
НАБЛЮДЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ В ПЭС, ГЕНЕРИРУЕМЫХ СОЛНЕЧНЫМ ТЕРМИНАТОРОМ, В ПЕРИОДЫ ДЕЙСТВИЯ ТАЙФУНОВ

OBSERVING WAVE PACKETS GENERATED BY SOLAR TERMINATOR IN TEC DURING TYPHOONS

И.К. Едемский

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ilya@iszf.irk.ru*

А.С. Ясюкевич

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, annpol@iszf.irk.ru*

I.K. Edemskiy

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ilya@iszf.irk.ru*

A.S. Yasyukevich

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, annpol@iszf.irk.ru*

Аннотация. В настоящей работе с использованием данных полного электронного содержания (ПЭС) проведен анализ ионосферных возмущений, возбуждаемых во время прохождения солнечного терминатора (СТ), в периоды действия тропических циклонов. Было рассмотрено 16 интенсивных тропических циклонов (тайфунов), наблюдаемых в северо-западной части Тихого океана вблизи территории Японии. Выполнен анализ двумерных распределений числа зарегистрированных волновых пакетов (ВП) в зависимости от разных параметров: местного времени, максимальной амплитуды пакетов, расстояния до тайфуна. Показано, что в большинстве случаев максимальное число ВП наблюдается на расстоянии менее 500–1500 км от центра тайфунов и локализовано в окрестности времени прохождения вечернего СТ. Для тайфунов, действовавших в осенние периоды, максимум числа ВП регистрируется в дневные часы местного времени, и, по видимому, не связан с СТ. Распределения числа ВП в зависимости от их амплитуды для всех рассмотренных случаев подобны, с максимумом вблизи значения ~ 0.2 TECU. При этом для некоторых тайфунов наблюдалось большое число ВП с амплитудой до 0.6–0.8 TECU, что существенно выше амплитуд ВП, характерных для спокойного времени. Кратко обсужден механизм возможного взаимодействия ионосферных возмущений, вызванных двумя различными источниками: тропическими циклонами и движением СТ.

Ключевые слова: волновые пакеты, ПЭС, тайфуны, солнечный терминатор, ионосферные возмущения, ГНСС.

Abstract. In this work, we study ionospheric disturbances excited by the passage of the solar terminator (ST) during tropical cyclone periods, using total electron content (TEC) data. We have considered 16 intense tropical cyclones (typhoons) that acted in the northwest of the Pacific Ocean near the territory of Japan. We analyze two-dimensional distributions of the number of registered wave packets (WPs) depending on various parameters: local time, maximum amplitude of packets, and distance to typhoon. It is shown that in most cases the maximum number of WPs is observed at a distance less than 500–1500 km from the typhoon center and near the time of evening solar terminator passage. For typhoons occurring during autumn periods, the maximum number of WPs is recorded at daytime, and, apparently, is not associated with ST. Distributions of the number of WPs depending on their amplitude have a similar form for all the cases considered, with a maximum of about 0.2 TECU. At the same time, for some typhoons there are a large number of WPs with amplitude up to 0.6–0.8 TECU, which is significantly higher than WP amplitudes under quiet conditions. We briefly discuss the mechanism of possible interaction between ionospheric disturbances caused by two different sources (tropical cyclones and ST passage).

Keywords: wave packets, TEC, typhoon, solar terminator, ionospheric disturbances, GNSS.

ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера представляет собой сложную динамическую систему, поведение которой связано не только с изменениями гелио- и геомагнитных факторов, но и с состоянием нейтральной атмосферы. В связи с этим исследование взаимосвязанных процессов, протекающих в нижней и верхней атмосфере Земли, является одной из приоритетных геофизических и метеорологических задач. Установлено, что в спокойных гео-

магнитных условиях изменчивость электронной концентрации ионосферы, связанная с влиянием метеорологических факторов, может достигать 35 % от фонового уровня ионизации [Forbes et al., 2000].

Основным механизмом передачи энергии возмущения от тропосферы на ионосферные высоты являются внутренние атмосферные волны различных масштабов: приливы, планетарные волны, внутренние гравитационные волны (ВГВ) [Lasto-

vicka, 2006]. При определенных условиях ВГВ могут достигать высот ионосферы, вызывая возмущения электронной концентрации, которые регистрируются как перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) [Kazimirovsky, 2002]. Среди источников ВГВ в нижней нейтральной атмосфере в литературе отмечались струйные течения, цунами, метеорологические штормы, тропические циклоны и т. д.

Тропические циклоны (ТЦ) являются мощными вихревыми структурами в тропосфере, эволюция которых сопровождается генерацией ВГВ различных масштабов. В ряде экспериментальных и теоретических работ показано, что над зонами действия ТЦ в мезосфере и нижней термосфере могут наблюдаться ВГВ с периодами от 2 мин до 6 ч и пространственными масштабами от 15 до 1000 км. [Chaneming et al., 2002; Pfister et al., 1993; Kim et al., 2005; Kuester et al., 2008]. Волновые возмущения с периодами от 2 до 90 мин над областями существования ТЦ регистрировались также в электронной концентрации ионосферы различными радиофизическими методами [Xiao et al., 2007; Bertin et al., 1975; Huang et al., 1985; Bishop et al., 2006; Polyakova, Perevalova 2011, 2013]. Выявлен ряд особенностей этих возмущений: их интенсивность максимальна в периоды обтекания береговой линии воздушными массами циклона, а также в моменты быстрых изменений скорости ветра в ТЦ [Xiao et al., 2007; Zakharov, Kunitsyn, 2012]. Bertin et al. [1975] показали, что ПИВ распространялись преимущественно против направления фонового ветра на высоте ионосферы, что свидетельствует в пользу их связи с ВГВ [Medvedev et al., 2017].

Отметим, что мощные ТЦ, для которых скорость ветра $V > 74$ узлов (1 узел = 1 морская миля/ч, или 0.5144 м/с), наблюдаемые в северо-западной акватории Тихого океана, принято также называть тайфунами.

В отличие от ТЦ движение солнечного терминатора (СТ) является регулярным источником волновых возмущений в атмосфере и ионосфере. Ранние работы по исследованию состояния ионосферы в области прохождения СТ [Hines, 1960; Francis, 1974] показали, что движение СТ вызывает генерацию волн, а также возникновение неустойчивостей и флуктуаций в ионосферной плазме. Это послужило поводом для проведения целого ряда исследований ионосферных параметров во время прохождения СТ [Mishin et al., 1991; Somsikov, Ganguly, 1995; Galushko et al., 1998].

Использование технологии радиозондирования ионосферы сигналами глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) позволило авторам работ [Afraimovich et al., 2003; Afraimovich et al., 2009a, 2009b] обнаружить, что движение СТ сопровождается генерацией в ионосфере среднемасштабных возмущений особого типа — волновых пакетов (ВП), проявляющихся в форме узкополосных колебаний полного электронного содержания (ПЭС). Предложена и теоретически обоснована модель генерации магнитогидродинамических (МГД) возмущений плазмы в системе ионосфера—плазмосфера, позволяющая объяснить наблюдаемые колебания ПЭС. В рамках этой модели предполагается, что движение СТ приводит к генерации токов в прово-

дящем слое ионосферы, являющихся источником волн медленного магнитного звука (ММЗ). Был предложен также механизм переноса генерируемых СТ возмущений вдоль магнитных силовых линий в другое полушарие [Leonovich et al., 2010]. Дальнейшие исследования показали [Edemskiy, Yasyukevich, 2011], что возмущения ПЭС, связанные с прохождением СТ, могут иметь более сложную структуру, являясь, по-видимому, суперпозицией колебаний ионосферной плазмы, вызванных прохождением не только МГД-волн, но и гравитационных.

Поскольку ТЦ и движение СТ являются источниками генерации атмосферных волн разного типа, но схожих временных масштабов, предполагается, что при одновременном существовании данных явлений в ионосфере может возникать взаимодействие возмущений, вызываемых этими источниками. Так, в работе [Belyaev et al., 2015] на основе спутниковых измерений электронной концентрации показано, что состояние ионосферы вблизи СТ модифицируется в периоды прохождения мощных ТЦ над поверхностью суши. Однако результаты этой работы получены на основе анализа ограниченного количества данных, что не позволяет достоверно выявить наличие возможного взаимодействия.

В работе [Полякова, Ясюкевич, 2016] были представлены пространственные карты вариаций ПЭС во время прохождения тайфуна HALONG, наглядно показывающие увеличение амплитуды волновых возмущений, вызванных движением СТ, относительно метеоспокойных дней. Подобный результат получен в работе [Chou et al., 2017a] для тайфуна NEPATRAK. В этой статье отчетливо наблюдаются МГД-волны, вызванные, по нашему мнению, прохождением СТ (имеют характерные наклон волнового фронта и время появления), и концентрические ВГВ, связанные с действием циклона. Авторы сделали вывод о взаимодействии этих волновых возмущений и предложили его возможный механизм. На наш взгляд, они неверно идентифицировали волны, генерируемые прохождением СТ, поэтому предложенный ими механизм не подходит для данного случая.

Таким образом, вопрос о возможном воздействии ТЦ на интенсивность и структуру ПИВ, генерируемых движением СТ, требует более тщательного анализа с привлечением большой статистики наблюдений. В настоящей работе с применением данных ГНСС-зондирования ионосферы проведен анализ ВП, наблюдаемых во время прохождения СТ, в периоды действия 16 тропических циклонов разной интенсивности.

ДАнные И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Экспериментальную основу работы составили данные о вариациях ПЭС в ионосфере, полученные с помощью фазовых двухчастотных измерений навигационных систем GPS/ГЛОНАСС. Траектории движения выбранных для исследования тайфунов располагались в северо-западной части Тихого океана вблизи территории Японии. Это позволило привлечь для исследования данные уникальной сети ГНСС-приемников Geonet [<http://terras.gsi.go.jp>],

включающей более 1200 станций. Большое количество приемников в регионе позволяет проследить картину ионосферных вариаций с высоким пространственно-временным разрешением.

На основе исходных данных выполнялся анализ вариаций ПЭС на наличие волновых пакетов. Поиск ВП осуществлялся в автоматическом режиме по методу, подробно изложенному в [Ясюкевич и др., 2013]. Кратко, анализ данных состоял из нескольких этапов.

1. Преобразование значений исходного наклонного ПЭС $I_s(t)$ в эквивалентное значение вертикального ПЭС $I(t)$ согласно формуле Клобучара [Klobuchar, 1986].

2. Фильтрация полученных рядов ПЭС методом скользящего среднего в диапазоне периодов 2–20 мин, выбранном исходя из наблюдаемых периодов пакетов (12–17 мин) [Едемский и др., 2011].

3. Отбор ВП проводился по двум критериям. Прежде всего, выбирались вариации ПЭС, среднеквадратичное отклонение (СКО) которых превышало заданный порог — 0.05 TECU. Далее для каждого отфильтрованного ряда рассчитывался амплитудный фурье-спектр. По полученному спектру проверялось выполнение условия квази-монохроматичности (узкополосности) колебаний ПЭС с целью выявления колебаний с относительно узким спектром. Если исходный ряд удовлетворял этим условиям, такое событие фиксировалось как ВП.

4. Для определения длительности регистрируемого ВП в каждом случае определялась огибающая по уровню 0.5 от максимальной амплитуды пакета и рассчитывалась его длительность. В дальнейшем под временем регистрации пакета мы считаем середину интервала времени, когда амплитуда огибающей превышала 0.5 от максимума.

Для анализа связи наблюдаемых возмущений с прохождением СТ использовалась система локального времени терминатора (ЛВТ), предложенная в [Afraimovich et al., 2009b]. Методика предполагает переход ко времени $dT = t_{\text{obs}} - t_{\text{st}}$, где t_{obs} — момент времени регистрации возмущения в точке, t_{st} — время прохождения СТ над данной точкой, которое определялось для высоты 300 км.

Систематизируя данные о наблюдении ВП, мы можем построить двумерные распределения числа ВП и наблюдать их зависимость от различных параметров: времени, амплитуды, расстояния до тайфуна. На рис. 1, а показано общее распределение числа ВП за 2008–2016 гг. в зависимости от расстояния до глаза (центра) тайфуна и амплитуды пакета. Расстояние определялось по дуге большого круга между точкой регистрации ВП и местоположением центра тайфуна. Предполагалось, что возможное влияние тайфуна на генерацию ВП должно убывать с расстоянием, поэтому ВП, зарегистрированные дальше чем в 3000 км от траектории тайфуна, исключались из рассмотрения. Таким образом, для построения распределений использовались данные только о 38.6 % пакетов от общего их числа за данный период.

Проведенный в работе анализ зависимости числа регистрируемых ВП от расстояния до глаза тайфуна показывает, что наибольшее их число наблюдается на удалении 2000–2500 км (рис. 1, а). Необходимо отметить, что, подходя к береговой линии, тайфун демонстрирует тенденцию к разрушению и, таким образом, время нахождения тайфуна вблизи суши (т. е. вблизи большинства станций ГНСС) оказывается существенно меньшим по сравнению со временем его нахождения над океаном. Определяя расстояние от каждой станции сети до глаза тайфуна с интервалом 1 ч за все время наблюдений, мы построили распределение этих расстояний (рис. 1, б), пик которого приходится на 2000–2500 км. Таким образом, число ВП в данном диапазоне выше лишь за счет большего числа наблюдений с такими расстояниями. Более репрезентативным будет использование весов для каждого расстояния, обратно пропорциональных полученному распределению (рис. 1, в). На рис. 1, в показано взвешенное распределение числа ВП. Вводя веса, мы можем говорить лишь об относительном числе зарегистрированных ВП, но не о конкретных значениях в зависимости от расстояния, поэтому цветовая шкала на нормированных распределениях будет относительной и ее можно опустить. Как видно из рис. 1, в, введение нормировки дает в среднем одинаковые распределения амплитуд для всех расстояний. Наличие локальных повышений (0, 1000, 2500 км) связано, по-видимому, с особенностями выбранной нормировки. Средняя амплитуда ВП слабо зависит от расстояния до центра тайфуна и составляет порядка 0.15–0.2 TECU, что согласуется с предыдущими исследованиями [Afraimovich et al., 2009b].

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМЫХ ТАЙФУНОВ

Для анализа возможного совокупного воздействия на состояние ионосферы солнечного терминатора и тайфунов было отобрано 16 тропических циклонов за 2008–2016 гг., проходивших вблизи берегов Японии. Для рассмотрения мы выбирали мощные тайфуны второй категории (скорость ветра $V > 96$ узлов). Данные об эволюции и траекториях движения тайфунов получены с помощью сервиса NOAA Environmental Satellite, Data and Information Service [<http://rammb.cira.colostate.edu/>]. Периоды действия исследуемых тайфунов, а также максимальные значения скоростей для каждого тайфуна приведены в таблице.

На рис. 2 показаны траектории движения глаза каждого из отобранных нами циклонов с момента зарождения до момента разрушения.

Маркеры отмечают положение глаза тайфуна через каждые три часа. Размер маркера соответствует установившейся скорости ветра в тайфуне в каждой конкретной точке. Диаметр маркера на легенде соответствует скорости 100 узлов. Видно, что, как правило, область зарождения тайфунов в северо-западной акватории Тихого океана находится в пределах 10–15° N и 135–150° E. В период своей эволюции тайфуны перемещались в северо-западном направлении, а затем в большинстве случаев их траектория совершала поворот и воздушные массы

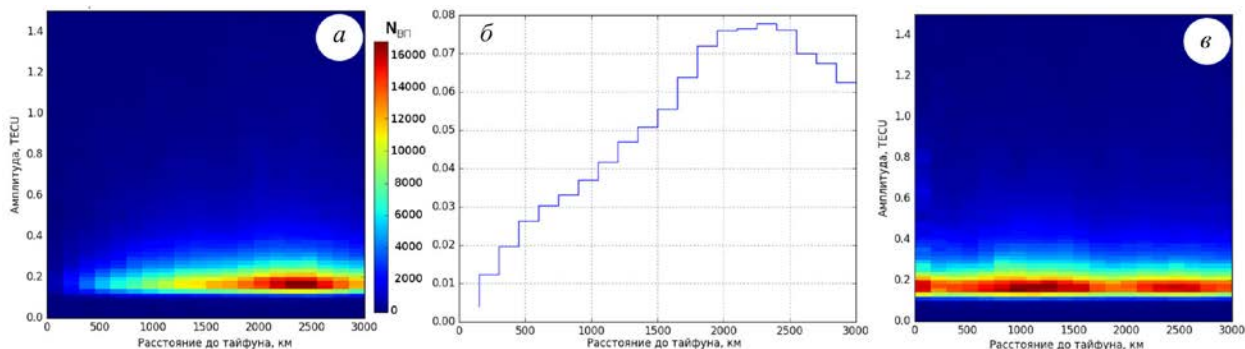


Рис. 1. Ненормированное распределение числа волновых пакетов ПЭС в зависимости от амплитуды ВП и расстояния до центра ТЦ (а); нормированное распределение расстояний станция—тайфун (б); распределения числа ВП с учетом нормировки расстояний (в). Все распределения получены для ВП, которые находились на расстоянии <3000 км от центров тайфунов

тайфунов смещались на северо-восток, достигая территории Японии, где расположены приемники ГНСС сети Geonet.

Исключения составляли ТЦ HAGUPIT, RAMMASAN-14 и MERANTI, их траектории проходили ниже 20° N, т. е. эти тайфуны в период своего действия не приближались к японским островам ближе чем на ~1500 км.

Тайфуны вблизи берегов Японии в 2008–2016 гг.

№	Название	Период действия	V_{max} , узлы (дата регистрации)	Число ВП
а	RAMMASUN-08	7–13 мая 2008	135 (10–11 мая)	5 483
б	NAKRI	27 мая – 03 июня 2008	125 (29–30 мая)	47 016
в	SINLAKU	8–22 сентября 2008	125 (11 сентября)	49 711
г	HAGUPIT	18–25 сентября 2008	120 (23 сентября)	9 359
д	JANGMI	23 сентября – 1 октября 2008	135 (27 сентября)	17 235
е	GUCHOL	11–19 июня 2012	130 (16–17 июня)	233 390
ж	NEOGURI	3–10 июля 2014	135 (07 июля)	223 592
з	RAMMASUN-14	10–19 июля 2014	135 (18 июля)	135 585
и	HALONG	28 июля – 10 августа 2014	140 (2–3 августа)	312 479
к	PHANFONE	28 сентября – 6 октября 2014	130 (4 октября)	72 331
л	VONGFONG	2–14 октября 2014	155 (7–8 октября)	93 118
м	NURI	31 октября – 6 ноября 2014	155 (2–3 ноября)	83 216
н	LIONROCK	18–30 августа 2016	115 (28 августа)	187 585
о	NAMTHEUN	31 августа – 5 сентября 2016	100 (2 сентября)	12 482
п	MERANTI	8–16 сентября 2016	160 (13 сентября)	48 038
р	MALAKAS	11–21 сентября 2016	115 (16 сентября)	60 641

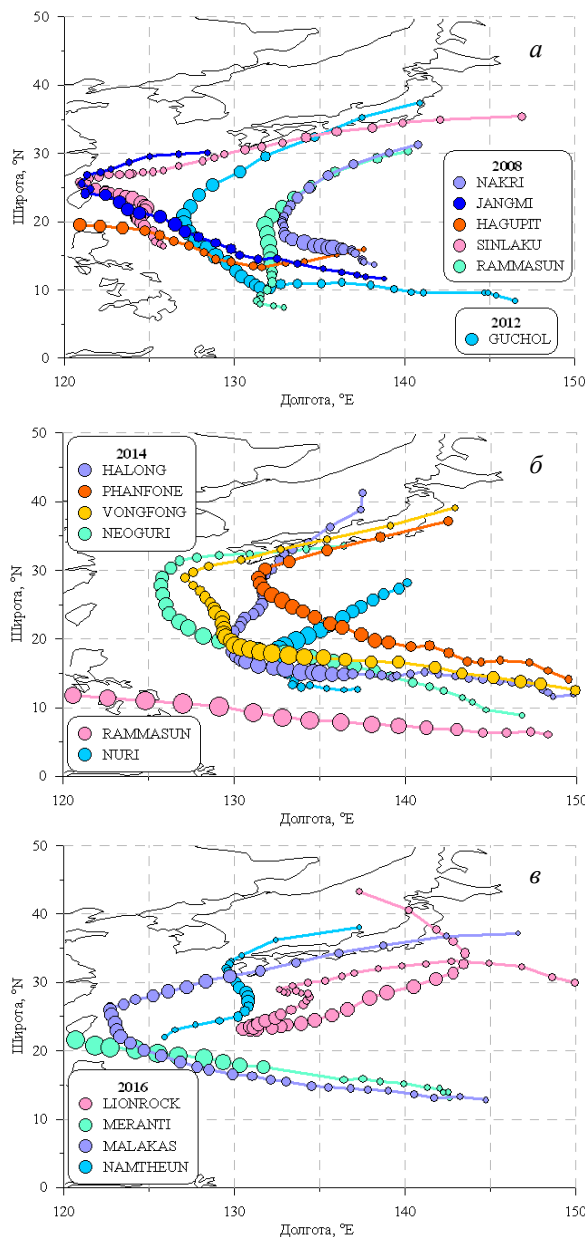


Рис. 2. Траектории движения тайфунов в 2008–2016 гг. Размер маркеров пропорционален максимальной силе установившегося ветра в ТЦ. Диаметр маркера на легенде соответствует скорости ветра в ТЦ, равной 100 узлов

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ВП

Используя вышеизложенную методику детектирования, мы анализировали распределения числа ВП в ПЭС в периоды действия выбранных ТЦ в зависимости от амплитуды ВП, расстояния до центров ТЦ и времени регистрации ВП. Общее количество ВП, зарегистрированных во время каждого тайфуна, приведено в таблице. Как указано выше, из рассмотрения при этом исключались ВП, обнаруженные дальше чем в 3000 км от глаза тайфуна. Видно, что наибольшее число ВП наблюдается в летнее время (летние периоды выделены в таблице серым цветом), что согласуется с предыдущими наблюдениями [Едемский и др., 2011]. В среднем, в летний период наблюдается около 150–250 тысяч ВП за время действия одного тайфуна. Исключение составляют тайфуны NAKRI и NAMTHEUN, время действия которых приходится на позднюю весну и раннюю осень соответственно. Весной и осенью генерация ВП вечерним СТ менее эффективна, чем летом [Afraimovich et al., 2009b]. Кроме того, в период действия тайфуна NAMTHEUM геомагнитная обстановка была возмущенной, что также могло сказаться на эффективности генерации. В весенний и осенний периоды эффективность генерации ВП в ионосфере существенно снижается, что, вероятно, связано с изменениями ориентации линии СТ относительно силовых линий магнитного поля. Число ВП в данные периоды составляет около 50–100 тысяч. Отметим отдельно случаи, когда общее число зарегистрированных ВП существенно ниже. Так, для ТЦ RAMMASAN-08, HAGUPIT, JANGMI и NAMTHEUM общее число зарегистрированных ВП не превышает 20 тысяч. Статистические результаты для данных тайфунов являются наименее репрезентативными, однако могут говорить о разрушающем влиянии тайфуна на резонансную систему, ответственную за генерацию ВП.

Чтобы исследовать связь генерации ВП с прохождением тайфунов, были построены распределения числа ВП в зависимости от расстояния до глаза тайфуна и локального времени вечернего СТ (рис. 3). Распределения для локального времени утреннего СТ в работе не приводятся, поскольку генерация ВП во время его прохождения в исследуемый период года существенно слабее [Едемский и др., 2011]. Распределения построены с учетом весовой функции (рис. 1, б), расположены в хронологическом порядке и промаркированы теми же буквами, что и тайфуны в таблице.

Из распределений на рис. 3 видно, что в большинстве случаев максимумы распределений числа ВП приходятся на расстояние до 500–1500 км от глаза тайфунов. Дальше всего от центра тайфунов смещены максимумы распределений для ТЦ RAMMASUN-14, HAGUPIT и MERANTI, траектория которых пролегла вдали от Японии, а также для ТЦ NAMTHEUN и RAMMASAN-08, для которых выше было отмечено низкое общее число зарегистрированных ВП. Вероятно, на распределения для данных тайфунов могло повлиять также недостаточное количество данных вблизи траектории ТЦ.

Некоторые распределения демонстрируют наличие локальных сгущений (рис. 3, б, д, и, м). Учитывая отсутствие выраженной систематики их положения на распределениях, их следует отнести, по-видимому, к особенностям перемещения тайфунов. Скорости движения глаза тайфуна отличаются на отдельных участках траектории, вследствие чего длительности нахождения тайфуна на разных удалениях от территории Японии могут значительно различаться (рис. 2). Так, на траекториях имеются участки, вдоль которых тайфун движется несколько дней, при этом расстояние центра тайфуна от территории Японии практически не меняется. В условиях стабильной генерации ВП это должно дать локальные повышения их числа для определенных дальностей, что мы, по-видимому, и наблюдаем.

Следует подчеркнуть, что возбуждение ВГВ в циклоне происходит не в его центре, а в области максимальных ветров, располагающейся в стене воронки циклона. Диаметр воронки на высоте 10 км составляет около 500–700 км. Таким образом, чтобы наблюдать ионосферные возмущения связанные с распространяющимися от циклона ВГВ, возмущения должны располагаться не над центром тайфуна, а на некотором расстоянии. Авторы работы [Chou et al., 2017b] наблюдали концентрические ПИВ, возникшие в период прохождения ТЦ MERANTI над территорией Тайваня, амплитуда которых была максимальной на расстояниях 500–800 км от центра тайфуна. Таким образом, удаленность наблюдаемых нами максимумов распределений числа ВП от центров тайфунов может указывать на их возможную связь с волновыми возмущениями, возбуждаемыми в ТЦ. Отметим также, что для нескольких распределений регистрация ВП наблюдается не в ограниченной пространственной области, а в широком диапазоне расстояний до тайфуна (рис. 3, д, ж, и). Такие равномерные распределения ВП, слабо зависящие от расстояния до тайфуна, указывают на наличие существенного числа ВП, генерация которых не связана с прохождением ТЦ. Кроме того, как было сказано выше, различие в траекториях ТЦ оказывает влияние на вид распределений. Тайфуны NEOGURI и HALONG приближались к берегам Японии наиболее равномерно, что, вероятно, также повлияло на наблюдаемый характер распределений, однако локальные максимумы на этих распределениях находятся вблизи центра ТЦ.

В большинстве случаев максимальное число волновых пакетов регистрируется вблизи времени прохождения вечернего СТ (точка 0 на оси абсцисс рис. 3). В отдельных распределениях максимум числа ВП наблюдается на малых расстояниях до тайфуна, но не вблизи времени прохождения СТ, а в дневное время (рис. 3, к–м).

Дальнейший анализ показывает, что распределения такого типа наблюдаются для тайфунов, действующих в осенний период. Как было отмечено выше, в весенний и осенний периоды эффективность генерации солнечным терминатором волновых пакетов в ионосфере существенно снижается [Едемский и др., 2011].

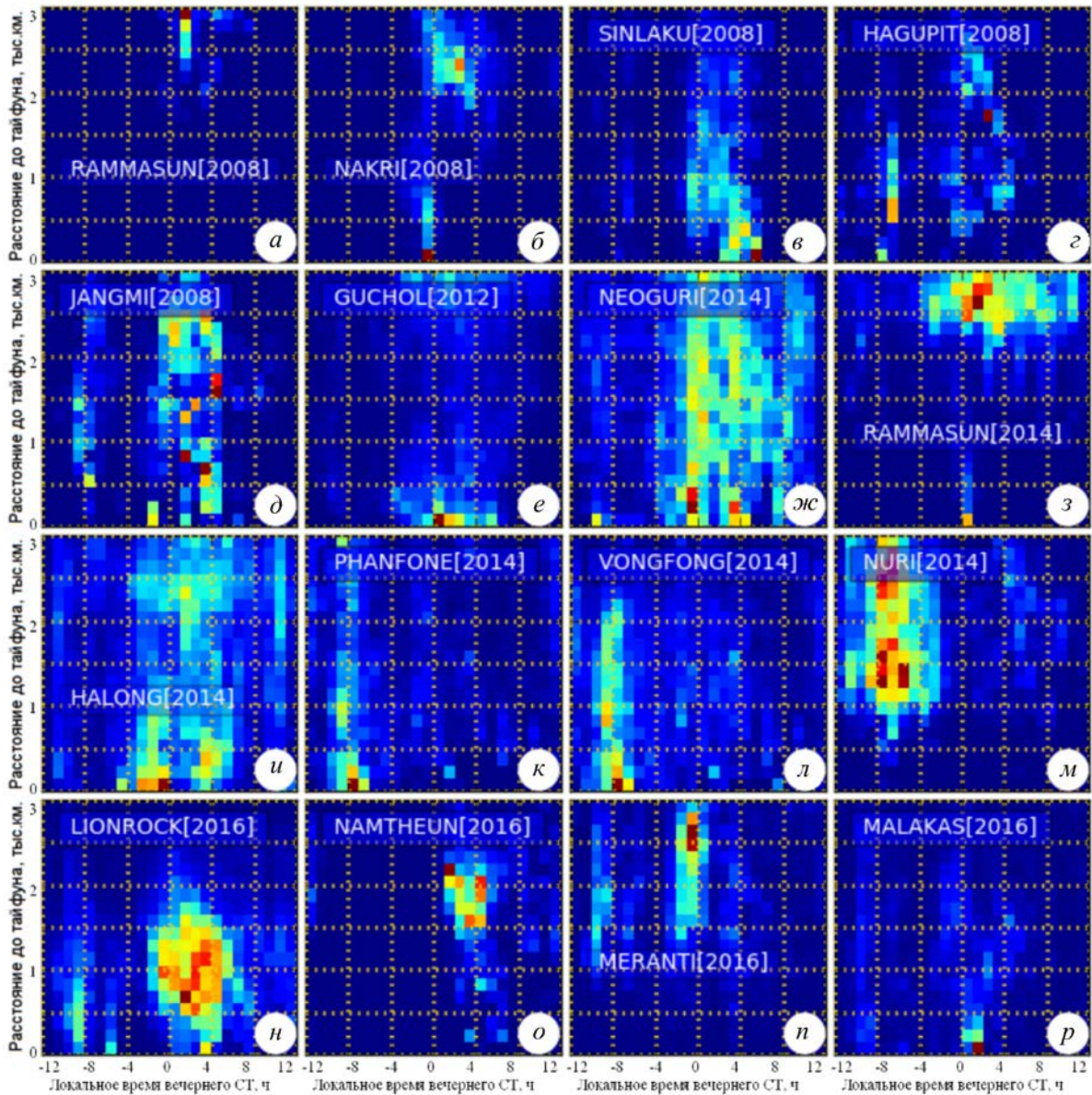


Рис. 3. Нормированные распределения числа волновых пакетов в системе локального времени вечернего СТ в зависимости от расстояния до центра ТЦ

Поэтому для таких тайфунов мы наблюдаем эффекты, связанные, вероятнее всего, не с СТ, а с другими факторами. Возможные источники генерации ВП перечислены в работе [Afraimovich et al., 2003]. Влияние же СТ на ионосферу существенно снижается в связи с ослаблением МГД-резонатора в данный сезон года.

На рис. 4 приведены распределения волновых пакетов по амплитуде в системе локального времени вечернего СТ. Видно, что во время действия большинства тайфунов распределения амплитуд ВП подобны, с максимумом около 0 ЛВТ и вблизи значения $\sim 0.2-0.3$ TECU. При этом статистический анализ параметров ВП, выполненный в работе [Afraimovich, 2009b], показал, что характерные значения максимальных амплитуд ВП, генерированных движением СТ над территорией Японии, в спокойные периоды составляют 0.12–0.15 TECU. Помимо этого, для некоторых тайфунов наблюдается также

выраженное увеличение ширины распределения, т. е. регистрируется существенное число ВП с амплитудой до 0.6–0.8 TECU (б, е, ж, з, и, н). При этом, согласно результатам рис. 3, наибольшее число ВП для всех этих тайфунов (за исключением RAMMASUN-14) регистрировалось на близком расстоянии от центра ТЦ. Таким образом, можно заключить, что максимальные значения амплитуд ВП во время действия тайфунов оказывались выше характерных значений, а в ряде случаев это превышение составляло более двух раз.

Необходимо заметить, что часть распределений показывает, что ВП регистрируются до прохождения СТ (рис. 4, е–и). Данные наблюдения сделаны в летний период, когда регистрация ВП в Японии начинается за несколько часов до прохождения СТ. Эти возмущения могут быть объяснены МГД-гипотезой генерации ВП [Leonovich et al., 2010] и прохождением СТ в магнитосопреженной области. Видно,

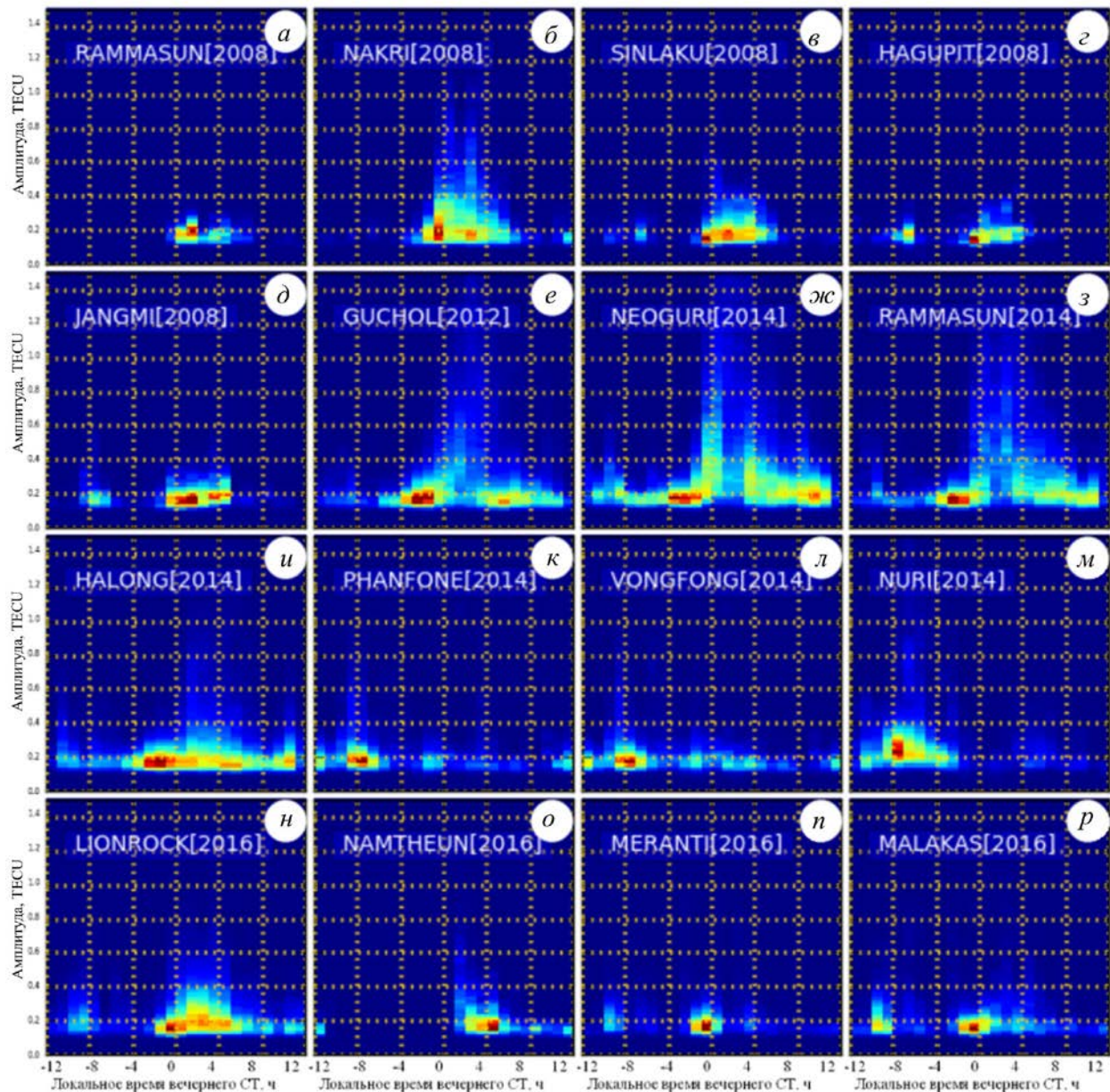


Рис. 4. Нормированные распределения числа волновых пакетов по амплитуде в системе ЛВТ

что регистрация ВП начинается за несколько часов до прохождения СТ и длится всю ночь, при этом дисперсия значений возрастает в момент прохождения локального СТ и возвращается к исходным значениям через несколько часов. Считая, что наблюдаемые над Японией ВП следует рассматривать как суперпозицию возмущений, связанных с прохождением СТ в магнитосопреженной и локальной областях [Едемский и др., 2011], можно предположить, что ТЦ оказывает воздействие на амплитуды только части наблюдаемых ВП, а именно сгенерированных прохождением локального СТ. Тогда возвращение распределений к исходным значениям можно объяснить прекращением локальной генерации ВП и наблюдением только МГД-волновых пакетов.

На рис. 5 показаны распределения числа ВП по амплитуде в зависимости от расстояния для тайфунов NAKRI, NEOGURI, GUCHOL и HALONG. Во время

действия этих тайфунов амплитуды ВП варьировали в наибольшем диапазоне при прохождении СТ (рис. 4). Видно, что распределения для этих тайфунов существенно различаются как по числу, так и по амплитуде. Для ТЦ NEOGURI и HALONG ширина распределения по амплитуде практически не зависит от расстояния. Для ТЦ GUCHOL пакеты с наибольшей амплитудой регистрируются на близком расстоянии от тайфуна, а для ТЦ NAKRI — в области 2000–2500 км от центра циклона. Естественно, что каждый ТЦ является уникальным явлением и обладает своим набором характеристик. На полученные распределения в каждом рассмотренном случае может оказывать влияние целый ряд факторов: интенсивность тайфуна, фоновые условия, сезон года, расстояние от сети приемников и т. п. Поэтому каждый отдельный случай требует более детального анализа, выходящего за рамки данной работы.

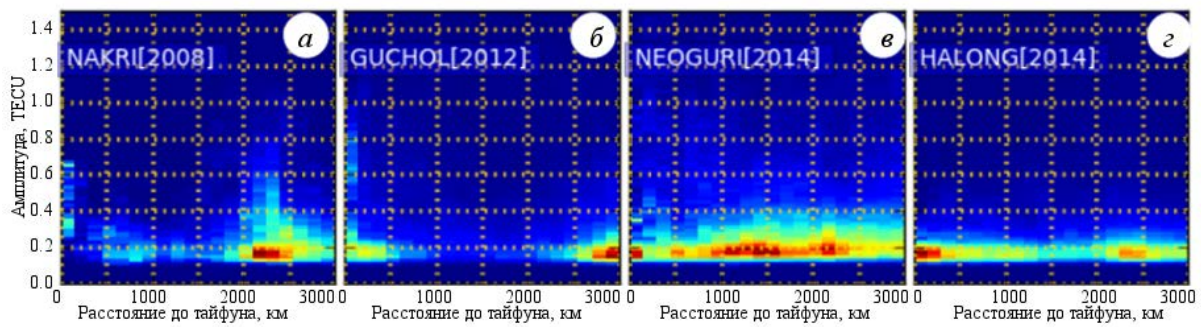


Рис. 5. Нормированные распределения числа волновых пакетов по амплитуде и расстоянию до центра ТЦ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе выполненного анализа распределений параметров волновых пакетов в ПЭС в периоды действия 16 мощных тропических циклонов показано, что в большинстве случаев максимальное число ВП наблюдается на расстоянии до 500–1500 км от центра тайфунов. По времени максимумы распределения числа ВП локализованы, как правило, в окрестности момента прохождения вечернего солнечного терминатора. Исключение составляют тайфуны, действовавшие в осенние периоды. Максимум числа ВП для них регистрировался в дневные часы местного времени, что указывает на связь этих возмущений с другими факторами. Распределения числа ВП в зависимости от амплитуды для всех рассмотренных тайфунов подобны, с максимумом около 0.2–0.3 TECU. При этом в половине случаев наблюдалось существенное увеличение ширины распределений до амплитуд 0.6–0.8 TECU. Отметим, что рост амплитуд волновых возмущений ПЭС различных периодов в утренние и вечерние часы местного времени во время действия ТЦ отмечался также в работе [Ясюкевич и др., 2018].

Полученный результат указывает на возможность взаимодействия ионосферных возмущений, связанных с двумя различными источниками: тропическими циклонами и движением СТ. В работе [Afraimovich et al., 2009a] показано, что движение СТ порождает в ионосфере волны МГД-типа. Условия генерации этих волн зависят, в том числе, от характеристик заряженной компоненты среды, в которой распространяется волна [Leonovich et al., 2010]. Резкие градиенты фоновой электронной плотности могут приводить к существенным изменениям характеристик сложной системы ионосферно-плазмосферного МГД-резонатора, что будет влиять на параметры генерируемых в этой системе ВП. С другой стороны, ТЦ являются источником ВГВ, проявляющихся в ионосфере в виде ПИВ. Они приводят к возрастанию градиентов электронной концентрации ионосферы, т. е. ВГВ, возбуждаемые в ТЦ, потенциально могут быть источником изменений характеристик (количества и интенсивности) ионосферных ВП, генерируемых прохождением СТ.

Следует отметить также, что используемый в данной работе статистический подход не лишен недо-

статков, так как предполагает приблизительно равные внешние условия для всех рассмотренных тайфунов. При этом траектории прохождения тайфунов, скорость ветра в них, стадия развития тайфуна, сезонные и гелиогеомагнитные условия и прочие факторы в каждом отдельно взятом случае могут существенно влиять на условия генерации возмущений ПЭС в форме ВП. Поэтому данный вопрос требует дальнейшего более тщательного рассмотрения.

Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ 16-35-00027 и при поддержке гранта Президента РФ МК-1097.2017.5. В работе использовались методики обработки данных, разработанные в рамках базового финансирования программы ФНИ П-16.

Мы признательны Geospatial Information Authority of Japan (GSI) за предоставление данных сети ГНСС-приемников Geonet, а также NOAA Environmental Satellite, Data and Information Service за данные об эволюции тайфунов. Авторы благодарны С.В. Воейкову за помощь в обработке данных и Ю.В. Ясюкевичу за плодотворные дискуссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Едемский И.К., Воейков С.В., Ясюкевич Ю.В. Сезонные и широтные вариации параметров волновых возмущений МГД-природы, генерируемых солнечным терминатором // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4. С. 107–116.
- Полякова А.С., Ясюкевич Ю.В. Изменение интенсивности отклика ионосферы на прохождение солнечного терминатора в периоды действия тропических циклонов // XXV Всероссийская конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований: Труды. Томск. 2016. Т. 1. С. 113–166.
- Ясюкевич А.С., Падохин А.М., Мильникова А.А., Ясюкевич Ю.В., Воейков С.В., Терешин Н.А. Изменения интенсивности волновых вариаций ПЭС различных периодов во время действия тропических циклонов // Ученые записки физического факультета МГУ. 2018. № 1. (В печати).
- Ясюкевич Ю.В., Первалова Н.П., Едемский И.К., Полякова А.С. Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. 271 с.
- Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Leonovich A.S., Leonovich L.A., Voeykov S.V., Yasyukevich Y.V. MHD nature of night-time MSTIDs excited by the solar terminator // Geophys. Res. Lett. 2009a. V. 36. L15106. DOI: [10.1029/2009GL039803](https://doi.org/10.1029/2009GL039803).

Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Voeykov S.V., Yasyukevich Yu.V., Zhivetiev I.V. Spatio-temporal structure of the wave packets generated by the solar terminator // *Adv. Space Res.* 2009b. V. 44. P. 824–835. DOI: [10.1016/j.asr.2009.05.017](https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.05.017).

Afraimovich E.L., Perevalova N.P., Voyeikov S.V. Traveling wave packets of total electron content disturbances as deduced from global GPS network data // *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2003. V. 65, Iss. 11–13. P. 1245–1262. DOI: [10.1016/j.jastp.2003.08.007](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2003.08.007).

Belyaev G., Boychev B., Kostin V., Trushkina E., Ovcharenko O. Modification of the ionosphere near the terminator due to the passage of a strong tropical cyclone through the large Island // *Sun and Geosphere*. 2015. V. 10. P. 31–38.

Bertin F., Testud J., Kersley L. Medium scale gravity waves in the ionospheric F-region and their possible origin in weather disturbances // *Planet. Space Sci.* 1975. V. 23. P. 493–507. DOI: [10.1016/0032-0633\(75\)90120-8](https://doi.org/10.1016/0032-0633(75)90120-8).

Bishop R.L., Aponte N., Earle G.D., Sulzer M., Larsen M.F., Peng G.S. Arecibo observations of ionospheric perturbations associated with the passage of Tropical Storm Odette // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. P. A11320. DOI: [10.1029/2006JA011668](https://doi.org/10.1029/2006JA011668).

Chane-Ming F., Roff G., Robert L., Leveau J. Gravity wave characteristics over Tromelin Island during the passage of cyclone Hudah // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. N 6. CiteID 1094. DOI: [10.1029/2001GL013286](https://doi.org/10.1029/2001GL013286).

Chou M.Y., Lin C. H., Yue J., Chang L. C., Tsai H.F., Chen C.H. Medium-scale traveling ionospheric disturbances triggered by Super Typhoon Nepartak (2016) // *Geophys. Res. Lett.* 2017a. V. 44. P. 7569–7577. DOI: [10.1002/2017GL073961](https://doi.org/10.1002/2017GL073961).

Chou M.Y., Lin C. C. H., Yue J., Tsai H.F., Sun Y.Y., Liu J.Y., Chen C.H. Concentric traveling ionosphere disturbances triggered by Super Typhoon Meranti (2016) // *Geophys. Res. Lett.* 2017b. V. 44. P. 1219–1226. DOI: [10.1002/2016GL072205](https://doi.org/10.1002/2016GL072205).

Edemskiy I.K., Yasyukevich Y.V. Duration of wave disturbances generated by solar terminator in magnetoconjugate areas // *Proc. XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium. Istanbul, 2011*, pp. 1–4. DOI: [10.1109/URSIGASS.2011.6051003](https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2011.6051003).

Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. Variability of the ionosphere // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2000. V. 62. P. 685–693. DOI: [10.1016/S1364-6826\(00\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00029-8).

Francis S. H. A theory of medium-scale traveling ionospheric disturbances // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 79, N 34. P. 5245–5260. DOI: [10.1029/JA079i034p05245](https://doi.org/10.1029/JA079i034p05245).

Galushko V.G., Paznukhov V.V., Yampolski Y.M., Foster J.C. Incoherent scatter radar observations of AGW/TID events generated by the moving solar terminator // *Ann. Geophys.* 1998. V. 16. P. 821–827. DOI: [10.1007/s00585-998-0821-3](https://doi.org/10.1007/s00585-998-0821-3).

Hines C.O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // *Canadian J. Phys.* 1960. V. 38, N 11. P. 1441–1481. DOI: [10.1139/p60-150](https://doi.org/10.1139/p60-150).

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. DOI: [10.1029/RS020i004p00897](https://doi.org/10.1029/RS020i004p00897).

Kazimirovsky E.S. Coupling from below as a source of ionospheric variability: a review // *Ann. of Geophys.* 2002. V. 45, N 1. P. 1–29.

Kim S.-Y., Chun H.-Y., Baik J.-J. A numerical study of gravity waves induced by convection associated with Typhoon Rusa // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. P. L24816. DOI: [10.1029/2005GL024662](https://doi.org/10.1029/2005GL024662).

Klobuchar J.A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users // *IEEE Trans. Aerospace and Electronics System.* 1986. V. 23, N 3. P. 325–331.

Kuester M.A., Alexander M.J., Ray E.A. A Model Study of Gravity Waves over Hurricane Humberto (2001) // *J. Atmosph. Sci.* 2008. V. 65, N 10. P. 3231–3246. DOI: [10.1175/2008JAS2372.1](https://doi.org/10.1175/2008JAS2372.1).

Lastovicka J. Forcing of the ionosphere by waves from below // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006. V. 68. P. 479–497. DOI: [10.1016/j.jastp.2005.01.018](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.01.018).

Leonovich A.S., Kozlov D.A., Edemskiy I.K. Standing slow magnetosonic waves in a dipole-like plasmasphere // *Planetary and Space Sci.* 2010. V. 58, N 11. P. 1425–1433. DOI: [10.1016/j.pss.2010.06.007](https://doi.org/10.1016/j.pss.2010.06.007).

Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Oinats A.V., Alsatkin S.S., Zhrebtsov G.A. Relation of internal gravity wave anisotropy with neutral wind characteristics in the upper atmosphere // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. V. 122. P. 7567–7580. DOI: [10.1002/2017JA024103](https://doi.org/10.1002/2017JA024103).

Mishin E.V., Epishova A.E., Ishkova L.M., Kovalevskaya E.M., Kozlov E.F., Kolokolov L.E., Rubtsov L.N., Samorokin N.I., Sidorova L.N., Somsikov V.M., Telegin V.A., Yudovich L.A. Disturbances of F-region electron density following solar terminator during the WITS period of 16–20 March 1988 // *J. Atmosph. Terr. Phys.* 1991. V. 53, Iss. 6–7. P. 643–648. DOI: [10.1016/0021-9169\(91\)90091-K](https://doi.org/10.1016/0021-9169(91)90091-K).

Pfister L., Chan K.R., Bui T.P., Bowen S., Legg M., Gary B., Kelly K., Proffitt M., Starr W. Gravity waves generated by a tropical cyclone during the STEP tropical field program: A case study // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98, N D5. P. 8611–8638. DOI: [10.1029/92JD01679](https://doi.org/10.1029/92JD01679).

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. DOI: [10.1016/j.asr.2011.06.014](https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.06.014).

Polyakova A.S., Perevalova N.P. Comparative Analysis of TEC Disturbances over Tropical Cyclone Zones in the North-West Pacific Ocean // *Adv. Space Res.* 2013. V. 52. P. 1416–1426. DOI: [10.1016/j.asr.2011.06.014](https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.06.014).

Somsikov V.M., Ganguly B. On the formation of atmospheric inhomogeneities in the solar terminator region // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1995. V. 57, Iss. 12. P. 1513–1523. DOI: [10.1016/0021-9169\(95\)00014-S](https://doi.org/10.1016/0021-9169(95)00014-S).

Xiao Z., Xiao S., Hao Y., Zhang D. Morphological features of ionospheric response to typhoon // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. P. A04304. DOI: [10.1029/2006JA011671](https://doi.org/10.1029/2006JA011671).

Zakharov V.I., Kunitsyn V.E. Regional features of atmospheric manifestations of tropical cyclones according to ground-based GPS network data // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2012. V. 52, N 4. P. 533–545. DOI: [10.1134/S0016793212040160](https://doi.org/10.1134/S0016793212040160).

URL: <http://rammb.cira.colostate.edu> (дата обращения 11 ноября 2017 г.).

URL: <http://terras.gsi.go.jp> (дата обращения 1 июня 2017 г.).

REFERENCES

Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Leonovich A.S., Leonovich L.A., Voeykov S.V., Yasyukevich Y.V. MHD nature of night-time MSTIDs excited by the solar terminator. *Geophys. Res. Lett.* 2009a, vol. 36, L15106. DOI: [10.1029/2009GL039803](https://doi.org/10.1029/2009GL039803).

Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Voeykov S.V., Yasyukevich Yu.V., Zhivetiev I.V. Spatio-temporal structure of the wave packets generated by the solar terminator. *Adv. Space Res.* 2009b, vol. 44, pp. 824–835. DOI: [10.1016/j.asr.2009.05.017](https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.05.017).

Afraimovich E.L., Perevalova N.P., Voyeikov S.V. Traveling wave packets of total electron content disturbances as deduced from global GPS network data. *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2003. vol. 65, iss. 11–13, pp. 1245–1262. DOI: [10.1016/j.jastp.2003.08.007](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2003.08.007).

Belyaev G., Boychev B., Kostin V., Trushkina E., Ovcharenko O. Modification of the ionosphere near the terminator due to the passage of a strong tropical cyclone through the large Island. *Sun and Geosphere*. 2015, vol. 10, pp. 31–38.

Bertin F., Testud J., Kersley L. Medium scale gravity waves in the ionospheric F-region and their possible origin in

weather disturbances. *Planet. Space Sci.* 1975, vol. 23, pp. 493–507. DOI: [10.1016/0032-0633\(75\)90120-8](https://doi.org/10.1016/0032-0633(75)90120-8).

Bishop R.L., Aponte N., Earle G.D., Sulzer M., Larsen M.F., Peng G.S. Arecibo observations of ionospheric perturbations associated with the passage of Tropical Storm Odette. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, pp. A11320. DOI: [10.1029/2006JA011668](https://doi.org/10.1029/2006JA011668).

Chane-Ming F., Roff G., Robert L., Leveau J. Gravity wave characteristics over Tromelin Island during the passage of cyclone Hudah. *Geophys. Res. Lett.* 2002, vol. 29, no. 6. CiteID 1094. DOI: [10.1029/2001GL013286](https://doi.org/10.1029/2001GL013286).

Chou M.Y., Lin C. H., Yue J., Chang L. C., Tsai H.F., Chen C.H. Medium-scale traveling ionospheric disturbances triggered by Super Typhoon Nepartak (2016). *Geophys. Res. Lett.* 2017a, vol. 44, pp. 7569–7577. DOI: [10.1002/2017GL073961](https://doi.org/10.1002/2017GL073961).

Chou M.Y., Lin C.C.H., Yue J., Tsai H.F., Sun Y.Y., Liu J.Y., Chen C.H. Concentric traveling ionosphere disturbances triggered by Super Typhoon Meranti (2016). *Geophys. Res. Lett.* 2017b, vol. 44, pp. 1219–1226. DOI: [10.1002/2016GL072205](https://doi.org/10.1002/2016GL072205).

Edemskiy I.K., Voyeykov S.V., Yasyukevich Yu.V. Seasonal and latitudinal variations of parameters of wavelike MHD-based disturbances generated by solar terminator. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]. 2011, vol. 8, no. 4, pp. 107–116. (In Russian).

Edemskiy I.K., Yasyukevich Y.V. Duration of wave disturbances generated by solar terminator in magnetoconjugate areas. *Proc. XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium*. Istanbul, 2011, pp. 1–4. DOI: [10.1109/URSIGASS.2011.6051003](https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2011.6051003).

Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. Variability of the ionosphere. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2000, vol. 62, pp. 685–693. DOI: [10.1016/S1364-6826\(00\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00029-8).

Francis S. H. A theory of medium-scale traveling ionospheric disturbances. *J. Geophys. Res.* 1974, vol. 79, no. 34, pp. 5245–5260. DOI: [10.1029/JA079i034p05245](https://doi.org/10.1029/JA079i034p05245).

Galushko V.G., Paznukhov V.V., Yampolski Y.M., Foster J.C. Incoherent scatter radar observations of AGW/TID events generated by the moving solar terminator. *Ann. Geophys.* 1998, vol. 16, pp. 821–827. DOI: [10.1007/s00585-998-0821-3](https://doi.org/10.1007/s00585-998-0821-3).

Hines C.O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. *Canadian J. Phys.* 1960, vol. 38, no. 11, pp. 1441–1481. DOI: [10.1139/p60-150](https://doi.org/10.1139/p60-150).

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, vol. 20, pp. 897–906. DOI: [10.1029/RS020i004p00897](https://doi.org/10.1029/RS020i004p00897).

Kazimirovsky E.S. Coupling from below as a source of ionospheric variability: a review. *Ann. Geophys.* 2002, vol. 45, no. 1, pp. 1–29.

Kim S.-Y., Chun H.-Y., Baik J.-J. A numerical study of gravity waves induced by convection associated with Typhoon Rusa. *Geophys. Res. Lett.* 2005, vol. 32, pp. L24816. DOI: [10.1029/2005GL024662](https://doi.org/10.1029/2005GL024662).

Klobuchar J.A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. *IEEE Trans. Aerospace and Electronics System.* 1986, vol. 23, no. 3, pp. 325–331.

Kuester M.A., Alexander M.J., Ray E.A. A Model Study of Gravity Waves over Hurricane Humberto (2001). *J. Atmosph. Sci.* 2008, vol. 65, no. 10, pp. 3231–3246. DOI: [10.1175/2008JAS2372.1](https://doi.org/10.1175/2008JAS2372.1).

Lastovicka J. Forcing of the ionosphere by waves from below. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006, vol. 68, pp. 479–497. DOI: [10.1016/j.jastp.2005.01.018](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.01.018).

Leonovich A.S., Kozlov D.A., Edemskiy I.K. Standing slow magnetosonic waves in a dipole-like plasmasphere. *Planetary and Space Sci.* 2010, vol. 58, no. 11, pp. 1425–1433. DOI: [10.1016/j.pss.2010.06.007](https://doi.org/10.1016/j.pss.2010.06.007).

Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Oinats A.V., Alsatkin S.S., Zherebtsov G.A. Relation of internal gravity wave anisotropy with neutral wind characteristics in the upper atmosphere. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017, vol. 122, pp. 7567–7580. DOI: [10.1002/2017JA024103](https://doi.org/10.1002/2017JA024103).

Mishin E.V., Epishova A.E., Ishkova L.M., Kovalevskaya E.M., Kozlov E.F., Kolokolov L.E., Rubtsov L.N., Samorokin N.I., Sidorova L.N., Somsikov V.M., Telegin V.A., Yudovich L.A. Disturbances of F-region electron density following solar terminator during the WITS period of 16–20 March 1988. *J. Atmosph. Terr. Phys.* 1991, vol. 53, iss. 6–7, pp. 643–648. DOI: [10.1016/0021-9169\(91\)90091-K](https://doi.org/10.1016/0021-9169(91)90091-K).

Pfister L., Chan K.R., Bui T.P., Bowen S., Legg M., Gary B., Kelly K., Proffitt M., Starr W. Gravity waves generated by a tropical cyclone during the STEP tropical field program: A case study. *J. Geophys. Res.* 1993, vol. 98, no. D5, pp. 8611–8638. DOI: [10.1029/92JD01679](https://doi.org/10.1029/92JD01679).

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, vol. 48, pp. 1196–1210. DOI: [10.1016/j.asr.2011.06.014](https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.06.014).

Polyakova A.S., Perevalova N.P. Comparative Analysis of TEC Disturbances over Tropical Cyclone Zones in the North-West Pacific Ocean. *Adv. Space Res.* 2013, vol. 52, pp. 1416–1426. DOI: [10.1016/j.asr.2011.06.014](https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.06.014).

Polyakova A.S., Yasyukevich Yu.V. Change in the intensity of ionospheric response to solar terminator passage during tropical cyclones. *Proc. XXV National Conference “Radio-waves propagation” dedicated to 80 Anniversary of Domestic Investigations of Ionosphere*. 2016, Tomsk, 3–9 July. 2016, vol. 1, pp. 113–166. (In Russian).

Somsikov V.M., Ganguly B. On the formation of atmospheric inhomogeneities in the solar terminator region. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1995, vol. 57, iss. 12, pp. 1513–1523. DOI: [10.1016/0021-9169\(95\)00014-S](https://doi.org/10.1016/0021-9169(95)00014-S).

Xiao Z., Xiao S., Hao Y., Zhang D. Morphological features of ionospheric response to typhoon. *J. Geophys. Res.* 2007, vol. 112, pp. A04304. DOI: [10.1029/2006JA011671](https://doi.org/10.1029/2006JA011671).

Zakharov V.I., Kunitsyn V.E. Regional features of atmospheric manifestations of tropical cyclones according to ground-based GPS network data. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2012, vol. 52, no. 4, pp. 533–545. DOI: [10.1134/S0016793212040160](https://doi.org/10.1134/S0016793212040160).

Yasyukevich Yu.V., Perevalova N.P., Edemskiy I.K., Polyakova A.S. *Otklik ionosfery na gelio- i geofizicheskie vozmushchayushchie faktory po dannym GPS* [Ionosphere response to helio- and geophysical disturbing factors from GPS data]. Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 2013, 271 p. (In Russian).

Yasyukevich A.S., Padokhin A.M., Mylnikova A.A., Yasyukevich Yu.V., Voyeykov S.V., Tereshin N.A. Changes in the intensity of TEC variations with different time scales during tropical cyclones. *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta MGU* [Memoirs of the Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University], 2018, no. 1. (In Russian).

URL: <http://rammb.cira.colostate.edu> (accessed 11 November 2017).

URL: <http://terras.gsi.go.jp> (accessed 1 June 2017).

Как цитировать эту статью

Едемский И.К., Ясюкевич А.С. Наблюдения волновых пакетов в ПЭС, генерируемых солнечным терминатором, в периоды действия тайфунов. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 2. С. 66–75. DOI: [10.12737/szf-42201806](https://doi.org/10.12737/szf-42201806).