

Радиофизические аспекты интерпретации данных спутникового ионозонда ЛАЭРТ

С.А. Пулинец¹, В.Х. Депуев²

¹ *Институт космических исследований Российской академии наук
1179997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32*

E-mail: pulse@cosmos.ru

² *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Имени
Н.В. Пушкова Российской академии наук*

108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе д. 4

E-mail: depuev@izmiran.ru

Рассмотрены проблемы распространения радиоволн в возмущенной ионосфере при наличии неоднородностей электронной концентрации, регистрируемых с помощью спутникового ионозонда ЛАЭРТ. Показаны различия типов неоднородностей в высокоширотной и низкоширотной ионосфере и преимущества их мониторинга с помощью внешнего зондирования по сравнению с данными систем ГНСС

Ключевые слова: ионосфера, ионозонд, неоднородности, распространение радиоволн

Radiophysical aspects of the data interpretation from the LAERT satellite ionosonde

S.A. Pulinets¹, V.Kh. Depuev²

¹ *Space Research Institute.*

² *Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism and Radio Waves Propagation.*

Presentation examines the problems of radio wave propagation in a disturbed ionosphere in the presence of electron density irregularities recorded by the LAERT satellite ionosonde. The presentation highlights the differences in irregularity types in the high- and low-latitude ionosphere and the advantages of monitoring them using external sounding compared to GNSS data.

Keywords: ionosphere, ionosonde, irregularities, radio wave propagation

Введение

Распространение радиоволн различных диапазонов частот при решении задач спутниковой связи и навигации в значительной мере зависит от состояния космической плазмы. Несмотря на широкое применение высокочастотных диапазонов (L , K_u , K_a , Q/V), в последние годы стремительное развитие получила дециметровая радиосвязь, на качество которой большое влияние оказывает ионосфера Земли [1]. Во многом это связано с освоением Арктической зоны, районов Сибири и Дальнего Востока.

С другой стороны мониторинг ионосферы с помощью вертикального зондирования со спутника позволяет исследовать динамику процессов внутри ионосферы, что недоступно для интегральных измерений с помощью систем ГНСС. Это дает возможность улучшить наше понимание поведения космической плазмы в различных гелиогеофизических условиях [2].

При рассмотрении данных вопросов будут использованы данные внешнего зондирования ионосферы с помощью спутниковых ионозондов ЛАЭРТ, установленных на спутниках Ионосфера-М космической группировки Ионозонд [3].

Основные режимы работы и особенности космического комплекса ЛАЭРТ

Из девяти предусмотренных техническим заданием режимов работы спутникового ионозонда ЛАЭРТ хотелось бы отметить два, которых не было во всех предыдущих образцах ионозондов различных стран. Они резко увеличили оперативность оценки получаемой информации. На сегодняшний день четырем аппаратам Ионосфера-1 зарегистрировано более 7.5 миллионов ионограмм, а за один виток, длящийся порядка 100 минут при зондировании каждые 10 с получается 600 ионограмм. Чтобы получить представление о поведении и строении ионосферы вдоль витка, требуется значительное время. Поэтому в режимы работы ионозонда был внесен режим радиоспектрометра, не отнимающий времени от сеанса зондирования, поскольку он «вшит» в процесс получения ионограммы. На каждой рабочей частоте ионозонда измеряется уровень сигнала за 300 мкс до излучения зондирующего импульса, а затем – через 2.5 мс после излучения зондирующего импульса. Последовательность измерений на каждой частоте представляется в виде тоновой вертикальной линии, которые сшиваются вместе, формируя так называемый динамический спектр. Динамический спектр перед излучением показывает уровень электромагнитных излучений вдоль витка в диапазоне рабочих частот ионозонда, а после импульса в добавок к естественным сигналам появляются следы плазменных резонансов на характерных частотах плазмы на высоте орбиты, а также плазменная частота на высоте ~500 км, соответствующей высоте времени задержки импульса 2.5 мс. Пример пассивного и релаксационного динамических спектров вдоль орбиты представлены на рис. 1

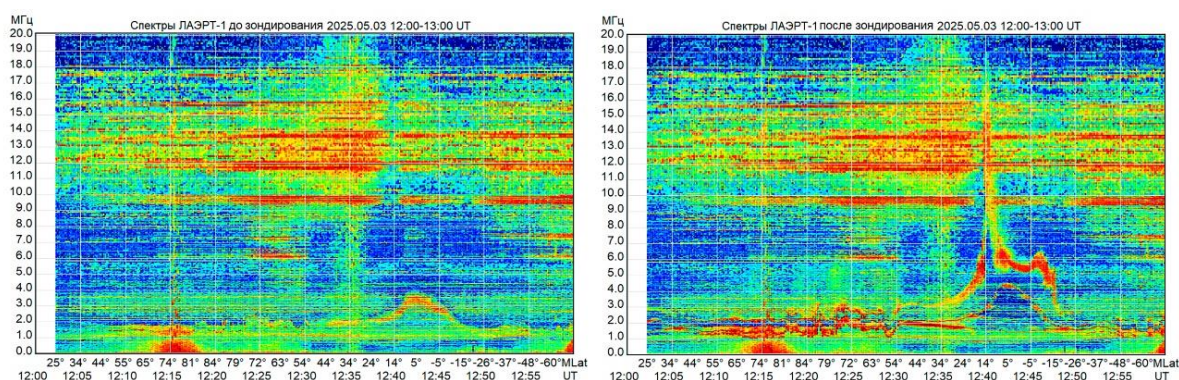


Рис. 1. Левая панель – динамический спектр до зондирования, правая панель – динамический спектр после зондирования

На динамических спектрах показан час работы ионозонда (360 ионограмм), и по ним мгновенно можно сориентироваться, где находятся все характерные структуры ионосферы: авроральный овал, главный ионосферный провал, полярная шапка, экваториальная аномалия, и выбрать интересующие исследователя область или явление.

Второй полезной опцией, также не использовавшейся во всех предыдущих версиях спутниковых ионозондов, является конструкция антенно-фидерного устройства ионозонда ЛАЭРТ. В связи с небольшой массой космического аппарата для уменьшения момента инерции антенн АФУ и с целью обеспечения надежной трехосной стабилизации спутника все плечи дипольных антенн АФУ впервые в мире выполнены из углепластика. Конструкция приемной антенны представляет собой скрещенный диполь, что позволяет определять поляризацию принимаемых волн во время зондирования, и это создает возможность автоматической идентификации обыкновенной и необыкновенной волн. Помимо идентификации следов отражения на ионограммах поляризационная расцветка помогает определить природу естественных шумов, генерируемых высыпавшимися частицами в авроральном овале, а также сигналов от удаленных источников, например,

солнечных радиовсплесков III типа. Пример поляризационной ионограммы представлен на рис. 2.

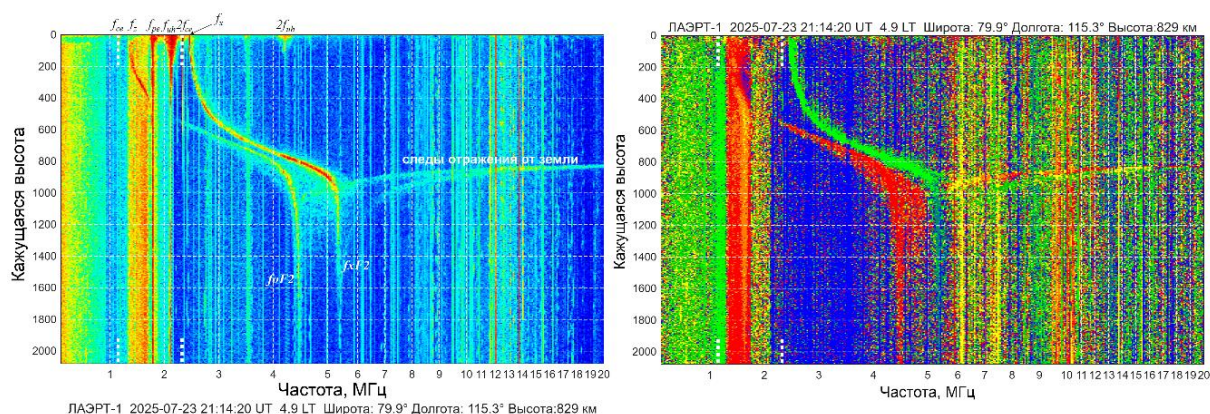


Рис. 2. Левая панель – стандартная ионограмма, правая панель – та же ионограмма после обработки поляризации принимаемых сигналов

На правой панели можно видеть два следа: красный и зеленый. Ориентируясь по частотам отсечки на левой панели, мы видим, что зеленый след «стартует» от частоты f_x – частоты отсечки необыкновенной волны, а красный входит в область шумов неопределенной поляризации, но мысленно след можно продлить до электронной плазменной частоты f_{pe} . Область шумов, окрашенная в красный цвет, занимает интервал между частотой отсечки f_z и электронной плазменной частотой f_{pe} , где распространяются так называемые медленные необыкновенные волны левой поляризации [4]. Отсюда понятно, что красным цветом окрашена обыкновенная компонента волны левой поляризации. Следует отметить, что вертикальная компонента геомагнитного поля при переходе спутника из Южного полушария в Северное меняет свое направление с положительного на отрицательное. Это приводит к тому, что в северном полушарии на полярных ионограммах обыкновенная компонента окрашивается в красный цвет, а необыкновенная в зеленый, а в Южном полушарии – наоборот.

Во всех предыдущих миссиях с ионозондом на борту при приеме и передаче ионозонды работали на одну и ту же антенну с использованием переключателя «прием-передача». В миссии «Ионозонд» приемная и передающая антенны автономны. Это повышает надежность системы, т.к. переключатели часто являются источниками отказов.

Большое значение имеет также ориентация приемной антенны относительно вектора скорости космического аппарата. На спутнике Интеркосмос-19 приемная антенна радиоспектрометра ИРС-1 была направлена вдоль вектора скорости спутника. Это приводило к тому, что заднее плечо приемного диполя попадало в след космического аппарата, где плазма «выметалась» корпусом спутника. В результате на спектрах появлялось два следа плазменной частоты: один – измерение в невозмущенной плазме, а второй показывал пониженное значение электронной концентрации в следе спутника. На спутниках Ионосфера-М скрещенные диполи расположены под углом 45° к вектору скорости спутника, а передающий V-образный диполь расположен вдоль вектора скорости (рис. 3). V-образная структура передающего диполя выбрана для обеспечения большей широкополосности и эффективности излучения. Для правильной интерпретации результатов зондирования в ионозонде ЛАЭРТ обеспечено измерение коэффициента стоячей волны в передающем тракте ионозонда.

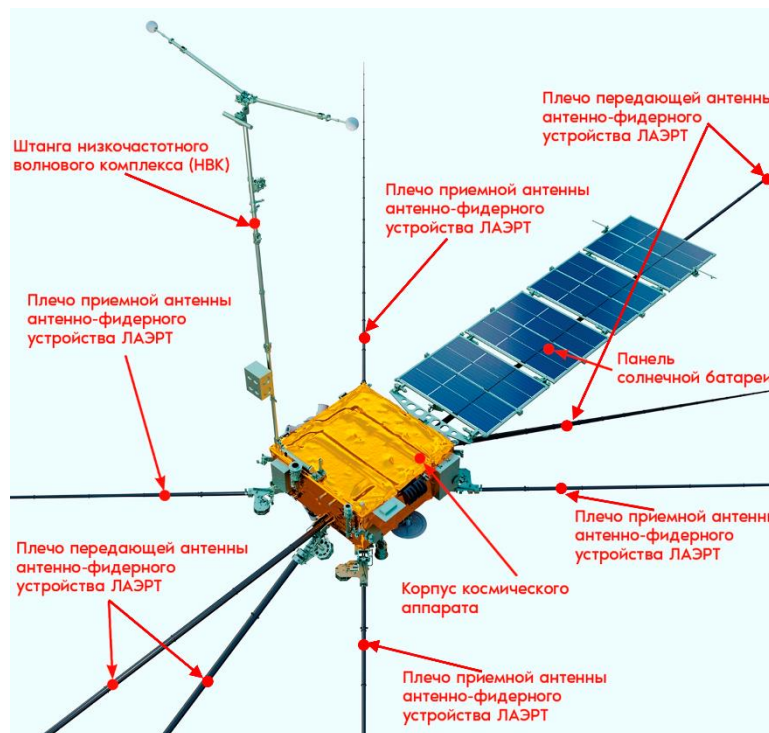


Рис. 3. Схема антенно-фидерного устройства спутникового ионозонда ЛАЭРТ

Проблемы распространения радиоволн в неоднородной ионосфере

Ионозонд ЛАЭРТ позволяет проводить мониторинг различных типов ионосферных неоднородностей, возникающих в ионосфере как в спокойных, так и возмущенных геомагнитных условиях. Для демонстрации этих возможностей приведем ряд примеров.

1. Резкие градиенты электронной концентрации.

На рис. 4 показан фрагмент динамического спектра при прохождении спутника через авроральную ионосферу в северном полушарии.

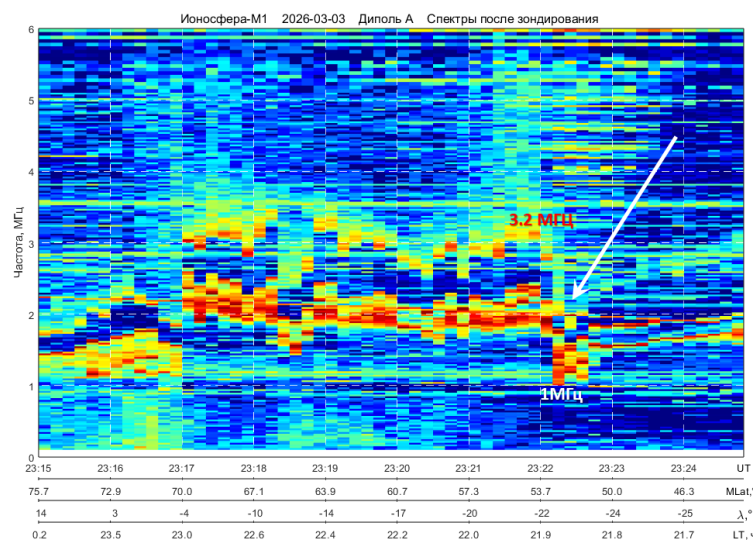


Рис. 4. Динамический спектр при пролете спутника Ионосфера-1 в высоких широтах Северного полушария

Мы видим, что в течение 20 с плазменная частота падает с 3.2 МГц до 1 МГц, т.е. более, чем три раза, что соответствует падению электронной концентрации в 10 раз. На рис. 5 показаны ионограммы, соответствующие этим моментам времени.

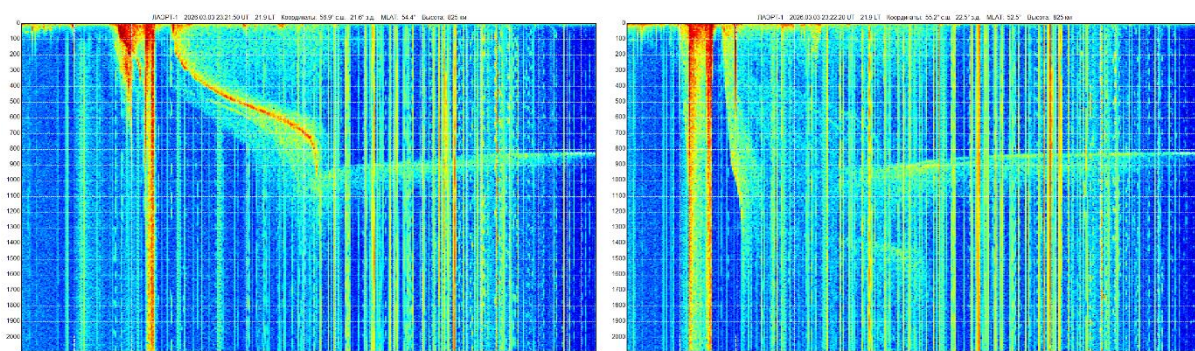


Рис. 5. Левая панель – ионограмма ЛАЭРТ-1 3 марта 2026 г. в 23:21:50 UT; правая панель – ионограмма ЛАЭРТ-1 3 марта 2026 г. в 23:22:00 UT

Критическая частота в первом случае составляла 4.85 Гц, а во втором – 1.51 МГц, т.е. значение критической частоты также упало в 3.2 раза. Совершенно очевидно, что такие градиенты будут создавать проблемы для распространения радиоволн.

2. Периодические и множественные неоднородности в виде плазменных пузырей и резких возрастаний электронной концентрации.

Из литературы известно, что наиболее проблемные зоны с точки зрения генерации ионосферных неоднородностей – это области экваториальных и полярных широт. По данным первого года существования проекта Ионозонд в экваториальных широтах преобладают, в основном, плазменные пузыри в вечернее время (21 LT), а в полярных широтах – резкие возрастания электронной концентрации, называемые в западной литературе blobs. Разнообразие форм плазменных пузырей с трудом поддается описанию, но мы предлагаем их разделить на три категории: одиночные плазменные пузыри, гигантские плазменные пузыри, и множественные плазменные пузыри, которые можно сравнить с эффектом кавитации. Они представлены на рис. 6.

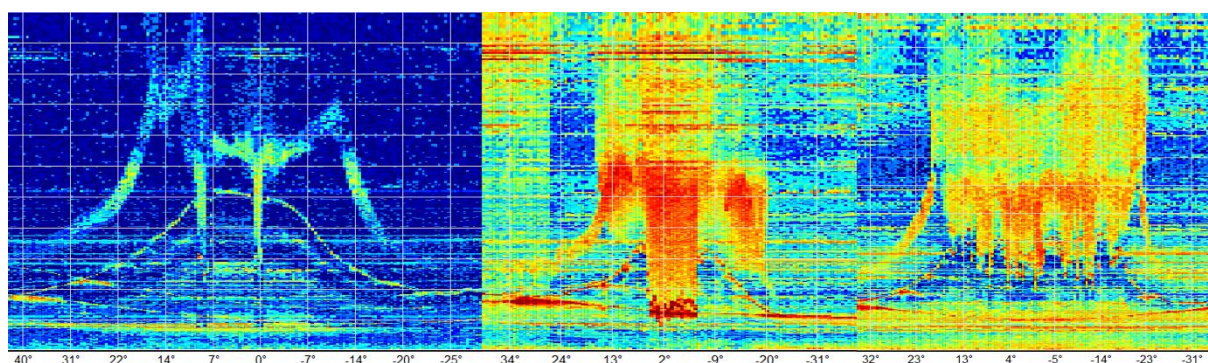


Рис. 6. Слева направо – одиночные плазменные пузыри, гигантский плазменный пузырь, множественные плазменные пузыри (кавитация)

На самом деле, в основном встречается комбинация всех трех типов. Следует отметить, что такие резкие изменения электронной концентрации сказываются на изменении импеданса передающей антенны, а, соответственно, возможны случаи перегрузки выходных каскадов передатчика ионозонда. На рис. 7 показано, как себя

ведет коэффициент стоячей волны для третьего случая, когда наблюдаются множественные плазменные пузыри, оккупирующие всю экваториальную аномалию.

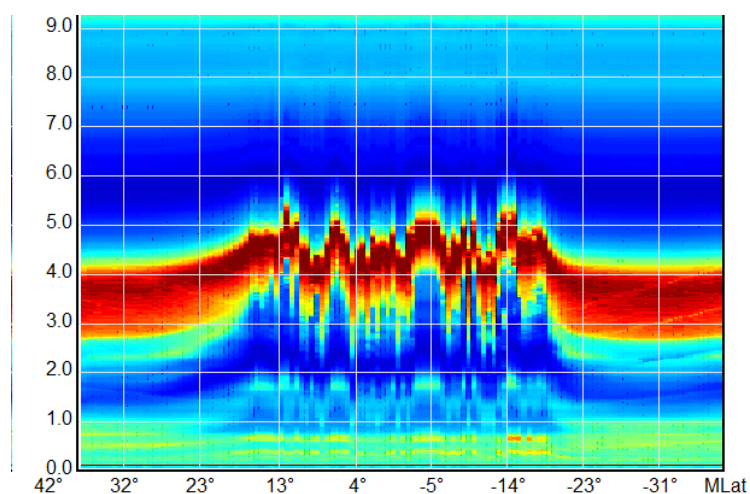


Рис. 7. Коэффициент стоячей волны на выходе передатчика ионозонда ЛАЭРТ во время регистрации множественных плазменных пузырей

В полярной ионосфере мы наблюдаем противоположную картину: возникновение резких всплесков повышения электронной концентрации, как это можно видеть на рис. 8.

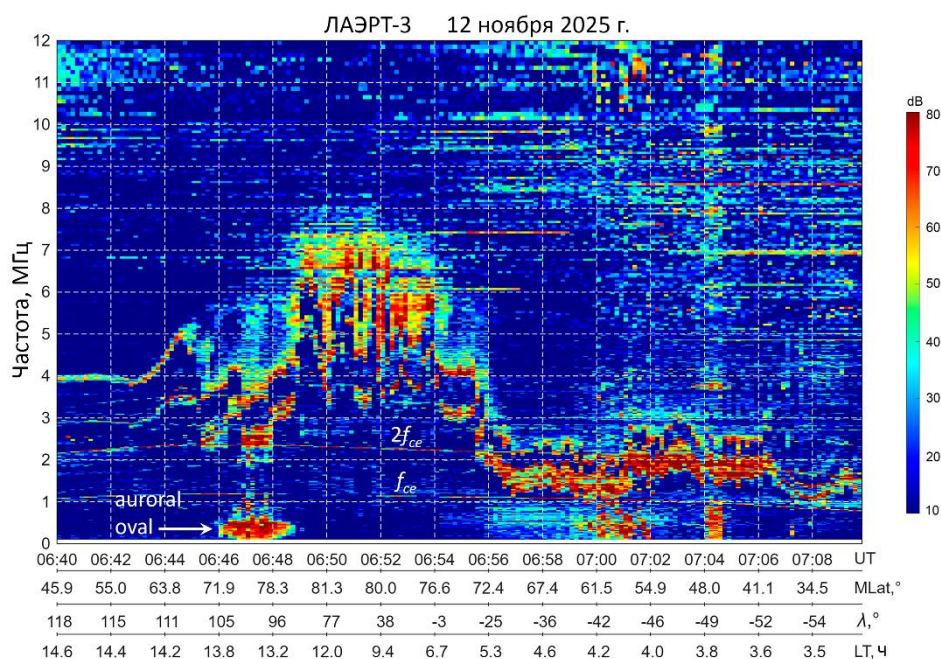


Рис. 8. Резкие броски электронной концентрации в полярной ионосфере во время главной фазы геомагнитной бури 11-14 ноября 2025 г.

Как видно из рисунка, при входе в область неоднородности плазменная частота выросла почти в два раза с 4 до 8 МГц, а при выходе рухнула в 4 раза с 8 до 2 МГц. Внутри области неоднородности происходят регулярные броски концентрации такого же порядка каждые 10-20 с. (одна клетка по горизонтали соответствует 10 с (время снятия одной ионограммы)). Вполне очевидно, что в таких условиях радиосвязь не просто

ухудшается, а вообще невозможна. Размер неоднородности можно оценить по времени нахождения спутника внутри области которое составляет порядка 10 мин., т.е. протяженность области превышает 700 км.

Обратимся, наконец, к наиболее серьезным нарушениям структуры ионосферы, которые имеют место во время сильных геомагнитных бурь [5]. Здесь следует отметить, что основное преимущество зондирования – это возможность заглянуть «внутрь» ионосферы и регистрировать динамику всех ее параметров во время сильных геомагнитных возмущений на разных высотах [6]. На рис. 9 показан комплекс параметров, начиная от критической частоты (верхние панели), полный разрез ионосферы, фактически томографическая реконструкция (средние панели) и вариации параметров на высоте орбиты спутника и на высоте 500 км – нижние панели.

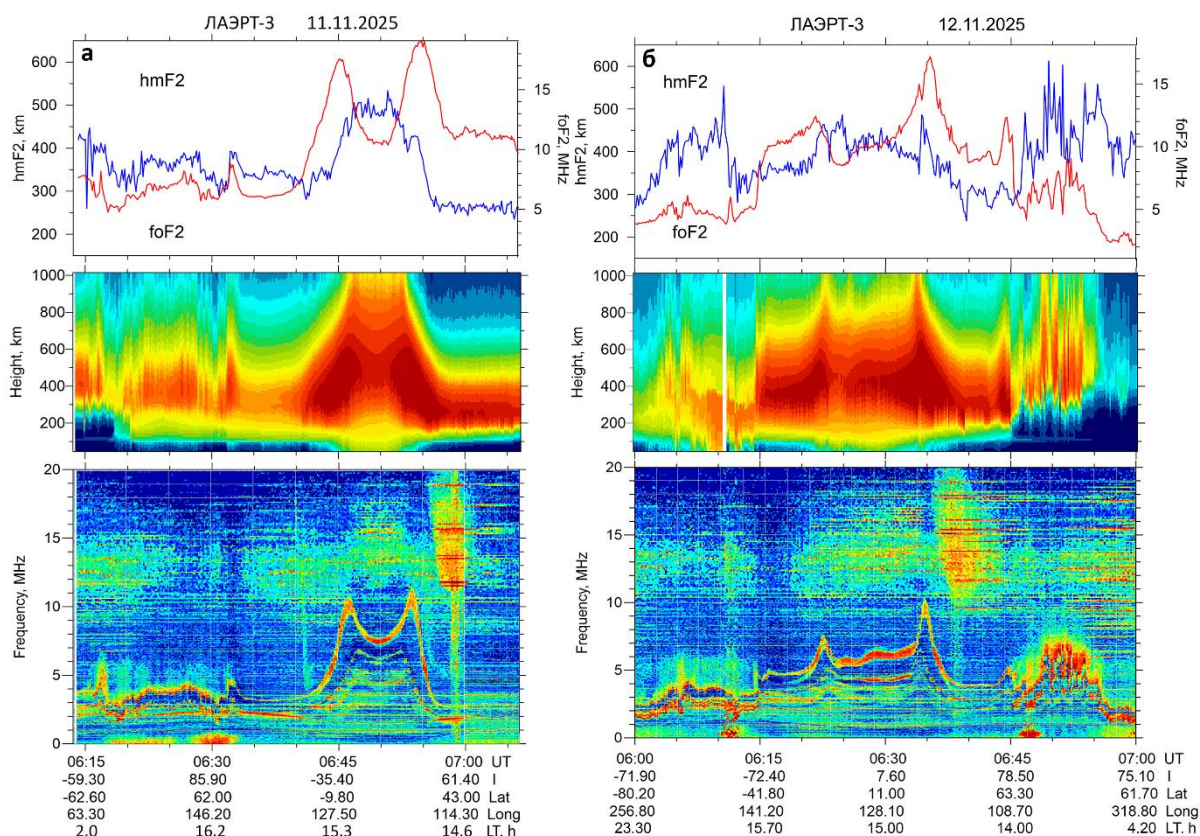


Рис. 9. а – комплексная картина параметров невозмущенной ионосферы; б – комплексная картина параметров ионосферы во время главной фазы геомагнитной бурь 11 ноября 2025 г. Верхние панели – вариации критической частоты (красная кривая) и высоты максимум слоя F ионосферы (синяя кривая); средние панели – томографическая реконструкция внутренней структуры ионосферы; нижние панели – верхняя кривая – вариации плазменной частоты на высоте 500 км, нижние кривые вариации плазменной и верхней гибридной частот на высоте орбиты спутника

Представлены распределения при пролете спутника Ионосфера-3 в одном и том же долготном секторе, и в одно и то же местное время с интервалом в сутки. На верхней панели рис. 9а можно видеть на красной кривой, представляющей критическую частоту, два пика – горбы экваториально аномалии. Согласно теории, концентрация на пике северного горба выше концентрации на пике южного горба – это так называемая зимняя аномалия. Синяя кривая, также в полном соответствии с существующими моделями экваториальной аномалии показывает, что высота максимума слоя F2 ионосферы в провале между горбами выше. Левая часть обеих кривых показывает наличие

плазменных неоднородностей в авроральной и полярной ионосфере. Средняя панель также демонстрирует регулярную внутреннюю структуру ионосферы. На нижней панели можно видеть, что форма экваториальной аномалии подобна форм на высоте максимума, но разница между концентрацией в горбах и провалом не такая большая, как аномалии критической частоты.

Рис. 9б разительно отличается от распределений в спокойной ионосфере. Фактически, полностью разрушена структура экваториальной аномалии, высота максимума вблизи геомагнитного экватора упала и потеряла свою колоколообразную структуру. Критическая частота южного горба упала на 5 МГц, а сами горбы разошлись на 10 градусов каждый в сторону от геомагнитного экватора. В северной полярной шапке разыгрался настоящий шторм с колебаниями критической частоты, достигающими 10 МГц. Это как раз область, показанная в деталях на Рис. 8. Можно сказать, что такое состояние ионосферы представляет большую проблемы для распространения радиоволн любых диапазонов.

Выводы

В данной работе представлена только очень малая часть той информации, которую мы получаем ежедневно с четырех аппаратов Ионосфера-М. При этом мы ставили перед собой две задачи: показать диагностические возможности спутникового ионозонда ЛАЭРТ с одной стороны, и те трудности, которые возникают для расчета трасс распространения радиоволн в сильно возмущенной ионосфере, и даже в спокойной ионосфере при наличии больших градиентов электронной концентрации. Даже демонстрация результатов для одной бури показала, насколько эти задачи сложны, а таких бурь будет много, и мы должны быть готовы к преодолению этих трудностей.

Литература

1. Коваль С.А. Ионосферный мониторинг в интересах перспективных адаптивных систем декаметровой радиосвязи: современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 4. С. 73-100. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10403
2. Ерухимов Л.М., Генкин Л.Г. Ионосфера как плазменная лаборатория // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 1992. Т. 35. №11/12. С. 363-387.
3. Пулинец С.А., Цыбуля К.Г., Депуев В.Х., Данилов И.С., Пулинец М.С. Спутниковый ионозонд ЛАЭРТ как основа глобальной системы мониторинга ионосферы // Космические исследования, 64:3 (2026) в печати
4. Stix, T., The Theory of Plasma Waves, New York: McGraw-Hill, 1962, 283 p.
5. Pulinets, S.; Kotonaeva, N.; Depuev, V.; Tsybulya, K. Ionospheric Response to the Geomagnetic Storm of 12–14 November 2025, Based on Multi-Parameter Analysis of Data from the LAERT Topside Sounder. // Atmosphere, **2026**, *17*, 150. <https://doi.org/10.3390/atmos17020150>
6. Пулинец С.А., Цыбуля К.Г. Заглянуть вглубь ионосферы // Земля и Вселенная, 2025, №3, С. 35-49 DOI: 10.7868/S004439482503003X