



УДК 550.388.1, 550.837.76

МАГНИТОСФЕРНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН СВ ДИАПАЗОНАА. С. Калишин¹, Н. Ф. Благовещенская¹, Т. Д. Борисова¹, И. М. Егоров¹, Н. А. Степанов¹,
А. О. Мингалева¹, Г. А. Загорский¹¹Государственный научный центр Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

В статье представлены результаты экспериментального исследования распространения сигналов СВ и КВ диапазонов в ионосферно-магнитосферном канале. Показано, что при возмущенных геомагнитных условиях зондирующий сигнал может распространяться вдоль силовых линий магнитного поля Земли в магнитосопряженную точку и отразившись от верхней ионосферы, вернуться в пункт излучения. Зарегистрированы эхо-сигналы с задержками 310 – 320 мс, что соответствует распространению зондирующего сигнала вдоль силовой линии, соответствующей L -оболочке, равной, 3,5 и протяженности трассы 94546 – 96712 км. Выполнен анализ фоновых геофизических условий при регистрации эхо-сигналов и моделирование распространения зондирующих сигналов в ионосферно-магнитосферном канале в приближении геометрической оптики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: СРЕДНИЕ ВОЛНЫ, ГИДИРОВАНИЕ, ЭХО-СИГНАЛЫ, КОРОТКИЕ ВОЛНЫ, ИОНОСФЕРА, МАГНИТОСФЕРА, ПЛАЗМОПАУЗА, РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ.

EDN: EJNUKE

1. ВВЕДЕНИЕ

Начиная с момента экспериментального подтверждения существования ионосферы, появлялись сообщения о регистрации радиоэхо с необычно длительными задержками. Под длительными задержками эхо-сигналов подразумеваются времена от десятков миллисекунд до десятков секунд. В зарубежной литературе данное явление получило название Long Delay Echo (LDE). Первое упоминания о регистрации данного эффекта было почти 100 лет назад – в 1927 г. [Stormer, 1928; Taylor & Young, 1928].

В [Stormer, 1928] сообщается о регистрации нескольких эхо-сигналов на частоте 9,55 МГц от передатчика в Эйтховене, Голландия. Сигнал был зарегистрирован Дж. Хальсом в окрестности Осло с запаздыванием примерно 3 секунды. В работе [Taylor & Young, 1928] приведены результаты регистрации эхо-сигналов на трассе Роки-Пойнт – Вашингтон (США), протяженностью 420 км. Излучение регистрировалось на дискретных частотах в диапазоне от 13 до 21 МГц. Помимо прямых сигналов, распространяющихся по дуге большого круга, были зарегистрированы сигналы с задержками, соответствующими распространению на трассах протяженностью от 2500 до 10000 км.

Краткие исторические обзоры по исследованию LDE приведен в работах [Muldrew, 1979; Шлионский, 1979] и цитируемой в них литературе. Эхо-сигналы с длительными задержками

Электронная почта авторов для переписки:

Калишин Алексей Сергеевич, e-mail: askalishin@aari.ru

Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

регистрировались на различных длинах волн от средних до ультракоротких. Сообщения об их регистрации опубликовывались, как радиолюбителями [Martinez, 2007; Villard et al., 1969; Goodacre, 1980; Rasmussen, 1975; Rasmussen, 1976], так и исследователями по результатам специальных контролируемых экспериментов [Muldrew, 1979, Благовещенский, 2011]. Регистрация эхо-сигналов с длительными задержками – достаточно редкое явление. Результаты многочисленных экспериментов, в которых были проведены до нескольких десятков тысяч сеансов зондирования, не имели положительного результата [Budden & Yates, 1952; Stormer, 1929; Senior et al., 2008].

В настоящее время показано, что в каждом диапазоне за генерацию LDE сигналов ответственны различные механизмы. Радиоволны средневолнового (СВ) диапазона могут быть захвачены в ионосферно-магнитосферный канал (ИМК), ориентированный вдоль магнитных силовых линий [Muldrew, 1979, Благовещенский, 2011; Ellis & Goldstone, 1990]. В таких каналах волна распространяется до магнитосопряженной точки, отражается от верхней ионосферы или поверхности Земли и возвращается обратно в пункт излучения. Волноводное распространение радиоволны в подобном канале получило название гидирования. Каналы могут образовываться неоднородностями концентрации плазмы, ориентированными вдоль магнитного поля. Задержка эхо-сигнала при эффекте гидирования зависит от геомагнитной широты, то есть протяженности силовой линии, связывающей магнитосопряженные точки и составляет до 1 секунды.

В коротковолновом (КВ) диапазоне, как правило, эффект LDE ассоциируют с кругосветным распространением радиоволн [Шлионский, 1979]. Эхо-сигналы имеют задержку распространения порядка 140 мс, а если сигналы многократно огибают Землю, то задержка получается кратной одному обороту. Однако существует достаточно много работ, где указываются задержки в несколько секунд, а порой, достигающие единиц минут, например, [Taylor & Young, 1928, Martinez, 2007; Villard et al., 1969, Goodacre, 1980]. Для объяснения таких результатов наблюдений выдвигались различные гипотезы. В одних утверждалось, что сигнал «запирается» в ионосферных слоях с малой группой скоростью, в других, что происходит захват волны между F и E – слоями ионосферы и распространение вокруг Земли, путем многократного ее огибания до тех пор, пока волна не выветится из образованного таким образом канала, третьи указывали, что в ионосфере происходит конверсия электромагнитных волн в электростатические, распространение электростатических волн и последующая трансформация обратно в электромагнитные [Stormer, 1928, Breit, 1929; Vidmar & Crawford, 1985]. Неоднократно озвучивались предположения, что отражение сигналов возникает от потоков плазмы солнечного ветра в околоземном космическом пространстве.

Эхо-сигналы с длительными задержками регистрировались также в УКВ диапазоне [Rasmussen, 1975]. В данных экспериментах были измерены задержки в единицы и десятки секунд. Эхо-сигналы от поверхности Луны идентифицировались достаточно легко, задержки таких сигналов составляли порядка 2,6 с, но при этом наблюдались и другие времена задержек, которые интерпретировались, как отражение на неоднородностях космической плазмы, сконцентрированных в точках Лагранжа системы Солнце – Земля [Clark, 1971]. Были озвучены, также радикальные предположения, что сигналы ретранслировались космическими аппаратами внеземного происхождения.

Следует отметить, что в 20–30-х годах прошлого столетия исследования эффекта LDE представляли значительный интерес как для радиолюбителей, так и для научного сообщества. В тот период регистрация сигналов осуществлялась фотографическими методами или на слух, оборудование передатчиков и приемников было относительно «простым», поэтому к ряду полученных результатов следует относиться достаточно скептически. Наблюдатели могли выдать случайные помехи в эфире за желаемый результат, самовозбуждение передатчика или его паразитное излучение принять за эхо-сигнал.

Убедительные результаты регистрации LDE в СВ диапазоне приведены в работах [Благовещенский, 2011; Ellis & Goldstone, 1990; Muldrew, 1963; Sharma & Muldrew, 1975]. Эхо-сигналы регистрировались не только при зондировании с поверхности Земли, но и с космических аппаратов. По результатам зондирования ионосферы сверху на космическом аппарате «Алуэтт» на частотах излучения менее 4 МГц было обнаружено, что эхо-сигналы регистрировались с временами задержки менее 0,5 с [Muldrew, 1967]. Эхо-сигналы возникали в результате захвата волны узкими дактами электронной концентрации, ориентированными вдоль силовых линий магнитного поля, их распространения в магнитосопряженную точку и обратно. Авторы показали, что наиболее часто радиоэхо наблюдалось на частотах менее 2 МГц.

Большой объем исследований эффекта LDE с поверхности Земли представлен в работах [Благовещенский, 2011; Благовещенский и др. 1996а; Благовещенский и др. 1996б, Благовещенский и Мальцева, 2022]. Под руководством Благовещенского Д.В. исследовались эхо-сигналы на частоте 1800 кГц при мощности излучения 5 кВт. Время задержки переднего фронта эхо-сигнала относительно переднего фронта излученного сигнала в различных сеансах регистрации находились в диапазоне 284–305 мс, отношения сигнал/шум имели значения 3,5–24,5 дБ. Эхо-сигналы регистрировались в предполуночном секторе зимнего периода только при возмущенном состоянии магнитного поля ($Kp \geq 3$). При этом, пункт наблюдений располагался в зоне главного ионосферного провала, а гидирование радиоволн происходило на внешней границе плазмосферы вблизи плазмопаузы. Во время сеансов наблюдения радиоэха критические частоты $foF2$ в пункте регистрации не превышали частоты зондирующего сигнала. Таким образом, зондирующий сигнал высвечивался из ионосферы и попадал в магнитосферный канал, распространялся до магнитосопряженной точки и возвращался обратно.

В работе [Ellis & Goldstone, 1990] приведены результаты регистрации эхо-сигналов в Австралии на частоте 1910 кГц при мощности излучения 17 кВт. Задержки составляли 250–260 миллисекунд. Критические частоты ионосферы находились в диапазоне 1,5–2,3 МГц. Необходимо отметить, что эффект LDE, возникающий в результате гидирования радиоволн, регистрируется достаточно редко, эхо наблюдается в нескольких процентах от всех сеансов зондирования [Благовещенский, 2011; Ellis & Goldstone, 1990]. Например, в ходе выполнения исследований по регистрации эхо-сигналов на нагревном стенде EISCAT/Heatign, который использовался в качестве зондирующей станции, вообще не удалось получить положительного результата [Senior et al., 2008]. Нагревной стенд излучал на частотах 4,9, 5,4 и 7,9 МГц, при этом, эффективная мощность излучения достигала в некоторых сеансах 1200 МВт.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования эффекта LDE в СВ и КВ диапазонах в предположении, что зондирующий сигнал захватывается в ионосферно-магнитосферный канал (дакт), ориентированный вдоль магнитного поля Земли. В таком канале сигнал распространяется до магнитосопряженной точки (МСТ), отражается от внешней ионосферы или земной поверхности и возвращается обратно в пункт излучения. Эксперименты выполнялись в зимний период 2024 и 2025 г. на научно-исследовательской станции (НИС) «Горьковская» Арктического и антарктического научно-исследовательского института, расположенной в Ленинградской области (60,27° с.ш., 29,38° в.д.). Приведено краткое описание приемо-передающего комплекса, установленного на НИС «Горьковская», предназначенного для регистрации эхо-сигналов. Основное внимание в работе уделяется анализу фоновых геофизических условий, необходимых для регистрации эхо-сигналов, и моделированию распространения зондирующих сигналов в ионосферно-магнитосферном канале в приближении геометрической оптики.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Регистрация эхо-сигналов возможна при выполнении ряда условий, которые обеспечивают прохождение зондирующего сигнала за пределы ионосферы в точке излучения и его отражение в магнитосопряженной точке. Частота зондирующего сигнала должна быть выше критической частоты в пункте излучения, чтобы пройти через ионосферу и попасть в магнитосферный волновой канал $foF2_{GRK} < f_s$. Для обеспечения условия отражения волны в МСТ от внешней ионосферы, частота зондирующего сигнала должна соответствовать условию $f_s < foF2_{MCP}$. Таким образом, для проведения экспериментов необходимо выполнение условия $foF2_{GRK} < foF2_{MCP}$. Поскольку пункт излучения расположен на НИС «Горьковская», данное условие наблюдается в зимний период для северного полушария, что соответствует летнему периоду в южном полушарии.

Для расчета координат МСТ, номера L -оболочки, соединяющей пункт излучения и точку отражения в южном полушарии, а также протяженности радиотрассы вдоль магнитной силовой линии, использовался программный пакет GEOPACK T-89 [Tsyganenko, 1989]. В модели магнитная активность задается планетарным индексом магнитной активности Kp . Положение МСТ по модели находится в районе 51° ю.ш. и 53° в.д., значение L -оболочки 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.

Параметры ионосферы в точке излучения контролировались ионозондом CAD1 (Canadian Advanced Digital Ionosonde) [Выставной и др., 2013], зондирование выполнялось каждые 15 минут.

Значение критических частот в МСТ оценивалось по результатам моделирования, представленными на сайте австралийского Центра прогнозирования космической погоды в реальном времени. Модельные расчеты сравнивались с результатами вертикального зондирования ближайшего к МСТ ионозонда, расположенного на станции Моусон (Антарктида).

3. ОПИСАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ LDE СИГНАЛОВ

Для выполнения экспериментов использовался следующий комплекс научного и измерительного оборудования на НИС «Горьковская»:

- вертикальный цифровой ионозонд CADI;
- передающая направленная широкополосная КВ антенна;
- приемная направленная широкополосная КВ антенна;
- приемно-передающий комплекс для дистанционного зондирования ионосферы и магнитосферы сигналами специальной формы (разработан в ААНИИ).

Передающая и приемная антенны представляют из себя проволочные антенны бегущей волны на стальных мачтах с оттяжками. Геометрические размеры полотен антенн представлены на рисунках 1А и 1Б, а на рисунках 1В и 1Г их диаграммы направленности в вертикальной плоскости, полученные по результатам моделирования в программе MMANA-GALbasic.

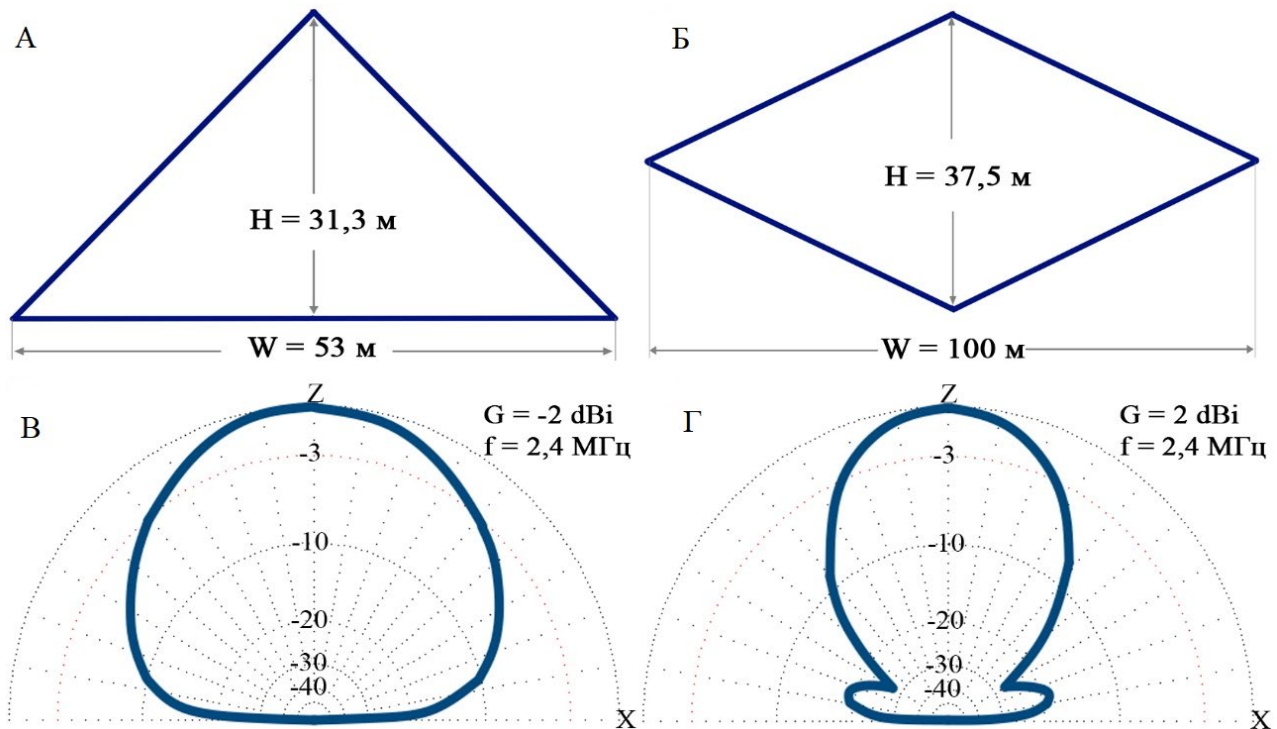


Рис. 1. Геометрические размеры передающей (А) и приемной (Б) КВ антенн, их диаграммы направленности в вертикальной плоскости (В и Г)

Приёмно-передающий комплекс является специализированным ионозондом, в котором задержки между зондирующими сигналами и отраженными сигналами исчисляются не микросекундами, а сотнями миллисекунд. Данное нестандартное оборудование было разработано сотрудниками отдела геофизики ФГБУ «ААНИИ» специально для проведения подобных исследований и в своём роде является уникальным. Общая структурная схема комплекса представлена на рисунке 2.

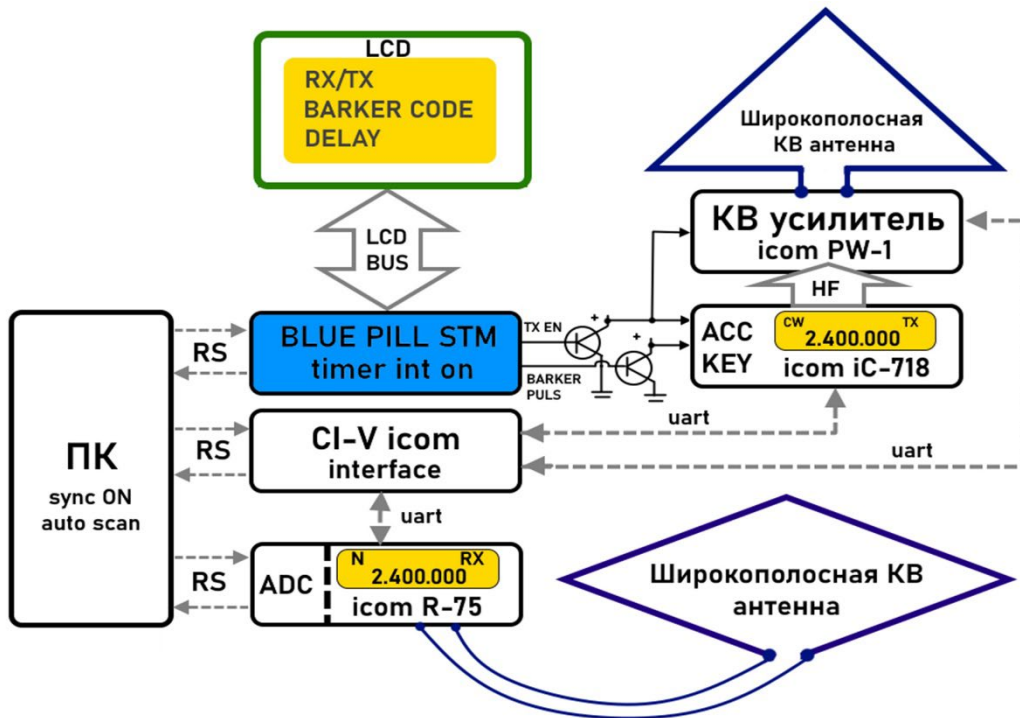


Рис. 2. Структурная схема приемо-передающего комплекса, установленного на научно-исследовательской станции «Горьковская»

Ядром комплекса является управляющее программное обеспечение (ПО) высокого уровня на персональном компьютере (ПК), и встроенное ПО низкого уровня на ARM-микроконтроллере (МК). ПО позволяет производить автоматическое сканирование заданной полосы частот с установленными шагом перестройки по частоте и скоростью. Также через ПО на персональном компьютере оператор может задать тип последовательности импульсов Баркера и время задержки между ними. Выбрав нужный режим работы, устройство начинает выполнять циклические излучения и не требует вмешательства.

В автоматическом режиме команды управления поступают от ПК по последовательному порту по протоколу CI-V на плату BLU PILL, трансивер ICOM IC-718, усилитель ICOM PW-1 и приемник ICOM R-75. По данному протоколу трансивер, усилитель и приемник получают коды перестройки частоты. Плата blue pill, в свою очередь, отображает на светодиодном индикаторе 128x64 пикс. время цикла зондирования, номер импульсной последовательности и статус излучения «ON/OFF». На борту платы запущен точный таймер, который генерирует заданные временные задержки, необходимые для формирования как импульсов кода Баркера, так и задержки между самими кодовыми последовательностями. На входы трансивера ICOM IC-718 «ACC» и «MORSE KEY», а также на вход усилителя ICOM PW-1 «TX EN» плата BLUE PILL через транзисторные ключи подает управляющие сигналы. После подачи и удержания низкого логического уровня на входы «ACC» и «TX EN», высокий или низкий логический уровень на входе трансивера «MORSE KEY» приводит к излучению или к остановке излучения на выбранной в данном цикле зондирования частоте. Минимальное время излучения 30 мс, а максимальное не ограничено. Излучается строго гармоническое колебание. Стабильность частоты излучения не хуже 10^{-6} ppm. Сформированная последовательность радиоимпульсов подается на вход KB усилителя ICOM PW-1. Мощность радиосигнала на выходе усилителя достигает 1 кВт.

Приемный канал состоит из направленной широкополосной KB антенны типа «ромб», приемника ICOM R-75 (чувствительность достигает единиц микровольт) и встроенной в корпус приемника схемы 16-битного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) оригинальной конструкции. Частота дискретизации АЦП составляет 6980 Гц. Оцифровка сигнала происходит в 65 зоне Найквиста после фильтра третьей промежуточной частоты 455 кГц. Закодированная последовательность отчетов АЦП по последовательному интерфейсу передается на ПК и обрабатывается специализированным ПО. В реальном времени происходит отображение сигналов во временной и в частотной области. Каждая

излучаемая «пачка» радиоимпульсов фиксируется приемной аппаратурой и далее ПО на ПК производит синхронизацию очередного цикла зондирования. Запускается таймер для отсчета задержки эхо сигнала. По истечении времени ожидания цикл зондирования повторяется. Таким образом, по функциональному исполнению комплекс оборудования напоминал ионозонд вертикального зондирования (ВЗ), с тем отличием, что ожидаемые задержки отраженных импульсов составляют не микросекунды, а сотни миллисекунд.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В основном, эксперименты проводились в январе 2024 и 2025 гг. Всего было выполнено 19 серий экспериментов, каждая длительностью от 5 до 10 часов. В периоды проведения исследований наблюдались как спокойные, так и возмущенные геофизические условия, значения Kp -индекса находилось в диапазоне от 1 до 4+. Периоды проведения и максимальные значения Kp -индекса (Kp_{\max}) за сутки до эксперимента и в период эксперимента приведены в таблице. По данным ВЗ излучение сигналов выполнялось на фоне вечернего спада критических частот и суточного минимума в ночное время. В МСТ критические частоты были на 1–3 МГц выше, чем в точке излучения. На рисунке 3 приведен типичный суточный ход критических частот на НИС «Горьковская» и в МСТ за 11 января 2024, на рисунке также показано значение частоты зондирующего сигнала. Напомним, что по условиям эксперимента, для выполнения эффекта гидирования и наблюдения эхо-сигнала от МСТ должны выполняться условия $foF2_{GRK} < f_s < foF2_{MCP}$

Таблица 1. Периоды проведения экспериментов и максимальные значения Kp -индексов

| Дата | Kp_{\max} за сутки до эксперимента | Kp_{\max} в период эксперимента |
|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 21.12.2023 – 22.12.2023 | 3– | 1+ |
| 09.01.2024 – 10.01.2024 | 2+ | 2– |
| 11.01.2024 – 12.01.2024 | 2 | 2– |
| 16.01.2024 – 17.01.2024 | 3– | 1– |
| 18.01.2024 – 19.01.2024 | 3– | 3– |
| 22.01.2024 – 23.01.2024 | 3+ | 3+ |
| 25.01.2024 – 26.01.2024 | 3+ | 1– |
| 30.01.2024 – 31.01.2024 | 2+ | 2+ |
| 01.02.2024 – 02.01.2024 | 3– | 1 |
| 26.12.2024 | 3– | 3– |
| 09.01.2025 – 10.01.2025 | 3+ | 3+ |
| 10.01.2025 – 11.01.2025 | 4 | 4 |
| 15.01.2025 – 16.01.2025 | 4– | 3+ |
| 16.01.2025 | 4– | 4– |
| 20.01.2025 | 4+ | 4– |
| 22.01.2025 | 3 | 3 |
| 24.01.2025 | 2+ | 2+ |
| 29.01.2025 | 2 | 1+ |
| 31.01.2025 | 3– | 3– |

Как видно из рисунка 3, $foF2_{GRK}$ находилась в диапазоне 1,5 – 2,5 МГц, критическая частота в МСТ в районе 4 МГц, а после 01 UT начала возрастать и в 2:20 UT достигла значения 6 МГц. 11 января 2024г. эксперимент проводился при спокойных геомагнитных условиях, характеризующихся $Kp = 2$. Эхо-сигналов в данном эксперименте не наблюдалось.

Эхо-сигналы с задержками порядка 310–324 мс были зарегистрированы только 20 января 2025г. Эксперименты проводились при возмущенных геофизических условиях, перед экспериментом значение Kp -индекса составляло 4+, а в период проведения 4–. В подобных условиях эксперименты выполнялись и в ночь с 10 на 11, с 15 на 16 и вечером 16 января, однако эхо-сигналы с длительной задержкой были зарегистрированы только 20 января 2025 г. Анализ фоновых геофизических условий показал, что только 20 января 2025 г. излучение зондирующих сигналов выполнялось на фоне поляризационного джета в районе НИС «Горьковская».

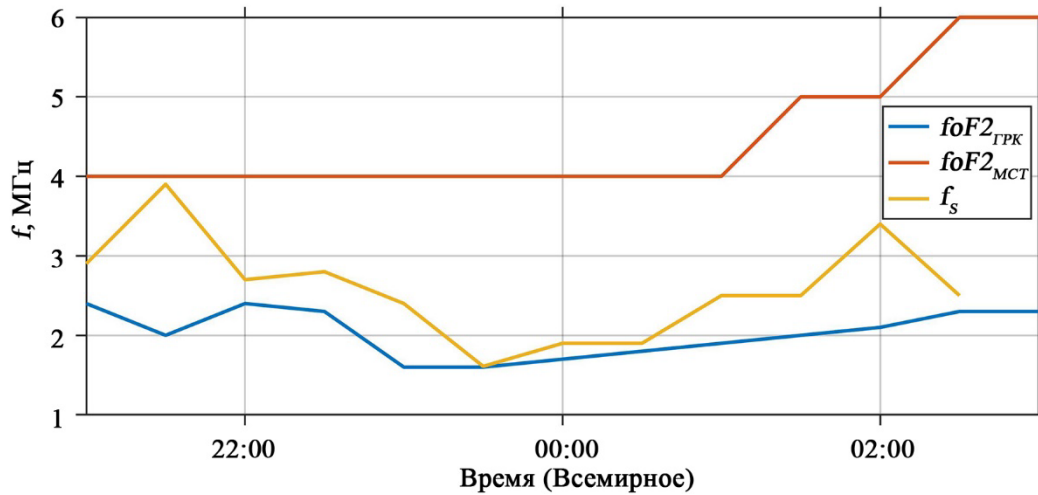


Рис. 3. Частота зондирующего сигнала f_s , временной ход критических частот на НИС «Горьковская» ($foF2_{GRK}$) и в магнитосопряженной точке ($foF2_{MCT}$) 11 января 2024 г.

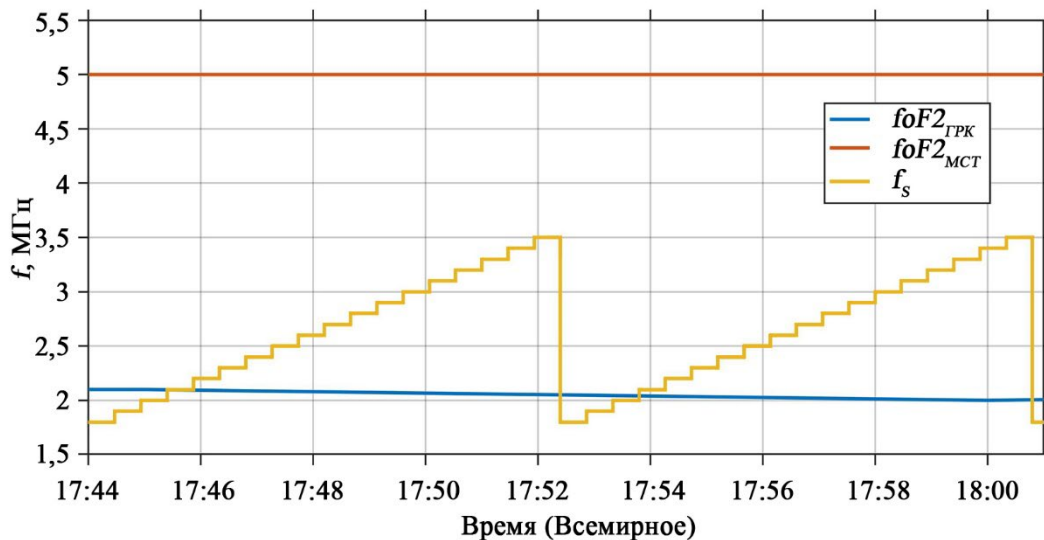


Рис. 4. Частота зондирующего сигнала f_s , временной ход критических частот на НИС «Горьковская» ($foF2_{GRK}$) и в магнитосопряженной точке ($foF2_{MCT}$) 20 января 2025 г.

Значение критических частот на НИС «Горьковская», МСТ и частот излучения зондирующего сигнала в период регистрации радиоэха 20 января 2025г. приведено на рисунке 4. Критическая частота на НИС «Горьковская» находилась в районе 2 МГц, в МСТ, примерно, 5 МГц. Частота зондирующего сигнала изменялась в диапазоне 1800–3500 кГц, с шагом 100 кГц. При этом на каждой частоте излучалось 7 зондирующих последовательностей, каждая из которых представляла собой пятиимпульсную последовательность Баркера. Зондирующий сигнал излучался каждые 4 с, мощность излучения составляла 1 кВт. При достижении верхней частоты диапазона, равной 3500 кГц, процесс зондирования начинался сначала с частоты 1800 кГц.

Эхо-сигналы были зарегистрированы в период с 17:45:25 до 17:46:40 UT, когда частота зондирующих сигналов составляла 2100–2300 кГц, а также в период с 17:52:25 до 18:00:50 UT, при частоте зондирования 2100–2400 кГц, то есть частота зондирования была равна или больше критической частоты ионосферы $f_s \geq foF2_{GRK}$. На рисунке 5 приведены последовательности осциллограмм зарегистрированных сигналов после амплитудного детектирования и низкочастотной фильтрации в период с 17:44 до 17:50 UT. Поскольку зондирующий сигнал представлял собой пяти импульсную последовательность Баркера (1, 1, 1, 0, 1) с длительностью каждого импульса по 30 мс, то после амплитудного детектора сигнал выглядел как два импульса, первый длительностью 90 мс и

второй, длительностью 30 мс, импульсы разделены паузой в 30 мс. На рисунке 5А излучающие последовательности располагаются на нулевой частоте, эхо-сигналы регистрировались в диапазоне задержек 310 – 324 мс. На рисунке 5Б зарегистрированные сигналы представлены в координатах период зондирования – время – интенсивность, частоты зондирования в каждый момент времени указаны справа от рисунка. На частоте излучения 2100 кГц было зарегистрировано 5 эхо-сигналов, на частоте 2200 кГц – 6 эхо-сигналов, и на частоте 2300 кГц, также 6 эхо-сигналов.

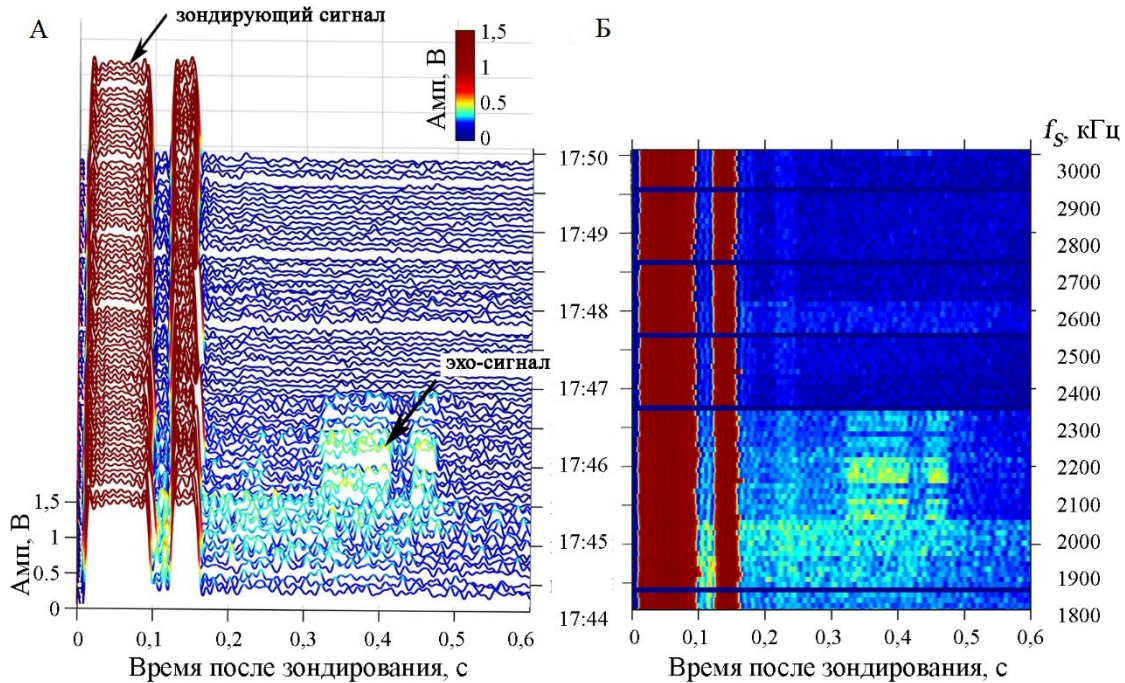


Рис. 5. Зондирующие и эхо-сигналы в виде последовательности осциллограмм 20 января 2025 г. с 17:44 до 17:50 UT (А) и в координатах период зондирования – время – интенсивность (Б)

Во втором цикле зондирования с 17:52:25 до 18:00:50 UT на частоте 2100 кГц было зарегистрировано 6 эхо-сигналов, на частоте 2200 кГц – 7, на частоте 2300 кГц – 6 и на 2400 кГц – 2 эхо-сигнала. Таким образом, всего было зарегистрировано 38 радиоэхо. На рисунке 6 приведена гистограмма распределения временных задержек эхо-сигналов, построенная по результатам 34 зондирований. В 4 случаях, по причине наложения помехи на регистрируемый сигнал, однозначно измерить время задержки не представлялось возможным. Задержки эхо-сигналов находились в диапазоне 310 – 324 мс, медианное значение составляло 316 мс, среднеквадратичное отклонение 2,8 мс.

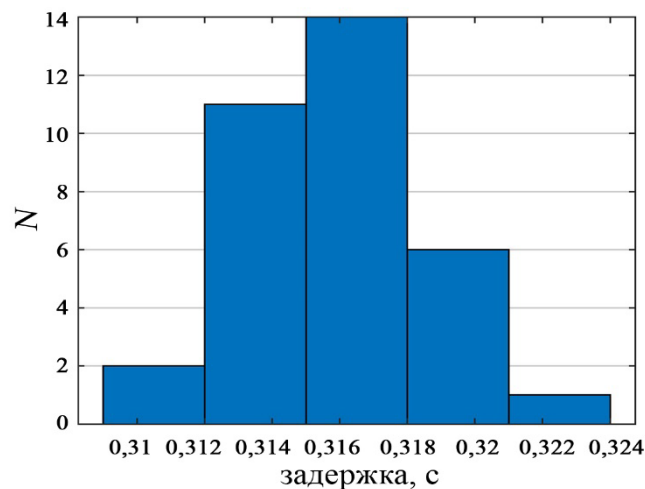


Рис. 6. Гистограмма распределения временных задержек эхо-сигналов 20 января 2025 г.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ фоновых геофизических условий показал, что в период регистрации эхо-сигналов в районе НИС «Горьковская» регистрировался поляризационный джет (ПД). Поляризационный джет представляет собой струи быстрых ионных дрейфов на запад вблизи проекции плазмопаузы на высотах F -области ионосферы, наблюдается в основном в вечерние и предполуночные часы, приводит к формированию узкого провала ионизации [Гальперин и др., 1973, Степанов и др., 2017]. Основным признаком ПД по данным ВЗ является дополнительный след $F3s$ на ионограмме [Степанов и др., 2019]. При этом, критические частоты начинают резко уменьшаться и в течение 30 минут могут упасть на 2–4 МГц, одновременно наблюдается рост высоты слоя $F2$.

На рисунке 7А приведен временной ход критической частоты $F2$ -слоя по результатам ВЗ на НИС «Горьковская» в период регистрации эхо-сигналов 20 января 2025 г. Для сравнения на этом же рисунке приведен ход критической частоты 29 января 2025 г. и медианное значение $foF2$ за январь 2025 г. 29 января также проводились эксперименты по регистрации эхо-сигналов, но результат не был получен. Этот день характеризовался спокойными геомагнитными условиями (см. табл.). На рисунке 7Б показано изменение действующей высоты слоя $F2$ за 20 и 29 января 2025 г., а также медианное значение действующей высоты слоя $F2$ за январь 2025 г. Как следует из рисунков 7А и 7Б, 20 января 2025 г. наблюдалось резкое снижение $foF2$, значительно быстрее, чем в магнитоспокойный день, при резком возрастании высоты $F2$ -слоя. Максимальный градиент снижения 20 января составлял 1,1 МГц за 15 минут, максимальное изменение медианного значения составляло 0,7 МГц за 15 минут, а снижение $foF2$ 29 января происходило с максимальной скоростью 0,5 МГц за 15 минут.

Анализ ионограмм ВЗ на НИС «Горьковская» 20 января 2025 г. показал, что в периоды регистрации эхо-сигналов наблюдался дополнительный след $F3s$. В качестве примера на рисунке 7В приведена ионограмма, полученная при проведении сеанса ВЗ в 17:45 UT. На ионограмме, кроме регулярного отражения от $F2$ -слоя, наблюдается дополнительный трек $F3s$, характеризующий появление ПД в окрестности зенита станции.

В работе [Степанов и др., 2017] по данным наземных и спутниковых наблюдений показано, что ПД всегда находится внутри главного ионосферного провала (ГИП) и приводит к формированию глубоких каверн ионизации. Анализ данных спутника Swarm C, показывает, что 20 января 2025 г. НИС «Горьковская» находилась на дне ГИП. Значения плазменных частот, измеренных на спутнике, приведено на рисунке 7Г (черная линия), широта НИС «Горьковская» обозначена красной пунктирной линией. В период с 17:26 по 17:34 UT, то есть за двадцать минут до регистрации эхо-сигналов Swarm C прошел по траектории на 5° восточнее НИС «Горьковская», высота траектории составляла примерно 460 км. На борту спутника размещен зонд Ленгмюра, работающий с частотой измерения 16 Гц. Для сравнения на этом же рисунке приведено широтное распределение плазменной частоты 29 января 2025 г. (синяя линия). Данные получены при пролете Swarm C в период с 16:50 до 16:58 UT. В спокойных условиях НИС «Горьковская» располагается на пологой южной стенке провала, а дно провала находится на 3–4 градуса севернее станции.

На множестве примеров [Степанов и др., 2017] показано взаимное расположение ГИП, поляризационного джета и проекции плазмопаузы. При возмущениях геомагнитного поля поляризационный джет находится в минимуме провала, а проекция плазмопаузы между поляризационным джетом и полярной стенкой ГИП. Примерное положение плазмопаузы можно оценить по эмпирическому выражению [Carpenter & Anderson, 1992]:

$$Lp = 5,6 - 0,46Kp_{max}, \quad (1)$$

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

Максимальное значение Kp -индекса за сутки до начала эксперимента 20 января 2025 г. составляло $Kp_{max} = 4+$, что соответствует положению внутренней границы плазмопаузы согласно выражению (1) на $L = 3,6$. Для НИС «Горьковская» значения L -параметра по модели ГЕОРАСК Т-89 составляют $L = 3,4–3,5$. Таким образом, проекция плазмопаузы находилась севернее НИС «Горьковская» на один градус широты. При спокойных геомагнитных условиях, значение L -параметра составляет 4,2–5,1, и проекция плазмопаузы значительно севернее станции. Широта проекции плазмотаузы обозначена на рисунке 7Г красной линией (PP).

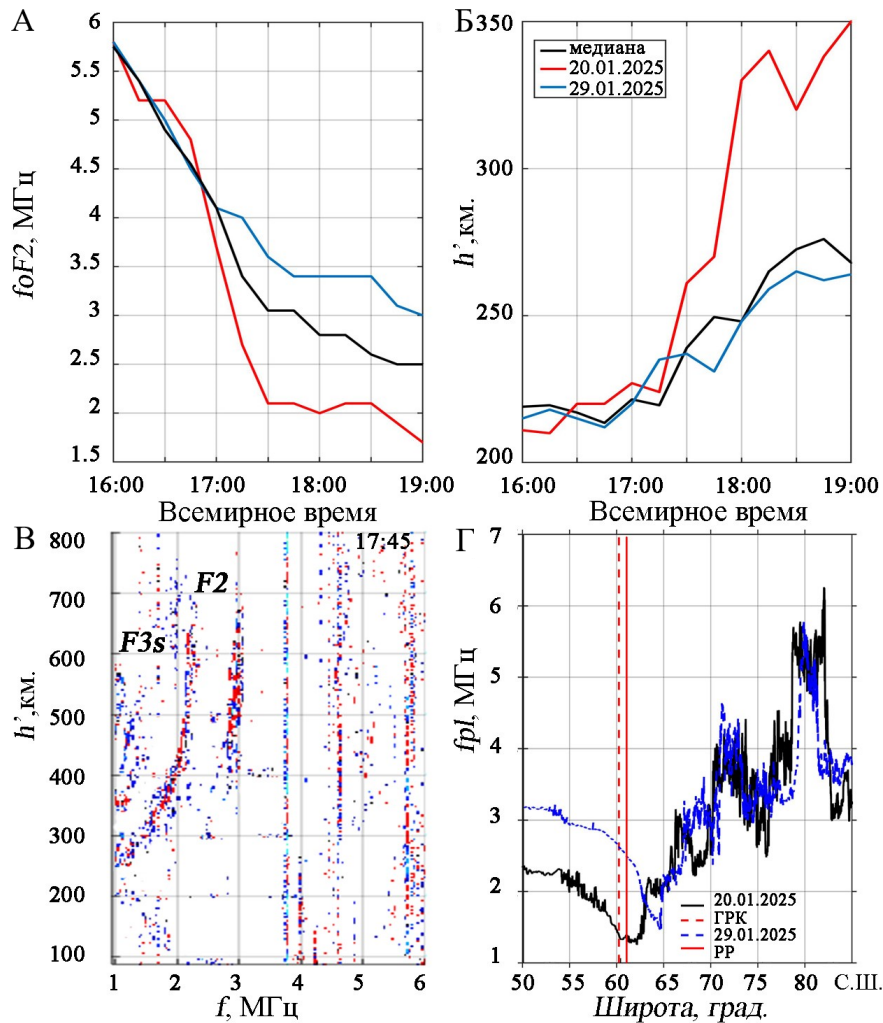


Рис. 7. Ход критических частот (А) и действующей высоты (Б) F2-слоя на НИС «Горьковская». Пример ионограммы вертикального зондирования со следами F3s в 17:45 UT 20 января 2025 г. (В). Широтное распределение плазменных частот по данным спутника Swarm-C (Г)

20 января 2025г эхо-сигналы регистрировались при возмущенных геомагнитных условиях, когда НИС «Горьковская» находилась на дне ГИП, а в районе зенита станции наблюдался поляризационный джет. Проекция плазмопаузы находилась севернее станции, примерно, на 100 км и попадала в основной лепесток диаграммы направленности передающей и приемной антенны.

В работе [Sharma & Muldrew, 1975], где обсуждались результаты регистрации эхо-сигналов с большими задержками на спутнике «Алуэтт», предложен механизм распространения радиоволн за счет образования канала между неоднородностями, ориентированными вдоль линий магнитного поля Земли. Показано, что для формирования подобного канала, электронная концентрация плазмы в неоднородностях, может превышать всего 1 % от фонового значения. Канал для гидрирования мог образоваться между неоднородностями на внутренней границе плазмопаузы, поскольку, как показывают данные фоновой геофизической обстановки, НИС «Горьковская» располагалась немного южнее проекции плазмопаузы. Результаты работ по данным наземных и спутниковых наблюдений [Халипов и др., 2016; Синевич и др., 2023] показывают, что в полосе ПД, происходит перенос плазмы вдоль магнитного поля из ионосферы в плазмосферу, что является определяющим фактором формирования неоднородностей распределения плотности плазмы в плазмосфере. В работе [Синевич и др., 2023] по данным спутниковых наблюдений показано, что ПД стратифицирован по электронной температуре и электронной концентрации. Размер неоднородностей внутри страт варьируется от десятков метров до нескольких километров.

Возможен и другой механизм гидрирования сигналов, предложенный в работах Д. В. Благовещенского [Благовещенский, 2011; Благовещенский и др., 1996а; Благовещенский и др., 1996б; Благовещенский и Мальцева, 2022], где было показано, что для создания оптимальных условий

гидирования радиоволн необходимо, чтобы положение проекции плазмопаузы было внутри ГИП, а передатчик находился в провале, южнее плазмопаузы. Распространение волн происходит вдоль ступеньки ионизации, образованной структурами ГИП и плазмопаузой.

6. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для проверки предположения о волноводном распространении зондирующих сигналов в ионосферно-магнитосферном канале (ИМК) разработан алгоритм моделирования. ИМК ориентирован вдоль силовой линии магнитного поля околоземного пространства между магнитно-сопряженными точками на Земле. Распространение сигнала происходит в канале, образованном силовыми линиями магнитного поля Земли с пониженной электронной плотностью, которые «опираются» на дно ГИП. Стенки канала образованы силовыми линиями с более высокой концентрацией электронов, проецирующимися на северную и южную стенку ГИП. Алгоритм включает в себя описание границ (геометрическое место точек ГМТ) ИМК распространения радиоволн, среды распространения в канале и метода траекторного моделирования.

С использованием уравнения для силовой линии точечного магнитного диполя были вычислены границы ИМК в геомагнитных и географических координатах [Campbell, 2003].

$$r = R_E L \cos^2 \Phi, \quad (2)$$

где r – расстояние до центра Земли, Φ – магнитная широта на силовой линии, R_E – радиус Земли.

Для моделирования среды канала распространения использовались текущие параметры гелиогеофизической обстановки ($W = 143$ и $K_p = 4$) на период эксперимента 20 января 2025 г.

Распределение электронной концентрации N_e в волноводе описывается в виде $N_e(r) \sim d^{-\delta}$ [Angerami & Thomas, 1964], где d – расстояние вдоль магнитной силовой линии. Величина показателя δ зависит от значений критических частот ионосферного слоя $F2$ над станцией излучения $foF2_{GRK}$, над магнитносопряженной точкой $foF2_{MCP}$ и от значений плазменных частот в апогее магнитной силовой линии f_{ne_min} . Значение f_{ne_min} рассчитывалось с учетом модели [Фаткуллин и др., 1981] и результатам исследований [Беспалов и др., 2022, Bezrukikh et al., 2003], для текущих геомагнитных условий составляло $f_{ne_min} = 0,065$. Расчетные значения показателя δ составили $\delta = -2,72$ и $\delta = -3,56$, для северного и южного полушария соответственно. Распределение гирочастот электронов вдоль ионосферного магнитосферного волновода f_{ce} , рассчитывается по модели Geomagnetic Field Model 1945–2025 (IGRF-13).

Схематичный вид распределения плазменных частот f_{ne} в центре, на верхней и нижней стенке ИМК в зависимости от дальности по земной поверхности приведен на рисунке 8А. Черным цветом отмечена верхняя граница ИМК, соответствующая положению северной границы ГИП с резким возрастанием уровня электронной концентрации; синим цветом обозначен центр ИМК, соответствующий минимуму N_e на дне провала и красным цветом – нижняя граница ИМК, опирающаяся на южную границу ГИП. График построен в полулогарифмическом масштабе для условий вечернего времени зимнего сезона. На рисунке 8Б приведено расчетное распределение гирочастот электронов.

На рисунке 9 качественно показан примерный вид ориентации силовых линий магнитного поля для границы ИМК. Отмеченные разным цветом силовые линии, соответствуют положению границ главного ионосферного провала (в северном полушарии). Дополнительные «врезки» (рис. 9Б) поясняют, как изменяется распределение электронной концентрации (плазменных частот f_{ne}) в поперечном разрезе магнитосферного канала, образованного посредством ГИП. Прямыми цветными линиями отмечены направления магнитного поля для границ и дна канала. На рисунке 9В приведен пример рассчитанной траектории радиоволны в ИМК, также изолиниями показано распределение электронной концентрации в центре (f_{neC}), вдоль нижней (f_{neB}) и верхней стенок (f_{neU}) канала. Электронная концентрация уменьшается вдоль канала гидирования по мере удаления от поверхности земли до апогея магнитной силовой линии, соответственно, для нижней границы канала $f_{neB1} > f_{neB2} > f_{neB3} > f_{neBn}$, для верхней границы $f_{neU1} > f_{neU2} > f_{neU3} > f_{neUn}$ и центра канала $f_{neC1} > f_{neC2} > f_{neC3} > f_{neCn}$. После апогея начинается рост N_e в направлении магнитосопряженной точки.

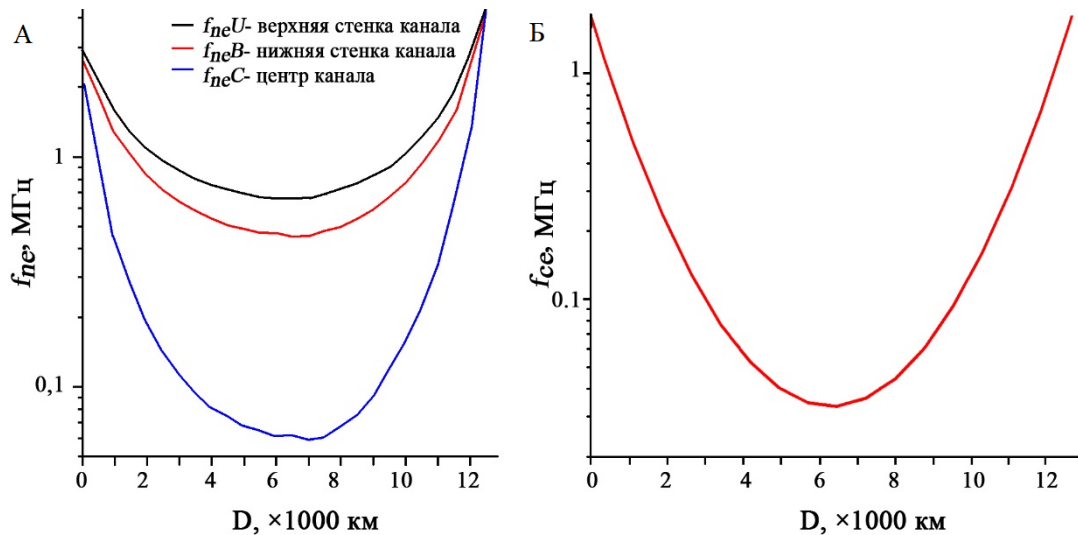


Рис. 8. Распределение плазменных частот (А) и гирочастот электронов в зависимости от дальности вдоль земной поверхности (Б)

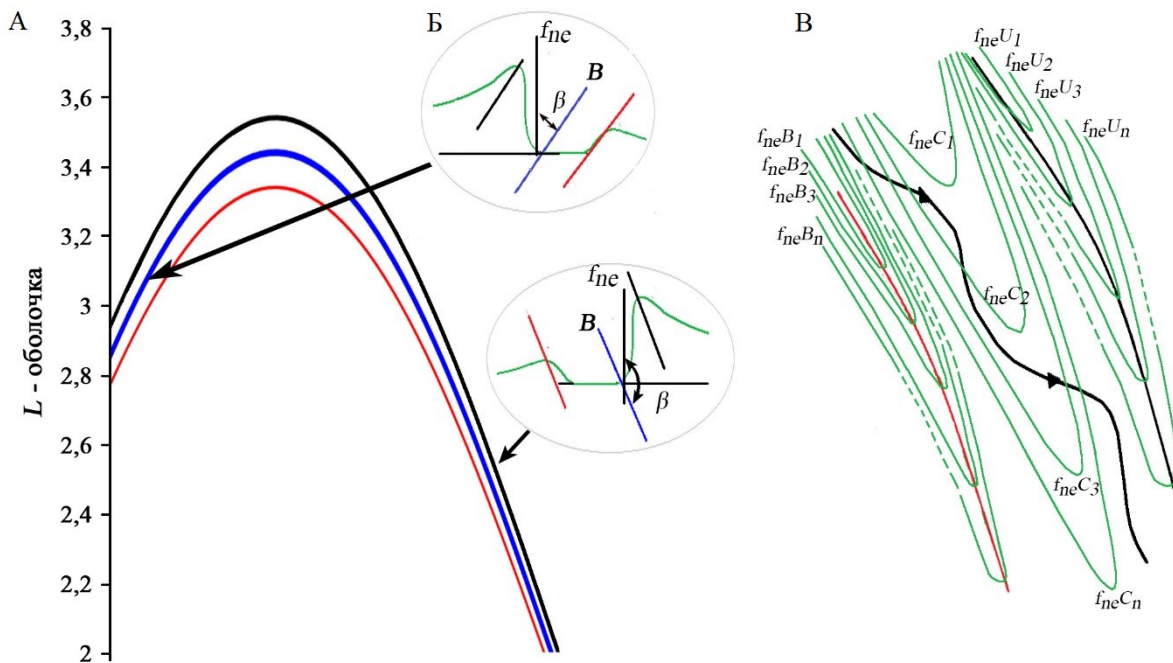


Рис. 9. Примерный вид ориентации силовых линий магнитного поля для границы ИМК (А), распределение электронной концентрации (плазменных частот f_{ne}) в поперечном разрезе магнитосферного канала (Б), пример рассчитанной траектории радиоволны в ИМК и изолинии распределения электронной концентрации в центре (f_{neC}), вдоль нижней (f_{neB}) и верхней стенок (f_{neU}) канала (В)

При моделировании траектории радиоволны в ИМК, искривленном влиянием магнитного поля (вдоль силовой линии магнитного поля Земли), для вычисления координат радиоволны на каждом шаге интегрирования учитывалось как изменение параметров среды, так и угла отклонения магнитной силовой линии в канале от вертикали (β). В пункте излучения $\beta = 17^\circ$, а в апогее канала 90° . Процесс моделирования характеристик распространения радиоволны в ИМК проводился в рамках метода геометрической оптики при условии сохранения закона Снелля (Снелиуса), $n \sin\theta = Const$, где θ – угол между волновой нормалью радиосигнала и продольной осью канала на шаге интегрирования, n – показатель преломления на каждом шаге интегрирования при данном значении θ , $Const$ – константа, определяемая начальными условиями [Muldrew, 1963; Budden, 1966].

На рисунке 10 приведены результаты моделирования для 20 января 2025 г. и $L = 3,5$ при условии излучения радиосигнала вертикально вверх и для начальных данных: $f_s = 2,1-2,4$ МГц с шагом 100 кГц, $foF2_{GRK} = 1,9$ МГц, $foF2_{MCP} = 4,2$ МГц, $f_{ne_minC} = 0,065$ МГц (центр ИМК); $f_{ne_minB} = 0,47$ МГц (нижняя граница ИМК); $f_{ne_minU} = 0,68$ МГц (верхняя граница ИМК). Сплошными линиями приведены траектории распространения радиоволн в ИМК для распределения плазменных частот f_{ne} , рассчитанных для условий $Kp = 4+$, при этом $f_{ne_minC} = 0,065$ МГц. Результаты моделирования демонстрируют возможность распространения радиосигналов в южное полушарие в ИМК и обратно после отражения на высотах слоя $F2$, что соответствует условиям с 17:45:25 до 18:00:50 UT. Значения плазменных частот в апогее ИМК в вечернее время зимнего сезона зависят от магнитной активности. Синей пунктирной линией показана траектория распространения сигнала на частоте $f_s = 2,1$ МГц при $Kp = 3$ и $f_{ne_minC} = 0,24$ МГц. Таким образом в апогее канала задается неоднородность с повышенной электронной концентрацией. В работе [36] приведены экспериментальные факты увеличения Ne в период снижения геомагнитной активности, вследствие заполнения силовых трубок (опустевших после начала бури) холодной плазмой из ионосферы. Результаты моделирования показывают, что волна высвечивается на неоднородности из ИМК, и эхо-сигналы регистрироваться не будут. Заполнение магнитосферных трубок холодной ионосферной плазмой могло быть одной из причин прекращения наблюдения эхо-сигналов после 18:00:50 UT.

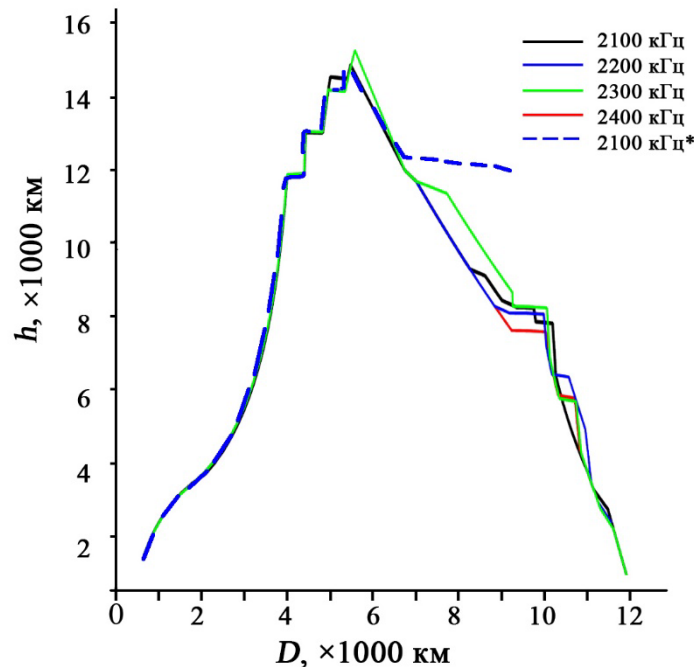


Рис. 10. Примеры расчетов траекторий гидирования для 20 января 2025 г. на четырех частотах

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты экспериментального исследования условий генерации эхо-сигналов с длительными задержками (LDE). Исследования выполнялись в СВ и КВ диапазонах в зимний период 2024 и 2025 г. Геомагнитные условия в периоды проведения экспериментов были спокойные и возмущенные. Эхо-сигналы были зарегистрированы только 20 января 2025 г. в СВ-диапазоне при возмущенных геофизических условиях. Длительность времен задержек сигналов составляла от 310 до 324 мс. Эхо-сигналы наблюдались в вечернем секторе в районе 21 MLT, когда пункт излучения находился на дне главного ионосферного провала на внешней границе плазмосферы вблизи плазмопаузы. Частоты эхо-сигналов превышали критические частоты ионосферы в пункте излучения и были меньше критических частот в магнитосопряженной точке.

Показано, что эхо-сигналы обусловлены эффектом гидирования зондирующего сигнала в ионосферно-магнитосферном канале. В таком канале сигнал распространялся до магнитосопряженной точки вдоль силовой линии магнитного поля Земли, отражался и возвращался в пункт излучения.

Впервые эхо-сигналы, излученные с поверхности Земли, регистрировались не на одной частоте, а в диапазоне частот, шириной 400 кГц, от 2100 до 2400 кГц. Шумовая обстановка на частотах ниже 2100 кГц не позволила определить нижнюю границу канала. Необходимо отметить, что в экспериментах, выполненных в [Благовещенский, 2011; Ellis & Goldstone, 1990], эхо-сигналы наблюдались цугами от десятков секунд до единиц минут, поэтому, нельзя однозначно определить частотный диапазон гидирования сигналов, поскольку канал мог «закраться» прежде, чем завершилось сканирование. Результаты моделирования показывают, что одной из причин прекращения регистрации эхо-сигналов может являться образование плазменных неоднородностей в канале. Особо сильное влияние такие неоднородности оказывают в апогее магнитной силовой линии. Плазменные неоднородности приводят к отклонению лучевой траектории и высвечиванию сигнала из ионосферно-магнитосферного канала. Подобные неоднородности могут возникать на восстановительной фазе геомагнитных возмущений при заполнении опустошенных магнитных силовых трубок холодной ионосферной плазмой.

В серии выполненных экспериментов эхо-сигналы регистрировались с помощью разработанного в ААНИИ приемо-передающего измерительного комплекса при минимальной мощности излучения сигналов зондирования, по сравнению с ранее проведенными исследованиями [Благовещенский, 2011, Ellis & Goldstone, 1990]. Мощность излучения зондирующего сигнала составляла 1 кВт, в то время как, в экспериментах по регистрации LDE, выполненных в Австралии [Ellis & Goldstone, 1990], мощность составляла 17 кВт, а в работах, представленных в [Благовещенский, 2011], использовался усилитель мощности на 5 кВт.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

ЛИТЕРАТУРА

- Беспалов П.А., Савина О.Н., Жаравина П.Д. Особенности возбуждения хоров посредством ВРА механизма в магнитосферных волноводах уплотнения и разрежения с рефракционным отражением // Космические исследования, том 60, № 1, 2022. С. 17–25. DOI: 10.31857/S0023420622010022.
- Благовещенский Д.В. Средние радиоволны в космосе. Наблюдения, модели // Сарбрюкен, 2011. 129 с.
- Благовещенский Д.В., Добросельский К.А., Мальцева О.А. О диагностических возможностях эхо-сигналов средневолнового диапазона // Геомагнетизм и аэрономия, том 36, № 5, 1996. С. 75–81. DOI: 10.31857/S0016794022020043.
- Благовещенский Д.В., Добросельский К.А., Румянцев Г.А. и др. Средние радиоволны в космосе, эффекты плазмопаузы // Космические исследования, том 34, № 5, 1996. С. 483–490.
- Благовещенский Д.В., Мальцева О.А. Моделирование распространения средних волн в магнитосфере // Геомагнетизм и аэрономия, том 62, № 2, 2022. С. 198–205. <https://doi.org/10.31857/S0016794022020043>.
- Выставной В.М., Макарова Л.Н., Широчков А.В., Егорова Л.В. Исследования высокоширотной ионосферы методом вертикального зондирования с использованием современного цифрового ионозонда SADI // Гелиогеофизические исследования, том 4, 2013. С. 1–10.
- Гальперин Ю.И., Пономарев Ю.Н., Зосимова А.Г. Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури. 1. Вопросы методики и некоторые результаты измерений в магнитно-спокойное время // Космические исследования, том 11, № 2, 1973. С. 273–283.
- Синевич А.А., Чернышов А.А., Чугунин Д.В., Могилевский М.М., Милох В.Я. Внутренняя структура поляризационного джета: стратифицированный поляризационный джет // Геомагнетизм и аэрономия, том 63, № 6, 2023. С. 764–774. <https://doi.org/10.31857/S0016794023600333>.
- Степанов А.Е., Кобяков С.Е., Халипов В.Л. Наблюдение быстрых субавроральных дрейфов ионосферной плазмы по данным Якутской меридиональной цепочки станций // Солнечно-земная физика, том 5, № 4, 2019. <https://doi.org/10.12737/szf-54201908>.

- 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.
- Фаткуллин М.Н., Зеленова Т.И., Козлов В.К., Легенька А.Д. Эмпирические модели среднеширотной ионосферы. – Москва: Наука, 1981. 256 с.
- 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 аэрономия, том 56, № 5, 2016. С. 568-578. <http://doi.org/10.7868/S0016794016050060>.
- Шлионский А.Г. Дальнее распространение радиоволн в ионосфере // Москва: Наука, 1979. 152 с.
- Angerami J.J., Thomas J.O. Studies of planetary atmosphere. 1. The distribution of electrons and ions in the Earth's exosphere // J. Geophys. Res, vol. 69, 1964. P. 4537–4566.
- Bezrukikh V.V., Kotova G.A., Lezhen L.A., Lemaire J., Venediktov Yu.I., Pierrard V. Dynamics of Temperature and Density of Cold Protons of the Earth's Plasmasphere Measured by the Auroral Probe/Alpha-3 Experiment Data during Geomagnetic Disturbances // Cosmic Research, vol. 41, № 4, 2003. P. 392-402. <https://doi.org/10.1023/A:1025013828230>.
- Breit G. Group-velocity and long retardations of radio echoes // Proc. IRE, vol. 17, № 9, 1929. P. 1509-1512. DOI: 10.1109/JRPROC.1929.221852.
- Budden K.G., Yates G.G. A search for radio echoes of long delay // J. Atmos. Terr. Phys, vol. 2, № 5, 1952. P. 272-281.
- Budden K.G. Radio waves in the ionosphere // Cambridge, 1966. 547 p.
- Campbell W.H. Introduction to geomagnetic field // Cambridge University Press, vol. 2, 2003. P. 352. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139165136>.
- Carpenter D.L., Anderson R.R. An ISEE whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere // J. Geophys. Res, vol. 97, 1992. P. 1097–1108. <https://doi.org/10.1029/91JA01548>.
- Clark C.R. Two possible explanations for LDEs // QST, vol. 105, № 11, 1971. P. 40-42.
- Ellis G.R., Goldstone G.T. The probability of observing ducted magnetospheric echoes from the ground // J. Geophys. Res, vol. 95, № 5, 1990. P. 6587-6590. <https://doi.org/10.1029/JA095iA05p06587>.
- Goodacre A.K. Observations of Long-Delay Echoes on 28 MHz // QST, vol. 84, № 3, 1980. P. 14-17.
- Martinez P. Long Delayed Echoes, A Study of Magnetospheric Duct Echoes 1997-2007 // Radio Communication, vol. 83, № 10, 2007. P. 60–63.
- Muldrew D.B. Generation of long-delayed echoes // J. Geophys. Res, vol. 84, № A9, 1979. P. 5199-5210.
- Muldrew D.B. Medium frequency conjugate echoes observed on topside-sounder data // Canad. J. Phys, vol. 45, № 12, 1967. P. 3935-3941. <https://doi.org/10.1139/p67-331>.
- Muldrew D.B. Radio propagation along magnetic field-aligned sheets of ionization observed by the ALOUETTE topside sounder // J. Geophys. Res, vol. 68, № 19, 1963. P. 5355-5370. DOI:10.1029/JZ068i019p05355.
- Rasmussen H.L. Ghost echoes on 1296 MHz // Technical Correspondence, vol. 57, № 60, 1976. P. 36.
- Rasmussen H.L. Ghost echoes on the Earth–Moon path // Nature, vol. 257, 1975. P. 36.
- 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, vol. 43, RS4009, 2008. DOI:10.1029/2007RS003779.
- Sharma R. P., Muldrew D.B. Seasonal and Longitudinal Variations in the Occurrence Frequency of Magnetospheric Ionization Ducts // J. Geophys. Res, vol. 80, № 7, 1975. P. 977-984. DOI:10.1029/JA080i007p0977.
- Stormer C. Radio echoes and conditions for their occurrence // Nature, vol. 123, № 3106, 1929. P. 788.
- Stormer C. Short wave echoes and the aurora borealis // Nature, vol. 122, № 3079, 1928. P. 878.

- *Taylor H.A., Young L.C.* Studies of high-frequency radio wave propagation // Proc. Inst. Radio Eng, vol. 16, № 5, 1928. P. 561–578.
- *Tsyganenko N.A.* A magnetospheric magnetic field model with a warped tail current sheet // Planetary and Space Science, vol. 37, № 1, 1989. P. 5-20. DOI:10.1016/0032-0633(89)90066-4.
- *Vidmar R.J., Crawford F.W.* Long-Delayed Radio Echoes' Mechanisms and Observation // J. Geophys. Res, vol. 90, № A2, 1985. P. 1523-1530.
- *Villard O.G., Graf C.R., Lomasney J.M.* Long-delayed echoes ... Radio's 'flying saucer' effect // QST., vol. 53 № 5, 1969. P. 38 – 45.

MAGNETOSPHERIC PROPAGATION OF MEDIUM RADIO WAVES

Kalishin A. S., Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Egorov I. M., Stepanov N. A., Mingaleva A. O., Zagorskiy G. A.

Results of experimental studies concerning the medium radio waves propagation in the ionosphere-magnetosphere waveguide channel are presented. It was shown that under disturbed magnetic condition the sounding signal is able to propagate along the Earth's magnetic field line at the magnetic conjugated point in the southern hemisphere and after reflection from the outer ionosphere to return back at the transmission point. The echo signals with the long delay times of 310–320 ms were recorded that corresponds the distance of 94546 – 96712 км along the magnetic field line at L-shell of 3.5. The analysis of the background geophysical conditions in the course of long delay echo signal occurrence was carried out. The modeling of sounding signal propagation in the ionosphere-magnetosphere wave guide channel using the geometric optic approximation was performed.

KEYWORDS: MEDIUM WAVES, GUIDING, LONG DELAY ECHO, SHORT WAVES, IONOSPHERE, MAGNETOSPHERE, PLASMAPAUSE, RADIOSOUNDING.