

ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ НА ПРОХОЖДЕНИЕ ТАЙФУНОВ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ МЕТОДОМ СДВ-РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ

IONOSPHERIC RESPONSE TO THE PASSAGE OF TYPHOONS OBSERVED BY SUBIONOSPHERIC VLF RADIO SIGNALS

С.Л. Шалимов

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

М.С. Соловьева

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, 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.S. Solovieva

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

Аннотация. С использованием региональной сети станций сверхдлинноволнового (СДВ) радиопросвечивания в Дальневосточном регионе России исследован отклик нижней ионосферы на прохождение нескольких десятков тайфунов. Приведенные экспериментальные данные во всех случаях отчетливо демонстрируют волновые возмущения амплитуды и фазы СДВ-сигнала на активной стадии тайфунов, пересекающих радиотрассы. При исключении магнитоактивных и сейсмоактивных дней это означает, что возмущения, генерируемые тайфуном, при распространении в верхнюю ионосферу проходят через нижнюю ионосферу, индикатором чего будут соответствующие возмущения амплитуды и фазы СДВ-сигнала. Спектральный анализ показывает, что диапазон обнаруженных волновых возмущений соответствует периодам атмосферных внутренних гравитационных волн (ВГВ). Предложен механизм воздействия ВГВ на нижнюю ионосферу, который позволяет интерпретировать наблюдаемые вариации фазы СДВ-сигнала. Согласно этому механизму, воздействие ВГВ на нижнюю ионосферу обусловлено поляризационными полями, возникающими при волновом движении плазмы в нижней части F-слоя, которые, проецируясь вдоль силовых линий геомагнитного поля в нижнюю ионосферу, вызывают подъем или опускание верхней стенки волновода Земля—ионосфера.

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

Abstract. The response of the lower ionosphere to the passage of several dozen typhoons has been studied using a regional network of VLF stations in the Russian Far East. The experimental data presented in all cases clearly demonstrates wavelike disturbances of the subionospheric VLF signal amplitude and phase during the active stage of typhoons crossing radio paths. With the exception of magnetoactive and seismoactive days, this means that the disturbances generated by a typhoon, when propagating into the upper ionosphere, pass through the lower ionosphere, causing corresponding disturbances in the amplitude and phase of the VLF signal. Spectral analysis shows that the range of the wave disturbances detected corresponds to the periods of atmospheric internal gravity waves (IGW). A mechanism of the action of IGWs on the lower ionosphere is proposed which allows us to interpret the VLF signal phase variations observed. According to this mechanism, the action of IGW on the lower ionosphere is caused by polarization fields arising during the wave motion of plasma in the lower part of the F layer. These fields projected along geomagnetic field lines into the lower ionosphere cause the upper wall of the Earth—ionosphere waveguide to rise or fall.

Keywords: remote sensing by subionospheric VLF signals, atmospheric internal gravity waves, typhoons, ionosphere.

ВВЕДЕНИЕ

Тропические циклоны и тайфуны рассматривают в ряду метеорологических факторов, оказывающих заметное влияние на плазму верхней атмосферы [Данилов и др., 1987]. По оценкам [Forbes et al., 2000], возмущение электронной концентрации N_e в максимуме слоя F2, вызванное метеорологическими факторами, в спокойных геомагнитных условиях может достигать 35 % от фонового уровня. Рассчитанные азимуты и горизонтальные скорости некоторых пере-

мещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) метеорологического происхождения показали, что вероятные зоны генерации зарегистрированных ПИВ лежат в тропосфере и совпадают с областями пониженного атмосферного давления в районах формирования циклонов [Bertin et al., 1975]. Статистические исследования 24 сильных тайфунов 1987–1992 гг. указывают на то, что часто выявляются среднemasштабные ПИВ, вызванные, как полагают, турбулизацией нижней атмосферы и генерацией атмосферных акустико-гравитационных волн, когда сильный

тайфун выходит на сушу или находится вблизи побережья [Xiao et al., 2007; Sharkov, 2012]. Наблюдения свечения в линии гидроксила показали [Suzuki et al., 2013], что на высотах мезосферы возмущения, которые ассоциируются с прохождением тайфуна, формируют картину в виде концентрических кругов. Это указывает на то, что атмосферные внутренние гравитационные волны (ВГВ), для которых характерна подобная пространственная дисперсия, могут распространяться непосредственно из области тайфуна в ионосферу. Было установлено также [Захаров, Куницын, 2012], что часто ВГВ, генерируемые тайфуном, опережают тайфун и распространяются в основном по ходу его движения. Однако следует помнить, что ВГВ могут попасть из тропосферы в ионосферу только при благоприятной для такого распространения ветровой структуре, а именно, ветер должен быть направлен навстречу распространяющейся атмосферной волне. Несмотря на то, что основным звеном, связывающим область тайфуна с ионосферой, считают атмосферные волны, самим механизмом воздействия таких волн на ионосферу практически не уделяют внимания. В результате одни исследователи находят возможный отклик в нижней (посредством ракет) [Ванина-Дарт и др., 2008] и верхней (посредством GPS) [Ванина-Дарт, 2011; Ясюкевич и др., 2013] ионосфере, тогда как другие (посредством GPS) [Афраймович и др., 2008] — нет. Поэтому очевидно, что исследования специфических особенностей ионосферного отклика на прохождение тайфунов необходимо продолжать, используя возможности глобальных и региональных сетей, а также разнообразных инструментов для мониторинга. Именно новые исследования, использующие дополнительные инструменты, способны привести к определению механизмов воздействия тайфунов на ионосферу.

В настоящей работе для исследования отклика ионосферы на прохождения тайфунов использована региональная сеть станций сверхдлинноволнового (СДВ) радиопросвечивания. Специфика эксперимента заключалась в использовании удобного метода дистанционного исследования воздействий на ионосферу — регистрации амплитудно-фазовых характеристик сигналов длинноволновых (ДВ) и СДВ-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 ионосферы происходит на высотах около 60 км днем и около 85 км ночью). Амплитуда и фаза сигналов являются чувствительными индикаторами 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. Подобные идеи были положены в основу поиска ионосферного отклика при воздействии землетрясений и цунами на ионосферу [Rozhnoi et al., 2012, 2014a; Шалимов и др., 2019].

Следует отметить, что изучение отклика ионосферы на прохождение тайфунов посредством

СДВ-радиопросвечивания только начинается. В известной авторам единственной работе по этой теме [Rozhnoi et al., 2014b] было показано, что данный метод является весьма эффективным для обнаружения воздействия атмосферных волн на ионосферу.

ИНСТРУМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

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 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 35 тайфунов за период 2014–2021 гг., которые пересекали зоны чувствительности трасс (пять зон Френеля) в периоды слабой магнитной и сейсмической активности, т. е. в отсутствие событий с $Dst < -50$ нТл и магнитудой $M > 5.5$. Другими источниками подобных возмущений сигнала могут быть извержения вулканов или распространение цунами. Таких событий в анализируемый период времени не наблюдалось. Анализ был сделан для амплитуды и фазы сигнала передатчика NWC (19.8 кГц), расположенного на западном побережье Австралии. Использовались данные, полученные на принимающих станциях в Петропавловске-Камчатском (РТК), Южно-Сахалинске (YSH) и Южно-Курильске (YUK) (рис. 1, 4). Данные в Петропавловске-Камчатском получены Камчатским филиалом ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» [<http://www.gsras.ru/new/infres>]. Аномальные вариации амплитуды и фазы сигнала были найдены для восемнадцати случаев.

Результаты анализа приведены в таблице. Данные по тайфунам были получены с сайта Японского метеорологического агентства (JMA) [<https://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>]. Как видно из таблицы, семнадцать событий не дали ожидаемого эффекта. Причины отсутствия аномалий сигнала в этих случаях требуют дальнейших исследований, но необходимо отметить (и это обстоятельство было упомянуто во введении), что наиболее вероятной причиной является неблагоприятная для распространения ВГВ в ионосферу ветровая структура (когда ветер направлен в ту же сторону, что и распространение волны, образуются критические слои для волн).

Поскольку в дневное время ионосфера достаточно стабильна и малочувствительна к слабым 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

Наличие/отсутствие возмущений в СДВ-сигнале во время прохождения тайфунов

Название	Международный номер	Категория SSHWS	Длительность	Максимальная скорость ветра на инт-ле 1 мин, км/ч	Наличие/отсутствие возмущений
Neoguri	TC 1408	5	2–11 июля 2014 г.	260	–
Rammasun	TC 1409	5	9–20 июля 2014 г.	260	+
Halong	TC 1411	5	27 июля – 11 августа 2014 г.	260	+
Phanfone	TC 1418	4	28 сентября – 6 октября 2014 г.	250	–
Vongfong	TC 1419	5	2–14 октября 2014 г.	215	+
Hagupit	TC 1422	5	30 ноября – 12 декабря 2014 г.	285	+
Maysak	TC 1504	5	27 марта – 7 апреля 2015 г.	230	–
Noul	TC 1506	5	2–12 мая 2015 г.	260	–
Soudelor	TC 1513	5	29 июля – 11 августа 2015 г.	285	–
Goni	TC 1515	4	13–25 августа 2015 г.	220	+
Koppu	TC 1524	4	12–21 октября 2015 г.	240	+
Melor	TC 1527	4	10–17 декабря 2015 г.	230	+
Nepartak	TC 1601	5	2–10 июля 2016 г.	285	+
Meranti	TC 1614	5	8–17 сентября 2016 г.	315	–
Chaba	TC 1618	5	24 сентября – 7 октября 2016 г.	280	–
Haima	TC 1622	5	14–21 октября 2016 г.	270	+
Nock-ten	TC 1626	5	20–28 декабря 2016 г.	280	+
Noru	TC 1705	4	19 июля – 8 августа 2017 г.	250	–
Lan	TC 1721	4	15–23 октября 2017 г.	250	+
Jebi	TC 1821	5	26 августа – 4 сентября 2018 г.	285	–
Cimaron	TC 1820	4	16–24 августа 2018 г.	215	+
Mangkhut	TC 1822	5	6–17 сентября 2018 г.	285	–
Trami	TC 1824	5	20 сентября – 1 октября 2018 г.	260	+
Kong-rey	TC 1825	5	28 сентября – 7 октября 2018 г.	280	–
Yutu	TC 1826	5	21 октября – 3 ноября 2018 г.	280	–
Lekima	TC 1909	4	2–14 августа 2019 г.	250	–
Faxai	TC 1915	4	2–9 сентября 2019 г.	215	+
Hagibis	TC 1919	5	4–22 октября 2019 г.	295	–
Kammuri	TC 1928	4	24 ноября – 6 декабря 2019 г.	220	+
Maysak	TC 2009	4	27 августа – 7 сентября 2020 г.	230	–
Goni	TC 2019	5	26 октября – 6 ноября 2020 г.	315	–
Vamco	TC 2022	4	8–15 ноября 2020 г.	215	+
Surigae	TC 2102	5	12 апреля – 2 мая 2021 г.	305	+
Chanthu	TC 2114	5	5–20 сентября 2021 г.	285	+
Mindulle	TC 2126	5	22 сентября – 2 октября 2021 г.	265	–

наблюдаемым и среднемесечным сигналами. Потом этот сигнал усреднялся за ночной интервал. Ниже приведены примеры анализа вариаций СДВ-сигнала для двух тайфунов: Faxai и Nepartak.

Тайфун Faxai (TC 1915) 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). Тайфун ослаб 9 сентября, когда он достиг берегов Японии [<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/summary/wnp/s/201915.html.en>]. Весь день 8 сентября тайфун находился внутри зон чувствительности трех трасс сигнала NWC (рис. 1). Вариации амплитуды сигнала для трех трасс показаны на рис. 2. Некоторое время 7 сентября Faxai двигался внутри зоны чувствительности трассы NWC–РТК и более короткое время внутри трассы NWC–YUK. На этих трассах падение амплитуды сигнала наблюдалось 7 и 8 сентября. На трассе NWC–YSH резкое падение амплитуды было зарегистрировано 8 сентября (см. рис. 2).

Для этого дня был сделан вейвлет-анализ амплитуды и фазы ночного сигнала, отфильтрованного в диапазоне частот 0.3–15 мГц (рис. 3). Фильтр вы-

бирался таким образом, чтобы исследовать периоды от 1 до 55 мин. В этом диапазоне существуют атмосферные акустические и внутренние гравитационные волны, разделяемые частотой Брента—Вяйсяля. Было найдено, что максимум спектральной плотности имеет период около 16–20 мин, поэтому далее анализировался диапазон периодов возмущений 8–55 мин, представляющий собой диапазон возмущений ВГВ.

Тайфун Nepartak (TC 1601) достиг категории тайфуна 4 июля 2016 г. Максимальная 5-я категория (SSHWS) ему была присвоена 5 июля 2016 г. На следующий день тайфун достиг пика интенсивности. Nepartak начал немного ослабевать 7 июля, сохраняя категорию тайфуна [<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/summary/wnp/s/201601.html.en>].

Движение тайфуна показано на рис. 4. Вариации амплитуды СДВ-сигнала для трасс NWC–РТК и NWC–YSH — на рис. 5. Депрессия амплитуды наблюдалась 5 июля на трассе NWC–РТК и 5–7 июля на трассе NWC–YSH. Вейвлет-анализ амплитуды и фазы для 5 и 7 июля показан на рис. 6, 7 соответственно.

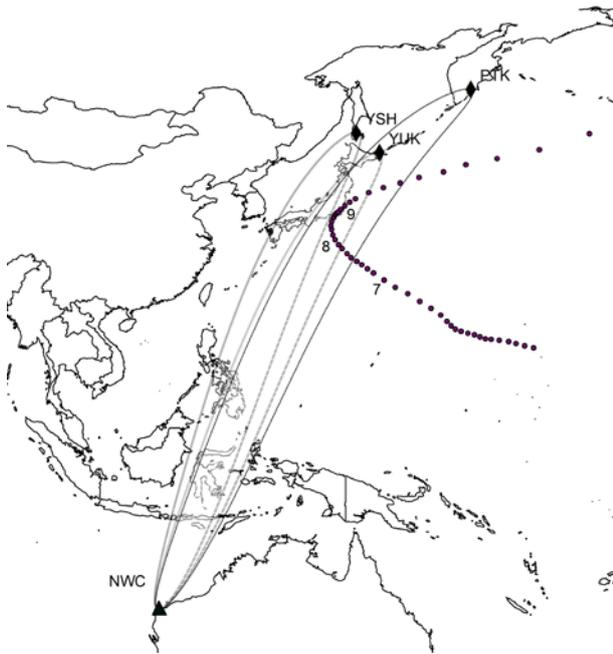


Рис. 1. Взаимное расположение передатчика NWC (треугольник) и принимающих станций (ромбы) в Петропавловске-Камчатском (PTK), Южно-Сахалинске (YSH) и Южно-Курильске (YUK). Эллипсы показывают зоны чувствительности трасс распространения сигнала. Точками показана трасса движения тайфуна Faxai (TC 1915) в сентябре 2019 г. Цифры отображают даты продвижения тайфуна

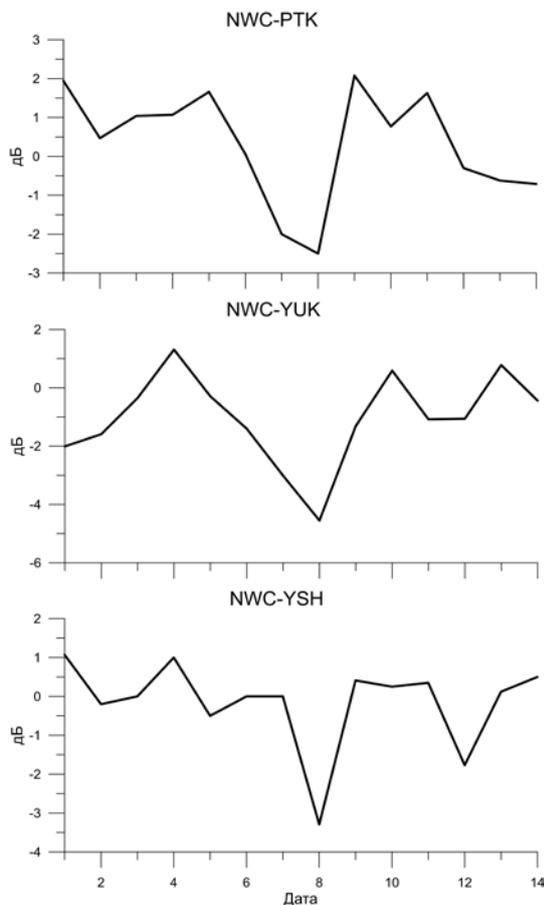


Рис. 2. Вариации амплитуды сигнала NWC для трех трасс, изображенных на рис. 1. Показаны усредненные за ночной интервал времени разностные значения сигнала. По шкале X — даты в сентябре 2019 г.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные экспериментальные данные отчетливо демонстрируют волновые возмущения амплитуды и фазы СДВ-сигнала на активной стадии тайфунов (для других тайфунов, измерения для которых не показаны, этот вывод сохраняется). Вейвлет-анализ показывает наличие волн в диапазоне периодов 8–55 мин, что видно на рис. 3, 6, 7. Этот диапазон соответствует атмосферным ВГВ. С использованием спутников GPS непосредственное наблюдение вариаций полного электронного содержания (ПЭС) в диапазоне упомянутых периодов для тайфуна Nepartak проведено в работе [Chou et al., 2017a, b].

Идея о том, что тайфуны генерируют ВГВ, конечно, не является новой. При этом сама идея неоднократно подтверждалась непосредственным обнаружением волновых возмущений верхней ионосферы, которые ассоциировались с прохождением тайфунов (см., например, [Chou et al., 2017a, b]). В частности, было установлено [Захаров, Куницын, 2012], что ВГВ, генерируемые тайфуном, опережают тайфун и распространяются в основном по ходу его движения.

Вместе с тем самому механизму воздействия генерируемых тайфуном ВГВ на ионосферную плазму, приводящему к наблюдаемым эффектам (в частности в D-слое ионосферы), не уделялось должного внимания. Здесь необходимо учесть, что, в отличие от акустических волн, ВГВ на ионосферных высотах — это вертикально-поперечные волны, групповая скорость которых перпендикулярна фазовой, а следовательно, энергия волн распространяется под прямым углом к направлению распространения волнового фронта. Если тайфун пересекает СДВ-трассу, как показано на рис. 1 и 4, то атмосферная волна, генерируемая им, будет распространяться в приэкваториальной ионосфере почти поперек силовых линий геомагнитного поля. При этом возмущения ветра δU 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 поляризация электрические поля δE , которые приведут плазму в движение в направлении $\delta E \times B_0$. Схема этих процессов для распространяющейся ВГВ показана на рис. 8. Движение происходит вдоль фронта волны, а магнитное поле направлено из плоскости рисунка.

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 проецироваться 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

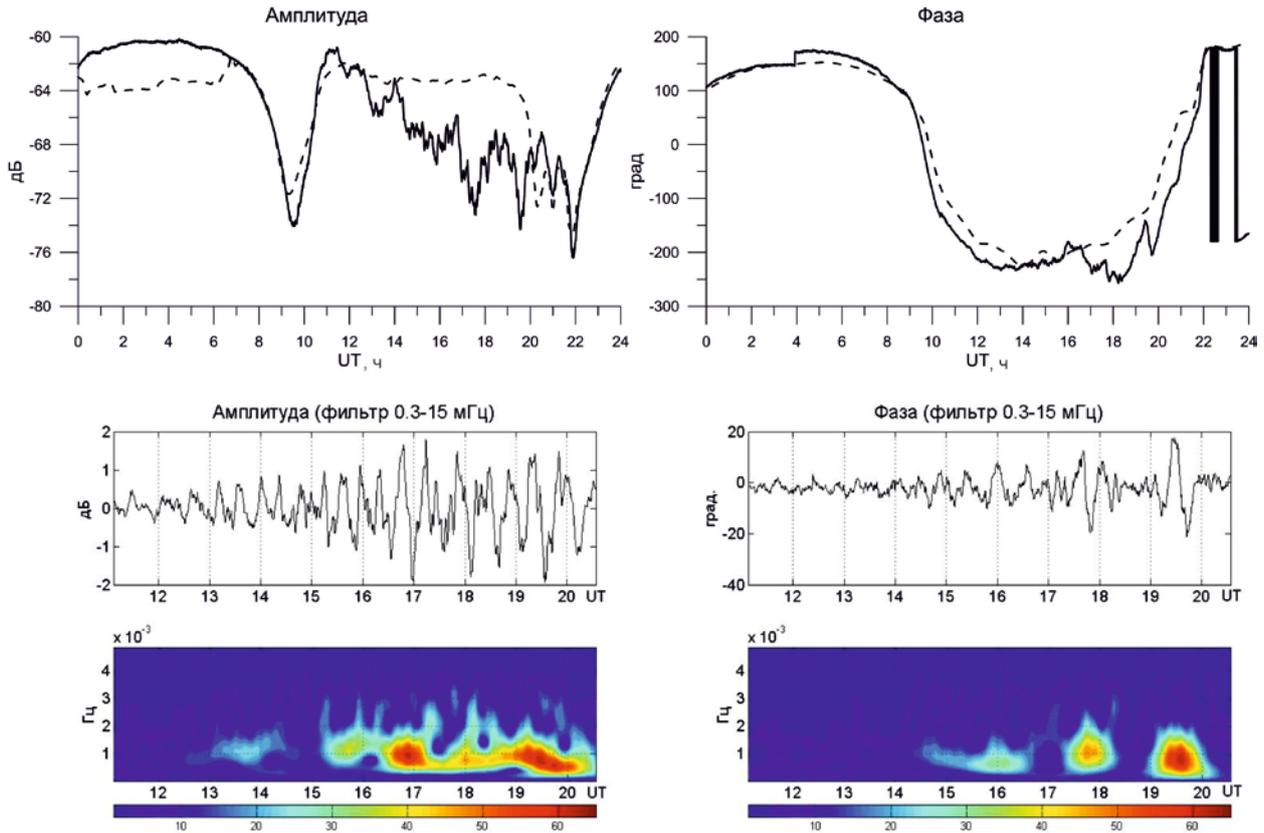


Рис. 3. Амплитуда и фаза: верхние панели — сигнала NWC, зарегистрированного в Южно-Сахалинске 8 сентября 2019 г. (сплошная линия) и среднемесячного сигнала (штриховая линия); средние панели — ночного фильтрованного сигнала на той же трассе. Нижние панели — вейвлет-спектры фильтрованного сигнала

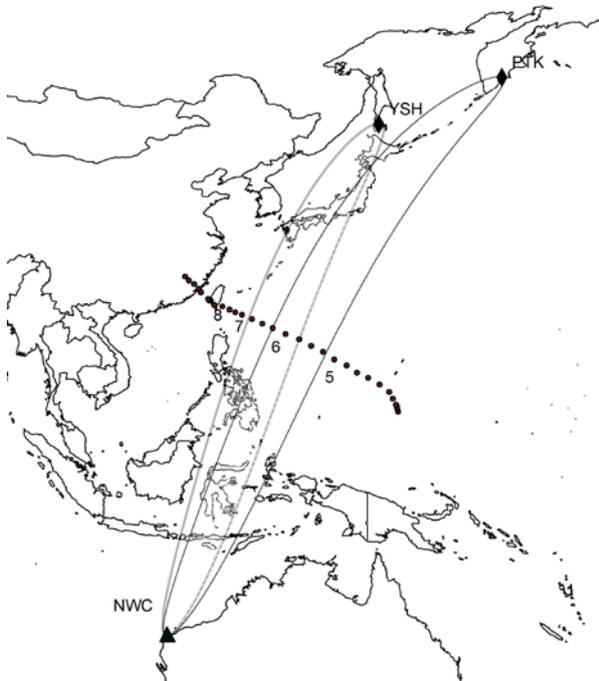


Рис. 4. Движение тайфуна Nepartak в июле 2016 г. Обозначения те же, что на рис. 1

фазы с периодом доминирующей волны. Существенно, что скорость плазмы в возмущениях не превосходит скорости нейтральных движений, поскольку при $\delta \mathbf{E} = -(\delta \mathbf{U} \times \mathbf{B}_0)$ скорость плазмы $\delta \mathbf{v} = (\delta \mathbf{E} \times \mathbf{B}_0) / B_0^2 = \delta \mathbf{U}$.

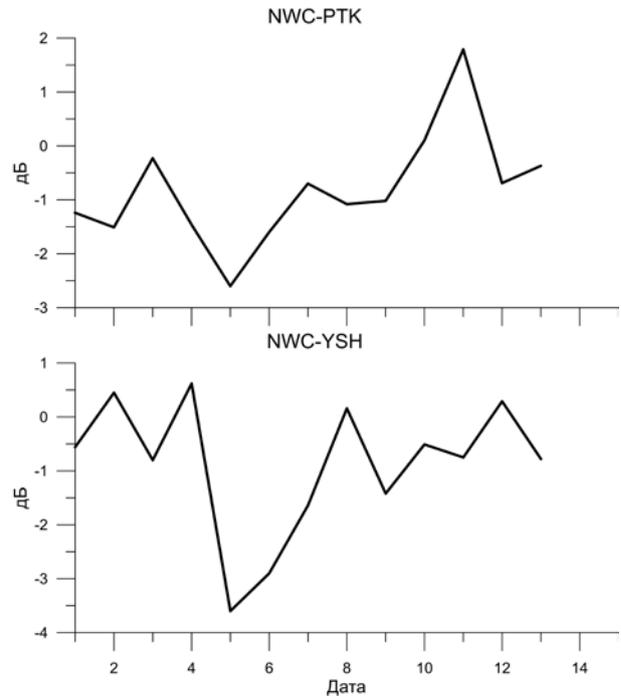


Рис. 5. Вариации амплитуды сигнала NWC для двух трасс, изображенных на рис. 4. Обозначения те же, что на рис. 2

Следует отметить, что схема на рис. 8 идеализированная, поскольку существуют условия, когда полярizations электрические поля могут быть зако-

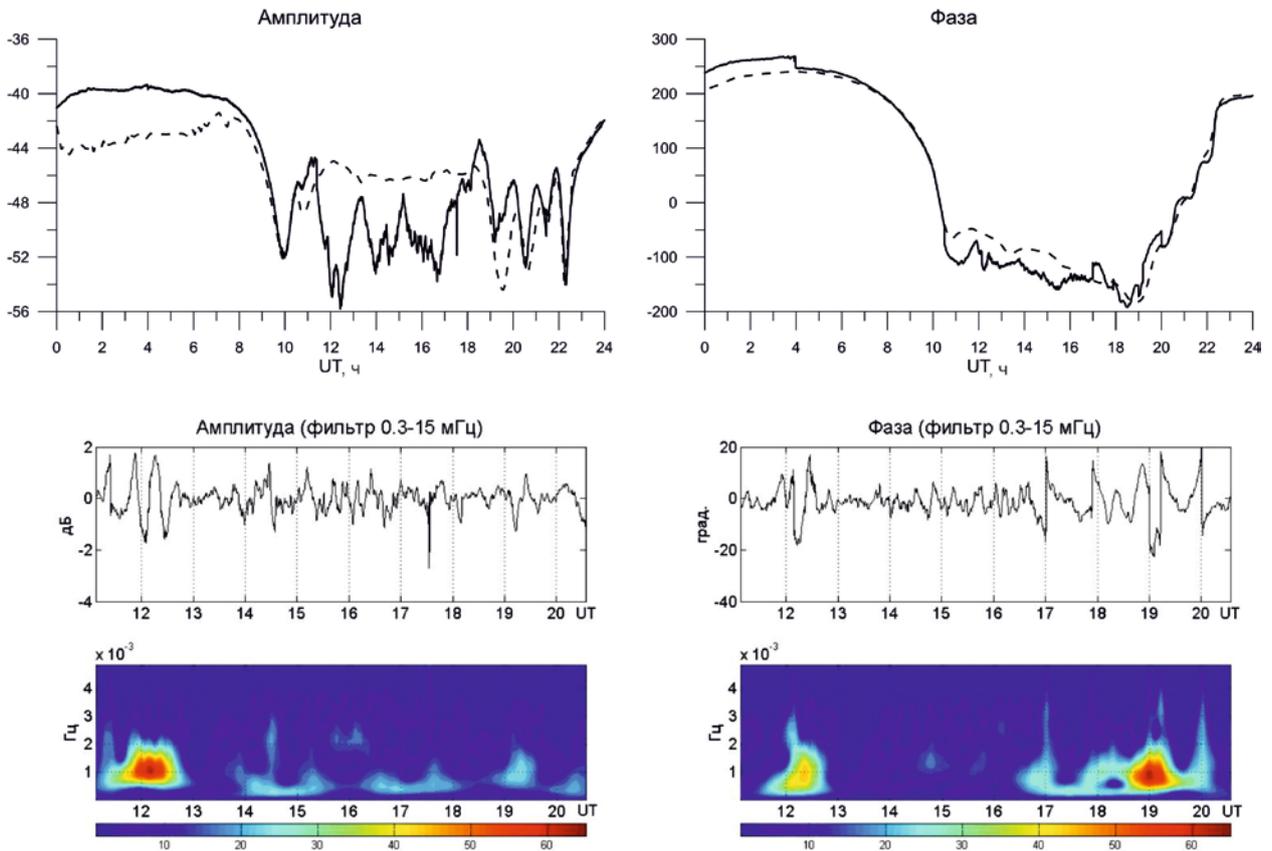


Рис. 6. То же, что на рис. 3, но для 5 июля 2016 г. на трассе NWC-PTK

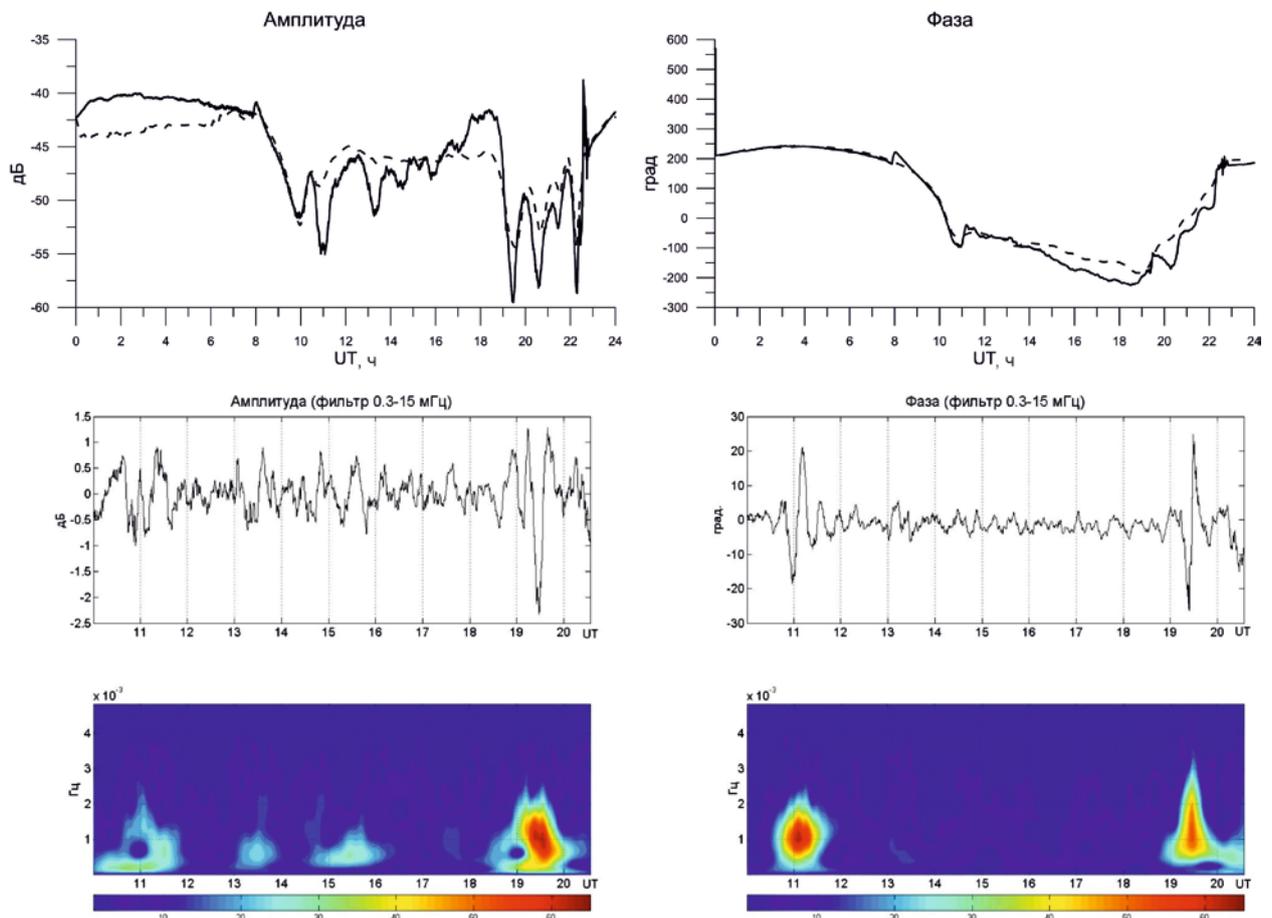


Рис. 7. То же, что на рис. 3, но для 7 июля 2016 г. на трассе NWC-YSH

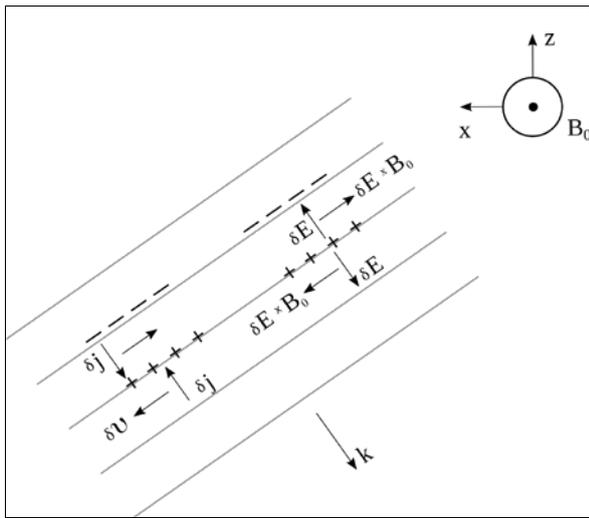


Рис. 8. Схема генерации электрического поля возмущениями ветра в ВГВ

рочены. Во-первых, магнитные силовые линии в экваториальной F-области, изгибаясь, пронизывают E-область вне экватора, дневная проводимость которой велика (в настоящей работе анализируется ночная ионосфера). Во-вторых, если вектор \mathbf{k} волны не строго перпендикулярен силовой линии, токи вдоль магнитного поля будут препятствовать образованию слоев заряда. Это обуславливает определенную направленность воздействия ВГВ тайфуна на ионосферную плазму.

Наконец, могут сложиться условия, когда движения в волне оказываются направленными вдоль геомагнитного поля (или имеется компонента скорости вдоль поля). Такая ситуация может возникать из-за специфической пространственной дисперсии ВГВ, которая проявляется как формирование концентрических зон возмущения. При этом движение нейтралов вдоль магнитного поля за счет соударений вовлекает в сопутствующее движение плазму. При достаточно медленных движениях, характерных для ВГВ, подъем и опускание столба плазмы сопровождаются (в частности в F-слое ионосферы) увеличением и уменьшением плотности электронов. Именно такая ситуация, скорее всего, имела место на завершающей стадии развития тайфуна Nепartak (07.07.2016), когда посредством GPS были зарегистрированы волновые возмущения ПЭС в виде кольцевых дуг на севере от местоположения тайфуна [Chou et al., 2017b].

Заметим, что кроме механизма, предложенного в настоящей работе, существует еще один механизм воздействия ВГВ на область D, обусловленный диссипацией ВГВ (см. [Rozhnoi et al., 2012]). Прохождение же предполагаемых акустических слабых ударных волн и ВГВ через область D само по себе не может привести к наблюдаемым волновым возмущениям фазы и амплитуды СДВ-сигнала из-за специфики плазмы на этих высотах (электроны замagnetичены, а ионы — нет), где для перераспределения плазмы по вертикали необходимо воздействие ветрового сдвига (в области E это приводит к формированию спорадических слоев [Гершман, 1974]).

Поэтому, хотя акустические и слабые ударные волны могут вызывать дополнительную ионизацию [Козлов, 2021], ветровой сдвиг в этом случае отсутствует. Для ВГВ ветровой сдвиг имеет место, но на высотах области D этот механизм неэффективен (см., например, [Haldoupis, Shalimov, 2021]), и перераспределения плазмы по вертикали (необходимого для объяснения колебаний фазы и амплитуды СДВ-сигнала) практически не происходит.

Таким образом, исследование отклика ионосферы на прохождение тайфунов посредством региональной сети станций СДВ-радиопросвечивания позволяет достаточно четко установить, что ВГВ, генерируемые тайфуном и при благоприятных условиях достигающие ионосферы, способны вызывать вариации фазы и амплитуды СДВ-сигнала. Предложенный в настоящей работе механизм воздействия ВГВ на нижнюю ионосферу обусловлен поляризационными полями, возникающими при волновом движении плазмы в нижней части F-слоя, которые, проецируясь 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.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-27-00182). Данные в Петропавловске-Камчатском получены Камчатским филиалом ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания № 075-00576-21.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афраймович Э.Л., Воейков С.В., Ишин А.Б. и др. Вариации полного электронного содержания во время мощного тайфуна 5–11 августа 2006 г. у юго-восточного побережья Китая. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2008. Т. 48, № 5. С. 703–708.
- 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.
- Ванина-Дарт Л.Б., Романов А.А., Шарков Е.А. Влияние тропического циклона на верхнюю ионосферу по данным томографического зондирования над о-вом Сахалин в ноябре 2007 г. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2011. Т. 51, № 6. С. 790–798.
- Гершман Б.Н. *Динамика ионосферной плазмы*. М.: Наука, 1974. 262 с.
- Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В. и др. *Метеорологические эффекты в ионосфере*. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 267 с.
- 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.
- Козлов С.И. *Аэронавигация искусственно возмущенных атмосфер и ионосферы Земли*. М.: Торус Пресс, 2021. 268 с.
- Шалимов С.Л., Рожной А.А., Соловьева М.С., Олшанская Е.В. Воздействие землетрясений и цунами на ионосферу. *Физика Земли*. 2019. № 1. С. 199–213.
- 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.

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.

Chou M.Y., Lin C.H., Yue J., et al. Concentric traveling ionosphere disturbances triggered by Super Typhoon Meranti (2016). *Geophys. Res. Lett.* 2017a. Vol. 44, iss. 3. P. 1219–1226. DOI: [10.1002/2016GL072205](https://doi.org/10.1002/2016GL072205).

Chou M.Y., Lin C.H., Yue J., et al. Medium-scale traveling ionospheric disturbances triggered by Super Typhoon Nepartak (2016). *Geophys. Res. Lett.* 2017b, Vol. 44, iss. 15. P. 7569–7577. DOI: [10.1002/2017GL073961](https://doi.org/10.1002/2017GL073961).

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).

Rozhnoi A., Shalimov S., Solovieva M., et al. Tsunami-induced phase and amplitude perturbations of subionospheric VLF signals. *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117, iss. A9, A09313. DOI: [10.1029/2012JA017761](https://doi.org/10.1029/2012JA017761).

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.* 2014a. Vol. 14, iss. 10. P. 2671–2679. DOI: [10.5194/nhess-14-2671-2014](https://doi.org/10.5194/nhess-14-2671-2014).

Rozhnoi A., Shalimov S., Solovieva M., et al. Detection of tsunami-driven phase and amplitude perturbations of subionospheric VLF signals following the 2010 Chile earthquake. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014b. Vol. 119. P. 5012–5019. DOI: [10.1002/2014JA019766](https://doi.org/10.1002/2014JA019766).

Sharkov E.A. *Global Tropical Cyclogenesis*. Springer Praxis Books, 2012. 604 p.

Suzuki S., Vadas S.L., Shiokawa K., et al. Typhoon-induced concentric airglow structures in the mesopause region. *Geophys. Res. Lett.* 2013. Vol. 40, iss. 22. P. 5983–5987. DOI: [10.1002/2013GL058087](https://doi.org/10.1002/2013GL058087).

Xiao Z., Xiao S.G., Hao Y.Q., Zhang D.H. Morphological features of ionospheric response to typhoon. *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112, iss. A4, A04304. DOI: [10.1029/2006JA011671](https://doi.org/10.1029/2006JA011671).

URL: <http://ultramsk.com> (дата обращения 20 мая 2022 г.).

URL: <http://www.gsras.ru/new/infres> (дата обращения 20 мая 2022 г.).

URL: <https://www.jma.go.jp/jma/indexe.html> (дата обращения 20 мая 2022 г.).

URL: <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon> (дата обращения 20 мая 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

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).