

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ОБ ОТКЛИКЕ ИОНОСФЕРЫ НА СИЛЬНЫЕ ТРОПОСФЕРНЫЕ
ВОЗМУЩЕНИЯ

© 2023 г. С. Л. Шалимов^{a, b, *}, В. И. Захаров^{a, c, d}, М. С. Соловьева^a, Н. Р. Булатова^{a, e},
Г. М. Коркина^e, П. К. Сигачев^e

^aИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), Москва, Россия

^bИнститут космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

^cФизический факультет Московского Государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ), Москва, Россия

^dИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

^eКамчатский филиал ФИЦ “Единая геофизическая служба РАН”, Петропавловск-Камчатский, Россия

*E-mail: pmsk7@mail.ru

Поступила в редакцию 27.06.2023 г.

С использованием региональных станций сверхдлинноволнового радиопросвечивания и измерений возмущений электронной плотности посредством спутников миссии SWARM в Дальневосточном регионе России исследован отклик нижней и верхней ионосферы на прохождение нескольких мощных тайфунов в период 2014–2016 гг. Обнаружено, что возмущения амплитуды и фазы СДВ-сигнала, а также электронной плотности во время активной стадии тайфунов, соответствуют прохождению атмосферных внутренних гравитационных волн и их диссипации. Предложен механизм воздействия внутренних волн на ионосферу, позволяющий интерпретировать наблюдаемые вариации фазы СДВ-сигнала и вариации электронной плотности в верхней ионосфере.

Ключевые слова: сверхдлинноволновое радиопросвечивание, атмосферные внутренние гравитационные волны, тайфуны, ионосфера

DOI: 10.31857/S0205961423060088, EDN: DGBRAJ

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, ионосфера подвержена влиянию распространяющихся вверх атмосферных волн, источником которых могут стать не только импульсные и волновые естественные источники в литосфере и океане (землетрясения, вулканы, цунами и др.) (Шалимов, 2018), но и метеорологические (Данилов и др., 1987; Ванина-Дарт, Шарков, 2016). Так, с использованием данных вертикального зондирования приблизительно сотни станций, было установлено (Forbes et al., 2000), что в отсутствие геомагнитных возмущений ионосферные вариации на ± 25 –35% определяются влиянием метеорологических факторов с периодами от нескольких часов до 1–2 дней и на ± 15 –20% – с периодами 2–30 дней (периоды планетарных волн) на всех широтах.

Среди различных метеорологических факторов тропические циклоны (тайфуны) выделяются как наиболее мощные источники, которые способны влиять на ионосферу. Это влияние регистрируют как в нижней, так и в верхней ионосфере. В частности, в активную фазу циклона (в ракетных экспериментах) было зарегистрировано уменьшение электронной концентрации в D об-

ласти (максимальное уменьшение – на высотах 71 ± 3 км) на расстояниях около 10^3 км (по горизонтали) от ядра циклона (Ванина-Дарт и др., 2008). В верхней ионосфере, как правило, регистрируют волновые вариации в диапазоне атмосферных внутренних волн (Ясюкевич и др., 2013; Шалимов и Соловьева, 2022). В некоторых работах утверждается, что полное электронное содержание (Total Electron Content, TEC) имеет тенденцию к увеличению перед выходом циклона на сушу, причем амплитуда и протяженность этой аномалии, спустя сутки после выхода, уменьшается (Mao et al., 2010; Rice et al., 2012; Liu et al., 2008). Вместе с тем, для шести циклонов в северо-западной части Тихого океана было показано (Polyakova, Perevalova, 2013), что вариации TEC достигают наибольших амплитуд, когда скорость ветра и интенсивность тропического циклона максимальны, причем тогда же наблюдаются перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ). В работе (Захаров, Куницын, 2012) методом GPS-интерферометрии во время действия крупнейших атлантических циклонов 2004–2008 гг. было показано, что перемещающиеся ионосферные волновые возмущения могут быть обусловлены орографией, так что возможна генерация аку-

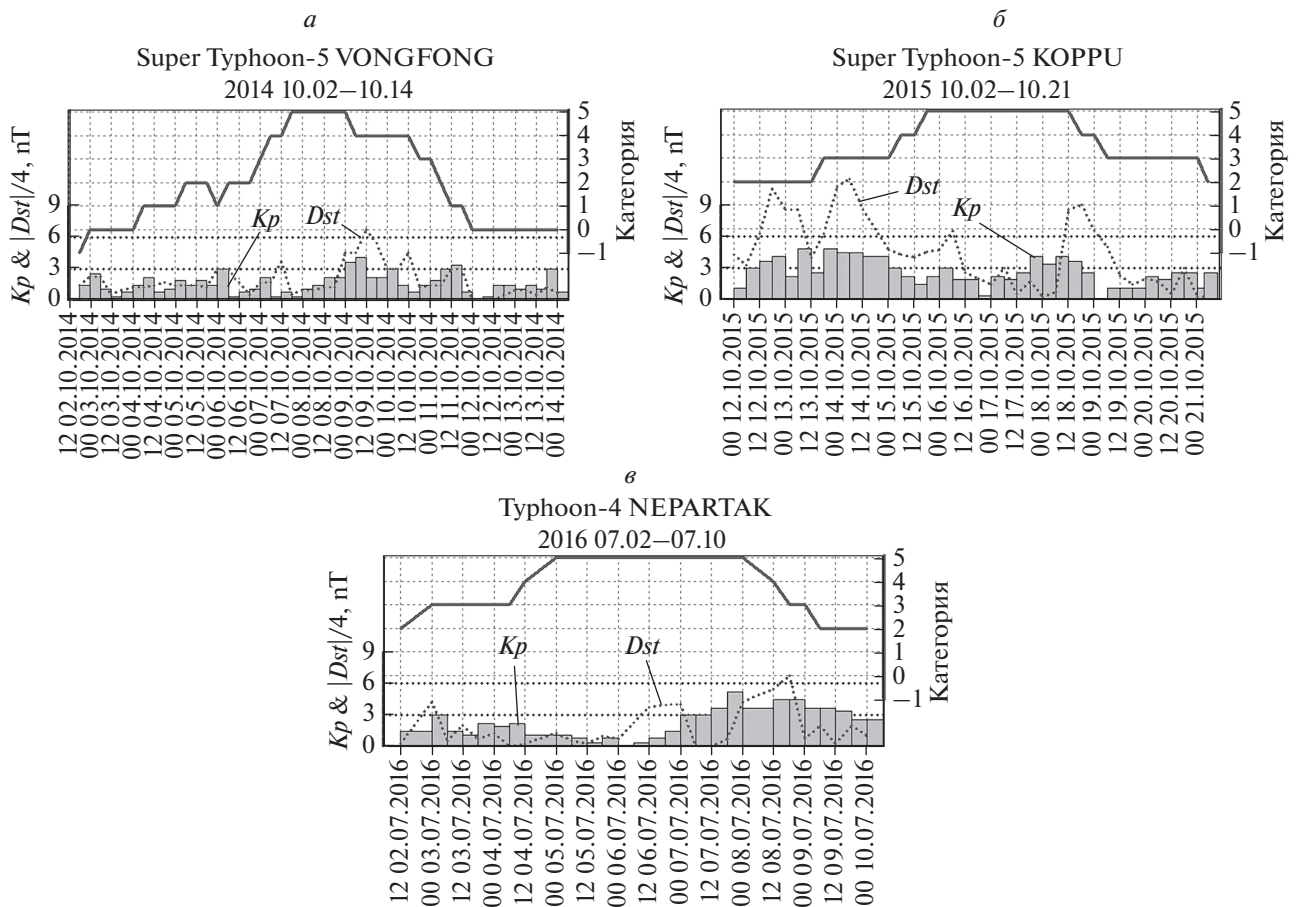


Рис. 1. Временная эволюция рассмотренных в работе тайфунов. Индексы K_p – гистограмма, Dst – ломаная кривая на панелях а – Vongfong, б – Koppu и в – Nepartak.

стико-гравитационных волн на береговой линии при ее обтекании воздушными потоками от тайфунов. Установлено, что такие волновые структуры приурочены к фазам роста или спада тайфуна.

Очевидно, что перечисленные признаки воздействия тайфунов на ионосферу нуждаются в дальнейших исследованиях как в нижней, так и в верхней ионосфере с использованием дополнительных (к названным выше) методов.

В настоящей работе для исследования отклика нижней ионосферы на прохождение тихоокеанских тайфунов периода 2014–2016 гг. использована региональная сеть станций СДВ-радиопросвечивания, а для регистрации отклика верхней ионосферы – измерения посредством спутников SWARM в интервалы пролета над зоной действия тайфунов.

ТРОПИЧЕСКИЕ ТАЙФУНЫ

В настоящей работе рассмотрены ионосферные отклики на мощные атмосферные вихри – тайфуны Vongfong, Koppu и Nepartak. События относятся к периоду 2014–2016 гг. и являются

тайфунами 5-ой наивысшей категории по шкале Саффира-Симсона. На рис. 1 представлена их временная эволюция. Скорость ветра в максимуме своего развития у рассматриваемых событий составила от 50 до 80 м/с, а падение давления в центре области возмущения достигала в максимуме величин от 70 до 110 гПа.

Поскольку на состояние ионосферы могут оказывать влияние параметры гео- и гелиомагнитной активности, учитывалась также временная эволюция индексов K_p и Dst . Они также приведены на рис. 1. Отметим, что во время рассматриваемых событий оба индекса показывали спокойную гео- гелиомагнитную обстановку, что позволяет упростить интерпретацию наблюдений и повысить надежность выводов, полученных на их основе. Траектории тайфунов показаны на рис. 2.

ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДЫ

Отклик нижней ионосферы исследуется методом дистанционного СДВ радиозондирования на частотах 3–30 кГц, которые способны распространяться на тысячи километров от передатчика

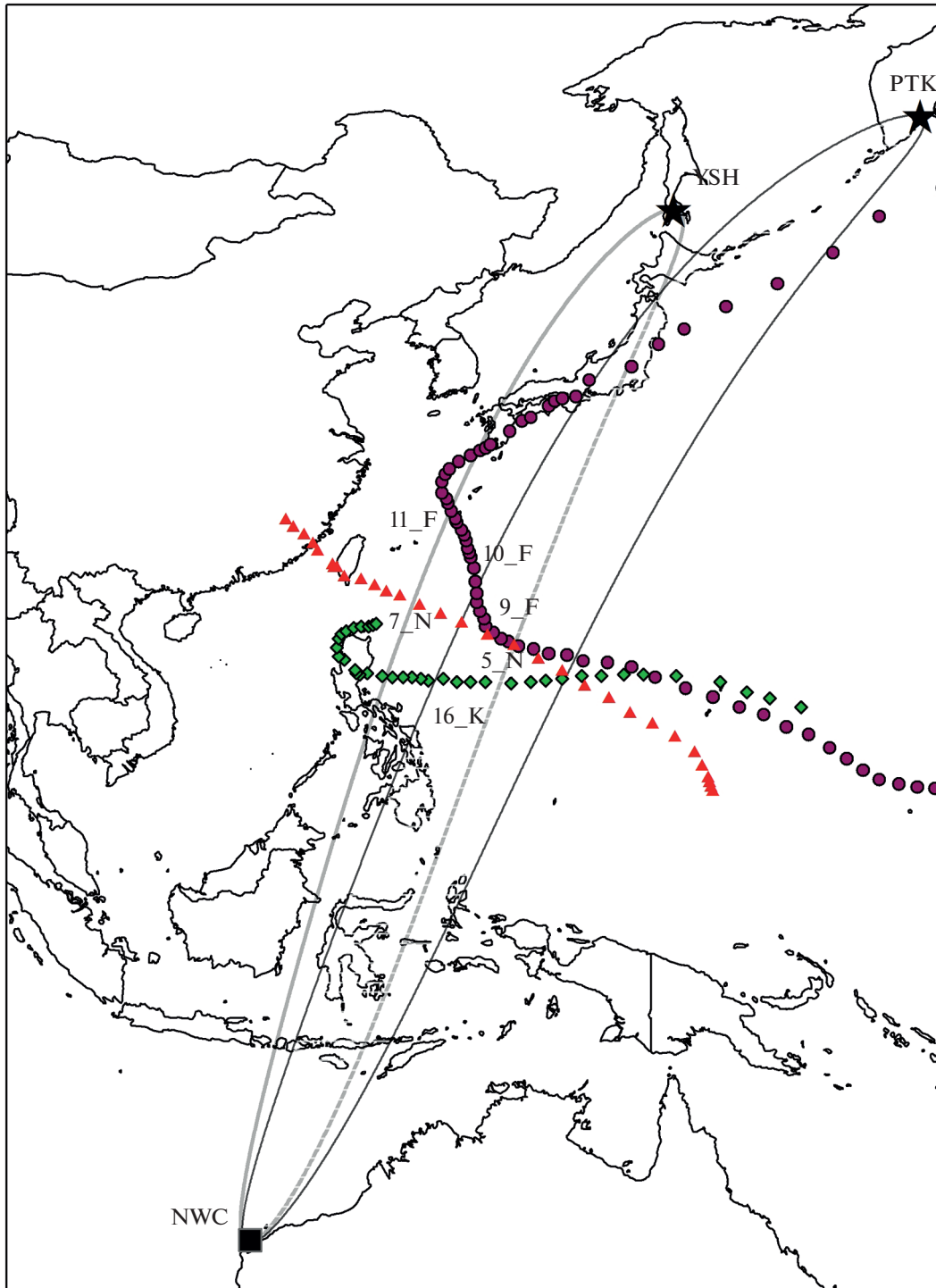


Рис. 2. Траектории тайфунов Vongfong (октябрь 2014 г., фиолетовые кружки), Корри (октябрь 2015 г., зеленые ромбы) и Nepartak (июль 2016 г., красные треугольники). Квадрат показывает положение передатчика NWC (19.8 кГц), звездочки – положение приемников в Южно-Сахалинске (YSH) и Петропавловске-Камчатском (РТК). Эллипсами показана зона чувствительности (пять зон Френеля) трасс сигнала. Цифры соответствуют датам, для которых были найдены возмущения сигнала. Буквы при них обозначают название тайфунов.

до приемника со слабым затуханием (~2 дБ на 1000 км) в естественном волноводе Земля – ионосфера (отражение от верхней стенки волновода –

ионосферы, происходит на высотах ~60 км днем и ~85 км ночью). Амплитуда и фаза сигналов является чувствительным индикатором состояния

ионосферы. Если возмущения генерируются в атмосфере тайфуном, то при распространении в верхнюю ионосферу эти волны проходят через нижнюю ионосферу, и индикатором этого будут соответствующие возмущения амплитуды и фазы СДВ-сигнала.

Приемные станции СДВ радиопросвечивания региональной сети Дальневосточного региона России находятся в Петропавловске-Камчатском, Южно-Сахалинске и Южно-Курильске. Станции оборудованы UltraMSK приемниками (<http://ultramsk.com>), которые измеряют одновременно амплитуду и фазу MSK (Minimum Shift Keying) модулированных сигналов в частотном диапазоне 10–50 кГц от нескольких передатчиков. MSK сигналы имеют фиксированные частоты в интервале 50–100 Гц относительно основной частоты. Приемник может регистрировать сигналы с шагом дискретизации от 50 мс до 60 с. Для анализа использовались данные усредненные по временному интервалу 20 с.

Были проанализированы вариации СДВ сигнала для 3-х тайфунов за период 2014–2016 гг., которые пересекали зоны чувствительности трасс (пять зон Френеля) в отсутствии магнитной и сейсмической активности (т.е. для событий с магнитудой $M > 5.5$). Трассами служили сигналы от передатчика NWC (19.8 кГц), расположенного на западном побережье Австралии, принимаемые станциях в Петропавловске-Камчатском (РТК), Южно-Сахалинске (YSH) и Южно-Курильске (YUK). Данные по тайфунам были получены с сайта Японского метеорологического агентства (JMA, <https://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>).

Для анализа был выбран ночной интервал времени, поскольку дневная ионосфера очень стабильна и мало чувствительна к воздействиям слабее, чем солнечные вспышки. СДВ сигналы имеют суточные и сезонные вариации, поэтому для анализа использовался разностный сигнал, определяемый как разница между наблюдаемым и среднемесячным сигналом.

Для исследования возмущений верхней ионосферы, синхронных с теми, что наблюдались в нижней ионосфере посредством СДВ радиопросвечивания, использовались данные со спутников Swarm, где задействованы 3 спутника (А, В и С), расположенные на двух околополярных орбитах: орбиты спутников А и С имеют наклонение 87.4° практически на одной высоте (в 430–460 км для эпохи 2019 г.) и двигаются по сходным орбитам с разницей эпох обращения 2–10 с. Третий спутник имеет иные параметры движения (например, орбиту в диапазоне 500–540 км), не синхронизован с первыми спутниками и является контрольным (Olsen et al., 2013). В настоящем исследовании используются данные о пространственно-временном распределении электронной

концентрации, измеренные лентгмюровскими зондами на борту спутников с частотой опроса 2 Hz и относительной ошибкой в области максимума электронной концентрации не более 1% при пролетах над зонами действия тайфунов (<http://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/swarm>).

Поскольку масштабы области ТЦ в атмосфере составляют величины порядка нескольких сотен км и не превосходят 1500 км, то с учетом скорости движения ИСЗ (7.4–7.6 км/с) параметры временного фильтра в нашей работе выбирались в интервале от 15 с до 3–5 мин.

Поиск данных по пролетам сводится к определению геометрического пересечения проекций треков пролетов космических аппаратов с областью, в которой могут наблюдаться ионосферные проявления тропических циклонов. Работа проведена с помощью специализированного ПО, созданного на физическом факультете МГУ. Все иллюстрации, приведенные в этой части работы, выполнены полуавтоматическим комплексом обработки. При этом учитывались следующие особенности: 1) возможность отсутствия пролетов в интересующий период в непосредственной близости от региона действия тропического циклона (ТЦ) или тайфуна, 2) трудность выделения изучаемого отклика на фоне естественных ионосферных возмущений, к которым в нашем случае относятся экваториальная ионосферная аномалия и области овала высоких широт (последний особенно важен в динамике ночной плазмы), 3) поиск пролетов спутника в ночные часы, когда наиболее существенны эффекты влияния ионосферы на распространение СДВ-сигналов, но уменьшается электронная концентрация, которая в работе используется как естественный индикатор возмущений в ионосфере, 4) определение возмущенной области, проявляющейся в ионосфере от ТЦ, которая, в случае приближения источника генерации к суше, т.е. препятствие может изменить картину регистрируемых возмущений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В настоящей работе синхронные возмущения нижней и верхней ионосферы будут рассмотрены для 3-х достаточно мощных тайфунов – Vongfong (2014), Korpu (2015) и Nепartak (2016), траектории которых показаны на рис. 2.

Тайфун Vongfong 2014. Из рис. 2 видно, что 8–11 октября тайфун находился внутри зон чувствительности трасс NWC-РТК и NWC-YSH. Депрессия в амплитуде наблюдалась 9 октября для трассы NWC-РТК и 10 октября для трассы NWC-YSH, но, принимая во внимание дальнейшее сопоставление с измерениями на спутниках Swarm, рассмотрим подробнее день 11 октября.

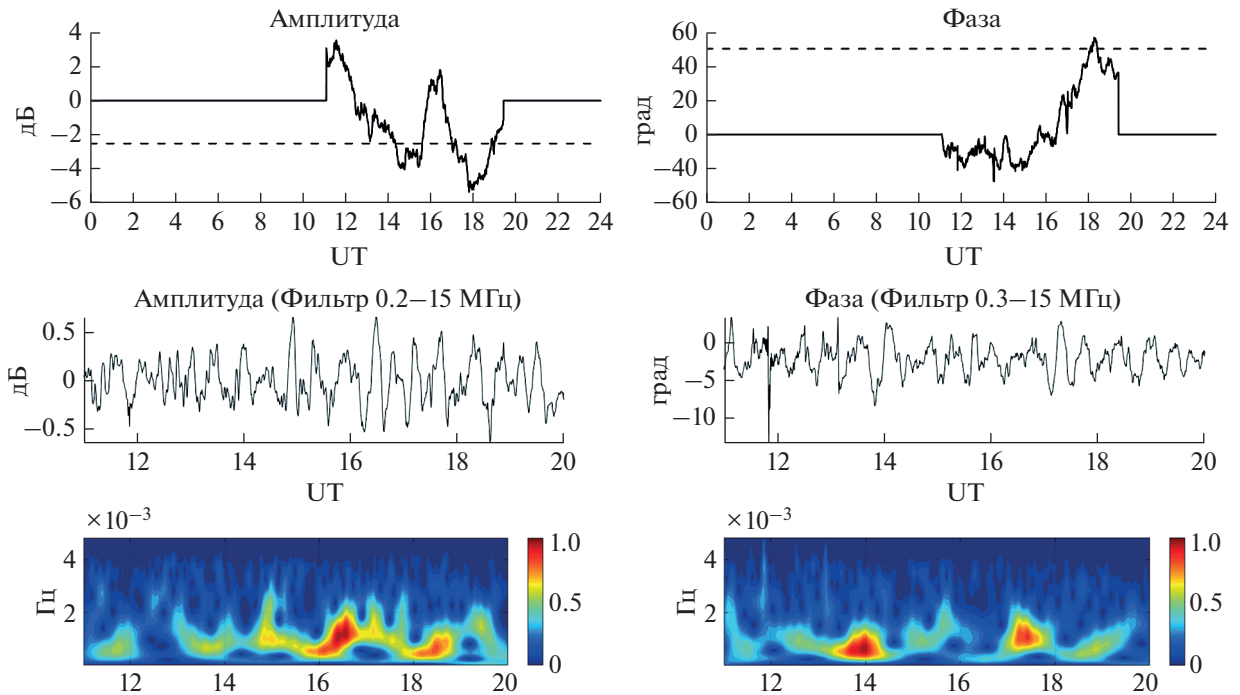


Рис. 3. Тайфун Vongfong 11 октября 2014 г. На верхнем графике изображены разностные ночные амплитуда и фаза NWC сигнала на станции в Южно-Сахалинске. Пунктирная линия – уровень 2 стандартных отклонений. На среднем графике показаны амплитуда и фаза фильтрованного сигнала в ночное время. Нижний график – вейвлет-спектры фильтрованного сигнала.

Для этого дня для трассы NWC–YSH был сделан вейвлет-анализ амплитуды и фазы ночного сигнала, отфильтрованного в диапазоне частот 0.3–15 мГц (рис. 3) Можно отметить две особенности вариаций фазы сигнала: достаточно длительный (несколько часов) отрицательный сдвиг фазы, который сменяется положительной аномалией, и наложенные на них более короткопериодные волновые вариации.

Рассмотрим теперь измерения в верхней ионосфере на спутниках SWARM. На рис.4 показан результат измерения вариаций электронной плотности за 11.10.2014 во время пролета спутников -А и -С в период 12:45–13:00 UTC над зоной действия тайфуна Vongfong приблизительно в одно время с регистрацией вариаций СДВ сигнала, показанных на рис. 3. На карте региона действия циклона представлен полный трек циклона за весь период его действия, на котором эллипсом в проекции карты отмечена область шторма циклона в указанный период времени. Условно лучами представлены треки спутников в проекции на поверхность земли. Вдоль нисходящих в нашем случае треков нанесены метки времени с обозначением спутника, например, “12:56 С” означает, что над данной точкой спутник SWARM -С пролетал в указанное время. Вдоль треков приведены соответствующие отклики электронной концентрации, выделенные в диапазоне 15...180 с. Для

удобства амплитуды возмущений вынесены на панель внутри рис. 3.

Обратим внимание на зарегистрированные квазипериодические структуры достаточно большой до 10% относительной амплитуды dN/N . С учетом скорости спутника (около 7.5 км/с), протяженность структур составляет 400–600 км, что соответствует горизонтальной длине волны структур.

Тайфун Корри 2015. Как видно из рис. 16 статус тайфуна был достигнут 15 октября 2015 г. 17 октября он усилился до 5 категории. Тайфун находился внутри зоны чувствительности трассы NWC-РТК 15–16 октября и внутри зоны чувствительности трассы NWC-YSH 16–17 октября (рис. 2).

На рис. 5 показана фаза и амплитуда для возмущенного дня 16 октября 2015 г. Хотя отклонение от среднемесячной величины не превышает двух стандартных отклонений для фазы, можно отметить отрицательный сдвиг фазы. Кроме того, отчетливо видны квазипериодические вариации фазы СДВ сигнала. Вейвлет-анализ сигнала показывает периоды этих вариаций.

Траектория спутников Swarm для этого тайфуна показана на рис. 6 вместе с условным радиусом действия тайфуна равным 1000 км. Видно, что около 17 UT спутники проходят по краю области шторма. Это позволяет регистрировать те же спе-

Super Typhoon-5 VONGFONG vs SWARM Ne cur 5 min dN/N
11.10.2014 12:45–13:00

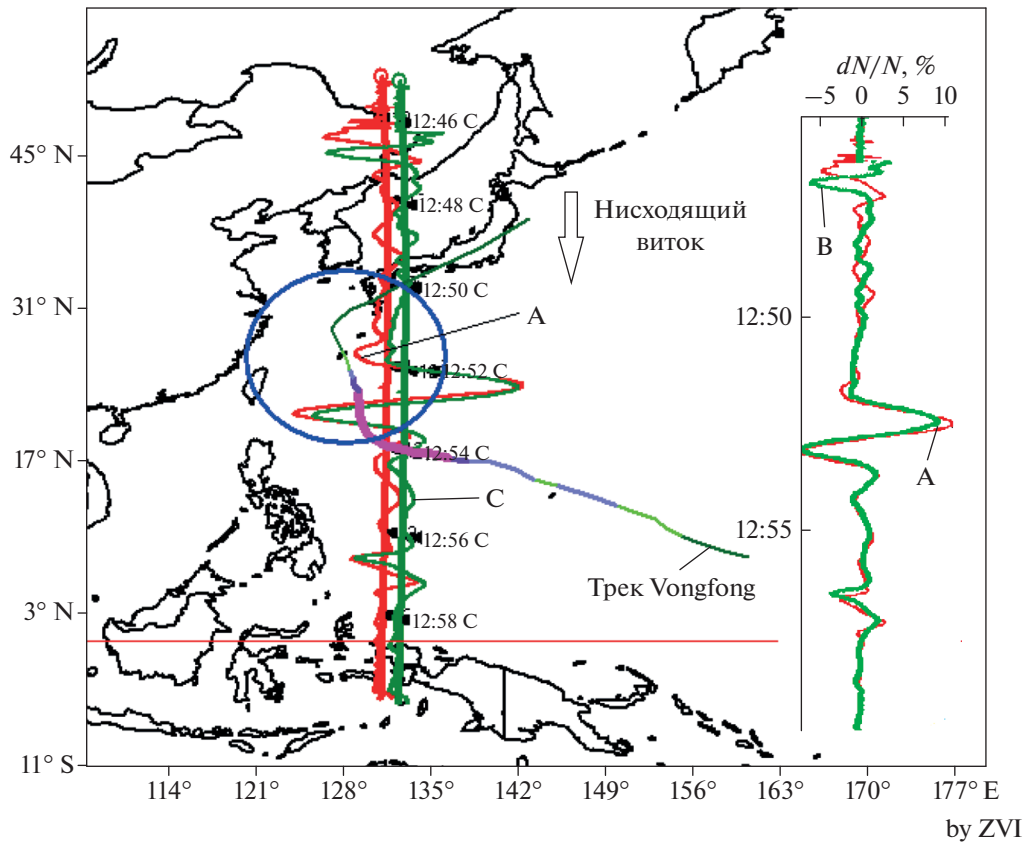


Рис. 4. Карта региона действия тайфуна с указанием его трека, эллипсом отмечена условная область тайфуна, пересекаемая траекториями спутников. Вдоль нисходящих витков нанесены метки времени с обозначением спутника и амплитудами возмущений (измерения возмущений для удобства вынесены на панель внутри рисунка).

цифические возмущения плотности плазмы, что и для тайфуна Vongfong (рис. 4).

В обозначениях аналогичных рис. 4, относительная амплитуда возмущений достигает 10%.

Тайфун Nepartak 2016. Тайфун достиг 5 категории 5 июля 2016 г. Находился в этой категории следующий день, когда достиг пика интенсивности. Эффекты наблюдались 5 июля на трассах NWC-PTK и NWC-YSH. Амплитуда и фаза возмущенного сигнала совместно с результатами вейвлет анализа 5 и 7 июля показана на рис. 7 и 8 соответственно.

Для обоих дней (5 и 7 июля) в вариациях фазы имели место квазиволновые возмущения. Это подтверждают и результаты вейвлет-анализа. При этом, если 5 июля ночные длиннопериодные вариации фазы начинались, как и в предыдущих двух случаях, с отрицательной полуволны и заканчивались положительной, то 7 июля ход фазы сигнала был инвертированный.

Для периода действия тайфуна Nepartak траектории спутников Swarm (-А и -С) и результаты из-

мерения вариаций плотности плазмы показаны на рис. 9.

На рис. 9 обращает на себя anomalно большой – до 30% – относительный отклик электронной концентрации для спутника -С на восходящем витке. Совместное рассмотрение откликов для спутников -А и -С показывает, что в ионосфере региона действия тайфуна возможно сосуществование как областей, обусловленных прохождением ВГВ, так и областей турбулентных движений плазмы. Поясним последнее утверждение. По построению системы SWARM спутники -А и -С синхронизованы в пространстве и времени – они входят в соседние области, отстоящие друг от друга на расстоянии менее 1.5 град по долготе и от 2 до 10 с по времени. Обычно корреляция двух сигналов составляет не менее 0.85–0.9, но в рассматриваемом случае корреляция численно равна 0.32, что может указывать на формирование в ионосфере вдоль траекторий пролета спутников различных областей, обусловленных квазиволновыми или турбулентными движениями плазмы.

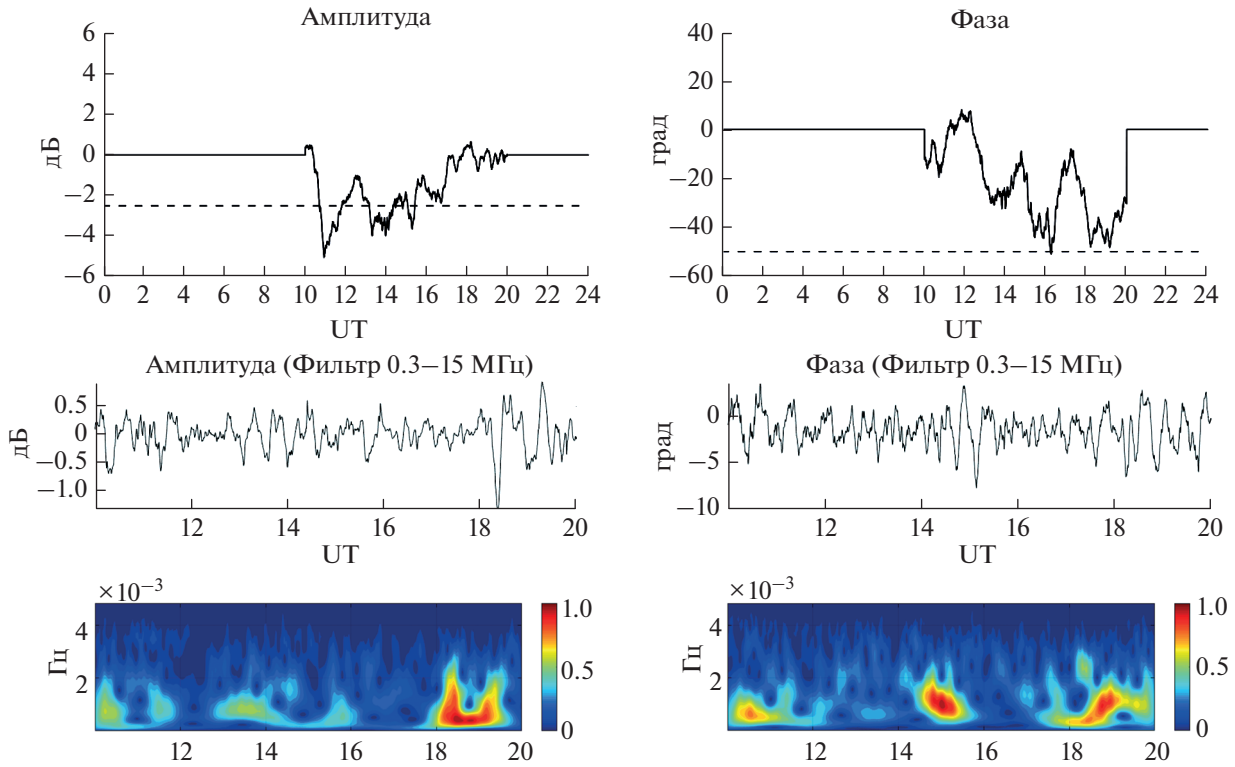


Рис. 5. То же, что на рис. 3, но для тайфуна Корри 16 октября 2015 г.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Приведенные экспериментальные данные отчетливо демонстрируют волновые возмущения амплитуды и фазы СДВ-сигнала во время активной стадии тайфунов, т.е. присутствие волновых возмущений в нижней ионосфере. Вейвлет-анализ показывает наличие волн в диапазоне периодов 8–55 мин, что видно на рис. 3, 5, 7, 8. Этот диапазон соответствует атмосферным внутренним гравитационным волнам (ВГВ).

Если обратиться к практически синхронным (с регистрацией возмущений посредством СДВ радиопросвечивания) наблюдениям на спутнике SWARM (см. рис. 4, 6, 9), то видно, что спутник регистрирует вариации плотности ионосферной плазмы верхней ионосферы с масштабом в несколько сотен км, которые являются типичными для перемещающихся ионосферных возмущений. Таким образом, и в нижней, и в верхней ионосфере во время активной фазы тайфунов имеют место вариации ионосферной плазмы характерные для распространяющихся ВГВ.

Можно оценить согласованность спутниковых измерений с измерениями методом СДВ радиопросвечивания. Поскольку масштабы L вариаций плотности, наблюдаемые на спутнике оцениваются по формуле $f \approx V_s/L$, где V_s — скорость спутника, то, используя рис. 4, 6, 9, для вариаций

плотности плазмы получим $L \approx 300\text{--}400$ км. Поскольку, согласно предположению, наблюдаемые частоты волновых вариаций в нижней ионосфере соответствуют проходящим через ионосферу ВГВ, то для них справедлива оценка $\omega = \omega_B \lambda_z / \lambda_x$, где ω_B — частота Брента–Вяйсяля, λ_z , λ_x — соответственно вертикальная и горизонтальная длины волн. Согласно модельным расчетам (Vadas and Fritts, 2006), на высотах термосферы ВГВ, генерируемые конвективными движениями в атмосфере, имеют вертикальные длины волн $\lambda_z \approx 45\text{--}55$ км. Соответственно, периоды этих волн должны занимать диапазон $T \approx 30\text{--}50$ мин, что согласуется с наблюдениями посредством СДВ радиопросвечивания (см. рис. 3, 5, 7, 8).

Как уже было отмечено, разностный сигнал на рис. 3, 5, 7, 8 демонстрирует две особенности вариаций фазы сигнала: длиннопериодные (несколько часов) отрицательные и положительные аномалии, на которые наложены более короткопериодные волновые вариации. Если короткопериодные волновые вариации связываются с распространением ВГВ, то происхождение длиннопериодных вариаций не вполне ясно, но можно полагать, что они также обусловлены присутствием ВГВ, а точнее — диссипацией внутренних волн. На то, что диссипативные процессы имеют место в верхней ионосфере, указывают отмеченные вы-

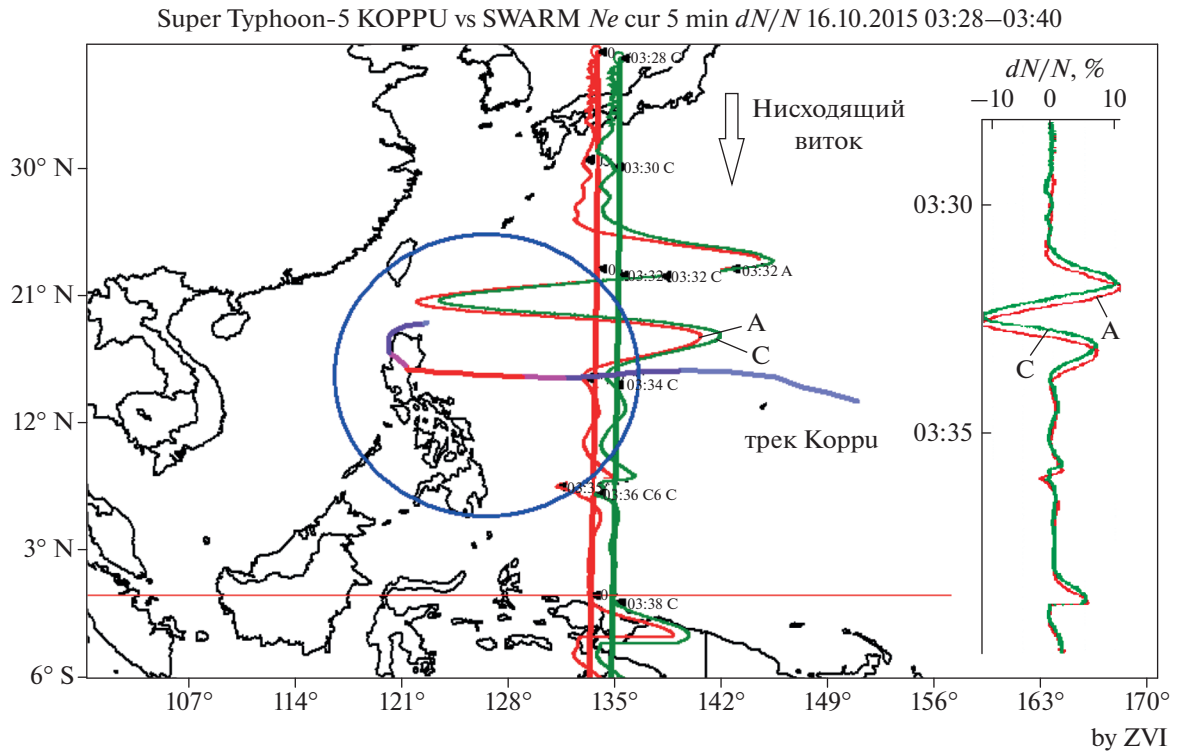


Рис. 6. То же, что на рис. 4, но для тайфуна Корри 16 октября 2015 г.

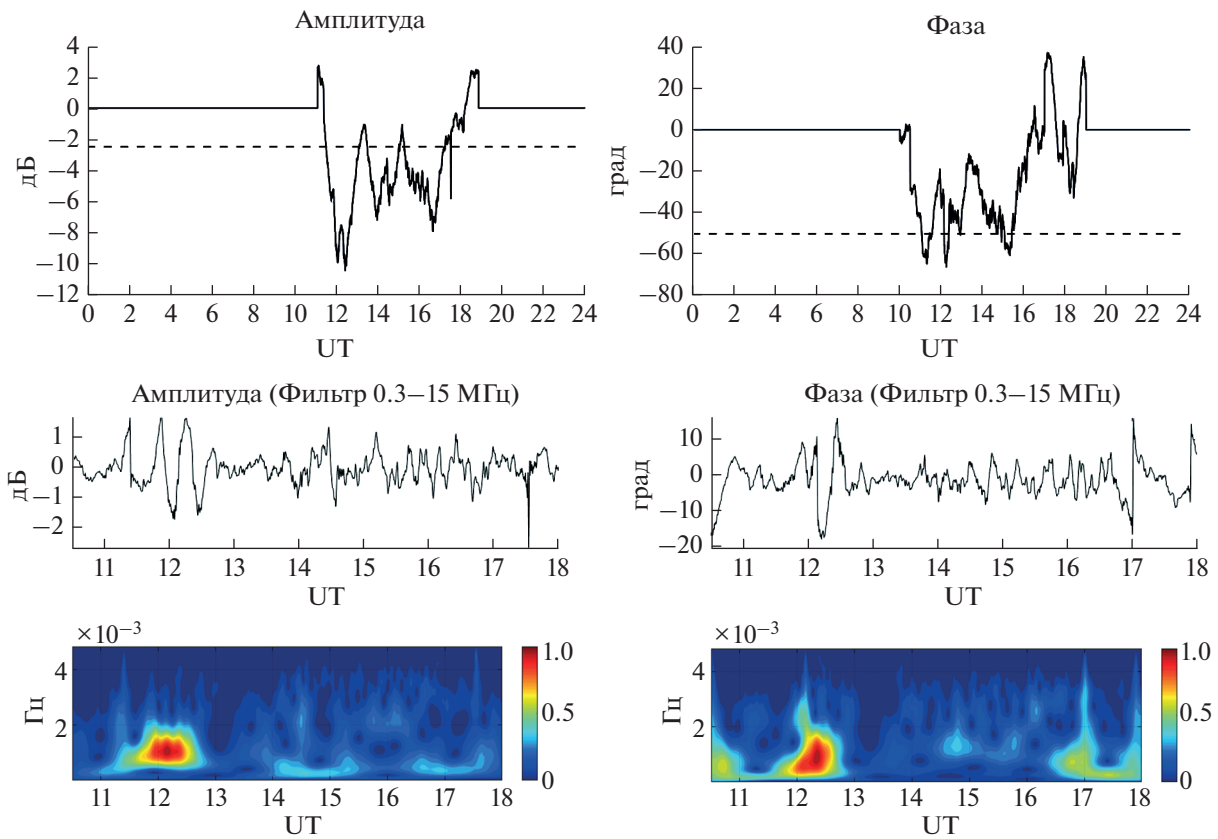


Рис. 7. То же, что на рис. 3, но для тайфуна Nepartak 5 июля 2016 г.

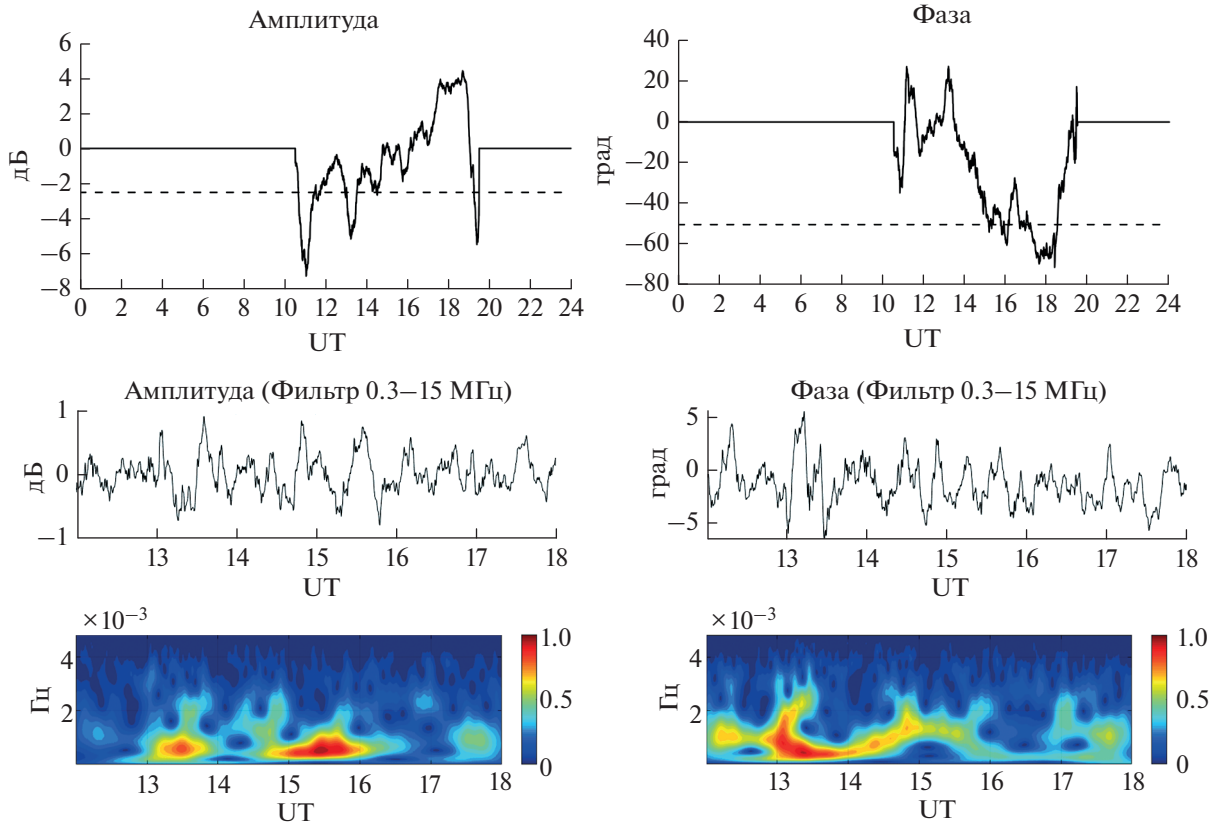


Рис. 8. То же, что на рис. 7 для тайфуна Nepartak 7 июля 2016 г.

ше измерения на спутниках SWARM. Поскольку в этих измерениях масштабы вариаций плотности занимают интервал от нескольких десятков до нескольких сотен км, они соответствуют масштабам неоднородностей в нижней ионосфере, где происходит диссипация ВГВ. Действительно, если неоднородность имеет масштаб λ_{\perp} поперек геомагнитного поля, то поляризационное электрическое поле этой неоднородности проектируется вдоль силовой линии на расстояние $l_{\parallel} = \lambda_{\perp} \sqrt{\sigma_{\parallel} / \sigma_p}$, где σ_{\parallel} и σ_p – продольная (вдоль силовых линий) и поперечная проводимость, соответственно (Kelley, 2009). Отношение $\sqrt{\sigma_{\parallel} / \sigma_p} \approx 60$ на высоте 100 км, поэтому вывод о соответствии масштабов в нижней и верхней ионосфере справедлив.

Действительно, если тайфун является источником ВГВ, распространяющихся в нижнюю ионосферу, то диссипация этих волн как раз на этих высотах приводит к росту коэффициента турбулентной диффузии D_t и, как следствие, к более быстрому перераспределению нейтральных составляющих атмосферы по высоте. Было показано (Ванина-Дарт и др., 2008), что возможной реакцией ионосферы в период активной фазы тропического циклона может быть понижение (в

несколько раз) электронной концентрации в диапазоне высот 60–80 км. В вариациях фазы СДВ этот эффект соответствовал бы отрицательной полуволне и поднятию D слоя. Авторы цитируемой работы предложили связать такое поведение электронной концентрации с повышением концентрации озона, что, как известно, понижает электронную концентрацию (Данилов, Власов, 1973; Пахомов, Князев, 1988). Если повышение концентрации озона на высотах 60–80 км обусловлено диффузионным перераспределением его снизу, то характерное время этого процесса можно оценить как $\tau_D \approx H^2 / D_t$, и при масштабе однородной атмосферы $H \approx 6$ км и $D_t \approx 3 \times 10^3$ м²/с (Данилов и др., 1987) получим $\tau_D \approx 10^4$ с. Соответственно, при отсутствии других процессов во время активной фазы циклона всегда наблюдалось бы понижение концентрации электронов в D слое.

Рассмотрим, однако, другой процесс, также обусловленный диссипацией ВГВ, но вызывающий появление положительной полуволны в вариациях фазы СДВ, который можно связать с вертикальным переносом молекул NO из области их активного образования (100–150 км), что, как известно, приводит к увеличению концентрации

Typhoon-4 NEPARTAK vs SWARM *Ne* cur 5 min *dN/N*
07.07.2016 16:05–16:20

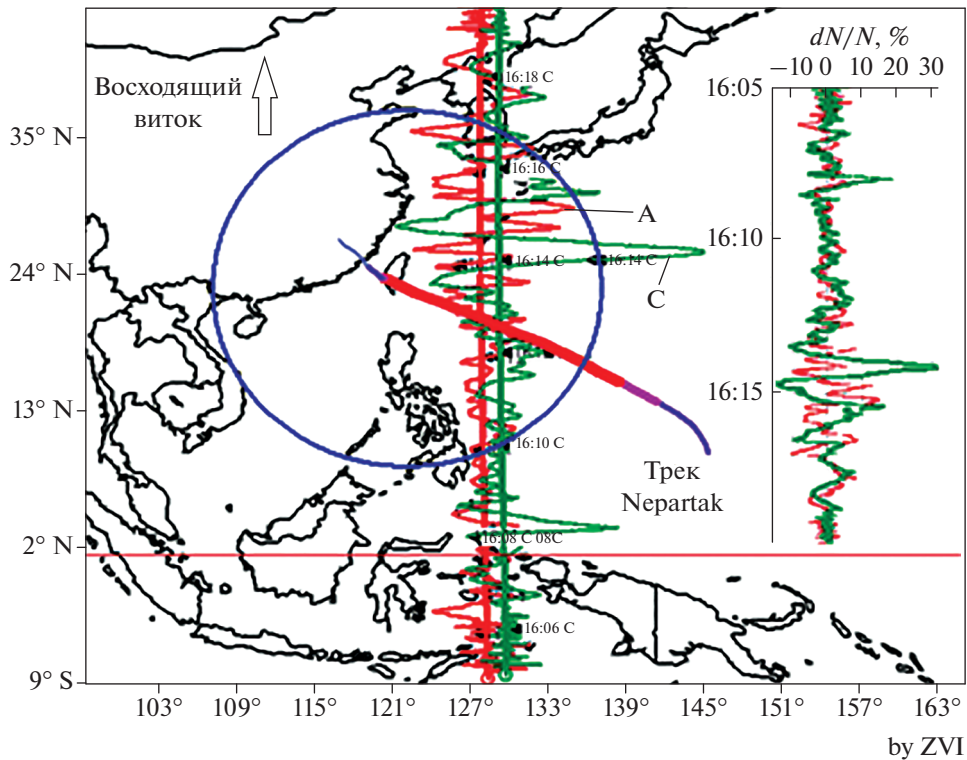


Рис. 9. То же, что на рис. 4 для тайфуна Neparatak 7 июля 2016 г.

электронов в нижней ионосфере (Данилов и др., 1987).

Здесь необходимо отметить, что (Чемберлен, 1981) в обычных условиях большая часть ионизации в нижней ионосфере обусловлена воздействием излучения Лайман- α именно на окись азота NO. Ночью, когда поток прямого излучения Лайман- α равен нулю, имеется значительный поток рассеянного излучения Лайман- α , отраженного от водородной геокороны в самых верхних слоях атмосферы. Интенсивность этого рассеянного излучения примерно в 100–1000 раз слабее, чем интенсивность дневного излучения и поэтому только ночью рассеянное излучение вносит значительный вклад в ионизацию нижней ионосферы. При этом характерное время нарастания электронной концентрации в e раз $\tau \approx 1/\sqrt{q_{eff}\alpha_{eff}}$ (Чемберлен, 1981), где α_{eff} – эффективный коэффициент рекомбинации, $q_{eff} = J \cdot [NO]/(1 + \lambda)$ – эффективная скорость ионизации, $\lambda = const$ – отношение концентраций отрицательных ионов и электронов, J – коэффициент скорости реакции фотоионизации. Для $\lambda \ll 1$, $\alpha_{eff} \sim 5 \times 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$, ночных величин $J \sim 10^{-9} - 10^{-10} \text{ с}^{-1}$ и повышенной

в результате перераспределения концентрации $[NO] \sim 3 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$ получим оценку $\tau \sim 3 \times 10^3 - 10^4 \text{ с}$.

Таким образом, продолжительность как отрицательной, так и положительной полуволны длиннопериодных колебаний фазы СДВ, согласно данным оценкам, соответствует наблюдаемым величинам. Это указывает на возможную значительную роль диссипации ВГВ в происхождении рассмотренных вариаций, которую необходимо определить в ходе дальнейших исследований.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-27-00182).

Использованное в работе ПО по анализу данных SWARM создано в рамках ГосЗадания МГУ им. М.В. Ломоносова по теме 01200408544. Используемые данные по СДВ радиопросвечиванию получены на УНУ (Уникальная научная установка “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира” [https://ckp-uf.ru/usu/507436/, http://www.gsras.ru/unu/]). Данные в Петропавловске-Камчатском получены Камчатским филиалом ФИЦ

“Единая геофизическая служба РАН” при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания № 075-00576-21 (<http://www.gsras.ru/new/infres/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ванина-Дарт Л.Б., Покровская И.В., Шарков Е.А.* Реакция нижней экваториальной ионосферы на сильные тропические возмущения // Геомагнетизм и аэронаука. 2008. Т. 48. № 2. С. 255–260.
- Ванина-Дарт Л.Б., Шарков Е.А.* Основные результаты современных исследований физических механизмов взаимодействия тропических циклонов и ионосферы // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 3. С. 75–83.
- Данилов А.Д., Власов М.Н.* Фотохимия ионизованных и возбужденных частиц в нижней ионосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 191 с.
- Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.Я.* Метеорологические эффекты в ионосфере. Л.: Гидрометеоздат. 1987. 267 с.
- Захаров В.И., Куницын В.Е.* Региональные особенности атмосферных проявлений тропических циклонов по данным наземных GPS-сетей // Геомагнетизм и Аэронаука. 2012. Т. 52. № 4. С. 562–574.
- Захаров В.И., Пилипенко В.А., Грушин В.А., Хамидуллин А.Ф.* Влияние тайфуна VONG-FONG 2014 на ионосферу и геомагнитное поле по данным спутников SWARM: 1. Волновые возмущения ионосферной плазмы // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. № 2. С. 114–123. <https://doi.org/10.12737/szf-52201914>
- Пахомов С.В., Князев А.К.* Озон в мезосфере и электронная концентрация среднеширотной области D // Геомагнетизм и аэронаука. 1988. Т. 28. № 6. С. 976–979.
- Чемберлен Дж.* Теория планетных атмосфер. М.: Мир. 1981. 352 с.
- Шалимов С.Л.* Атмосферные волны в плазме ионосферы. М.: ИФЗ РАН, 2018. 390 с.
- Шалимов С.Л., Соловьева М.С.* Отклик ионосферы на прохождение тайфунов по наблюдениям методом СДВ-радиопросвечивания // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8. № 3. <https://doi.org/10.12737/szf-81202201>
- Ясюкевич Ю.В., Едемский И.К., Перевалова Н.П., Полякова А.С.* Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS. Иркутск: ИГУ. 2013. 160 с.
- Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X.* Variability of the ionosphere // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2000. V. 62. P. 685–693. <http://ultramsk.com>. <https://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>. <http://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/swarm>. <https://ckp-rf.ru/usu/507436/>. <http://www.gsras.ru/unu/>. <http://www.gsras.ru/new/infres/>.
- Kelley M.C.* The Earth’s Ionosphere: Plasma Physics & Electrodynamics. N.Y.: Acad. Press, 2009. 550 p.
- Liu Y.M., Wang J.S., Suo Y.-C.* Effects of Typhoon on the Ionosphere. Advances in Geosciences. 2006. 29. 351–360. https://doi.org/10.1142/9789812707185_0029
- Mao T., Wang, J., Yang G., Yu T., Ping J., Suo, Y.* Effects of typhoon Matsa on ionospheric TEC. Chinese Science Bulletin. 2010. V. 55(8), P. 712–717. <https://doi.org/10.1007/s11434-009-0472-0>
- Olsen N., Friis-Christensen E., Floberghagen R. et al.* The Swarm Satellite Constellation Application and Research Facility (SCARF) and Swarm data products // Earth Planets Space. 2013. V. 65. P. 1189–1200.
- 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, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.07.029>
- Rice D.D., Sojka J.J., Eccles J.V., Schunk R.W.* Typhoon Melor and Ionospheric weather in the Asian sector: A case study // Radio Science, 2012. V. 47. P. 1–9. <https://doi.org/10.1029/2011RS004917>
- Vadas S.L., Fritts D.C.* Influence of solar variability on gravity wave structure and dissipation in the thermosphere from tropospheric convection // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, A10S12. <https://doi.org/10.1029/2005JA011510>

Response of the Ionosphere to Strong Tropospheric Disturbances

S. L. Shalimov^{1, 2}, V. I. Zakharov^{1, 3, 4}, M. S. Solov’eva¹, N. R. Bulatova^{1, 5},
G. M. Korkina⁵, and P. K. Sigachev³

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences (IPP RAS), Moscow, Russia

²Space Research Institute, Russian Academy of Sciences (IKI RAS), Moscow, Russia

³Department of Physics, Moscow State University (MSU), Moscow, Russia

⁴Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁵Kamchatka Branch, Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences Federal Research Center, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

The response of the lower and upper ionosphere to the passage of several powerful typhoons during 2014–2016 years was studied using regional network of VLF radio stations and measurements of electron density disturbances by satellites of the SWARM mission in the Russian Far East. It was found that the disturbances of the amplitude and phase of the VLF signal, as well as the electron density during the active stage of typhoons, correspond to the passage of atmospheric internal gravity waves and their dissipation. A mechanism

for the action of internal gravity waves upon the ionosphere is proposed, which allows to interpret the observed variations in the phase of the VLF signal and variations in the electron density in the upper ionosphere.

Keywords: subionospheric VLF signals, atmospheric internal gravity waves, typhoons, ionosphere

REFERENCES

- Chemberlen D.* Teoriya planetnykh atmosfer [Theory of planetary atmospheres]. Moscow. Mir. 1981. 352 p.
- Danilov A.D., Vlasov M.N.* Fotokhimiya ionizovannykh i vzbuzhdennykh chastits v nizhnei ionosphere [Photochemistry of ionized and excited particles in lower ionosphere]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973. 191 p.
- Danilov A.D., Kazimirovskii E.S., Vergasova G.V., Khachikyan G.Ya.* Meteorologicheskie effect v ionosphere [Meteorological effects in the ionosphere]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 267 p.
- Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X.* Variability of the ionosphere // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2000. V. 62. P. 685–693. <http://ultramsk.com>.
<https://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>.
<http://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/swarm>.
<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>.
<http://www.gsras.ru/unu/>.
<http://www.gsras.ru/new/infres/>.
- Kelley M.C.* The Earth's Ionosphere: Plasma Physics & Electrodynamics. N.Y.: Acad. Press, 2009. 550 p.
- Liu Y.M., Wang J.S., Suo Y.-C.* Effects of Typhoon on the Ionosphere. *Advances in Geosciences*. 2006. 29. 351–360. http://dx.doi.org/10.1142/9789812707185_0029
- Mao T., Wang J., Yang G., Yu T., Ping J., Suo Y.* Effects of typhoon Matsa on ionospheric TEC. *Chinese Science Bulletin*. 2010. V. 55(8). P. 712–717. <https://doi.org/10.1007/s11434-009-0472-0>
- Olsen N., Friis-Christensen E., Flobberghagen R. et al.* The Swarm Satellite Constellation Application and Research Facility (SCARF) and Swarm data products // *Earth Planets Space*. 2013. V. 65. P. 1189–1200.
- Pakhomov S.V., Knyazev A.K.* Ozon v mezofere i elektronaya kontsentratsiya sredneshirotnoi oblasti D [Ozon in mesosphere and electron concentration of midlatitude D region] // *Geomagnetism and aeronomy*, 1988. V. 28. № 6. P. 976–979. (In Russian).
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.07.029>
- Rice D.D., Sojka J.J., Eccles J.V., Schunk R.W.* Typhoon Melor and Ionospheric weather in the Asian sector: A case study // *Radio Science*, 2012. V. 47. P. 1–9. <https://doi.org/10.1029/2011RS004917>
- Shalimov S.L.* Atmosfernnye volny v plazme ionosfery [Atmospheric waves in ionospheric plasma]. Moscow. IFZ RAN. 2018. 390 p.
- Shalimov S.L., Solov'eva M.S.* Otklik ionosfery na prokhozhenie taifunov po nablyudeniya metodom SDV-radioprosvechivaniya [Ionosphere response on typhoon passing according to observations by VLF radio sounding], *Solnechno-zemnaya fizika*. 2022. V. 8. № 3. (In Russian). <https://doi.org/10.12737/szf-81202201>
- Vadas S.L., Fritts D.C.* Influence of solar variability on gravity wave structure and dissipation in the thermosphere from tropospheric convection // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. A10S12. <https://doi.org/10.1029/2005JA011510>
- Vanina-Dart L.B., Pokrovskaya I.V., Sharkov E.A.* Reaktsiya nizhnei ekvatorial'noi ionosfery na sil'nie tropicheskie vozmuscheniya [Response of lower equatorial ionosphere upon strong tropical disturbances] // *Geomagnetism and aeronomy*, 2008. V. 48. № 2. P. 255–260. (In Russian).
- Vanina-Dart L.B., Sharkov E.A.* Osnovnye rezultaty sovremennykh issledovaniy fizicheskikh mekhanizmov vzaimodeystviya tropicheskikh tsiklonov i ionosfery [Main results of modern researches of physical mechanisms on tropical cyclones and ionosphere interaction] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2016. № 3. P. 75–83. (In Russian).
- Yasyukevich Yu.V., Edemskii I.K., Perevalova N.P., Polyakova A.S.* Otklik ionosfery na geli- i geofizicheskie vozmuchayushchie factory po dannym GPS [Ionospheric response on geli- and geophysical disturbances according to GPS data]. Irkutsk. IGU. 2013. 160 p.
- Zakharov V.I. and Kunitsyn V.E.* Regional features of atmospheric manifestations of tropical cyclones according to ground-based GPS network data // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2012. V. 52. № 4. P. 533–545. <https://doi.org/10.1134/S0016793212040160>
- Zakharov V.I., Pilipenko V.A., Grushin V.A., Khamidullin A.F.* Impact of typhoon Vongfong 2014 on the ionosphere and geomagnetic field according to SWARM satellite data: 1. Wave disturbances of ionospheric plasma // *Solar-Terrestrial Physics*. 2019. V. 5. № 2. P. 101–108. <https://doi.org/10.12737/stp-52201914>