

УДК 551.515.2+551.510.535+537.877

## ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ НИЖНЕЙ И ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА FAXAI 2019 г.

© 2023 г. С. Л. Шалимов<sup>1, 2, \*</sup>, В. И. Захаров<sup>1, 3, 4</sup>, М. С. Соловьева<sup>1</sup>,  
П. К. Сигачев<sup>1, 3</sup>, М. Ю. Некрасова<sup>1, 5</sup>, Г. М. Коркина<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

<sup>3</sup>Физический факультет Московского государственного университета  
им. М.В. Ломоносова (МГУ), Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>5</sup>Камчатский филиал ФИЦ “Единая геофизическая служба РАН”,  
Петропавловск-Камчатский, Россия

\*e-mail: pmsk7@mail.ru

Поступила в редакцию 11.07.2022 г.

После доработки 05.09.2022 г.

Принята к публикации 22.09.2022 г.

С использованием региональной сети станций сверхдлинноволнового радиопросвечивания в Дальневосточном регионе России и измерений возмущений электронной плотности посредством спутников миссии SWARM исследован отклик нижней и верхней ионосферы на прохождение тайфуна Faxai 2019 г. Приведенные экспериментальные данные отчетливо демонстрируют волновые возмущения амплитуды и фазы СДВ-сигнала, а также электронной плотности во время активной стадии тайфуна. Параметры волновых возмущений соответствуют атмосферным внутренним гравитационным волнам. Максимум спектральной плотности волновых возмущений в нижней ионосфере соответствует 16–20 мин. Предложен механизм воздействия внутренних волн на ионосферу, обусловленный поляризационными полями, возникающими при волновом движении плазмы в нижней части  $F$ -области. Такие поля, проецируясь вдоль силовых линий геомагнитного поля, позволяют интерпретировать наблюдаемые вариации фазы СДВ-сигнала и вариации электронной плотности в верхней ионосфере.

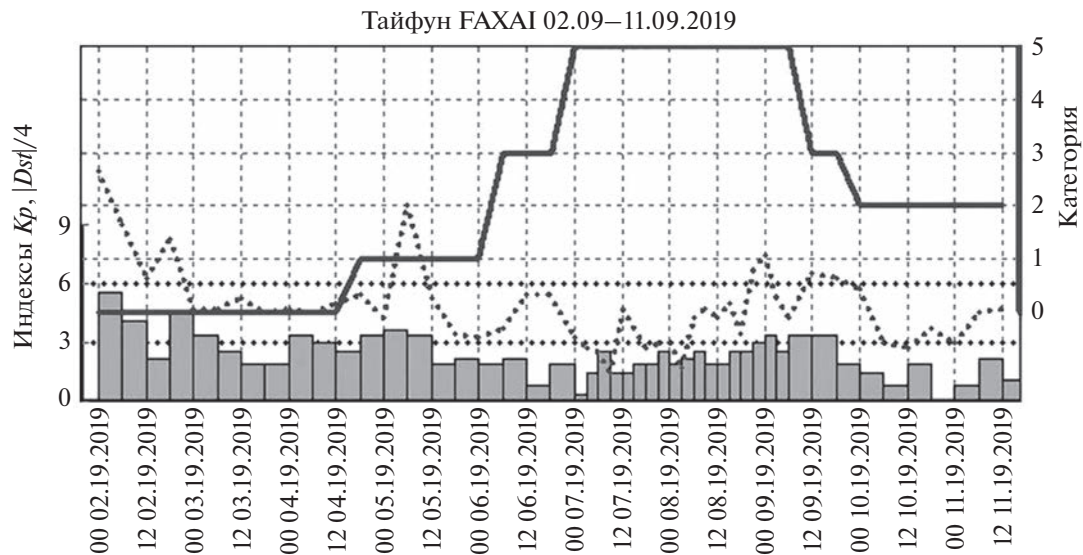
DOI: 10.31857/S0016794022600442, EDN: DLSCRR

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач современной геофизики является изучение механизмов взаимовлияния внешних земных оболочек и идентификация конкретных проявлений таких взаимосвязей. В настоящей работе рассмотрены возмущения в ионосфере, обусловленные таким интенсивным атмосферным процессом, как тропический циклон. По оценкам [Forbes et al., 2000] возмущение электронной концентрации  $N_e$  в максимуме ионосферного слоя  $F_2$ , вызванное влиянием атмосферных (метеорологических) факторов, в спокойных геомагнитных условиях достигает 35% от фонового уровня. Основным звеном, связывающим метеорологические факторы с ионосферой, считают атмосферные внутренние гравитационные волны (ВГВ) [Данилов и др., 1987]. В частности, рассчитанные азимуты и горизонтальные скорости некоторых перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) метеорологическо-

го происхождения (которые и принято связывать с распространяющимися ВГВ) показали, что вероятные зоны генерации зарегистрированных ПИВ лежат в тропосфере и совпадают с областями пониженного атмосферного давления в районах формирования циклонов [Vertin et al., 1975].

Если атмосферные волны генерируются метеорологическим образованием, то при распространении в верхнюю ионосферу эти волны проходят через нижнюю ионосферу. Соответственно, возмущения во время действия циклонов (тайфунов) должны наблюдаться как в нижней, так и в верхней ионосфере. Действительно, исследователи находят возможный отклик не только в нижней ионосфере, наблюдаемый в ракетном эксперименте [Ванина-Дарт и др., 2008], но и в верхней ионосфере — как в результате применения обработки GPS-сигналов [Захаров и Куницын, 2012; Ванина-Дарт и Шарков, 2016; Ясюкевич и др., 2013; Chou et al., 2017a, b], так и непосредственно в прямых зондовых измерениях



**Рис. 1.** Временная динамика силы тайфуна Faxai в период 2–11 сентября 2019 г. показана сплошной линией: на правой оси показана шкала категорий, отмечающая силу тайфуна (по критериям Японского метеорологического агентства). Величины индексов  $K_p$  (гистограмма) и  $Dst$  (пунктирная линия) отложены на левой оси.

[Zakharov and Sigachev, 2022]. Вместе с тем, исследование специфических особенностей ионосферного отклика на прохождение тайфунов необходимо продолжать, используя возможности и иных инструментов мониторинга. Такая задача возникает не только потому, что подобных исследований явно недостаточно, но и потому, что именно новые исследования, использующие дополнительные инструменты, способны привести также к определению механизмов воздействия тайфунов на ионосферу, которым практически не уделяют внимания.

В настоящей работе впервые для исследования ионосферного отклика на прохождение тайфунов используется, с одной стороны, региональная сеть станций СДВ-радиопросвечивания (позволяющая регистрировать возмущения нижней ионосферы, например, атмосферные внутренние волны от распространяющихся цунами [Rozhnoi et al., 2012]), а с другой, — измерения посредством спутниковой миссии SWARM (регистрация возмущений в верхней ионосфере). Такой подход позволяет использовать уникальные возможности различных методов наблюдения и проследить за развитием атмосферного возмущения на разных ионосферных высотах по мере его распространения из приземного слоя. Указанный подход также позволяет конкретизировать механизмы воздействия тайфуна на ионосферу.

## 2. ТРОПИЧЕСКИЙ ЦИКЛОН (ТАЙФУН) FAXAI

Событием, изучению которого посвящена настоящая работа, является тайфун Faxai. Указан-

ный тайфун — один из сезонных тихоокеанских тайфунов 2019 г. Он образовался 29 августа 2019 г. и окончательно рассеялся 12 сентября 2019 г., причем период его активного действия 02–11 сентября 2019 г. Заметим, что в работе применительно к изучаемому атмосферному явлению используются оба названия — “тайфун”, или “циклон”, которые соответствуют одинаковым процессам в нижней атмосфере и отличаются лишь областью происхождения названия.

Гелиогеомагнитная обстановка во время действия урагана представлена на рис. 1 двумя индексами —  $K_p$  и  $Dst$ . Анализ показывает, что в период действия активной фазы выше уровня тропического шторма индекс  $K_p$  не превышал 4, а индекс  $Dst$  достиг величины  $-40$  нТ. Указанные величины соответствуют слабо возмущенным геомагнитным условиям, что служит аргументом в пользу того, что наблюдаемые возмущения ионосферы можно интерпретировать как проявление атмосферно-ионосферных связей.

Данные о тайфуне Faxai, или событии TC 1915 по каталогу JMA, были получены с сайта Японского метеорологического агентства (JMA, <https://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>).

Тайфун Faxai достиг категории тайфуна 6 сентября 2019 г., 8 сентября тайфун достиг максимальной силы и ему была присвоена 4-я категория по шкале Саффира–Симпсона (SSHWS) [<http://www.nhc.noaa.gov/aboutsshws.php>], а по классификации Японского метеорологического агентства (JMA) для тайфунов Тихоокеанского региона — наивысшая 5-я категория. В период действия тайфуна было зафиксировано максимальное па-

дение давления до 955 гПа. Тайфун ослаб 9 сентября, когда он достиг берегов Японии (<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/summary/wnp/s/201915.html.en>).

Метеорологические данные и спутниковые снимки эволюции тайфуна Faxai позволяют по методикам [Захаров и др., 2019; Zakharov and Sigachev, 2022] оценить параметры самого тайфуна и параметры волновых возмущений, генерируемых тайфуном при своем движении (с учетом того, что скорость возмущений гораздо меньше скорости спутника). Так, радиус глаза по спутниковым данным составляет 11–15 км, радиус ядра оценивается как 110–150 км, а внешний радиус структуры достигает 300 км. Высота действия тайфуна составляет 14 км, т.е. тайфун возмущает атмосферу практически до высоты тропопаузы. Максимальная зарегистрированная скорость ветра составила 43 м/с.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТОДОМ СДВ-РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ

В настоящей работе для исследования отклика нижней ионосферы на прохождение тайфунов использована региональная сеть станций СДВ-радиопросвечивания. Специфика эксперимента заключалась в использовании удобного метода дистанционного исследования воздействий на ионосферу – регистрации амплитудно-фазовых характеристик СДВ-сигналов (в английской транскрипции VLF – very low frequency) радиостанций. Частоты этих сигналов (3–30 кГц) таковы, что они способны распространяться на тысячи километров от передатчика 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 атмосферные волны генерируются 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 с временным интервалом 20 с.

Были проанализированы вариации СДВ-сигнала для тайфуна Faxai, который пересекал зоны чувствительности трасс (пять зон Френеля) в отсутствии магнитной и сейсмической активности (т.е. отсутствовали события с магнитудой  $M > 5.5$ , которые могли бы привести к возмущениям сигнала). Анализ был сделан для амплитуды и фазы сигнала от передатчика NWC (19.8 кГц), расположенного на западном побережье Австралии. Использовались данные, полученные на принимающих станциях (см. рис. 2) в Петропавловске-Камчатском (РТК), Южно-Сахалинске (YSH) и Южно-Курильске (YUK).

В связи с тем, что в дневное время ионосфера средних широт и экваториальная мало чувствительна к слабым, по сравнению с солнечными вспышками, воздействиям, для анализа был выбран ночной интервал времени. СДВ-сигналы имеют суточные и сезонные вариации, поэтому для анализа использовался разностный сигнал, определяемый как разница между наблюдаемым и среднемесячным сигналами. Потом этот сигнал усреднялся за ночной интервал.

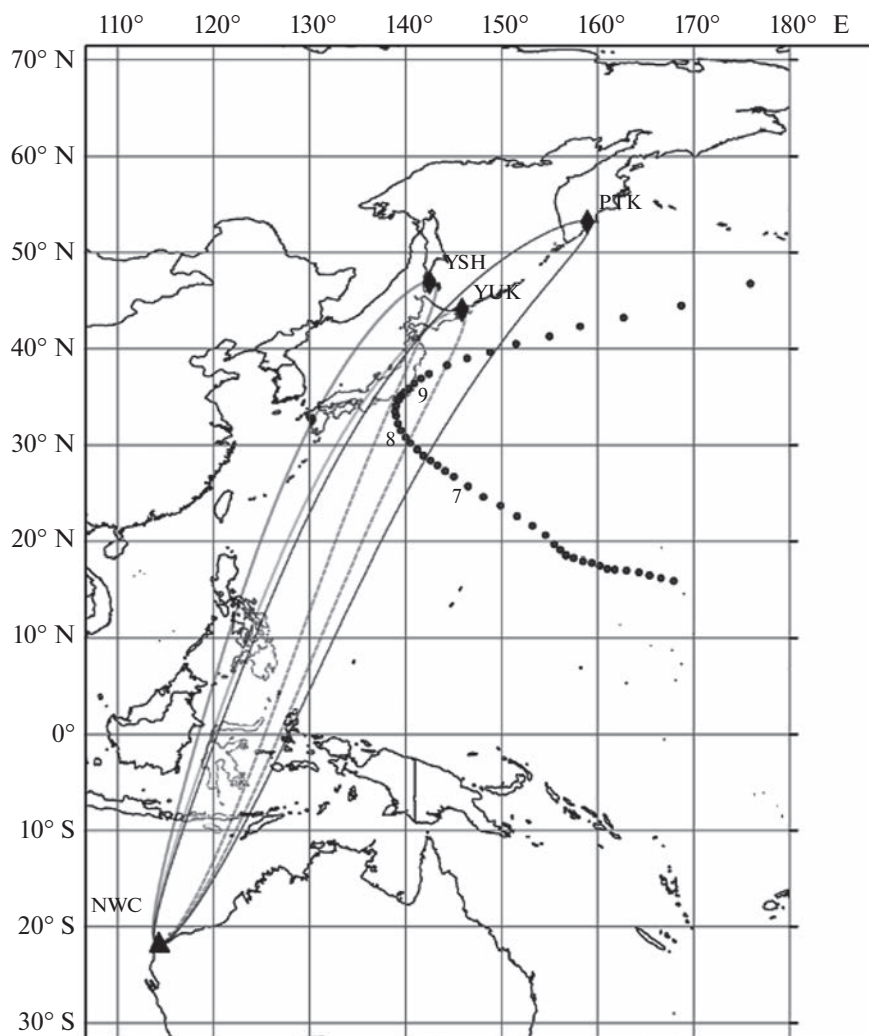
На рисунке 3 видно, что по мере движения тайфуна ночная депрессия амплитуды СДВ-сигнала появляется сначала (7 сентября) на ближайших трассах (NWC–РТК, и NWC–YUK, зоны чувствительности которых почти перекрываются), а потом (8 сентября) и на дальней трассе NWC–YSH. Подчеркнем, что возмущения регистрируются в ночные часы, и отмечается средняя за ночь величина ( $\langle dA \rangle$ ). 9 сентября утром тайфун обрушился на Японию и после этого распался.

Проведенный нами анализ показывает, что весь день 8 сентября тайфун находился внутри зон чувствительности трех трасс NWC сигнала (рис. 2).

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. 4). Максимум спектральной плотности находится в интервале 0.3–2 мГц (8–55 мин). Диапазоны приведенных оценок в целом совпадают с оценками диапазонов генерации волновых возмущений тайфуном Faxai, приведенными в следующем разделе.

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПОСРЕДСТВОМ МИССИИ SWARM

Проект Swarm состоит из трех спутников (A, B и C), расположенных на двух околополярных орбитах: орбиты спутников C и A имеют наклонение  $87.4^\circ$  практически на одной высоте (в 430–460 км для эпохи 2019 г.) и двигаются по сходным орбитам с разницей эпох обращения 2–10 с. Тре-



**Рис. 2.** Взаимное расположение передатчика NWC (треугольник) и принимающих станций (ромбы) в Петропавловске-Камчатском (РТК), Южно-Сахалинске (YSH) и Южно-Курильске (YUK). Эллипсы показывают зоны чувствительности трасс распространения сигнала. Точками показана трасса движения тайфуна Faxai (TC 1915) в сентябре 2019 г. Цифры отображают даты продвижения тайфуна.

тый 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, независимо измеренные ленгмюровскими зондами на борту спутников с частотой опроса 2 Hz и относительной ошибкой не более 1% (<http://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/swarm>).

Идея разделения влияния различных процессов на отклик в ионосфере связана с различными пространственно-временными характеристиками изучаемых процессов. Так, влияние ТЦ должно локализоваться в меньшей широтной области, условно связанной с областью шторма или значи-

тельных возмущений в нижней атмосфере. Пространственные масштабы области шторма в атмосфере составляют величины порядка нескольких сотен км и не превосходят 1500 км. Указанные пространственные размеры, с учетом скорости движения ИСЗ (7.4–7.6 км/с), определяют выбор параметров временного фильтра, которые в нашей работе составляют от 15 с до 3–5 мин.

По утверждениям авторов методики и конструкторов спутников SWARM (<http://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/swarm>), минимальные величины ионной концентрации, регистрируемых волновыми ленгмюровскими зондами, составляют не менее 100 ионов/см<sup>3</sup>, что позволяет, в предположении квазинейтральности плазмы на высотах 450–500 км, оценить величину ошибки в определении относительной электрон-

ной концентрации, как не превышающую 1%. Приводимые далее результаты выделенных эффектов везде превосходят указанную величину ошибок эксперимента.

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 решались четыре основные проблемы.

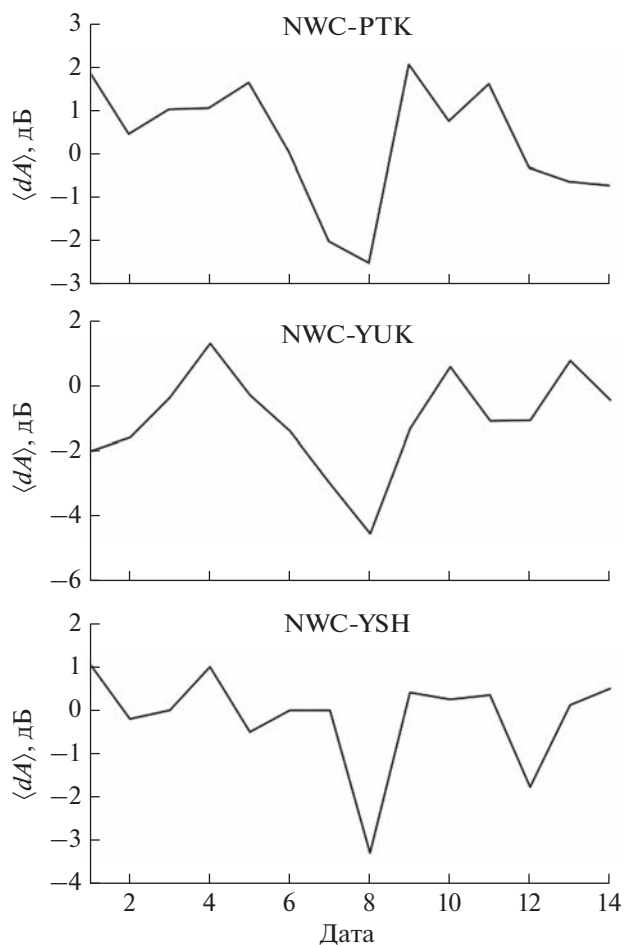
Первая связана с динамикой системы космических аппаратов и параметрами их орбит. Например, возможна ситуация отсутствия пролетов в интересующий период в непосредственной близости от региона действия тропического циклона (ТЦ) или тайфуна (см. рис. 5).

Вторая проблема определяется трудностью выделения изучаемого отклика на фоне естественных ионосферных возмущений. К таковым в нашем случае относятся экваториальная ионосферная аномалия и области овала высоких широт (последний особенно важен в динамике ночной плазмы). Третья проблема связана с тем обстоятельством, что поиск пролетов необходимо провести в ночные часы, когда наиболее существенны эффекты влияния ионосферы на распространение СДВ-сигналов, но уменьшается электронная концентрация, которая в работе используется как естественный маркер волноподобных возмущений в ионосфере.

Наконец, последняя проблема связана с определением возмущенной области, проявляющейся в ионосфере от ТЦ. При этом в случае приближения источника генерации к суше, т.е. препятствию, меняется не только картина генерации, но и происходит (или может происходить) интерференция отдельных волноподобных возмущений.

Рассмотрим далее детально оба пролета за 07.09.2019 г., один из которых попадает на утренние часы 07:20–07:35 UT, а второй – на вечерние, 18:45–19:00 UT, т.е. накануне даты максимального развития исследуемого циклона. Отклик в ионосфере по спутниковым данным во время пролета 07:20–07:35 UT представлен на рис. 6а.

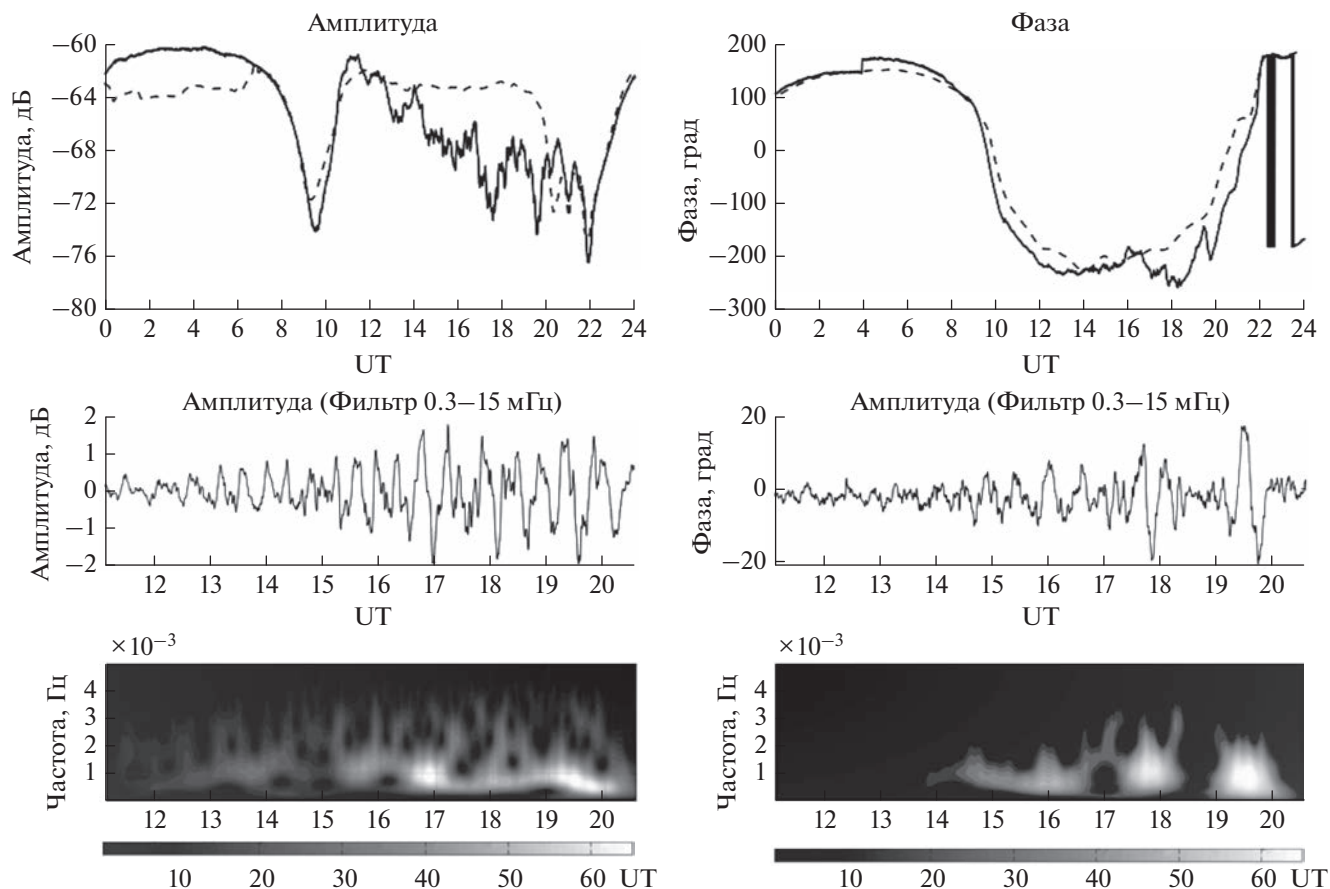
Области широт более  $\sim 55^\circ \text{N}$  и менее  $10^\circ \text{N}$  заняты волноподобными возмущениями, выделяемыми на уровне выше уровня ошибок методики. Рассматриваемая же пространственная область оказывается более подходящей для прогнозируемого влияния единственного ТЦ, и полученный результат соответствует интерференции волн от различных источников, в том числе от ТЦ и береговой кромки. В работе [Zakharov and Sigachev, 2022] для относительных вариаций электронной



**Рис. 3.** Вариации амплитуды сигнала NWC для трех трасс, изображенных на рис. 2. Показаны усредненные за ночной интервал времени разностные значения сигнала. По горизонтальной оси – даты в сентябре 2019 г.

плотности приведены величины 4–10% для ТЦ 4–5 категории по шкале Саффира–Симпсона. Указанные категории означают повышенную (минимум на порядок по сравнению с фоном) энергетику процесса или особые условия генерации акустико-гравитационных волн при прохождении изучаемого циклона.

Отклик ионосферы во время пролета 18:45–19:00 UT и полученные при этом результаты показаны на рис. 6б, 7. Видно, что в области шторма выделяются возмущения амплитудой до 20% по синхронным измерениям на обоих КА SWARM. Это очень значительный отклик для ТЦ такой мощности, он не является артефактом и подтверждается выделением неоднородностей на фоне регулярного хода электронной концентрации. Абсолютные величины возмущений в ионосфере над регулярными достигают значений  $10^4 \text{ см}^{-3}$  и более – см. рис. 7, что в 100 и более раз превосхо-



**Рис. 4.** На верхних графиках изображена амплитуда и фаза NWC-сигнала, зарегистрированного в Южно-Сахалинске 8 сентября 2019 г. (сплошная линия) и среднемесячный сигнал (штриховая линия). Средние графики показывают ночной фильтрованный сигнал и нижние – вейвлет-спектры фильтрованного сигнала.

дит упоминавшиеся инструментальные погрешности.

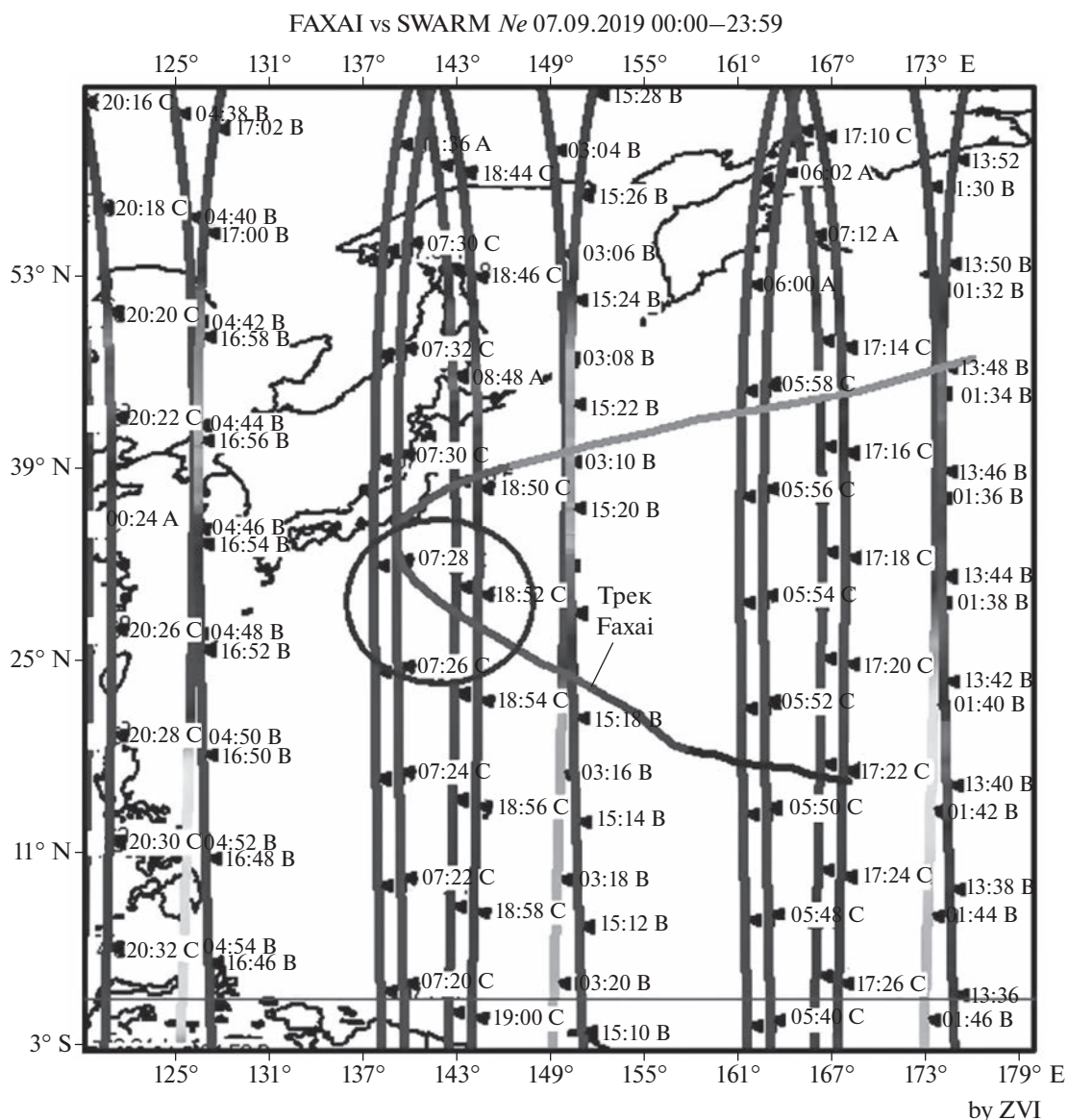
Наложённые на карту выделенные относительные вариации электронной концентрации на уровне выше максимума ионосферного слоя  $F2$  представлены на рис. 8.

Возможно, что полученный результат соответствует интерференции ионосферных возмущений, имеющих своим источником не только область шторма, но и представляющих источники на японских островах. При этом возмущения с амплитудой до 20% не могут быть объяснены наличием полярного овала или влиянием экваториальной ионосферной аномалии, которая не наблюдалась на широтах  $40^\circ$  N в данное время. Вечернее время наблюдения может привести, однако, к влиянию высываний электронов, но это пока также не подтверждено. Проведенный полный анализ показал, что возмущения свыше 7% также присутствуют и в дневное время.

Рассмотрим теперь пролет 08.09.2019 г. Наблюдалось два пролета над областью ТЦ 06:40–06:55 UT и 18:05–18:20 UT. В обоих зарегистриро-

ваны отклики на прохождение ТЦ, но также в 1.5 раза большем пространственном интервале. Амплитуды откликов достигли 3 и 10% соответственно. На рис. 6в приведены возмущения для периода 18:05–18:20 UT.

В утреннее время 9 сентября зарегистрировано 4 пролета над условной областью шторма. В периоды 02:15–02:40 UT во время пролета SWARM-B анализ выделяет цуги волн амплитудой электронной концентрации до 3%. Напомним, что траектория указанного КА находится выше на 90 км, и равновесная электронная концентрация там меньше. В период 04:00–04:10 UT также во время пролета SWARM-B регистрировались цуги волн, локализованные в области шторма, с амплитудой до 4%. Наконец, в периоды 6:00–06:15 UT на пролете SWARM-A и -B наблюдался шум, не превосходящий величины 2% амплитуды, а в период 7:35–7:50 UT на пролете SWARM-A и -B были видны цуги волн до 3%.



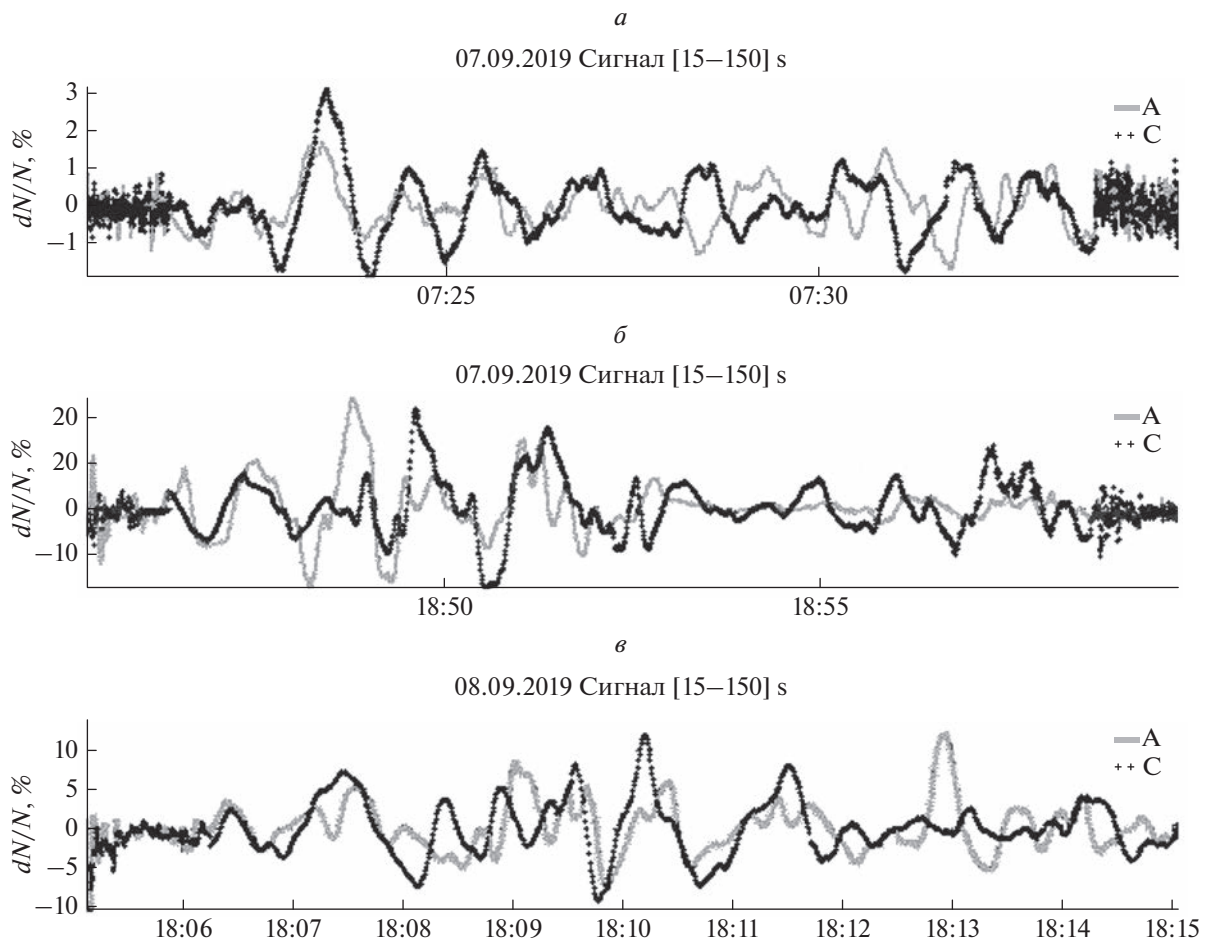
**Рис. 5.** Область действия циклона Faxai и треки пролетов спутников системы SWARM за сутки 7 сентября 2019 г. Трек тайфуна Faxai приведен за все время его существования. Видны два случая пролета КА SWARM через условную область шторма 07.09.2019 г. (окружность на рисунке). Вдоль каждого трека КА отмечено время пролета соответствующего спутника и его индекс (-А, -В или -С).

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

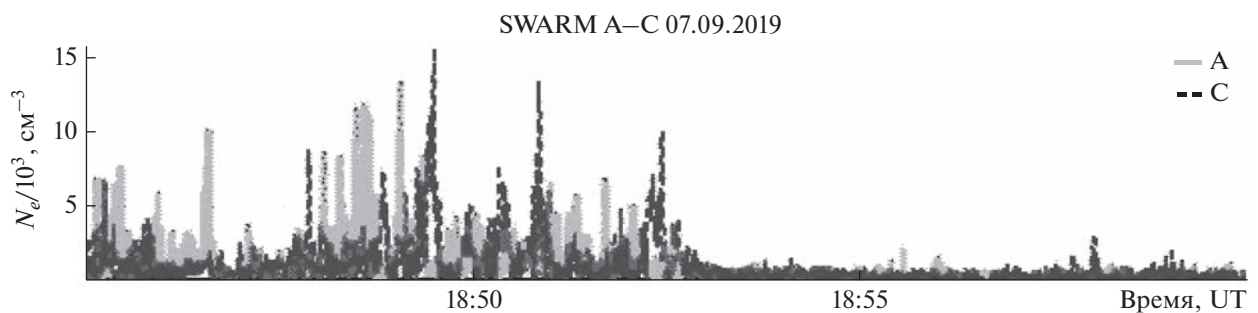
В результате измерений в ионосфере посредством спутника SWARM и СДВ-радиопросвечивания во время активной фазы тропического циклона Faxai в течение трех дней (с 07.09. по 09.09.2019 г.) его максимальной активности и последующего проведенного анализа получены следующие выводы.

Исследовано 8 удачных пролетов спутника. В 2 случаях уверенная регистрация волноподобных структур оказалась невозможной, в 1 случае зарегистрирован anomalously мощный отклик, вероятно обусловленный неучтенным фактором.

В 5 случаях оказалось возможным выделить возмущения относительной амплитуды от 3 до 10%. Удачной регистрации возмущений способствовало то, что область локализации возмущения, ассоциированного с ТЦ в ионосфере, оказывается больше, чем на уровне земли. Это является косвенным подтверждением волновой структуры этих возмущений, что в целом соответствует теоретическим оценкам области с учетом дисперсионных соотношений ВГВ. Амплитуда регистрируемых возмущений в ночной период несколько меньше дневной. Кроме того, структура зарегистрированных откликов напоминает интерфе-



**Рис. 6.** (а) – относительные (в процентах) вариации электронной плотности в полосе 15–180 с для условий рис. 5 во время пролета 07:20–07:35 UT 07.09.2019 г.; (б) – то же, но во время пролета 18:45–19:00 UT 07.09.2019 г.; (в) – выделенный отклик в ионосфере в полосе 15–180 с 08.09.2019 г.

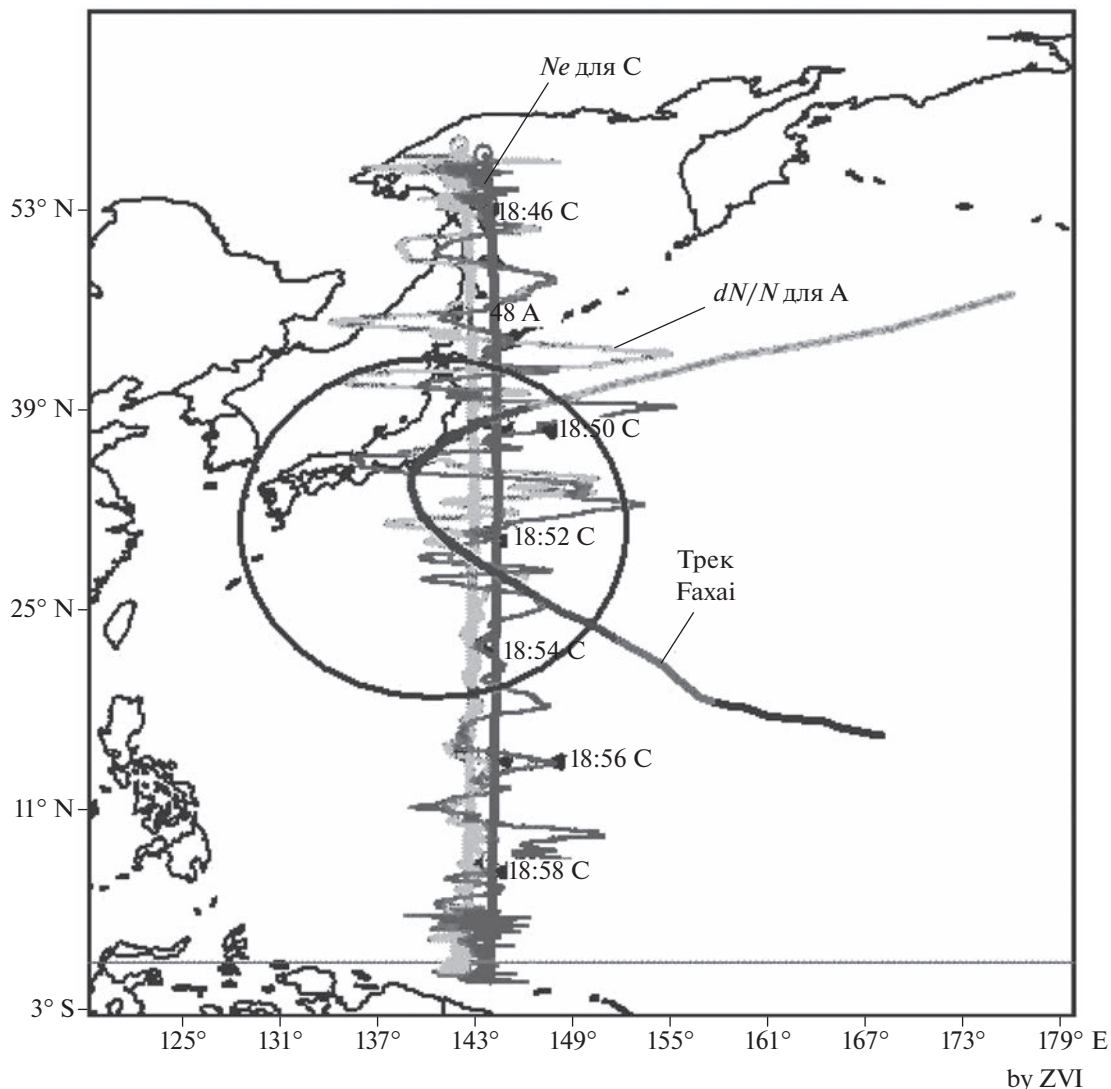


**Рис. 7.** Выделение неоднородностей электронной концентрации на пролете спутников SWARM -А и -С 07.09.2019 г.

ренционную картину волн от нескольких источников. Вероятно, это обстоятельство связано с тем, что тайфун Гахаі 2019 в максимуме своей активности при движении встретил Японские острова, что могло вызвать дополнительную турбулизацию нижней атмосферы и генерацию волновых структур.

Приведенные экспериментальные данные отчетливо демонстрируют волновые возмущения амплитуды и фазы СДВ-сигнала во время активной стадии тайфуна (в частности, для дня 08.09.2019 г., данные для которого были рассмотрены), т.е. присутствие волновых возмущений в нижней ионосфере. Вейвлет-анализ показывает



FAXAI vs SWARM  $Ne$  [ $dN/N$ ] 07.09.2019 18:45–19:00

**Рис. 8.** Пространственная картина выделенных в полосе 15–180 с неоднородностей электронной концентрации на пролете спутников SWARM -А и -С в интервале 18:45–19:00 UT 07.09.2019 г.

наличие волн в диапазоне периодов 8–55 мин, что видно на рис. 4. Этот диапазон соответствует атмосферным внутренним гравитационным волнам (ВГВ).

Для сравнения с этим выводом обратимся к рис. 9, где показан результат измерений на спутнике SWARM приблизительно в то же время суток, что и для вариаций СДВ-сигнала. Видно, что спутник регистрирует вариации плотности ионосферной плазмы верхней ионосферы с масштабом в несколько сотен км, которые являются типичными для ПИВ. Таким образом, и в нижней, и в верхней ионосфере во время активной фазы тайфуна имеют место вариации ионосферной плазмы характерные для распространяющихся ВГВ.

Хотя представление об излучении ВГВ тайфунами неоднократно подтверждалось регистрацией волновых возмущений верхней ионосферы, которые ассоциировались с прохождением тайфунов (см., например, [Chou et al., 2017a, b]), и было также установлено [Захаров и Куницын, 2012], что ВГВ, излучаемые тайфуном, опережают тайфун и распространяются в основном по ходу его движения, но синхронные волновые возмущения на разных высотах – от нижней атмосферы до ионосферы на высотах слоя  $D$  и  $F2$  были обнаружены различными методами впервые в настоящей работе.

Вместе с тем, самому механизму воздействия ВГВ от тайфуна на ионосферную плазму, приводящему к наблюдаемым эффектам уделяли недо-

статочного внимания. Здесь необходимо учесть, что, в отличие от акустических волн, ВГВ — это вертикально-поперечные волны, в которых групповая скорость перпендикулярна фазовой, и энергия волн распространяется под прямым углом к направлению распространения волнового фронта. Если тайфун пересекает СДВ-трассу, как показано на рис. 2, то атмосферная волна, генерируемая им, будет распространяться в приэкваториальной ионосфере почти поперек силовых линий геомагнитного поля. При этом возмущения ветра  $\delta U$  будут направлены поперек геомагнитного поля, в результате чего в волне, распространившейся до нижней части  $F$ -слоя, возникнут токи  $\delta j = \sigma_p (\delta U \times B_0)$ . Если токи не бездивергентные, то возникнут поляризационные электрические поля  $\delta E$ , которые приведут плазму в движение в направлении  $\delta E \times B_0$ . Схема этих процессов для распространяющейся ВГВ показана на рис. 9, где движения происходят вдоль фронта волны, а магнитное поле направлено из плоскости рисунка.

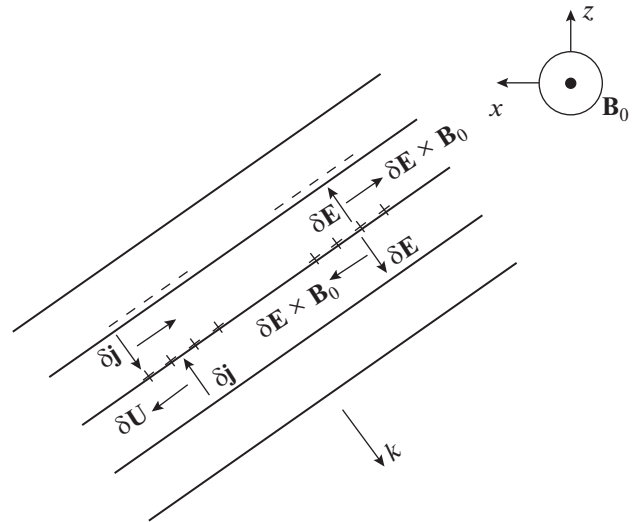


Рис. 9. Схема генерации поляризационного электрического поля атмосферной внутренней волной в нижней части  $F$ -области.

Поскольку движение среды в волне встречное, токи не являются бездивергентными даже в однородной плазме. В результате образуются чередующиеся слои разного знака с электрическими полями, соответствующими длине волны. Перпендикулярная к магнитному полю компонента электрического поля в дипольном магнитном поле будет проектироваться в нижнюю ионосферу. При этом вертикальная компонента плазменного дрейфа будет создавать возмущения в виде поднимающихся и опускающихся слоев плазмы, которые будут соответствовать горизонтальной длине волны. В результате подъем и опускание слоев плазмы в  $D$ -области будет приводить к уменьшению и увеличению фазы, т.е. к вариациям фазы с периодом доминирующей волны.

В свою очередь, эти же перпендикулярные геомагнитному полю электрические поля приведут к дрейфу плазмы в  $F$ -области ионосферы, т.е. к подъему или опусканию столба плазмы, что при достаточно медленных движениях, характерных для ВГВ (с периодом порядка времени рекомбинации), будет сопровождаться соответственно увеличением или уменьшением плотности электронов на масштабах порядка длины волны ВГВ. Именно такая ситуация, скорее всего, имела место во время активной фазы тайфуна Faxai 2019, рассмотренного в настоящей работе.

Следует отметить, что схема на рис. 9 соответствует оптимальному случаю, поскольку в реальной ситуации могут возникнуть условия, когда поляризационные электрические поля будут закорочены. Во-первых, магнитные силовые линии в экваториальной  $F$ -области, изгибаясь, пронизывают  $E$ -область вне экватора, дневная проводимость которой велика (в настоящей ра-

боте анализируется ночная ионосфера). Во-вторых, если вектор  $k$  волны не строго перпендикулярен силовой линии, токи вдоль магнитного поля будут препятствовать образованию слоев заряда. Это указывает на выделенность некоторых направлений при воздействии ВГВ от тайфуна на ионосферную плазму и обуславливает сложность экспериментального обнаружения этих эффектов.

Отметим наконец, что существуют и другие механизмы перераспределения плазмы по горизонтали в  $D$ -области. Один из них — наличие вертикального шира в горизонтальных движениях нейтральной компоненты, когда завихренность этих движений имеет компоненту, направленную противоположно геомагнитному полю. Однако на высотах слоя  $D$  этот механизм малоэффективен [Haldoupis and Shalimov, 2021]. Еще один механизм для  $D$  (а также  $F$ ) области — наличие компоненты скорости ВГВ вдоль магнитного поля, когда перераспределение плазмы возможно вдоль силовых линий (см., например, [Шалимов и Соловьева, 2022]). Подчеркнем, что в настоящей работе применительно к тайфунам рассмотрен случай, когда движения в волне ВГВ осуществляются поперек магнитного поля в нижней части  $F$ -области.

Таким образом, исследования отклика ионосферы на прохождение тайфунов посредством региональной сети станций СДВ-радиопроектирования и спутников с низкими орбитами (SWARM в настоящей работе) позволяют достаточно уверенно установить, что ВГВ, генерируемые тайфуном и при благоприятных условиях достигающие ионосферы, способны вызывать как вариации

фазы и амплитуды СДВ-сигнала, так и вариации плотности в верхней ионосфере. Предложенный в настоящей работе механизм воздействия ВГВ на нижнюю ионосферу обусловлен поляризационными полями, возникающими при волновом движении плазмы в нижней части  $F$ -области, которые, проектируясь вдоль силовых линий геомагнитного поля в нижнюю ионосферу, вызывают подъем или опускание верхней стенки волновода Земля – ионосфера. В свою очередь, такие движения определяют вариации фазы СДВ-сигнала и высоты  $F$ -области.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

Использованное в работе ПО по анализу данных SWARM создано в рамках Государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова по теме 01200408544 и НОШ МГУ “Фундаментальные и прикладные проблемы физики космоса”. 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-rf.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 аэрномия. Т. 48. № 2. С. 255–260. 2008.
- Ванина-Дарт Л.Б., Шарков Е.А. Основные результаты современных исследований физических механизмов взаимодействия тропических циклонов и ионосферы // Исследование Земли из космоса. № 3. С. 75–83. 2016.
- Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. Л.: Гидрометеоздат. 267 с. 1987.
- Захаров В.И., Куницын В.Е. Региональные особенности атмосферных проявлений тропических циклонов по данным наземных GPS сетей // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 52. № 4. С. 562–574. 2012.
- 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 плаз-

мы // Солнечно-земная физика. Т. 5. № 2. С. 114–123. 2019.

<https://doi.org/10.12737/szf-52201914>

– Шалимов С.Л., Соловьева М.С. Отклик ионосферы на прохождение тайфунов по наблюдениям методом СДВ-радиопросвечивания // Солнечно-земная физика. Т. 8. № 3. 2022.

<https://doi.org/10.12737/szf-81202201>

– Ясюкевич Ю.В., Едемский И.К., Первалова Н.П., Полякова А.С. Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS. Иркутск: ИГУ. 160 с. 2013.

– 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. V. 23. P. 493–507. 1975.

– Chou M.Y., Lin C.H., Yue Jia, 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. V. 44. P. 1219–1226. 2017a.

<https://doi.org/10.1002/2016GL072205>

– Chou M.Y., Lin C.H., Yue Jia, Chang L.C., Tsai H.F., Chen C.H. Medium-scale traveling ionospheric disturbances triggered by Super Typhoon Nepartak (2016) // Geophys. Res. Lett. V. 44. P. 7569–7577. 2017b.

<https://doi.org/10.1002/2017GL073961>

<https://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>

<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/summary/wnp/s/201915.html.en>

<http://ultramsk.com>

<http://www.gsras.ru/new/infres/>

<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>

<http://www.gsras.ru/unu/>

<http://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/swarm>

– Haldoupis C., Shalimov S. On the altitude dependence and role of zonal and meridional wind shears in the generation of E region metal ion layers // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 214. 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105537>

– Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. Variability of the ionosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2000. V. 62. P. 685–693.

[https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00029-8)

– 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. V. 65. P. 1189–1200. 2013.

– Rozhnoi A., Shalimov S., Solovieva M., Levin B., Hayakawa M., Walker S. Tsunami-induced phase and amplitude perturbations of subionospheric VLF signals // J. Geophys. Res. V. 117. A09313. 2012.

<https://doi.org/10.1029/2012JA017761>

– Zakharov V.I., Sigachev P.K. Ionospheric disturbances from tropical cyclones // Adv. Space Res. V. 69. № 11. P. 132–141. 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.09.025>