytime. The intensity of variations with longer periods (up to 4 hours) changes mainly in the morning and evening local time hours, during the passage of the solar terminator. We assume the interaction of ionospheric disturbances generated by tropical cyclones and solar terminator passage. A possible mechanism for the interaction is briefly discussed.

PACS: 94.20.-y

Keywords: total electron content, tropical cyclones, ionospheric disturbances, global navigation satellite systems.

Received 09 February 2018.

Сведения об авторах

1. Анна Сергеевна Ясюкевич — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник ИСЗФ СО РАН; тел.: (395) 256-45-54, e-mail: anapol@iszf.irk.ru.
2. Артем Михайлович Падохин — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; (495) 939-28-77, e-mail: padokhin@physics.msu.ru.
3. Анна Александровна Мыльникова — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник, ИСЗФ СО РАН; тел.: (395) 256-45-80, e-mail: anna@iszf.irk.ru.
4. Юрий Владимирович Ясюкевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, ИСЗФ СО РАН; тел.: (395) 256-45-54, e-mail: yasyukevich@iszf.irk.ru.
5. Сергей Викторович Воейков — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, ИСЗФ СО РАН; e-mail: serg3108@iszf.irk.ru.
6. Никита Алексеевич Терешин — аспирант; тел.: (495) 939-28-77, e-mail: nikita.tereshin@gmail.com.