
ОТКЛИК ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ НА ВНЕТРОПИЧЕСКИЕ ЦИКЛОНЫ**UPPER ATMOSPHERE RESPONSE TO EXTRATROPICAL CYCLONES**

В.И. Захаров 

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия, Zvi_555@list.ru
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
Москва, Россия

М.С. Соловьева

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, rozhnoi@ifz.ru

С.Л. Шалимов

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, pmsk7@mail.ru
Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия

М.Г. Акперов

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
Москва, Россия, aseid@ifaran.ru

Г.М. Коркина

Камчатский филиал ФИЦ
«Единая геофизическая служба РАН»,
Петропавловск-Камчатский, Россия, gkor@emsd.ru

Н.Р. Булатова

Камчатский филиал ФИЦ
«Единая геофизическая служба РАН»,
Петропавловск-Камчатский, Россия, geofizik@emsd.ru

V.I. Zakharov

Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia, Zvi_555@list.ru
Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia
Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS,
Moscow, Russia

M.S. Solovieva

Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, rozhnoi@ifz.ru

S.L. Shalimov

Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, pmsk7@mail.ru
Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia

M.G. Akperov

Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS,
Moscow, Russia, aseid@ifaran.ru

G.M. Korkina

Kamchatka Branch, Unified Geophysical Service of the
Russian Academy of Sciences Federal Research Center,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, gkor@emsd.ru

N.R. Bulatova

Kamchatka Branch, Unified Geophysical Service of the
Russian Academy of Sciences Federal Research Center,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, geofizik@emsd.ru

Аннотация. На основе измерений на региональных станциях сверхдлинноволнового радиопросвечивания и на спутниках миссии Swarm исследован отклик нижней и верхней ионосферы на прохождение внетропических циклонов в Дальневосточном регионе России в период 2014–2023 гг. Для двенадцати циклонов обнаружено, что возмущения в нижней ионосфере, отмечаемые по вариациям амплитуды и фазы СДВ-сигнала, а также сопряженные с ними вариации электронной плотности в верхней ионосфере на активной стадии циклонов соответствуют прохождению атмосферных внутренних гравитационных волн и их диссипации, что продемонстрировано на нескольких примерах. Рассмотрены механизмы воздействия внутренних атмосферных волн на ионосферу, позволяющие интерпретировать наблюдаемые в нижней ионосфере вариации фазы СДВ-сигнала и вариации электронной плотности в верхней ионосфере.

Ключевые слова: сверхдлинноволновое радиопросвечивание, атмосферные внутренние гравитационные волны, внетропические циклоны, ионосфера.

Abstract. We have examined the response of the lower and upper ionosphere to the passage of extratropical cyclones in 2014–2023, using measurements made at regional ultra-long-wave radio stations and satellites of the Swarm mission in the Far Eastern region of Russia. For twelve cyclones, we have found that disturbances in the lower ionosphere, observed in VLF signal amplitude and phase variations, as well as their associated electron density variations in the upper ionosphere during the active stage of the cyclones, correspond to the passage of atmospheric internal gravity waves and their dissipation, as evidenced by several examples. We have studied the mechanisms of the influence of internal atmospheric waves on the ionosphere, which make it possible to interpret the VLF signal phase variations observed in the lower ionosphere and the electron density variations in the upper ionosphere.

Keywords: ultra-long-wave radio sounding, atmospheric internal gravity waves, extratropical cyclones, ionosphere.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение взаимовлияния внешних земных оболочек (атмосферы, ионосферы, магнитосферы), которое проявляется при наличии высокоэнергичных источников в одной из указанных геосфер, а также механизмов таких взаимосвязей, относится к важным задачам современной геофизики.

По оценкам [Forbes et al., 2000], влияние атмосферных (метеорологических) факторов в спокойных геомагнитных условиях может достигать 35 % от фонового уровня для возмущений в верхней атмосфере (конкретно — электронной концентрации N_e в максимуме ионосферного слоя F2, расположенного на высотах 250–300 км). 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 (ПИБ) метеорологического происхождения (которые принято связывать с распространяющимися ВГВ) показали, что вероятные зоны генерации зарегистрированных ПИБ находятся в тропосфере и совпадают, например, с областями пониженного атмосферного давления в районах формирования циклонов [Bertin et al., 1975]. Атмосферные волны, генерируемые метеорологическим образованием, при распространении вверх проходят и нижнюю и верхнюю ионосферу. Соответственно, возмущения во время циклонов должны наблюдаться как в нижней, так и в верхней ионосфере.

Действительно, при исследованиях тропических циклонов (тайфунов) возможный отклик находят не только в нижней ионосфере по результатам ракетного эксперимента [Ванина-Дарт и др., 2008] и СДВ-радиозондирования [Rozhnoi et al., 2014; Pal et al., 2020; Das et al., 2021; Шалимов, Соловьева, 2022], но и в верхней ионосфере по результатам анализа GPS-сигналов [Polyakova, Perevalova, 2011; Захаров, Куницын, 2012; Ясюкевич и др., 2013; Ванина-Дарт, Шарков, 2016; Chou et al., 2017a, b], спутниковых измерений [Захаров и др., 2019; Шалимов и др., 2023a, b] и данных наклонного зондирования ионосферы [Черниговская и др., 2010]. Вместе с тем систематические исследования отклика верхней атмосферы на внетропические циклоны, в отличие от тропических (см., например, обзор [Chernogor, 2023]), не проводились ввиду сложности выделения самого атмосферного образования. Необходимо продолжать исследования отклика атмосферы на прохождение циклона любого типа, используя возможности различных инструментов мониторинга, что может способствовать определению механизмов воздействия циклонов на ионосферу, которым стали уделять внимание только в последнее время.

Внетропические циклоны регистрируют на средних и высоких широтах [Хромов, Петросянец, 2006; Lutgens et al., 2018; Швед, 2020]. Одним из основных, но не единственным механизмом их зарождения является бароклинная неустойчивость атмосферы — динамическая волновая неустойчивость атмосфер-

ного потока с широтным градиентом температуры и, следовательно, с вертикальным градиентом скорости ветра в поле силы Кориолиса. Источником энергии растущих возмущений в таком потоке служит доступная потенциальная энергия неустойчивости. Вне зависимости от механизмов образования, циклоны всегда проявляются в виде замкнутых изобар на карте атмосферного давления, а их образованию и эволюции сопутствуют изменения ветра и связанных с этим возмущений тропосферы, в том числе волновой природы.

Для расчета характеристик циклонов во внетропических широтах ($>20^\circ$ N) Северного полушария использовались 6-часовые поля атмосферного давления на уровне моря по данным реанализа ERA-5 и метод идентификации характеристик циклонов [Бардин, Полонский, 2005; Акперов и др., 2007]. Циклоны определяются как области пониженного давления, ограниченные замкнутыми изобарами. Рассчитываются характеристики циклонов, такие как количество вихрей, их время жизни, глубина (интенсивность), определяемая разностью между минимальным значением давления в циклоне и значением на последней замкнутой изобаре, площадь, занимаемая вихрем, и размер вихря, т. е. его средний радиус. Квадратом глубины циклона характеризуется кинетическая энергия циклона [Голицын и др., 2007; Simmonds, Keay, 2009]. Сравнение статистики характеристик циклонов, полученных данным методом [Акперов и др., 2007; Голицын и др., 2007] и другими методами идентификации [Neu et al., 2013; Ulbrich et al., 2013], показывает их хорошее взаимное соответствие. Количество внетропических образований, по размеру сравнимых с тропическими и превосходящих их, в год на порядок больше, чем тропических.

При движении внетропических циклонов над водной поверхностью можно ожидать волновые отклики в ионосфере, аналогичные наблюдаемым от тропических циклонов, движущихся преимущественно над водой. Именно поэтому для исследования нами выбран регион Тихого океана и Дальнего Востока, где наиболее часто действуют циклоны и есть значительная доля морской или океанической поверхности, а также проходят несколько СДВ-радиотрасс.

На рис. 1 приведено распределение крупных внетропических циклонов за 2020–2023 гг., характеризующихся падением давления более 10 гПа, длительностью свыше трех дней и максимальным диаметром более 300 км, что соответствует размерам тропических циклонов.

Видно, что размер внетропических циклонов на уровне моря в среднем составляет порядка 1500 км, что превосходит аналогичный показатель для тропических циклонов. Далее в работе приведены метеорологические данные о конкретных внетропических циклонах.

В настоящей работе впервые для исследования ионосферного отклика на прохождение внетропических циклонов используются, с одной стороны, измерения с помощью региональной сети станций СДВ-ра-

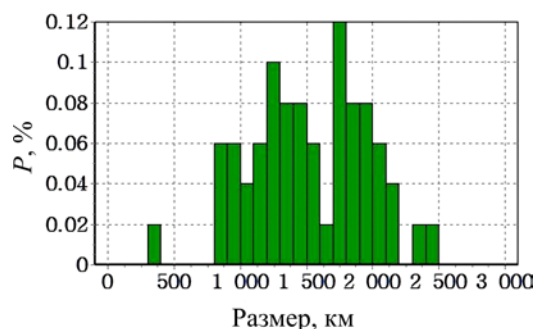


Рис. 1. Распределение крупных внетропических циклонов с величиной падения давления более 10 гПа, длительностью свыше трех дней и максимальными размерами диаметра более 300 км для региона Дальнего Востока за период 2020–2023 гг.

диопроевещения (позволяющей регистрировать возмущения нижней ионосферы), а с другой — данные спутниковой миссии Swarm (регистрация возмущений в верхней ионосфере). Такой подход позволяет использовать уникальные возможности различных методов наблюдения и проследить за развитием атмосферного возмущения, обусловленного внетропическим циклоном, на разных ионосферных высотах по мере распространения возмущения. Указанный подход позволяет также конкретизировать механизмы воздействия циклона на ионосферу.

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Отклик нижней ионосферы на атмосферные процессы исследуется методом дистанционного СДВ-радиозондирования на частотах 3–30 кГц, сигналы на которых 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 ~65 км днем и ~85 км ночью. Амплитуда и фаза сигналов являются чувствительными индикаторами состояния ионосферы. Волновые возмущения, генерируемые в атмосфере достаточно сильным циклоном, при распространении в верхнюю ионосферу должны проходить через нижнюю ионосферу, индикатором чего будут соответствующие возмущения амплитуды и фазы СДВ-сигнала.

В работе использовались данные, полученные на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» [Дягилев, Сдельникова, 2022; <https://ckp-rf.ru/usu/507436/>; <http://www.gsr.ru/unu/>]. Приемные станции СДВ-радиопросвечивания региональной сети Дальневосточного региона России находятся в Петропавловске-Камчатском, Южно-Сахалинске и Южно-Курильске. Станции оборудованы приемниками UltraMSK [<http://ultramsk.com>], которые измеряют одновременно амплитуду и фазу MSK (Minimum Shift Keying) модулированных сигналов в частотном диапазоне 10–50 кГц от несколь-

ких 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 48 внетропических циклонов 2014–2023 гг., которые пересекали зоны чувствительности трасс (пять зон Френеля) в отсутствие магнитной и сейсмической активности (т. е. для событий с магнитудой $M > 5.5$). Эффекты были обнаружены для 12 событий. Трассами служили сигналы от передатчика NWC (19.8 кГц) на западном побережье Австралии и передатчиков JJY (40 кГц) и JJI (22.2 кГц) в Японии, принимаемые на станциях в Петропавловске-Камчатском (РТК), Южно-Сахалинске (YSH) и Южно-Курильске (YUK). Данные по циклонам были получены по методике ИФА РАН, описанной в предыдущем разделе.

Анализировался ночной интервал времени, поскольку дневная ионосфера очень стабильна и чувствительна только к сильным воздействиям вроде солнечных вспышек и магнитных бурь [Клейменова, др., 2004]. СДВ-сигналы имеют суточные и сезонные вариации, поэтому при анализе сопоставлялись наблюдаемый и среднemesячный сигналы.

Для исследования возмущений верхней ионосферы, синхронных с теми, что наблюдались в нижней ионосфере посредством СДВ-радиопросвечивания, использовались данные трех спутников Swarm (А, В и С), расположенных на двух околополярных орбитах: орбиты спутников А и С имеют наклонение 87.4° практически на одной высоте (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 высот 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 лемингировскими зондами на борту спутников с частотой опроса 2 Гц и относительной ошибкой в области максимума электронной концентрации не более 1 % при пролетах над зонами действия тайфунов. Данные доступны по адресу [<http://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/Swarm>].

Поскольку размеры области действия циклонов в атмосфере составляют в среднем 1500 км, то, с учетом скорости движения ИСЗ Swarm, параметры временного фильтра в нашей работе выбирались в интервале от 15 с до 5 мин.

Поиск данных по пролетам сводится к определению пересечения проекций треков космических аппаратов с областью, в которой могут наблюдаться ионосферные проявления циклонов. Эта работа проведена с помощью специализированного ПО, созданного на физическом факультете МГУ. Все иллюстрации, приведенные в этой части работы, выполнены полуавтоматическим комплексом обработки по методике, созданной для тропических циклонов. Особенности регистрации отклика аналогичны задаче для тропических циклонов.

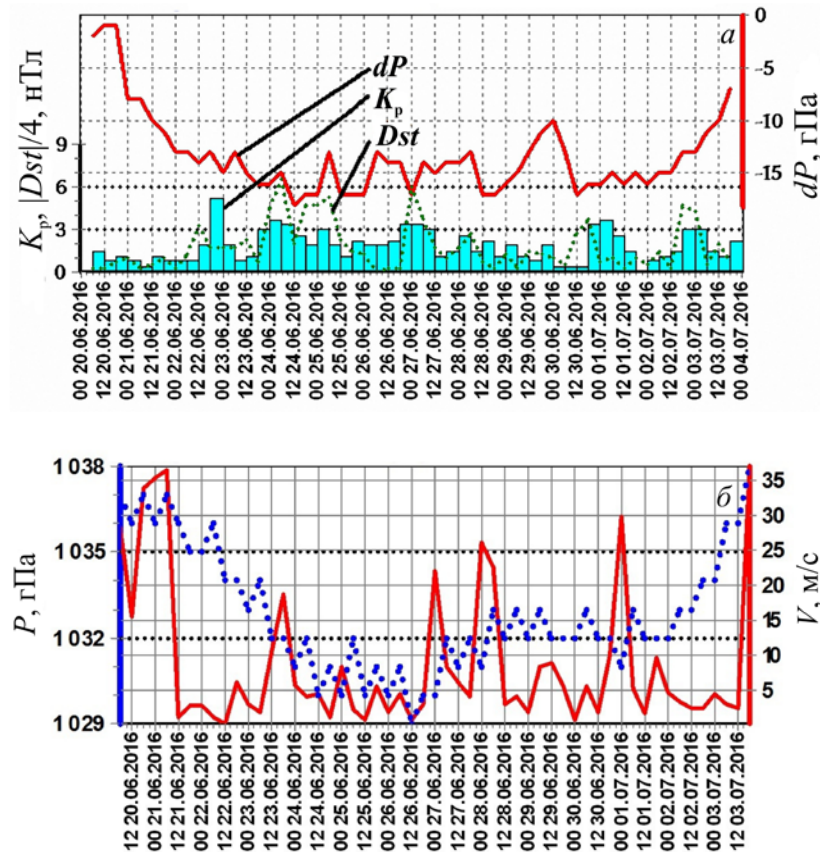


Рис. 2. Временная эволюция циклона 20 июня – 3 июля 2016 г. (событие 2008611(18) с падением давления dP на 18 ГПа по каталогу ИФА РАН) и поведение геомагнитных индексов K_p и $|Dst|$ (а), а также вариации давления и скорости ветра во время рассматриваемого события (б)

Заметим, что мы осуществляем поиск ионосферных откликов в ночные часы, когда наиболее существенно влияние ионосферы на распространение СДВ-сигналов. Однако в это время уменьшается электронная концентрация, которая используется как индикатор возмущений в ионосфере. Наконец, в случае приближения внутритропического циклона как источника генерации ВГВ к суше картина регистрируемых возмущений может меняться из-за интерференции волн. Все это создает дополнительные сложности, наряду с отсутствием пролетов в интересующий период в непосредственной близости от региона действия циклона или тайфуна и трудностями выделения отклика на фоне естественных ионосферных возмущений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Итак, наблюдать синхронные возмущения в нижней и верхней ионосфере во время действия циклонов затруднительно из-за того, что в измерениях посредством СДВ-радиопросвечивания рассматривается ночная ионосфера, а ближайшие по времени пролеты спутников миссии Swarm могут оказаться сдвинутыми приблизительно на 5–7 ч. Тем не менее в настоящей работе возмущения нижней и верхней ионосферы будут рассмотрены для одного случая практически синхронных измерений и нескольких случаев с указанным сдвигом по времени.

Рассмотрим проявление атмосферно-ионосферного взаимодействия во время циклона 2016 г., действовавшего 20 июня – 3 июля. На рис. 2 показано изменение (падение на 18 ГПа) давления на фоне умеренной геомагнитной возмущенности: индексы $Dst \leq 25$ нТл, $K_p \leq 3$, кроме шестичасового интервала в ночь на 23 июня.

Для рассматриваемого события с номером 2008611 (18) по каталогу ИФА РАН анализировались две трассы: JJY–РТК и NWC–YSH, с хорошим качеством данных за период 20.06–03.07.2016. Карта показана на рис. 3. Возмущения амплитуды и фазы сигнала на трассе NWC–YSH были зарегистрированы 24 июня.

На рис. 4 показаны амплитуда и фаза сигнала для трассы NWC–YSH 24.06.2016 в сравнении со среднемесячным уровнем. 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. Имеет место отрицательная аномалия амплитуды. Отклонение фазы от среднего составляет 40° – 50° . Вейвлет-анализ показывает, что короткопериодные вариации амплитуды и фазы имеют основной период около 30 мин.

Для трассы JJY–РТК, как видно на рис. 5, эффект наблюдался 27.06.2016. При сравнении фазы в качестве спокойного дня используется 20 июня. Здесь также имеет место волнообразная вариация фазы. Отклоне-

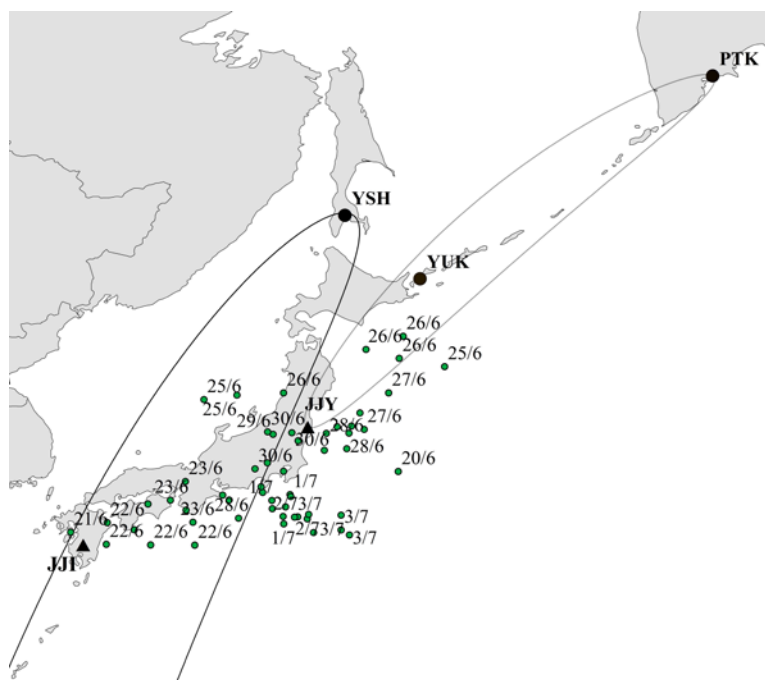


Рис. 3. Движение циклона 2008611(18) (точки) и положение приемников РТК (Петропавловск-Камчатский), YSH (Южно-Сахалинск) и YUK (Южно-Курильск) и передатчиков JJI (22.2 кГц) и JYU (40 кГц): эллипс — проекция пяти зон Френеля на земную поверхность (зона чувствительности трассы NWC–YSH показана частично); цифры — даты в формате день/месяц

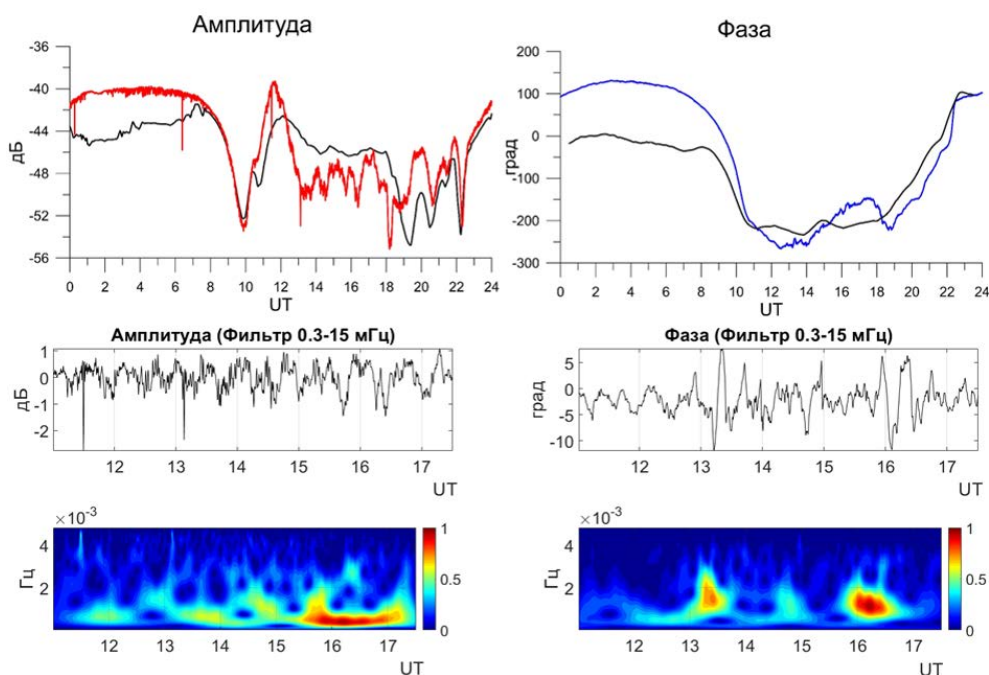


Рис. 4. Амплитуда и фаза сигнала передатчика NWC на станции в Южно-Сахалинске 24 июня 2016 г.: верхние панели — вариации амплитуды и фазы сигнала; черными линиями показаны среднеемесячные значения; средние панели — амплитуда и фаза фильтрованного сигнала в ночное время; нижние панели — вейвлет-спектры фильтрованного сигнала

ние от уровня сигнала в спокойный день достигает 40° . Вейвлет-анализ сигнала передатчика JYU 27 июля на Камчатке также показывает наличие 30-минутных колебаний.

Траектория спутника Swarm-B при пролете над областью циклона 2008611(18), а также условный радиус действия циклона и вариации электронной плотности для 24.06.2016 в интервале 20:50–21:02 UT по-

казаны на рис. 6. Колебания относительной концентрации электронов достигают 10 %.

Траектории спутников Swarm вместе с вариациями электронной плотности в области действия того же циклона, но для 27.06.2016 в интервале 16:09–16:22 UTC показаны на рис. 7. Несмотря на то, что спутники Swarm-A и -C синхронизованы в пространстве и времени, т. е. они входят в соседние области,

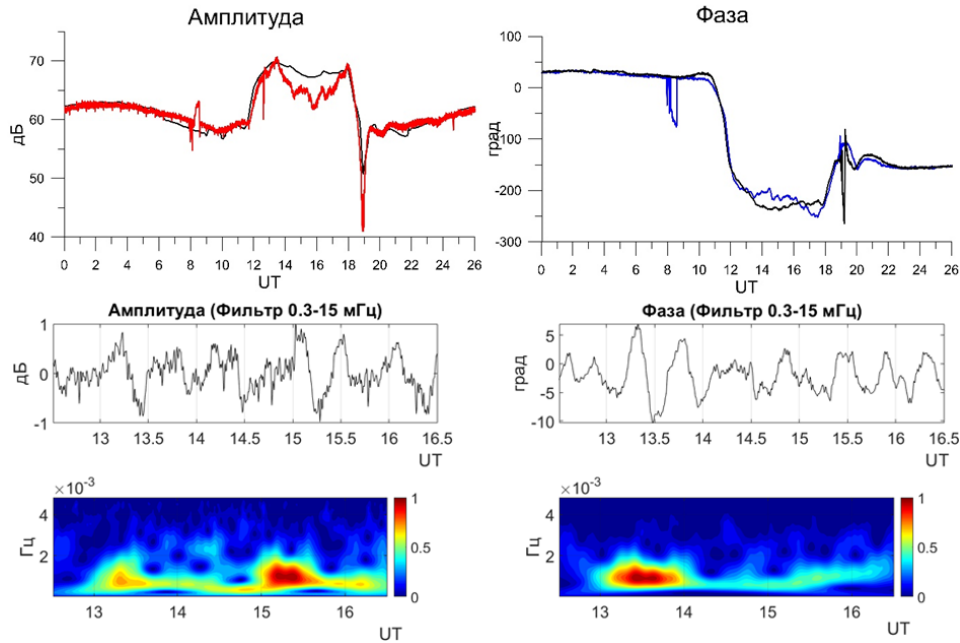


Рис. 5. Амплитуда и фаза сигнала передатчика JJY на станции в Петропавловске-Камчатском 27 июня 2016 г. Обозначения аналогичны обозначениям на рис. 4

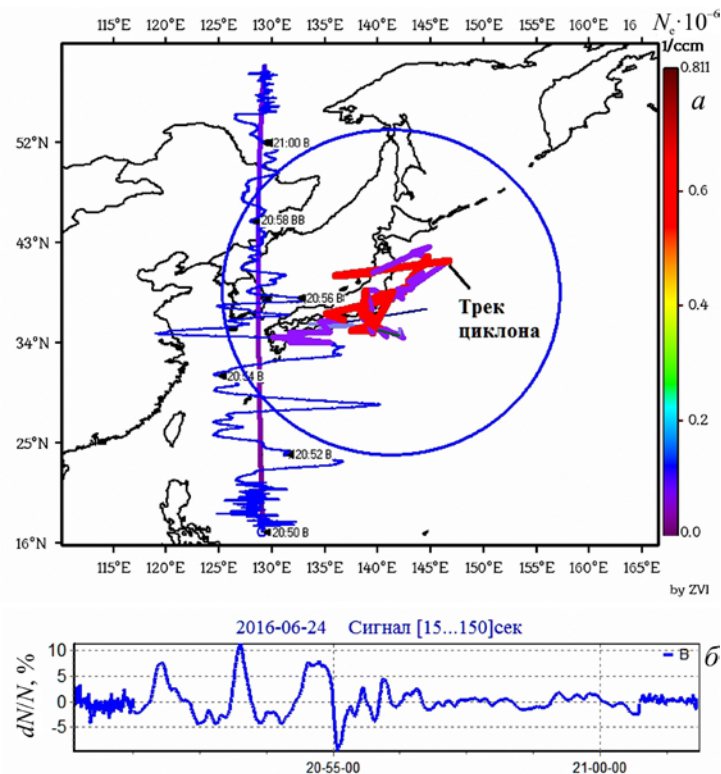


Рис. 6. Панель а — пространственно-временные возмущения электронной концентрации вдоль трека спутника Swarm-B над областью действия циклона 2008611(18) 24.06.2016 в 20:50–21:02 UTC. Показаны условный радиус действия циклона и его трек за все время существования. Проекция трека спутника на поверхность Земли представлена лучом, вокруг которого приведены относительные вариации электронной плотности. Панель б — колебания относительной концентрации электронов на временном интервале до 3 мин на уровне 530 км (высота орбит Swarm-B)

отстоящие друг от друга по долготе менее чем на 1.5° и не совпадающие по времени на 2–10 с, синхронности откликов не наблюдается. Обычно корреляция сигналов этих спутников составляет не менее 0.85, но в рассматриваемом случае корреляция мала, что может указывать на формирование в ионосфере

вдоль траекторий спутников различных областей, обусловленных квазиволновыми движениями плазмы, интерференцией волн или локальной турбулизацией плазмы.

Для другого события — циклона 914245(16) по каталогу ИФА РАН с падением давления на 16 гПа —

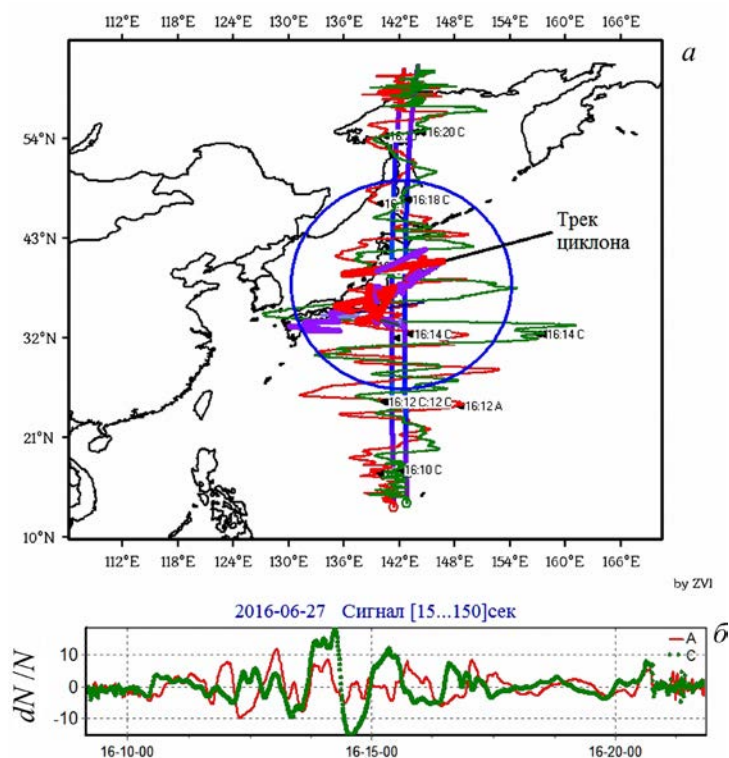


Рис. 7. Панель *a* — пространственно-временные возмущения электронной концентрации вдоль треков спутников Swarm-A и -C над областью действия циклона 2008611(18) 27.06.2016 в 16:09–16:22 UTC. Обозначения аналогичны обозначениям на рис. 6. Панель *б* — колебания величины относительной концентрации электронов на временном интервале до 3 мин на уровне 460 км (высота орбит Swarm-A и -C)

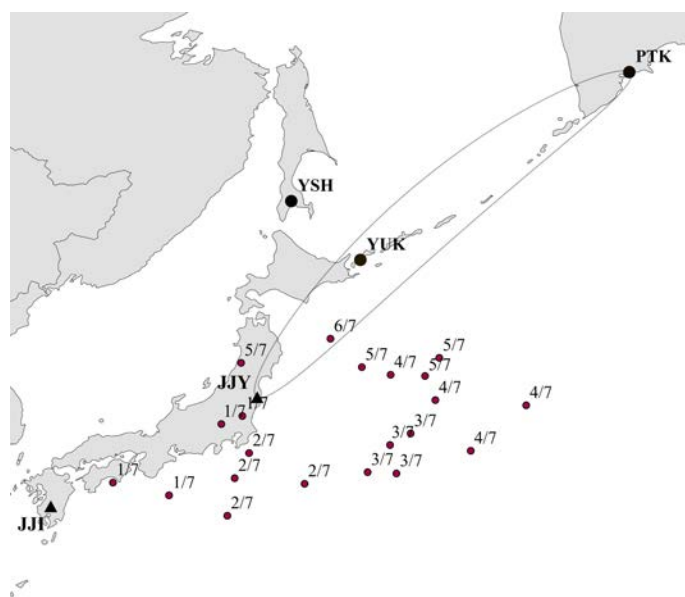


Рис. 8. То же, что на рис. 3, для циклона 914245(16)

анализировался только сигнал JJY за 01.07–06.07.2020, поскольку остальные данные были плохого качества. Эффекты были найдены для 06.07.2020. На рис. 8 показаны положение циклона во времени и анализируемые СДВ-трассы.

Записи амплитуды и фазы СДВ-сигнала для трассы JJY–РТК и соответствующие карты вейвлетов при фильтрации сигнала в диапазоне частот 0.3–15 мГц приведены на рис. 9. Можно отметить две особенности вариаций фазы сигнала: достаточно

длительный (несколько часов) положительный сдвиг фазы, который сменяется отрицательной аномалией (т. е. вариация обратная той, что на рис. 4 и 5), и наложенные на них более короткопериодные волновые вариации.

Рассмотрим теперь измерения в верхней ионосфере на спутниках Swarm. На рис. 10 представлен результат измерения вариаций электронной плотности спутниками А и С в 15:43–15:52 UTC 06.07.2020 над зоной действия циклона, приблизительно в одно

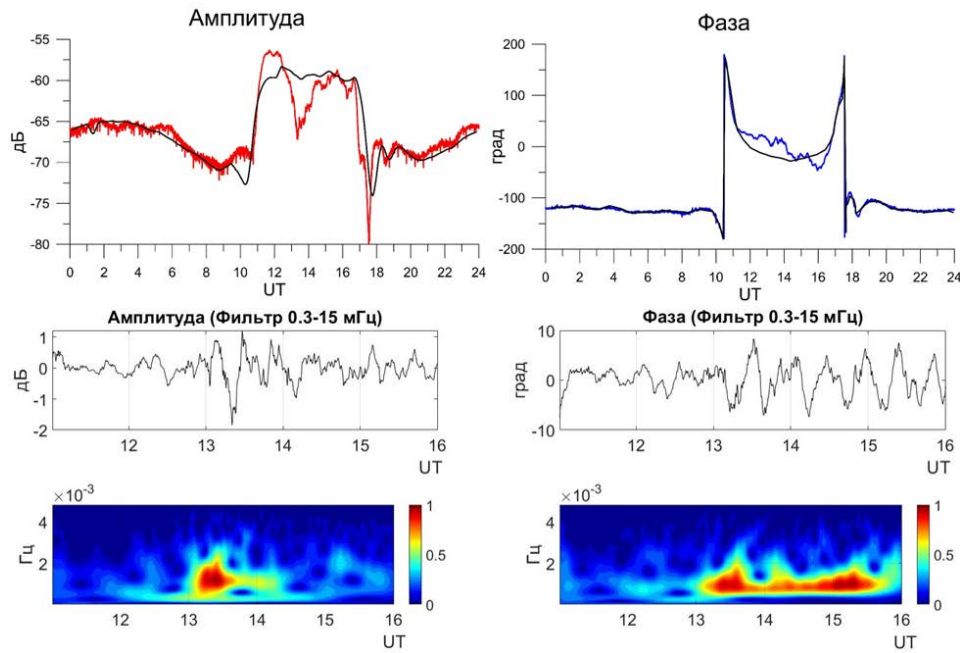


Рис. 9. Верхние панели — вариации амплитуды и фазы сигнала JJY, записанные на станции в Петропавловске-Камчатском 6 июля 2020 г.: черные линии — среднемесячные значения. Средние панели — амплитуда и фаза фильтрованного сигнала в ночное время. Нижние панели — вейвлет-спектры фильтрованного сигнала

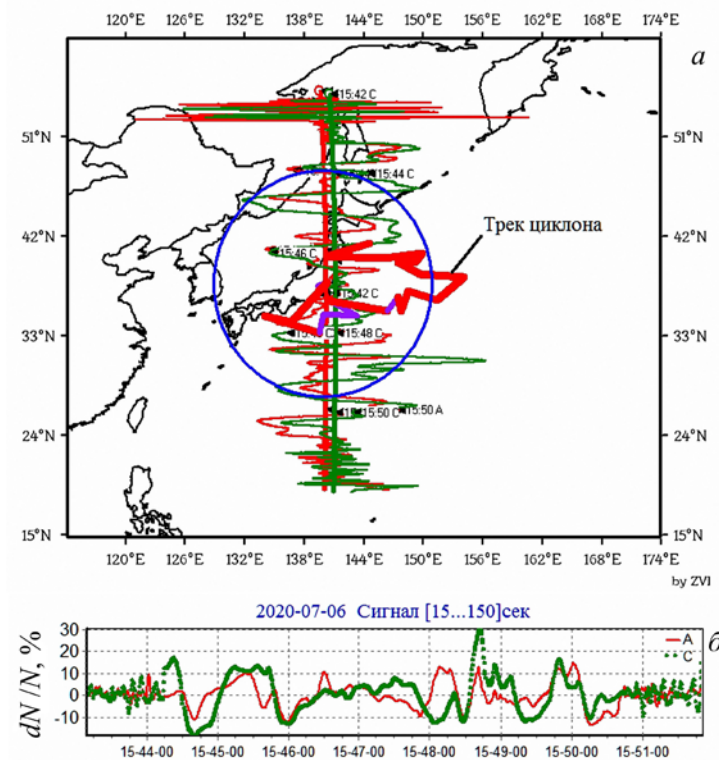


Рис. 10. Панель а — пространственно-временные возмущения электронной концентрации вдоль треков спутников Swarm -А и -С над областью действия циклона 914245(16) 06.07.2020 в 15:43–15:52 UTC. Обозначения аналогичны обозначениям на рис. 6. Панель б — колебания относительной концентрации электронов на уровне 460 км (высота орбит Swarm-А и -С)

время с регистрацией вариаций СДВ-сигнала, показанных на рис. 9. На карте показан полный трек циклона за весь период его действия, эллипсом в проекции карты отмечена область шторма в указанный период времени. Лучами показаны проекции треков спутников на поверхность Земли.

Отклики электронной концентрации, выделенные в диапазоне 15...180 вдоль треков, приведены на рис. 10, б. Обратим внимание на зарегистрированные квазиволновые структуры достаточно большой (до 30 %) относительной амплитуды dN/N . С учетом скорости спутника (около 7.5 км/с) протяженность

структур составляет 400–600 км, что одного порядка с горизонтальной длиной волны структур.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Как уже было отмечено, можно выделить две особенности вариаций фазы СДВ-сигнала: длинно-периодные (несколько часов) отрицательные и положительные аномалии, на которые наложены более короткопериодные волновые вариации.

Действительно, приведенные экспериментальные данные отчетливо демонстрируют волновые возмущения амплитуды и фазы СДВ-сигнала во время активной стадии циклонов, т. е. присутствие волновых возмущений в нижней ионосфере. Вейвлет-анализ показывает наличие волновой активности в диапазоне периодов 8–55 мин, что видно на рис. 4, 5, 9. Этот диапазон соответствует атмосферным внутренним гравитационным волнам (ВГВ).

Если обратиться к наблюдениям на спутнике Swarm (см. рис. 10), практически синхронным с регистрацией возмущений посредством СДВ-радиопросвечивания, то видно, что спутник регистрирует вариации плотности ионосферной плазмы верхней ионосферы с размерами порядка 500 км, которые являются типичными для перемещающихся ионосферных возмущений. Таким образом, и в нижней и в верхней ионосфере во время активной фазы циклонов имеют место вариации ионосферной плазмы, характерные для распространяющихся ВГВ.

ВГВ, генерируемые циклоном, при благоприятных условиях (точнее, при подходящей для распространения в ионосферу структуре ветров [Medvedev et al., 2017]) достигают нижней части F-слоя ионосферы, где способны вызывать вариации как фазы и амплитуды СДВ-сигнала, так и плотности плазмы на высотах полета спутников Swarm. Действительно (см. [Шалимов, Соловьева, 2022]), поляризационные электрические поля, возникающие при волновом движении плазмы в нижней части F-слоя (при распространении волны поперек геомагнитного поля), проецируясь вдоль силовых линий геомагнитного поля в нижнюю ионосферу, вызывают подъем или опускание верхней стенки волновода Земля—ионосфера, т. е. определяют вариации фазы СДВ-сигнала.

Эти же перпендикулярные геомагнитному полю поляризационные 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. Эти вариации плотности плазмы могут быть зарегистрированы на спутнике Swarm.

Можно оценить согласованность спутниковых измерений с измерениями методом СДВ-радиопросвечивания. Пространственные масштабы L вариаций плотности, наблюдаемые на спутнике, оцениваются по формуле $L = V_s/f$, где V_s — скорость спутника; f — частота вариаций. Используя рис. 6, 7, 10 для опре-

деления масштабов вариаций плотности плазмы, получим $L = 400–600$ км. Предполагается, что наблюдаемые частоты волновых вариаций в нижней ионосфере соответствуют проходящим через ионосферу ВГВ, следовательно, для них справедлива оценка $T = T_B \lambda_x / \lambda_z$, где T_B — период Брента—Вайсяля; λ_z , λ_x — вертикальная и горизонтальная длины волн. Согласно модельным расчетам [Vadas, Fritts, 2006], на высотах термосферы ВГВ, генерируемые конвективными движениями в атмосфере, имеют вертикальные длины волн $\lambda_z \approx 45–55$ км. Соответственно, периоды этих волн должны занимать диапазон 30–50 мин, что согласуется с данными СДВ-радиопросвечивания (см. рис. 4, 5, 9).

Рассмотренные выше короткопериодные волновые вариации связываются с распространением ВГВ, поэтому можно полагать, что длиннопериодные вариации тоже так или иначе обусловлены присутствием ВГВ, а точнее диссипацией внутренних волн [Шалимов и др., 2023a].

Действительно, если циклон является источником ВГВ, распространяющихся в ионосферу, то диссипация этих волн в нижней ионосфере приводит к росту коэффициента турбулентной диффузии и, как следствие, к более быстрому перераспределению нейтральных составляющих атмосферы по высоте. Возможной реакцией ионосферы может быть понижение в несколько раз электронной концентрации в диапазоне высот 60–80 км, обусловленное повышением концентрации озона [Ванина-Дарт и др., 2008]. В вариациях фазы СДВ этот эффект соответствовал бы отрицательной полуволне длительностью несколько часов и поднятию D-слоя [Шалимов и др., 2023a].

Другой процесс, также обусловленный диссипацией ВГВ, можно связать с вертикальным переносом молекул NO из области их активного образования (100–150 км), что приводит к увеличению концентрации электронов в нижней ионосфере [Данилов и др., 1987]. Этот эффект с характерным временем несколько часов может соответствовать положительной полуволне в вариациях фазы СДВ [Шалимов и др., 2023a].

Кроме того, возможно прямое воздействие ВГВ на нижнюю ионосферу, которое из-за специфики плазмы на этих высотах (электроны замагничены, а ионы — нет) будет приводить к перераспределению плазмы по вертикали ветровым сдвигом (формирование спорадических слоев в области E [Kelley, 1989]). Однако можно показать, что при воздействии ВГВ на область D перераспределение плазмы по вертикали (которое необходимо для объяснения колебаний фазы и амплитуды СДВ-сигнала) практически отсутствует (см., например, [Haldoupis, Shalimov, 2021]).

Таким образом, исследования отклика ионосферы на прохождение внетропических циклонов с использованием региональной сети станций СДВ-радиопросвечивания и низкоорбитальных спутников (Swarm) позволяют установить, что ВГВ, генерируемые циклоном и при благоприятных условиях достигающие ионосферы, способны вызывать вариации как фазы и амплитуды СДВ-сигнала, так

и плотности плазмы в верхней ионосфере, причем структура откликов показывает возможность взаимодействия внутренних волн от разных источников.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИФЗ РАН и МГУ. Для анализа данных Swarm использовалось ПО, созданное в рамках госзадания МГУ им. М.В. Ломоносова по теме 01200408544. В работе использовались данные, полученные на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» [<https://ckprf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsrar.ru/unu>]. Расчет характеристик внетропических циклонов был выполнен в рамках проекта РНФ № 24-17-00138.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акперов М.Г., Бардин М.Ю., Володин Е.М. и др. Функции распределения вероятностей циклонов и антициклонов по данным реанализа NCEP/NCAR и модели климата ИВМ РАН. *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2007. Т. 43, № 6. С. 764–772. DOI: [10.1134/S0001433807060](https://doi.org/10.1134/S0001433807060).
- Бардин М.Ю., Полонский А.Б. Североатлантическое колебание и синоптическая изменчивость в Европейско-Атлантическом регионе в зимний период. *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2005. Т. 41, № 2. С. 3–13.
- Ванина-Дарт Л.Б., Шарков Е.А. Основные результаты современных исследований физических механизмов взаимодействия тропических циклонов и ионосферы. *Исследование Земли из космоса*. 2016. № 3. С. 75–83.
- Ванина-Дарт Л.Б., Покровская И.В., Шарков Е.А. Реакция нижней экваториальной ионосферы на сильные тропические возмущения. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2008. Т. 48, № 2. С. 255–260.
- Голицын Г.С., Мохов И.И., Акперов М.Г., Бардин М.Ю. Функции распределения вероятности для циклонов и антициклонов в период 1952–2000 гг.: инструмент для определения изменений глобального климата. *Доклады АН*. 2007. Т. 413, № 2. С. 254–256.
- Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.Я. *Метеорологические эффекты в ионосфере*. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 267 с.
- Дягилев Р.А., Сдельникова И.А. Уникальная научная установка «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира». *Геодинамика и тектонофизика*. 2022. Т. 13, № 2, 0591. DOI: [10.5800/GT-2022-13-2s-0591](https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0591).
- Захаров В.И., Куницын В.Е. Региональные особенности атмосферных проявлений тропических циклонов по данным наземных GPS-сетей. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2012. Т. 52, № 4. С. 562–574.
- Захаров В.И., Пилипенко В.А., Грушин В.А., Хамидуллин А.Ф. Влияние тайфуна Vongfong 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. DOI: [10.12737/szf-52201914](https://doi.org/10.12737/szf-52201914).
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Рожной А.А., Соловьева М.С. Вариации параметров СДВ-сигналов на радиотрассе Австралия–Камчатка во время магнитных бурь. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2004. Т. 44, № 3. С. 1–9.
- Хромов С.П., Петросянец М.А. *Метеорология и климатология*. М.: Наука, 2006. 582 с.
- Черниговская М.А., Куркин В.И., Орлов И.И. и др. Исследование связи короткопериодных временных вариаций параметров ионосферы в северо-восточном регионе России с проявлениями тропических циклонов. *Исследование Земли из космоса*. 2010. № 5. С. 32–41.
- Шалимов С.Л., Соловьева М.С. Отклик ионосферы на прохождение тайфунов по наблюдениям методом СДВ радиопросвечивания. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 3. С. 54–61. DOI: [10.12737/szf-83202208](https://doi.org/10.12737/szf-83202208). (Shalimov S.L., Solovieva M.S. Ionospheric response to the passage of typhoons observed by subionospheric VLF radio signals. *Solar-Terr. Phys.* 2022. Vol. 8, iss. 3. P. 51–57. DOI: [10.12737/stp-83202208](https://doi.org/10.12737/stp-83202208)).
- Шалимов С.Л., Захаров В.И., Соловьева М.С. и др. Об отклике ионосферы на сильные тропосферные возмущения. *Исследование Земли из космоса*. 2023а. № 6. С. 106–117. DOI: [10.31857/S0205961423060088](https://doi.org/10.31857/S0205961423060088).
- Шалимов С.Л., Захаров В.И., Соловьева М.С. и др. Волновые возмущения нижней и верхней ионосферы во время тропического циклона Faxai 2019. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2023б. Т. 63, № 1. С. 216–226. DOI: [10.31857/S0016794022600442](https://doi.org/10.31857/S0016794022600442).
- Швед Г.М. *Введение в динамику и энергетику атмосферы*. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2020. 396 с.
- 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, 2013. 160 с.
- 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. P. 493–507.
- Chernogor L.F. A tropical cyclone or typhoon as an element of the Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere system: Theory, simulations, and observations. *Remote Sens.* 2023. Vol. 15, iss. 20, 4919. DOI: [10.3390/rs15204919](https://doi.org/10.3390/rs15204919).
- Chou M.Y., Lin C.H., Jia Yue, et al. Concentric traveling ionosphere disturbances triggered by Super Typhoon Meranti (2016). *Geophys. Res. Lett.* 2017a. Vol. 44. P. 1219–1226. DOI: [10.1002/2016GL072205](https://doi.org/10.1002/2016GL072205).
- Chou M.Y., Lin C.H., Jia Yue, et al. Medium-scale traveling ionospheric disturbances triggered by Super Typhoon Nepartak (2016). *Geophys. Res. Lett.* 2017b. Vol. 44. P. 7569–7577. DOI: [10.1002/2017GL073961](https://doi.org/10.1002/2017GL073961).
- Das B., Sen A., Pal S., Halder P.K. Response of the sub-ionospheric VLF signals to the super cyclonic storm Amphan: First observation from Indian subcontinent. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2021. Vol. 220, 105668. DOI: [10.1016/j.jastp.2021.105668](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105668).
- Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. Variability of the ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2000. Vol. 62. P. 685–693. DOI: [10.1016/S1364-6826\(00\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00029-8).
- 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.* 2021. Vol. 214. 105537. DOI: [10.1016/j.jastp.2021.105537](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105537).
- Lutgens F.K., Tarbuck E.J., Herman R.L. *The Atmosphere. An Introduction to Meteorology*. 14 Edition. New York: Pearson, 2018. 1912 p.
- Kelley M.C. *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*. Academic Press, 1989. 500 p.
- Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., et al. Relation of internal gravity wave anisotropy with neutral wind characteristics in the upper atmosphere. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. Vol. 122. P. 7567–7580. DOI: [10.1002/2017JA024103](https://doi.org/10.1002/2017JA024103).
- Neu U., Akperov M.G., Bellenbaum N., et al. IMILAST: a community effort to intercompare extratropical cyclone detection and tracking algorithms. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2013. Vol. 94, no. 4. P. 529–547. DOI: [10.1175/BAMS-D-11-00154.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00154.1).
- 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. Vol. 65. P. 1189–1200.

Pal S., Sarkar Sh., Midya S.K., et al. Low-latitude VLF radio signal disturbances due to the extremely severe cyclone Fani of May 2019 and associated mesospheric response. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2020. Vol. 125, iss. 5, e2019JA027288. 11 p. DOI: [10.1029/2019JA027288](https://doi.org/10.1029/2019JA027288).

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

Rozhnoi A., Solovieva M., Levin B., et al. Meteorological effects in the lower ionosphere as based on VLF/LF signal observations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2014. Vol. 14, iss. 10. P. 2671–2679. DOI: [10.5194/nhess-14-2671-2014](https://doi.org/10.5194/nhess-14-2671-2014).

Simmonds I., Keay K. Extraordinary September Arctic sea ice reductions and their relationships with storm behavior over 1979–2008. *Geophys. Res. Lett.* 2009. Vol. 36, no. 19. L19715. P. 1–5. DOI: [10.1029/2009GL039810](https://doi.org/10.1029/2009GL039810).

Ulbrich U., Leckebusch G.C., Grieger J., et al. Are greenhouse gas signals of Northern Hemisphere winter extra-tropical cyclone activity dependent on the identification and tracking methodology? *Meteorologische Zeitschrift*. 2013. Vol. 22. P. 61–68. DOI: [10.1127/0941-2948/2013/0420](https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0420).

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. Vol. 111. A10S12. DOI: [10.1029/2005JA011510](https://doi.org/10.1029/2005JA011510).

URL: <https://ckp-rf.ru/usu/507436/> (дата обращения 22 октября 2024 г.).

URL: <http://www.gsras.ru/unu> (дата обращения 22 октября 2024 г.).

URL: <http://ultramsk.com> (дата обращения 22 октября 2024 г.).

URL: <http://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/Swarm> (дата обращения 22 октября 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

Захаров В.И., Соловьева М.С., Шалимов С.Л., Акперов М.Г., Коркина Г.М., Булатова Н.Р. Отклик верхней атмосферы на внетропические циклоны. *Солнечно-земная физика*. 2025. Т. 11, № 1. С. 77–87. DOI: [10.12737/szf-111202509](https://doi.org/10.12737/szf-111202509).