

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE PHYSICS

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-396-411>

УДК 533.951; 551.510.413.7; 621.396.98



Экспериментальные исследования магнитосферного распространения радиоволн средневолнового диапазона

А.С. Калишин[✉], Н.Ф. Благовещенская, Т.Д. Борисова, И.М. Егоров,
А.О. Мингалева, Г.А. Загорский

*ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия*

[✉]askalishin@aari.ru

ID АСК, 0000-0001-7299-6546; НФБ, 0000-0003-1752-3273; ТДБ, 0000-0003-1727-5310;
ИМЕ, 0009-0004-7062-6161; АОМ, 0009-0003-1284-8447; ГАЗ, 0000-0002-4342-7907

Аннотация. В работе приведены результаты экспериментальных исследований аномального распространения радиоволн средневолнового диапазона. Было обнаружено, что в пункте излучения зондирующего сигнала регистрировались эхо-сигналы с необычно большими временами задержки 310–324 мс. Результаты экспериментов можно объяснить эффектом гидрирования — попаданием радиоволны в волноводный канал, ориентированный вдоль силовой линии магнитного поля Земли. В таком канале волна распространяется в магнитосопряженную точку в Южном полушарии и возвращается обратно в пункт излучения, пройдя 93000 км. Выполнен анализ фоновых геофизических условий, и рассмотрены механизмы формирования волнового канала вдоль магнитной силовой линии. Эффект гидрирования может иметь прикладное значение для разработки средств наземного мониторинга параметров космической погоды и радиолокационного зондирования околоземного космического пространства.

Ключевые слова: средние волны, радиоэхо, ионосфера, магнитосфера, плазмопауза, главный ионосферный провал, геомагнитные возмущения, магнитные силовые линии, магнитосопряженная точка

Для цитирования: Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Егоров И.М., Мингалева А.О., Загорский Г.А. Экспериментальные исследования магнитосферного распространения радиоволн средневолнового диапазона. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(4):396–411. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-396-411>

Поступила 29.08.2025

После переработки 06.10.2025

Принята 09.10.2025

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Experimental studies of medium radio wave propagation in the magnetosphere

Alexey S. Kalishin✉, Nataly F. Blagoveshchenskaya, Tatiana D. Borisova,
Ivan M. Egorov, Anna O. Mingaleva, Gleb A. Zagorskiy

State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia

✉askalishin@aari.ru

ASK, 0000-0001-7299-6546; NFB, 0000-0003-1752-3273; TDB, 0000-0003-1727-5310;
IME, 0009-0004-7062-6161; AOM, 0009-0003-1284-8447; GAZ, 0000-0002-4342-7907

Abstract. The paper presents experimental studies of anomalous propagation of medium radio waves. Radio echo signals with unusually long delay times of 310–324 ms were recorded at the transmitter point of the sounding signal. The experimental results can be explained by the guiding effect, when a radio wave penetrates into a waveguide channel oriented along the Earth's magnetic field line. In this case, the radio wave propagates to the magnetic conjugated point in the southern hemisphere and returns to the transmission point traveling a distance of 93,000 km. The echo signals were recorded with the use of AARI-developed transmitting and receiving measuring equipment that has a minimum radiation power of 1 kW, while in the previous LDE observation experiments the radiation power was 5 and 17 kW. For the first time, echo signals that radiated from the Earth's surface were recorded not at a single fixed frequency, but in a frequency band of 400 kHz, from 2.100 to 2.400 kHz. The noise environment at frequencies below 2.100 kHz did not allow us to determine the lower boundary of the channel. Analysis of the background geophysical conditions was performed. It was shown that the long delayed echo (LDE) signals were observed under disturbed magnetic conditions (the planetary magnetic index $K_p = 4^+$) in evening hours. The echo signal frequencies exceeded the critical frequencies of the ionosphere at the transmitter point and were less than the critical frequencies at the magnetically conjugate point. A distinctive feature seen from the CADI ionograms was the presence of the F3S layer, which is the main signature of the development of a subauroral polarization stream (SPS) near the station's zenith. Swarm satellite observations revealed that the Gorkovskaya observatory was located at the bottom of the main ionospheric trough (MIT), near its equatorial boundary. The projection of the plasmopause was also located at the MIT bottom, between its polar boundary and Gorkovskaya. Plausible mechanisms for the creation of a waveguide along the magnetic field line were considered. The guiding effect may find practical significance in the development of means and methods for ground-based monitoring of space weather parameters, as well as radar sounding of the near-Earth space.

Keywords: medium radio-waves, long-delay echoes, ionosphere, magnetosphere, plasmopause, main ionospheric trough, geomagnetic disturbances, magnetic field line, magnetic conjugated point

For citation: Kalishin A.S., Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Egorov I.M., Mingaleva A.O., Zagorskiy G.A. Experimental studies of medium radio wave propagation in the magnetosphere. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(4):396–411. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-396-411>

Received 29.08.2025

Revised 06.10.2025

Accepted 09.10.2025

Введение

При распространении радиоволн средневолнового (СВ) и коротковолнового (КВ) диапазонов достаточно редко наблюдается эффект радиоэха, когда в пункте излучения регистрируется собственный сигнал с необычно большими временами задержки от сотен миллисекунд до единиц секунд [1]. С подобным явлением сталкивались не только исследователи и специалисты, эксплуатирующие различные системы связи, но и радиолюбители. Например, П. Мартинес приводит результаты своих многолетних наблюдений эхо-сигналов с большими временами задержки на

территории Великобритании и делает попытку объяснения данного явления за счет воздействия гравитационного поля Луны [2].

Задержки эхо-сигналов в сотни миллисекунд могут быть обусловлены кругосветным распространением радиоволн, отражением от космических объектов или магнитосферным распространением вдоль магнитных силовых линий. При кругосветном распространении сигналов должен произойти захват радиоволны в канал ионосферы — Земля. В таком канале радиоволна может обогнуть земной шар и возвратиться в пункт излучения. При этом волна может совершить не один оборот вокруг Земли, и эхо-сигнал будет наблюдаться несколько раз. При подобном распространении эхо-сигналы имеют постоянную задержку, а в случае двух или трех витков задержка будет кратной. Время огибания земного шара весьма стабильно и составляет 136–139 мс [1].

При магнитосферном распространении радиоволна, пройдя ионосферу, проникает в магнитосферу и канализируется вдоль магнитных силовых линий Земли. Данное явление получило название гидирование — волноводное распространение электромагнитных волн вдоль силовых линий магнитного поля. Эхо с большими задержками регистрируется при попадании радиосигнала в плазменные неоднородности, играющие роль волноводов. В таком волноводе сигнал распространяется до магнитосопряженной точки, отражается от внешней ионосферы и возвращается обратно. К подобному волноводу можно отнести крупномасштабные неоднородности с пониженной или повышенной электронной концентрацией в магнитосфере, которые образуются вдоль силовых линий магнитного поля. Различные эксперименты по исследованию аномальных механизмов распространения средних и коротких волн показали возможность подобного механизма распространения [3–5]. Наиболее часто эхо-сигналы от волн, распространяющихся в магнитосферных каналах (дактах), регистрировались в диапазоне частот 1,8–3 МГц, а в некоторых случаях инжекция радиоволн в магнитосферу и их дальнейшее распространение наблюдались даже в диапазоне 9–12 МГц [6]. Попадание радиоволн средневолнового диапазона в волноводный канал между магнитосопряженными точками регистрировалось и по данным спутниковых наблюдений. По результатам зондирования ионосферы сверху на ИСЗ «АЛУЭТТ» показано, что зондирующие сигналы, частотой менее 4 МГц, могли проникнуть в узкие дакты, ориентированные вдоль магнитных силовых линий, и распространяться в магнитосопряженную точку противоположного полушария [7]. Эхо-сигналы наблюдались на L -оболочках со значением менее 4 и временными задержками до 500 мс. Авторами было показано, что наиболее часто эхо-сигналы регистрировались на частотах до 2 МГц. При этом нужно отметить, что подобный механизм распространения наблюдается крайне редко и составляет единицы процентов от всего времени проведения экспериментов. Например, в ходе выполнения исследований по гидированию на нагревном стенде EISCAT/Heating не удалось получить положительного результата [8]. Нагревной стенд использовался в качестве радиолокационной КВ-станции, которая работала на частотах 4,9; 5,4 и 7,9 МГц. Эффективная мощность излучения доходила до 1200 МВт.

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование эффекта гидирования радиоволн средневолнового и коротковолнового диапазонов. Зондирующие сигналы попадали в волноводный канал, ориентированный вдоль силовых линий магнитного поля Земли, распространялись в магнитосопряженную точку, находящуюся в Южном полушарии, отражались от внешней ионосферы и возвращались

обратно в пункт излучения. В статье приводится краткое описание оборудования, разработанного для проведения исследований, и результаты регистрации эхо-сигналов. Основное внимание уделяется анализу фоновых геофизических условий, необходимых для регистрации эхо-сигналов, и возможных механизмов распространения радиоволн вдоль магнитной силовой линии.

Описание эксперимента и используемой аппаратуры

Эксперименты по гидированию радиоволн выполнялись на научно-исследовательской станции (НИС) «Горьковская» в январе 2024 и 2025 гг. НИС «Горьковская» расположена в Ленинградской области, севернее Санкт-Петербурга (60,27° с. ш., 29,38° в. д.). Станция предназначена для проведения круглосуточного мониторинга параметров ионосферы и условий распространения радиоволн. Помимо этого, на станции выполняются исследования по дистанционной диагностике эффектов активных воздействий мощного радиоизлучения нагревных стенов на ионосферную плазму.

Эксперименты выполнялись в вечерние и ночные часы. Это обусловлено тем, что эффект гидирования радиоволн с последующей регистрацией эхо-сигналов возможен при совпадении ряда условий, которые обеспечивают прохождение зондирующего сигнала за пределы ионосферы в точке излучения и его отражение в магнитосопреженной точке (МСТ) [4]:

– критическая частота в пункте излучения — НИС «Горьковская» ($foF2_{GRK}$) должна быть ниже, чем в магнитосопреженной точке ($foF2_{MCP}$)

$$foF2_{GRK} < foF2_{MCP}; \quad (1)$$

– частота зондирующих сигналов fss должна соответствовать условию

$$foF2_{GRK} < fss < foF2_{MCP}. \quad (2)$$

Для обеспечения условий (1) и (2) необходимо выполнение экспериментов в зимний период для Северного полушария (НИС «Горьковская»), что будет соответствовать летнему периоду в Южном полушарии. Анализ поведения $foF2$ на НИС «Горьковская» и МСТ показал, что данное условие реализуется в период с ноября по февраль.

Значение критической частоты слоя $F2$ и наличие спорадического слоя Es на НИС «Горьковская» определялось по данным вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы, которое проводилось каждые 15 минут. На станции установлен ионозонд CADI, который выполняет сетевые наблюдения параметров ионосферы [9].

Значение критических частот в МСТ оценивалось по данным, представленным на сайте австралийского Центра прогнозирования космической погоды <https://www.sws.bom.gov.au>. Модельные расчеты сравнивались с результатами вертикального зондирования ближайшего к магнитосопреженной точке ионозонда, расположенного на станции Моусон (Антарктида). Инограммы вертикального зондирования станции Моусон доступны в реальном времени на том же сайте.

Основной задачей экспериментов являлось излучение диагностического сигнала и поиск его эха. Для расчета положения МСТ, номера L -оболочки, протяженности радиотрассы вдоль магнитной силовой линии, а следовательно, и задержки радиоэха зондирующего сигнала использовался программный пакет GEORACK T-89 [10]. Для учета магнитосферной активности в модели применяется Kp -индекс магнитной активности. L -оболочка (параметр Мак-Илвейна) характеризует геоцентрическое расстояние до вершины магнитной силовой линии в радиусах Земли (R_3).

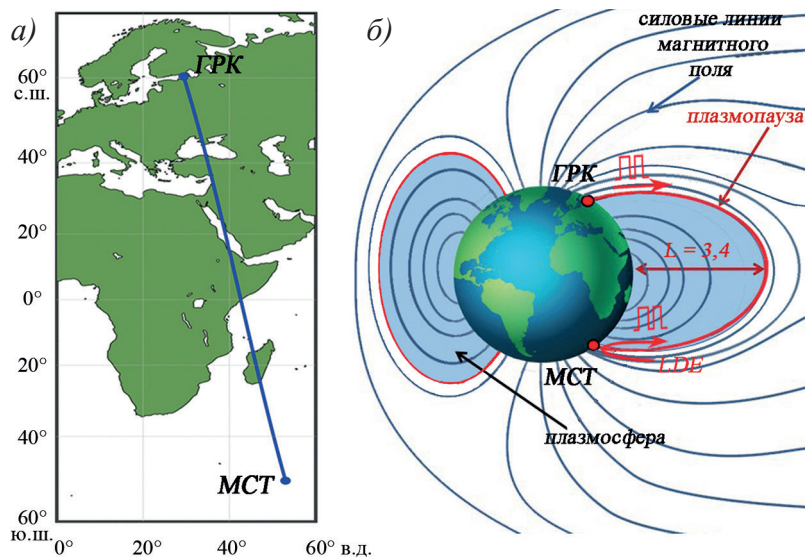


Рис. 1. Геометрия проведения эксперимента. (а) Положение обсерватории ААНИИ НИС «Горьковская» (ГРК), магнитосопряженной точки (МСТ) и проекции траектории распространения радиоволны на поверхность Земли; (б) геометрия распространения зондирующего сигнала вдоль магнитной силовой линии для НИС «Горьковская» при значении $Kp = 3-5$

Fig. 1. The geometry of experiments. The location of the AARI “Gorkovskaya” observatory (GRK), the magnetically conjugate point (MCP) and the projection of the trajectory of radio waves to the Earth’s surface (a); the propagation trajectory of the sounding signal from GRK to MCP and back along the magnetic field line for $Kp = 3-5$ (b)

На рис. 1 приведены расчетные значения координат магнитосопряженной точки и значение L -оболочки в радиусах Земли при $Kp = 3-5$. Положение МСТ находится в районе 51° ю. ш. и 53° в. д., значение L -оболочки составляет $3,4-3,5$. Расчетное расстояние до магнитосопряженной точки и обратно вдоль силовой линии составляет $94546-96712$ км, время задержки эхо-сигналов должно находиться в диапазоне $315-322$ мс. Также схематически показано (см. рис. 1) положение плазмопаузы — верхней границы холодной плазменной оболочки Земли, которая характеризуется резким спадом концентрации плазмы. Область высот атмосферы от 1000 км до плазмопаузы называется плазмосферой. Силовые линии геомагнитного поля в плазмосфере замкнуты и практически дипольны. Высотные положения нижней границы плазмопаузы и форма плазмопаузы зависят от геофизических условий.

Для поиска эхо-сигнала автокорреляционным методом и его однозначной идентификации в качестве зондирующего сигнала использовалась пятиимпульсная амплитудная последовательность Баркера. Длительность импульсов последовательности выбиралась из условия безотказной работы имеющихся в наличии трансивера и усилителя мощности. В эксперименте использовался трансивер IC-718 и усилитель PW-1 фирмы ICOM. Опыт их эксплуатации показал, что оборудование может стабильно работать с импульсами длительностью не менее 30 мс. Таким образом, длительность зондирующей последовательности составляла 150 мс. Зондирующий сигнал передавался каждые 4 с. Усилитель PW-1 обеспечивал выходную мощность сигнала от 500 до 1300 Вт в зависимости от частоты излучения.

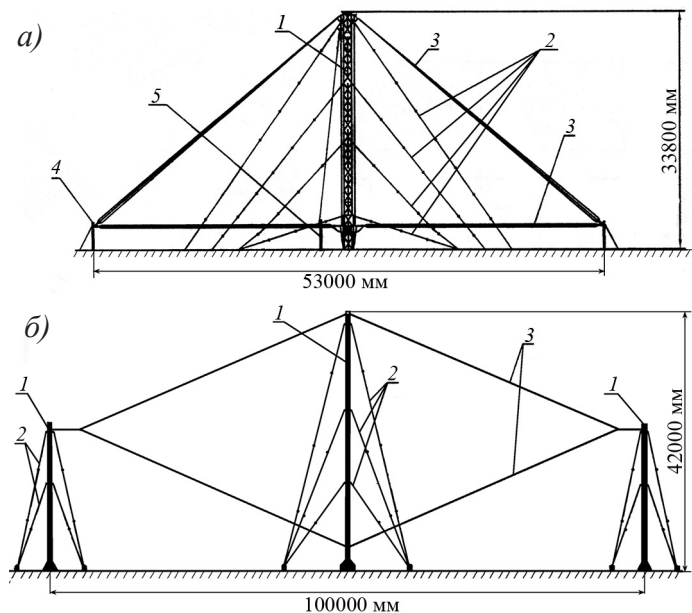


Рис. 2. Антенно-фидерная система комплекса зондирования. Передающая (а) и приемная (б) антенны: 1 — мачтовое устройство, 2 — оттяжка, 3 — антенное полотно, 4 — оттягивающая опора, 5 — опора с согласованной нагрузкой

Fig. 2. Antenna and feedline of the remote sensing sounder complex. a) Transmitting antenna and b) receiving antenna: 1 — radio mast, 2 — guy wire, 3 — antenna curtain, 4 — guy anchor, 5 — support with balanced/unbalanced device

В эксперименте использовалась передающая антенна, которая представляет собой широкополосное «дельта-полотно» с рабочим диапазоном частот 1–16 МГц (рис. 2а). Антенное полотно состоит из двух наклонных и двух горизонтальных вибраторов, которые крепятся на мачте высотой 33 м [11]. Верхние части двух наклонных вибраторов подключаются к согласованной нагрузке 600 Ом. Нижние части наклонных вибраторов соединяются с концами вибраторов горизонтальных частей полотна. Вторые концы горизонтальных вибраторов подключаются к согласующему высокочастотному трансформатору, выполняющему согласование симметричного тракта с волновым сопротивлением 600 Ом с несимметричным трактом фидерной линии с волновым сопротивлением 50 Ом. В антенне обеспечивается однонаправленное излучение, диаграмма направленности ориентирована вертикально вверх относительно поверхности земли.

Прием зондирующих сигналов осуществлялся при помощи КВ приемного комплекса, представляющего собой анализатор спектра декаметрового диапазона на базе приемника IC-R75 [12]. Данное оборудование предназначено для регистрации сигналов КВ нагревных стенов и узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы во время экспериментов по активным воздействиям на ионосферную плазму. Для использования его в экспериментах по гидированию было разработано программное обеспечение (ПО), позволяющее регистрировать, визуализировать, проводить корреляционный и спектральный анализ последовательности радиоим-

пульсов. Ширина полосы анализа принимаемых сигналов составляла 250 Гц и задавалась полосовым фильтром на промежуточной частоте. Регистрация сигналов выполнялась в бинарный файл для дальнейшего анализа.

Прием сигналов выполнялся на вертикальную ромбическую антенну с длиной одной стороны 50,4 м и высотой центральной мачты 42 м (см. рис. 2б). Антенна нагружена на сопротивление 600 Ом, закрепленное на мачте. Для согласования антенны с несимметричной линией 50 Ом используется симметрирующий трансформатор, закрепленный под мачтой. Антенна обеспечивает прием или излучение зондирующих сигналов в частотном диапазоне от 1 до 5 МГц.

Для синхронизации работы радиопередатчика и приемника было разработано соответствующее программное обеспечение, позволяющее проводить сканирование выбранного частотного диапазона с заданным числом повторений зондирующих последовательностей. ПО формирует сетку излучения по времени и частоте, синхронизирует перестройку передатчика и приемника. Таким образом, по функциональному исполнению комплекс оборудования напоминал ионозонд, с тем отличием, что ожидаемые задержки отраженных импульсов составляют не микросекунды, а сотни миллисекунд.

Результаты эксперимента

Всего было выполнено 19 серий экспериментов. Длительность каждой серии составляла от 4 до 10 часов. Эксперименты проводились при спокойных геомагнитных условиях за исключением 15, 16 и 20 января 2025 г., когда наблюдались магнитные возмущения. При спокойных условиях максимальное значение Kp -индекса составляло от 1– до 3+ при суммарном значении за сутки ΣKp от 8– до 16. В воз-

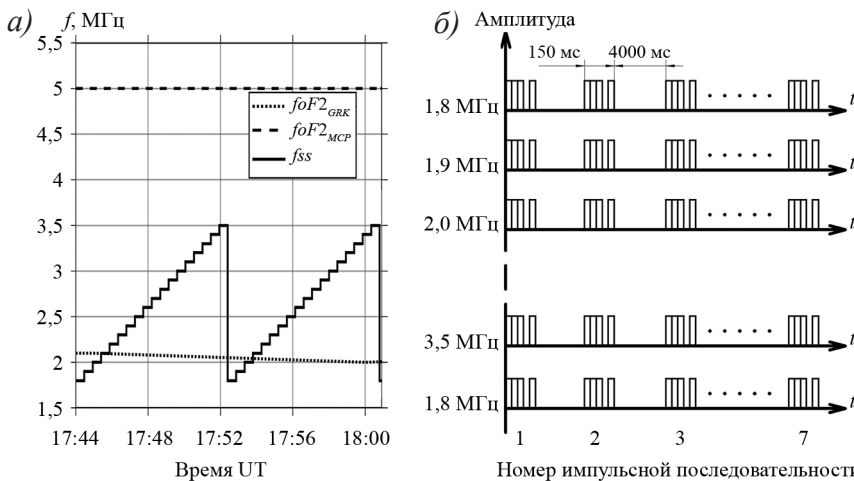


Рис. 3. Ход критических частот $F2$ -слоя ионосферы на НИС «Горьковская» ($foF2_{GRK}$) и в магнитосопряженной точке ($foF2_{MCP}$) (см. рис. 1), а также изменение частоты зондирующего сигнала (f_{ss}) 20 января 2025 г. с 17:44 до 18:10 UT (а). Периодограмма зондирующего сигнала (б)

Fig. 3. Behavior of the critical frequencies of the ionospheric F2 layer at the Gorkovskaya observatory ($foF2_{GRK}$) and at the magnetically conjugate point ($foF2_{MCP}$) (see Fig. 1), as well as the frequency changes of the sounding signal (f_{ss}) on January 20, 2025 from 17:44 to 18:10 UT (a). The periodogram of the sounding signal (b)

мушенные периоды значение $Kp \approx 4$, при $\Sigma Kp = 22-27-$. Наиболее возмущенные условия наблюдались 20 января 2025 г. Максимально значение Kp -индекса за сутки составляло 4+, при $\Sigma Kp = 27-$.

Эхо-сигналы с задержкой 310–324 мс были зарегистрированы только 20 января 2025 г. в период с 17:45 до 18:00 UT. В данный период наблюдались возмущенные магнитные условия, значение Kp -индекса составляло 4+, критическая частота $F2$ -слоя на НИС «Горьковская» составляла 2,1 МГц, E_s -слой отсутствовал. Излучение зондирующих сигналов выполнялось в диапазоне 1,8–3,5 МГц, с шагом 100 кГц. На каждой частоте излучалось 7 импульсных последовательностей с интервалом 4 с. Мощность излучения составляла 1 кВт. На рис. 3а приведен ход критических частот на НИС «Горьковская» и в магнитосопряженной точке, а также частоты зондирующих сигналов в данный период. На рис. 3б показана периодограмма излучаемых сигналов.

На рис. 4 представлены осциллограммы амплитудно детектированных зондирующих сигналов, зарегистрированных в 17:46 UT 20 января 2025 г. Пример последовательности диагностических сигналов с регистрацией эха приведен на рис. 4а. Поскольку зондирующий сигнал (см. рис. 4а, обозначен «3С») представляет собой пятиимпульсную последовательность Баркера (1 1 1 0 1), на осциллограмме он выглядит как два импульса, разделенных паузой. Длительность первого импульса составляет 90 мс, длительность второго — 30 мс, длительность паузы между импульсами также 30 мс. Зондирующие импульсы располагаются на нулевой секунде осциллограммы. При частоте излучения 2,2 МГц на 310-й мс после начала зондирования был зарегистрирован эхо-сигнал (long delay echo — LDE), который имеет такие же временные характеристики, как и излученный сигнал, но меньшую амплитуду.

На рис. 4б приведены зарегистрированные сигналы после амплитудного детектирования в координатах период зондирования — время — интенсивность. На нулевой секунде располагается зондирующий сигнал. Изменение частоты излучения показано на рис. 4в. Первый цикл зондирования начался в 17:44:00 UT, частота составляла 1800 кГц. На данной частоте было выполнено семь зондирований с периодом 4 с. Через 28 с частота излучения перестроилась на 100 кГц и стала составлять 1900 кГц. На данной частоте также было выполнено семь зондирований с интервалом в 4 с. Таким образом, перестройка частоты излучения осуществлялась каждые 28 с до 17:52:00 UT, пока частота не достигла верхнего предела зондирования 3500 кГц. С 17:52:25 цикл зондирования повторился с частоты 1800 кГц. Всего было выполнено три цикла зондирования с 17:44 до 18:09 UT. Показаны (см. рис. 4) только первые два цикла, в которых наблюдались эхо-сигналы.

Эхо-сигналы в первом цикле зондирования стали наблюдаться с 17:45:25 UT. На частоте излучения 2,1 МГц были зарегистрированы эхо-сигналы в 5 зондирующих последовательностях из 7. На частотах 2,2 и 2,3 МГц было зарегистрировано по 6 эхо-сигналов.

Во втором цикле зондирования с 17:52:25 до 18:00:50 эхо-сигналы регистрировались в частотном диапазоне 2,1–2,4 МГц. На частоте 2,1 МГц зарегистрировано 6 эхо-сигналов, на частоте 2,2 МГц — 7, на частоте 2,3 МГц — 6 и на 2,4 МГц — 2 эхо-сигнала. В третьем цикле эхо-сигналы не регистрировались, поэтому они не приводятся (см. рис. 4).

В диапазоне от 1,8 до 2,1 МГц регистрировались сигналы различных источников излучения, что проявилось в высоком уровне шумов, поэтому нельзя однозначно определить наличие эхо-сигналов на этих частотах.

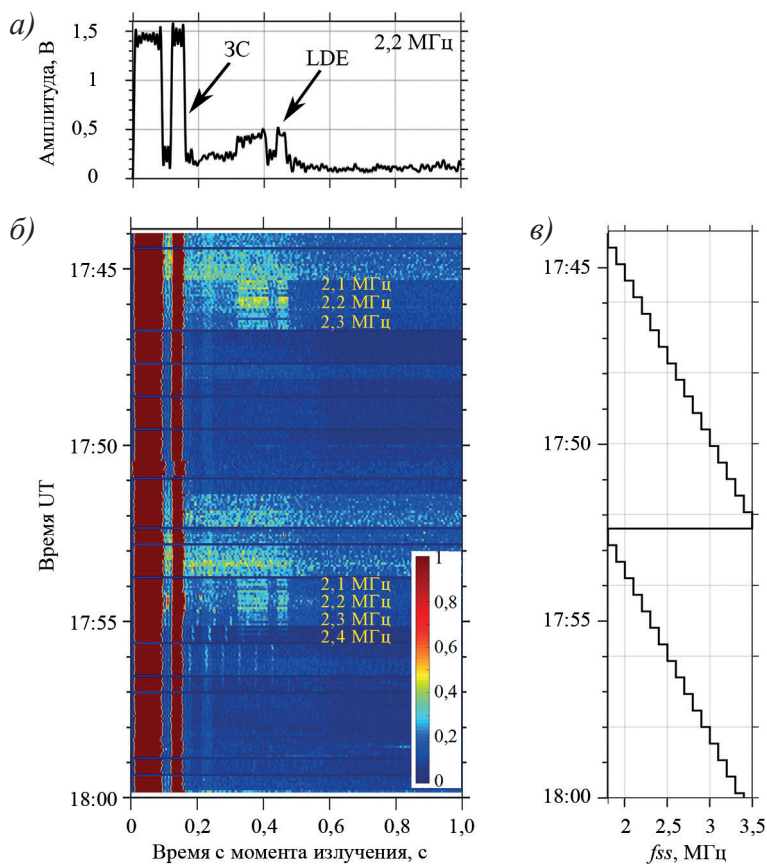


Рис. 4. Интенсивности зарегистрированных сигналов и значение частоты зондирования 20 января 2025 г. с 17:44 до 18:00 UT. (а) Осциллограмма зарегистрированных сигналов на частоте 2,2 МГц. (б) Зарегистрированные сигналы в координатах период зондирования — время — интенсивность. (в) Частота излучения зондирующего сигнала

Fig. 4. The intensity of the recorded signals and the frequency changes of the sounding signal on January 20, 2025 from 17:44 to 18:00 UT. (a) Oscillogram of received signal at frequency of 2,2 MHz. (б) Intensities of the received signals depending on the delay time and time of observations. (в) The frequency of the sounding signal

Из рис. 4 видно, что на всех частотах регистрировался эхо-сигнал с задержкой 95 мс. В нашей работе природа данного сигнала не рассматривается. Скорее всего, он может быть связан с перегрузкой входного каскада приемника излучающим сигналом.

Обсуждение результатов

В период с декабря 2023 по январь 2025 г. было проведено 19 экспериментов по гидированию радиоволн. Эхо-сигналы с задержкой в 310–324 мс были зарегистрированы только 20 января 2025 г. с 17:45 до 18:00 UT. В этот период значение критических частот и частоты зондирования соответствовало условиям (1) и (2). Анализ фоновой геофизической обстановки, при которой наблюдались эхо-сигналы, показал некоторые особенности по сравнению с другими днями, в которые прово-

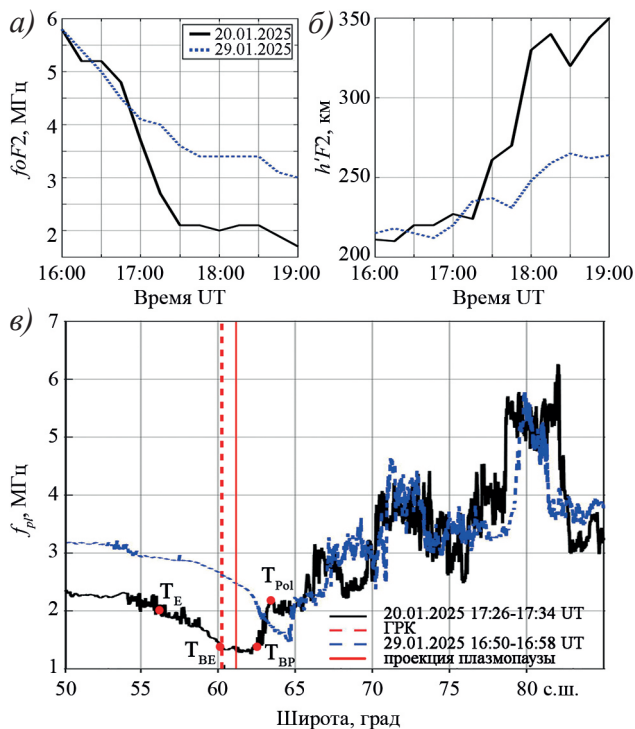


Рис. 5. Характеристики ионосферы в период проведения экспериментов. Значения критических частот (а) и действующих высот (б) F2-слоя, широтное распределение плазменных частот по данным спутника Swarm C 20 и 29 января 2025 г. (в)

Fig. 5. The ionosphere conditions during experiments. The behavior of critical frequencies (a) and virtual heights (б) of the F2-layer, the latitudinal distribution of plasma frequencies from the Swarm C satellite measurements on January 20 and 29, 2025 (в)

дильсь эксперименты. В этот день наблюдалось максимальное значение Kp -индекса, которое составляло 4+. Анализ критических частот F -области ионосферы показал, что эхо-сигналы наблюдались после резкого падения критической частоты в пункте размещения передатчика. В качестве примера на рис. 5а приведены значения критических частот $foF2$ в магнитоспокойный день 29 января 2025 г. и в возмущенный 20 января 2025 г. В данные дни проводились эксперименты по гидрированию, но эхо-сигналы регистрировались только 20 января. В спокойный период значение $foF2$ с 16:00 до 18:00 UT уменьшалось с 5,8 МГц до 3,4 МГц, при этом максимальный градиент снижения составлял 0,5 МГц за 15 минут. 20 января наблюдалось резкое уменьшение $foF2$ до 2,1 МГц, при этом максимальный градиент снижения был существенно больше и составлял 1,1 МГц за 15 минут. Одновременно с уменьшением критической частоты 20 января наблюдался резкий рост высоты отражения ионосферных следов. На рис. 5б приведен ход действующей высоты F2-слоя. 20 января отражения наблюдались на 60 км выше, чем в спокойных условиях 29 января. Таким образом, за 15 минут до регистрации эхо-сигналов наблюдалось резкое снижение критической частоты с увеличением высоты слоя F2, что несвойственно для спокойной январской ионосферы.

Наглядное представление о широтном распределении плазменных частот ионосферы дают данные спутников Swarm A и Swarm C, на борту которых размещен зонд Ленгмюра, работающий с частотой измерений 16 Гц [13]. Орбиты спутников, запущенных Европейским космическим агентством в 2014 г., имеют высоту 451–481 км и наклонение $87,3^\circ$. Расстояние между космическими аппаратами по долготе составляет $1,4^\circ$.

За двадцать минут до наблюдения эффекта гидирования Swarm A и Swarm C прошли по траектории на 5° восточнее НИС «Горьковская», высота пролета составляла примерно 460 км. Значения плазменной частоты по результатам измерений ближайшего к станции спутника Swarm C приведены на рис. 5в (черная линия). Разница между значениями плазменных частот по данным Swarm A и Swarm C составляла десятки кГц, что не является существенным для анализа, поэтому результаты измерений со спутника Swarm A в данной статье не приведены.

По значениям плазменной частоты, измеренной на спутниках Swarm, и результатам вертикального зондирования видно, что 20 января 2025 г. НИС «Горьковская» вошла в зону дна главного ионосферного провала (ГИП). Южная граница ГИП (T_E), соответствующая 20 % понижению электронной концентрации [14], располагалась на широте $55,9^\circ$, дно провала находилось в диапазоне широт $60,3^\circ$ (T_{ME}) — $62,6^\circ$ (T_{MP}), т. е. ширина дна провала составляла $2,3^\circ$, а северная стенка на $63,4^\circ$ (T_{Pol}). Широта станции указана красной пунктирной (см. рис. 5в).

Сравнение положения основных структур ГИП в зависимости от геомагнитных условий показывает, что при возмущенных условиях ГИП находится южнее, чем при спокойных. С ростом возмущенности увеличивается и ширина дна провала, но при этом уменьшаются плазменные частоты на южной стенке и дне провала. Например, 29 января (см. рис. 5в, синяя пунктирная линия) при спокойных геомагнитных условиях северная стенка провала располагалась на широте 65° , ширина дна провала составляла $1,2^\circ$. Плазменные частоты на южной стенке были выше на $0,9$ МГц, а на дне провала на $0,3$ МГц, по сравнению с 20 января во время наблюдения эффекта гидирования. Таким образом, в спокойных геомагнитных условиях станция находилась на южной, пологой стенке провала.

Анализ ионограмм ВЗ и поведения критической частоты указывает на наличие поляризационного джета (ПД) над НИС «Горьковская», который представляет собой узкие струи очень быстрых ионных дрейфов к западу вблизи проекции плазмопаузы на высотах F -области ионосферы [15]. ПД имеет протяженность вдоль меридиана 100–200 км (1 – 2° по широте) и регистрируется всегда экваториальнее границы высыпания авроральных электронов, с увеличением геомагнитной активности смещается на более низкие широты [16]. ПД наблюдается преимущественно в вечернем и предполуденном секторе и вызывает быстрое формирование узкого провала ионизации. Критические частоты $foF2$ в большинстве случаев начинают резко уменьшаться и в течение 15–45 мин снижаются на 2–4 МГц. Одновременно с резким падением критической частоты наблюдается рост высоты слоя $F2$.

Основным признаком развития ПД вблизи зенита станции вертикального зондирования является наличие дополнительного следа отражений $F3s$ на ионограмме [17]. На рис. 6 приведена серия ионограмм вертикального зондирования на НИС «Горьковская» в период с 16:45 до 18:15 UT 20 января 2025 г. По следам отражений от $F2$ -слоя видно резкое падение критической частоты и увеличение высоты слоя. В 16:45, 17:15, 17:45 и 18:15 UT на ионограммах наблюдается дополнительный след $F3s$. Анализ ионограмм показывает, что в период регистрации эхо-сигналов поглощение зондирующих сигналов было минимально. По данным наземных и спутниковых

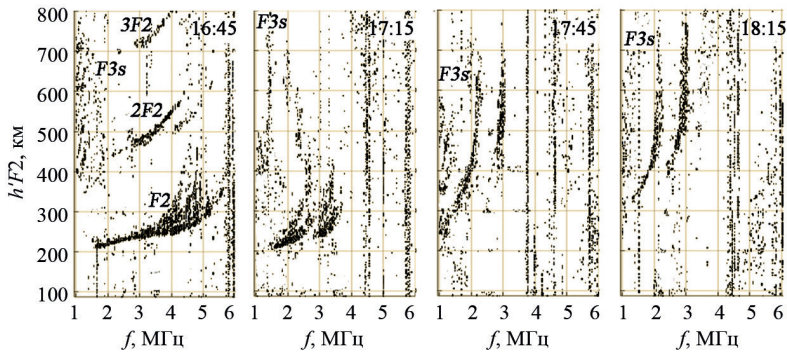


Рис. 6. Ионограммы вертикального зондирования на НИС «Горьковская» 20 января 2025 г. с 16:45 по 18:30 UT

Fig. 6. Ionograms of vertical sounding at the Gorkovskaya observatory on January 20, 2025 from 16:45 to 18:30 UT

наблюдений показано, что ПД приводит к быстрому формированию узких и глубоких провалов ионизации или углублению уже существующего главного провала ионизации вблизи его полярной стенки, т. е. ПД всегда находится внутри главного провала, экваториальнее его полярной стенки [16, 17].

Таким образом, анализ фоновых геофизических условий показывает, что эхосигналы на НИС «Горьковская» регистрировались в период существования ПД при минимальном ионосферном поглощении. В остальные периоды проведения эксперимента подобных условий не наблюдалось.

В работах Д.В. Благовещенского и соавторов [4, 18] выполнен анализ и предложен механизм распространения радиоволн СВ-диапазона вдоль магнитных силовых линий в районе плазмоспаузы, являющейся верхней границей плазмосферы, где силовые линии геомагнитного поля замкнуты и практически дипольны. Для создания оптимальных условий гидирования волн вдоль замкнутых силовых линий необходимо, чтобы положение проекции плазмоспаузы было внутри главного ионосферного провала (ГИП), а передатчик находился в провале, южнее плазмоспаузы. Распространение волн происходит вдоль ступеньки ионизации, образованной структурами ГИП и плазмоспаузой.

Полярная стенка провала создается за счет ионизации электронами диффузной авроральной зоны и может совпадать с проекцией плазмоспаузы, на что указывают результаты наблюдений, полученные как по наземным средствам измерений параметров ионосферы [19], так и с борта космических аппаратов [20, 21]. При возмущенных условиях, когда положение плазмоспаузы изменяется гораздо быстрее, чем происходит перестройка ГИП, проекция плазмоспаузы смещается южнее полярной стенки провала и стремится к области центра дна провала.

Взаимное расположение полярной стенки провала, проекции плазмоспаузы и ПД достаточно подробно изучены по спутниковым наблюдениям, а также наземным сетям вертикального и наклонного зондирования ионосферы [16]. При возмущениях геомагнитного поля ПД находится в минимуме провала, а проекция плазмоспаузы — между ПД и полярной стенкой ГИП.

Положение плазмоспаузы можно приблизительно оценить при помощи эмпирической модели, предложенной Д. Карпентером и Р. Андерсеном [22]:

$$Lp = 5,6 - 0,46Kp_{max}, \quad (3)$$

где Kp_{max} — максимальное значение Kp -индекса за предшествующие 24 часа.

Модель построена по результатам наблюдений на спутниках ISEE и применима для расчета положения плазмопаузы в диапазонах L -оболочек от 2,25 до 8.

Геоцентрическое расстояние плазмопаузы изменяется в зависимости от геомагнитной активности и уменьшается с ростом Kp -индекса (плазмопауза приближается к Земле).

В период появления эхо-сигналов в СВ-диапазоне максимальные значения Kp составляло $Kp_{max} = 4+$, что соответствует положению внутренней границы плазмопаузы на $L = 3,6$ (3). Для НИС «Горьковская» значения L -параметра по модели GEORACK T-89 составляет $L = 3,4-3,5$. Таким образом, проекция плазмопаузы на ионосферу находилась севернее НИС «Горьковская» на один градус широты (рис. 5б). В остальные дни проведения экспериментов при спокойных геомагнитных условиях, соответствующих значению Kp -индекса 1–3, значение L -параметра составляет 4,2–5,1.

Необходимо отметить, что антенна передатчика имеет ширину диаграммы направленности в вертикальной плоскости порядка 50° и пятно засветки антенны на высоте F -слоя составляет 370 км, поэтому зондирующий сигнал облучает все магнитные силовые трубки, опирающиеся на дно провала. Таким образом, при сложившихся фоновых геофизических условиях 20 января 2025 г. в период проведения экспериментов действительно могли сложиться геофизические условия, приведенные в [4, 18], и распространение радиоволн осуществлялось вдоль ступеньки ионизации между минимумом ГИП, усиленным влиянием ПД, и плазмопаузой.

Еще одним механизмом распространения может быть канализация волны между неоднородностями, ориентированными вдоль силовых линий магнитного поля Земли. Данный способ распространения предложен по результатам наблюдений на спутнике «АЛУЭТТ» [7]. Канал распространения образовывался между неоднородностями, концентрация плазмы в которых могла превышать всего 1 % от фонового значения.

Поскольку НИС «Горьковская» располагалась южнее проекции плазмопаузы в периоды регистрации эхо-сигналов, то канал распространения мог образоваться между неоднородностями на внутренней границе плазмопаузы. Внутри подобных неоднородностей плотность плазмы может превышать фоновую более чем на 10 % [23]. В ряде теоретических работ рассмотрены возможные причины возникновения подобных неоднородностей [24, 25]. При всем их различии они сводятся к действию одного механизма — образованию локального электрического поля в основании силовой трубки, под влиянием которого в магнитном поле Земли возможно формирование вытянутых вдоль поля неоднородностей [26]. Например, по данным Якутской меридиональной сети ионосферных станций было показано, что в полосе ПД происходит перенос плазмы вдоль магнитного поля из ионосферы в плазмосферу, который является определяющим в потерях ионизации в F -слое [27]. Данные спутниковых наблюдений также показывают формирование неоднородностей плотности плазмы на L -оболочках, проецирующихся на ионосферную область развития ПД [28].

ПД, как правило, наблюдается в ночном секторе и представляет собой поток ионов в западном направлении, сосредоточенный в узкой полосе широт [15]. Ввиду условий замагничности плазмы на высотах F -слоя такая узкая полоса быстрого западного ионного дрейфа ассоциируется с сильным электрическим полем, направленным к полюсу. Таким образом, ПД над НИС «Горьковская» в период приема эхо-сигналов указывает на возможность канализации радиоволны посредством плазменных неоднородностей в области внутренней границы плазмопаузы.

Заключение

Проведенные исследования позволили экспериментально обнаружить эффект гидирования средних радиоволн вдоль силовых линий магнитного поля, который определялся по регистрации эхо-сигналов с задержками 310–324 мс. При этом впервые эффект гидирования с поверхности Земли регистрировался в диапазоне частот, а не на одной фиксированной частоте. Эхо-сигналы наблюдались в диапазоне от 2,1 до 2,4 МГц при их регистрации с шагом 100 кГц. Экспериментально показано, что ширина полосы канала, ответственного за канализацию диагностических сигналов, составляла 400 кГц. Однако шумовая обстановка на частотах ниже 2,1 МГц не позволила однозначно определить нижнюю границу канала. Также необходимо отметить, что в экспериментах по гидированию радиоволн, выполненных ранее [3, 5], эхо-сигналы наблюдались цугами от десятков секунд до единиц минут. Таким образом, однозначно нельзя говорить о частотном диапазоне канала распространения, поскольку он мог «закрыться» прежде, чем завершится сеанс сканирования выбранного радиодиапазона.

Эхо-сигналы регистрировались при минимальных мощностях излучения по сравнению с проведенными ранее исследованиями. Мощность излучения в наших экспериментах находилась в пределах 1 кВт. В экспериментах, выполненных под руководством Д.В. Благовещенского [3], использовался усилитель мощности на 5 кВт, а мощность сигналов зондирования в экспериментах, проведенных австралийской группой исследователей, составляла 17 кВт [5].

Эффект гидирования средних волн наблюдался в вечернем секторе в районе 21:00 MLT в зимний период только при возмущенных условиях. Частоты эхо-сигналов превышали критические частоты ионосферы в пункте излучения и были меньше критических частот в магнитосопряженной точке. Пункт излучения располагался в зоне минимума главного ионосферного провала, в зените наблюдался поляризационный джет. Гидирование радиоволн происходило на внешней границе плазмосферы вблизи плазмопаузы.

Для поиска ответов на вопросы о механизмах гидирования, условиях генерации и характеристиках каналов, ответственных за туннелирование радиоволн, необходимо продолжение экспериментов. Эффект гидирования может иметь прикладное значение для разработки средств и методов наземного мониторинга состояния плазмосферы и положения проекции плазмопаузы. Помимо этого, в последнее время интенсивно проводятся исследования на нагревных стендах, которые могут быть использованы в качестве радиолокационных станций средних и коротких волн. В подобных исследованиях проводится радиозондирование околоземного космического пространства и оболочек других планет, поэтому эффект гидирования может найти применение и в данной сфере.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00248, <https://rscf.ru/project/24-27-00248/>.

Благодарности. Авторы признательны австралийскому Центру прогнозирования космической погоды за предоставление данных о состоянии ионосферы по наблюдениям глобальной сети ионозондов.

Competing interests. No conflict of interest involved.

Funding. The investigation was carried out within grant № 24-27-00248 from the Russian Scientific Foundation, <https://rscf.ru/project/24-27-00248/>.

Acknowledgements. We are grateful to the Australian Space Weather Forecasting Centre for providing data on the state of the ionosphere, as observed by the global network of ionosondes.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Шлионский А.Г. *Дальнее распространение радиоволн в ионосфере*. М.: Наука; 1979. 152 с.
2. Martinez P. Long delayed echoes, a study of magnetospheric duct echoes 1997–2007. *Radio Communication*. 2007;83(10):60–63.
3. Благовещенский Д.В., Добросельский К.А., Румянцев Г.А., Благовещенская Н.Ф., Киргетов В.Д. Средние радиоволны в космосе, эффекты плазмопаузы. *Космические исследования*. 1996;34(5):483–490.
Blagoveshchenskii D.V. Dobrosel'skii K.A., Rumyanzev G.A., Blagoveshchenskaya N.F., Kirgetov V.D. Medium waves in space and phenomena of plasmopause. *Cosmic Res*. 1996;34(5):446–453.
4. Благовещенский Д.В. *Средние радиоволны в космосе. Наблюдения, модели*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co; 2011. 129 p.
5. Ellis G.R, Goldstone G.T. The probability of observing ducted magnetospheric echoes from the ground. *J. Geophys. Res. Space Physics*. 1990;95(A5):6587–6590. <https://doi.org/10.1029/JA095iA05p06587>
6. Grossi M.D., Padula-Pintos V.H. Ground-based radio sounding of the Earth magnetosphere. *J. Geophys. Res*. 1971;76(16):3755–3763. <https://doi.org/10.1029/JA076I016P03755>
7. Muldrew D.B. Medium frequency conjugate echoes observed on topside-sounder data. *Canad. J. Phys*. 1967;45(12):3935–3941. <https://doi.org/10.1139/p67-331>
8. Senior A., Honary F., Chapman P.J., Rietveld M.T., Kelso T.S., Kosch M.J. High-frequency magnetospheric sounding at EISCAT: Some trials and their implications. *Radio Sci*. 2008;43(4):RS4009. <https://doi.org/10.1029/2007RS003779>
9. Выставной В.М., Макарова Л.Н., Широчков А.В., Егорова Л.В. Исследования высокоширотной ионосферы методом вертикального зондирования с использованием современного цифрового ионозонда CADI. *Гелиогеофизические исследования*. 2013;4:1–10.
Vystavnoy V.M., Makarova L.N., Shirochkov A.V., Egorova L.V. Investigations of the high-latitude ionosphere by using data of the modern digital vertical ionosonde CADI. *Heliogeophysical Research*. 2013;4:1–10. (In Russ.).
10. Tsyganenko N.A. A magnetospheric magnetic field model with a warped tail current sheet. *Planetary and Space Science*. 1989;37(1):5–20.
11. *Руководство по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям. Часть 1. Ионосферные наблюдения*. РД 52.26.817–2023. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»; 2023. 199 с.
12. Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Рогов Д.Д. Дистанционные методы диагностики эффектов воздействия высокоширотных нагревных комплексов. *Метеорология и гидрология*. 2021;4:22–36. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-4-22-36>
Kalishin, A.S., Blagoveshchenskaya, N.F., Borisova, T.D., Rogov D.D. Remote Diagnostics of effects induced by high-latitude heating facilities. *Russ. Meteorol. Hydrol*. 2021;46:231–240. <https://doi.org/10.3103/S1068373921040038>
13. Buchert S., Zangerl F., Sust M., Andre M., Eriksson A., Wahlund J.-E., Opgenoorth H. SWARM observations of equatorial electron densities and topside GPS track losses. *Geophys. Res. Lett*. 2015;42:2088–2092. <https://doi.org/10.1002/2015GL063121>
14. Ishida T., Ogawa Y., Kadokura A., Hiraki Y., Häggström I. Seasonal variation and solar activity dependence of the quiet-time ionospheric trough. *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2014;119:6774–6783. <https://doi.org/10.1002/2014JA019996>
15. Гальперин Ю.И., Пономарев Ю.Н., Зосимова А.Г. Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури. 1. Описание прибора и измерения в магнитно-спокойное время. *Космические исследования*. 1973;11(2):273–282.
Galperin Yu.I., Ponomarev V.N., Zosimova, A.G. Direct measurements of drift rate of ions in upper atmosphere during a magnetic storm. *Kosm. Issled*. 1973;11(2):273–282. (In Russ.).

16. Степанов А.Е., Халипов В.Л., Голиков И.А., Бондарь Е.Д. *Поляризационный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы*. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2017. 128 с.
17. Степанов А.Е., Кобяков С.Е., Халипов В.Л. Наблюдение быстрых субавроральных дрейфов ионосферной плазмы по данным Якутской меридиональной цепочки станций. *Солнечно-земная физика*. 2019;5(4):73–79. <https://doi.org/10.12737/szf-54201908>
Stepanov A.E., Kobyakova S.E., Khalipov V.L. Fast subauroral drifts of ionospheric plasma according to data from Yakut meridional chain of stations. *Solar-Terrestrial Physics*. 2019;5(4):60–65. <https://doi.org/10.12737/stp-54201908>
18. Благовещенский Д.В., Мальцева О. А. Моделирование распространения средних волн в магнитосфере. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2022;62(2):198–205. <https://doi.org/10.31857/S0016794022020043>
Blagoveshchensky D.V., Maltseva O.A. Simulation of medium wave propagation in the magnetosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2022;62(1–2):58–65. <https://doi.org/10.1134/S0016793222020049>
19. Благовещенский Д.В., Жеребцов Г.А. *Высокоширотные геофизические явления и прогнозирование коротковолновых радиоканалов*. М.: Наука; 1987. 272 с.
20. Titheridge J.E. Plasmapause effects in the topside ionosphere. *J. Geophys. Res.* 1976;81(19):3227–3233. <https://doi.org/10.1029/JA081i019p03227>
21. Brace L.H., Theis R.F. The behavior of the plasmapause at mid-latitudes: Isis 1 Langmuir probe measurements. *J. Geophys. Res.* 1974;79(13):1871–1884. <https://doi.org/10.1029/JA079i013p01871>
22. Carpenter D.L., Anderson R.R. An ISEE whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1992;97:1097–1108.
23. Angerami J.J. Whistler duct properties deduced from VLF observations made with the Ogo 3 satellite near the magnetic equator. *J. Geophys. Res.* 1970;6115–6135. <https://doi.org/10.1029/JA075i031p06115>
24. Bernhardt P.A., Park C.G. Protonospheric-ionospheric modeling of VLF ducts. *J. Geophys. Res.* 1977;82(32):5222–5230. <https://doi.org/10.1029/ja082i032p05222>
25. Борисов Н.Д., Золотарев И.П. О возможности образования магнитосферных дактов при локальном нагреве ионосферы. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1983;23(5):797–803.
Borisov N.D. Zolotarev I.P. On a possibility of formation of magnetospheric ducts with local heating of the ionosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1983;23(5):797–803. (In Russ.).
26. Cole K.D. Formation of field-aligned irregularities in the magnetosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1971;33(5):741–750. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(71\)90027-4](https://doi.org/10.1016/0021-9169(71)90027-4)
27. Халипов В.Л., Степанов А.Е., Котова Г.А., Кобякова С.Е., Богданов В.В., Кайсин А.В., Панченко В.А. Вертикальные скорости дрейфа плазмы при наблюдении поляризационного джета по наземным доплеровским измерениям и данным дрейфометров на спутниках DMSP. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2016;56:568–578. <http://doi.org/10.7868/S0016794016050060>
Khalipov V.L., Stepanov A.E., Kotova G.A., Kobyakova S.E., Bogdanov V.V., Kaisin A.B., Panchenko V.A. Vertical plasma drift velocities in the polarization jet observation by ground Doppler measurements and driftmeters on DMSP satellites. *Geomagn. Aeron.* 2016;56(5):535–544. <https://doi.org/10.1134/S0016793216050066>
28. Котова Г.А., Халипов В.Л., Степанов А.Е., Безруких В.В. Влияние суббурь на процессы в ионосфере и плазмасфере Земли. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2024;64:208–216. <https://doi.org/10.31857/S0016794024020043>
Kotova G.A., Khalipov V.L., Stepanov A.E., Bezrukykh V.V. The Substorms Impact on Processes in the Ionosphere and Plasmasphere of the Earth. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2024;64:180–188. <https://doi.org/10.1134/S0016793223601023>