

УДК: 550.388.1

DOI: 10.26907/rwp29.2025.34-41

НОВЫЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИОНОСФЕРЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ БОРТОВОГО ИОНОЗОНДА ВНЕШНЕГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ КА «ИОНОСФЕРА 1-2»

Н.Г. Котонаева, С.А. Пулинец, К.Г. Цыбуля, С.В. Журавлев

ФГБУ «ИППГ», 129128, г. Москва, ул. Ростокинская, 9

E-mail: kongt@yandex.ru

Аннотация. Проведен анализ первых результатов внешнего радиозондирования ионозондом ЛАЭРТ с КА Ионосфера–М №1 и №2. Даны общие характеристики КА и средств наблюдения за ионосферой. Представлены ионограммы и спектрограммы ионозонда внешнего радиозондирования ЛАЭРТ. Показаны результаты, демонстрирующие особенности ионосферы в полярной и экваториальной областях. Сделан акцент на возможности использования данных внешнего радиозондирования в совместном с наземными станциями мониторинге состояния ионосферы.

Ключевые слова: ионосфера; ионозонд; внешнее радиозондирование ионосферы; ионограмма; спектрограмма; экваториальная аномалия, провал ионизации

NEW MORPHOLOGICAL FEATURES OF THE IONOSPHERE OBTAINED FROM THE FLIGHT TESTS OF THE TOP-SOUNDING IONOSONDE ONBOARD THE IONOSPHERE-1, -2 SATELLITES

N.G. Kotonaeva, S.A. Pulinets, K.G. Tsybulya, S.V. Zhuravlev

Abstract. We carried out analysis of the first results of the top-sounding LAERT ionosonde data which is currently working on the Ionosphere-1 and -2 satellites. General characteristics of the spacecraft and its ionosphere-observing equipment are discussed. We present ionograms and spectrograms obtained by the LAERT top-sounder and demonstrate characteristic features of the ionosphere in the polar and equatorial regions. The main accent is on usefulness of the top-sounding data for ionospheric monitoring in combination with the ground-based stations.

Keywords: ionosphere, ionosonde, ionospheric top-sounding, ionogram, spectrogram, equatorial anomaly, main ionospheric trough.

Введение

5 ноября 2024 года с космодрома Восточный осуществлен запуск двух космических аппаратов (КА) «Ионосфера-М», предназначенных для мониторинга ионосферы и других параметров космической погоды.

Впервые, после нескольких научных экспериментов на КА Интеркосмос -19, Космос 1809, орбитальном комплексе «Мир» [1,2,3], ионозонд внешнего радиозондирования (ВнЗ) в диапазоне плазменных частот ионосферы установлен на двух космических аппаратах, находящихся на одной солнечно синхронной орбите в плоскости 9/21 час на высоте 820 км. Подобное расположение орбиты позволяет наблюдать ионосферу в 9 и 21 час локального времени над всей территорией Земли. Ближе к полюсам локальное время наблюдения отклоняется от указанных на 1-2 часа. В июне 2025 г планируется запуск еще одной пары КА «Ионосфера –М» с орбитой в плоскости 3/15 часов.

Сброс информации осуществляется на приемные пункты Росгидромета в составе Европейского, Сибирского и Дальневосточного центров. В целом задержка передачи информации не превышает 1 часа.

До настоящего времени мониторинг ионосферы осуществлялся наземными станциями в границах РФ, информация над зарубежными территориями либо, частично, заимствовалась, либо заменялась модельными климатическими данными. Ионозонд обеспечивает оперативное определение критической частоты ионосферы вдоль орбиты спутника, расчет вертикальных профилей электронной концентрации от высоты КА до высоты максимума концентрации электронов, определение параметров ионосферной плазмы на высоте орбиты спутника по частотам плазменных резонансов. По данным параметрам возможно определение границ основных образований в ионосфере (экваториальной аномалии, главного ионосферного

провала, аврорального овала и полярной шапки), влияющих на распространение радиоволн различных диапазонов частот.

Целью данного доклада является представление первых результатов этой космической миссии, определение перспектив ВнЗ с КА на солнечно-синхронных орбитах в комплексном мониторинге верхней ионосферы.

Аппаратура внешнего радиозондирования КА «Ионосфера-М»

Ионозонд ВнЗ, получивший название ЛАЭРТ работает в непрерывном режиме каждые 10 с. Такой режим ионозонда для оперативного использования требует исключительно автоматической обработки. ЛАЭРТ работает с трансформируемым антенно-фидерным устройством (АФУ). АФУ обеспечивает передачу и прием импульсов в диапазоне рабочих частот от 0,1 до 20 МГц. АФУ ЛАЭРТ включает в себя тридцатиметровую передающую антенну, состоящую из четырех плеч антенн по 15 м каждое, и две пятнадцатиметровые приемные антенны, каждая из которых состоит из двух плеч антенн по 7,5 м каждое. После выведения на орбиту для достижения орбитальной конфигурации АФУ проведено шесть раскрытий и восемь выдвижений. Особенностью АФУ является то, что раздвижные плечи антенны сделаны из углепластикового материала, что сделано впервые.

Определение основных параметров ионосферы по ионограммам ВнЗ

На рис. 1 приведена ионограмма ионозонда ЛАЭРТ с выделенными основными определяемыми элементами. Цветом показаны амплитуды принимаемых сигналов.

Прежде всего это следы отражения от ионосферы 1- о-компонента, 2- х-компонента, 3- z-компонента; следы отражения от Земли 4- о-компонента, 5- х-компонента. На нулевой действующей дальности наблюдаются частоты плазменных резонансов – гирочастота f_h до седьмой гармоники, верхнегибридный резонанс на высоте КА (f_{rs}). Критические частоты слоя F2 ионосферы обыкновенной (f_oF2) и необыкновенной (f_xF2) компонент, а также характеристики плазмы на высоте спутника f_{xs} – частота необыкновенной компоненты и f_{zs} частота медленной необыкновенной z-компоненты. Плазменный резонанс на высоте спутника обыкновенной компоненты (f_{os}) обычно сливается с верхнегибридной частотой либо бывает поглощен. Напомним, что расстояние между f_{zs} и f_{xs} по частоте равно гирочастоте f_h [4]. Обратим внимание, что низкочастотный конец следа отражения от Земли совпадает с высокочастотным концом следа отражения от ионосферы соответствующей компоненты, что позволяет повысить точность определения частоты максимума ионосферы в случае поглощения одного из следов.

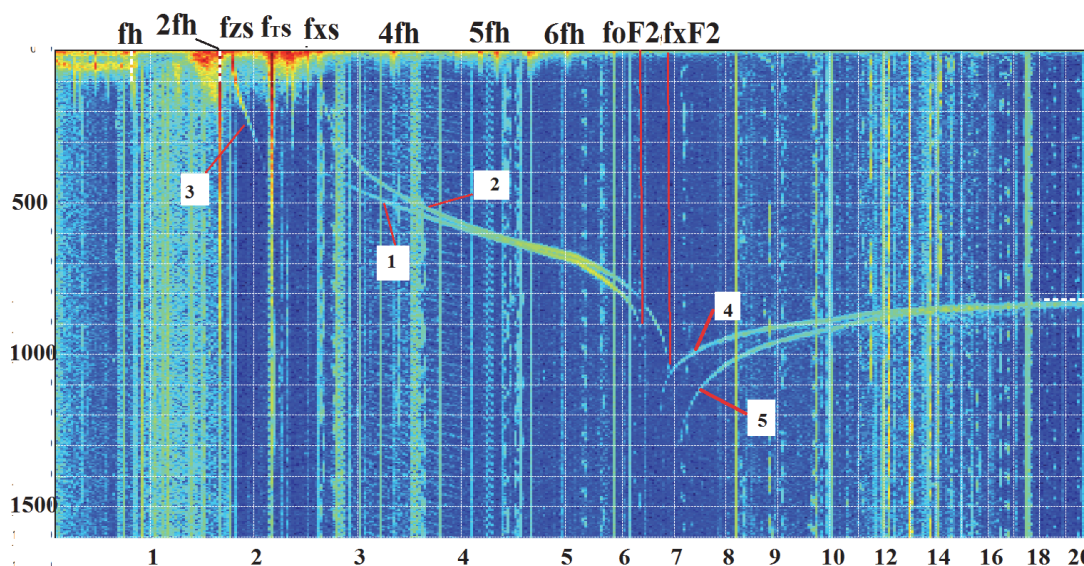


Рис. 1. Ионограмма ВнЗ 36,7 с.ш. 37,6 з.д. Высота 820 км. Амплитуды принимаемых сигналов. По оси ординат показаны действующие дальности принимаемых сигналов

Конструкция приемной антенны ионозонда в виде двух скрещенных диполей позволила включить в алгоритм обработки сигналов опцию расчета фаз сигналов, принятых на каждый из диполей. На рис. 2 показана ионограмма с рис. 1 в фазовом представлении с теми же выделенными следами отражения, зеленый след обозначает право поляризованную компоненту (в северном полушарии необыкновенную), а красный – лево поляризованную (в северном полушарии – обыкновенную). При этом поляризация медленной необыкновенной волны Z определена правильно как лево поляризованная, такая же, как и обыкновенная компонента. В южном полушарии поляризации для обыкновенной и необыкновенной компонент меняются, цвета, соответственно, тоже.

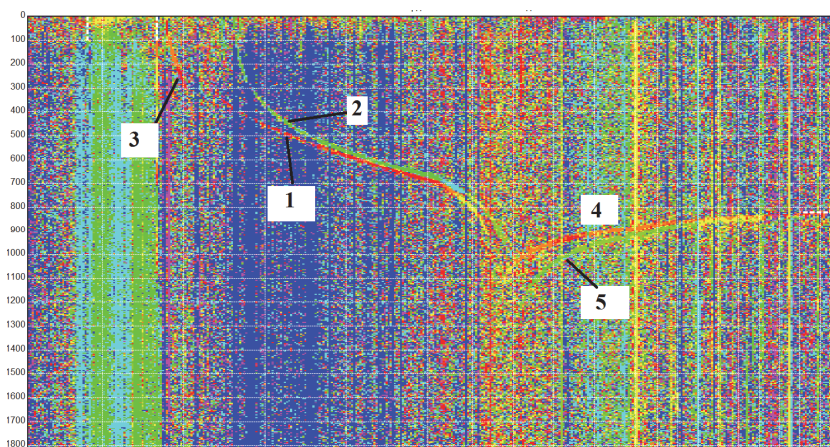


Рис. 2. Ионограмма ВнЗ 36,7 с.ш. 37,6 з.д. Высота 820 км. Фазы принимаемых сигналов

Важным инструментом исследования ионосферы являются повитковые спектры, полученные в неактивном режиме работы ионозонда в перерывах между сеансами радиозондирования. На них фиксируются все особенности ионосферы: повышение концентрации электронов в районах гребней экваториальной аномалии (ЭА) (1, 2, 3 на рис. 3), высыпания в районах авроральных овалов (4 на рис. 3). В целом спектрограмму, полученную после сеансов зондирования, можно рассматривать как общий волновой портрет ионосферы.

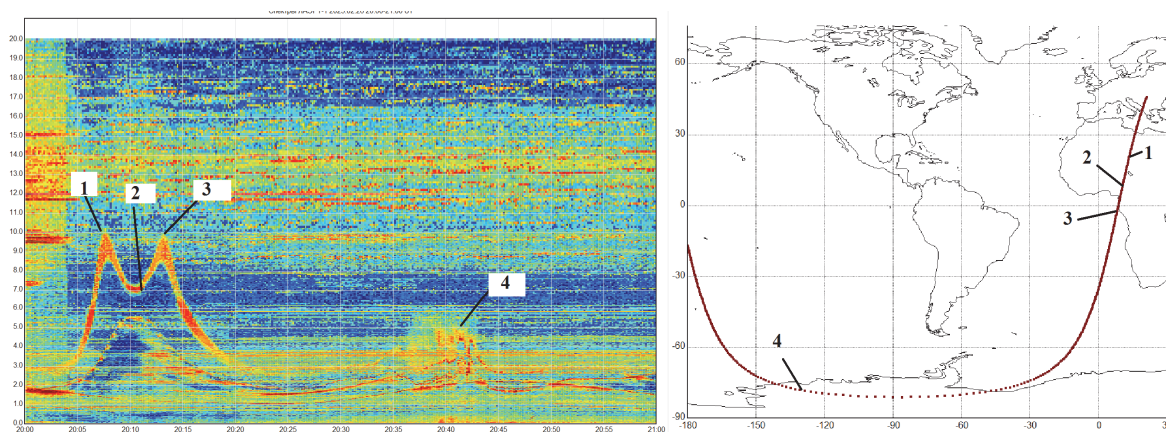


Рис. 3. Слева – Спектрограмма ионозонда ЛАЭРТ, справа – след орбиты, соответствующий спектрограмме

Морфологические особенности ионосферы по результатам работы ионозондов ЛАЭРТ

Первые месяцы испытаний ионозонда ЛАЭРТ позволили получить интересные результаты в части морфологических особенностей ионосферы в период высокой солнечной активности.

1. На рис. 4 приведены ионограммы, иллюстрирующие разброс критических плазменных частот на различных широтах с 2,2 МГц до 17,5 МГц, зафиксированных ионозондом. Регистрировались ионограммы с следом уходящим за верхнюю частоту радиозондирования, то

есть $f_x F2 > 20$ МГц, однако обычно асимптота высокочастотного края следа была поглощена на диапазоне 19-20 МГц.

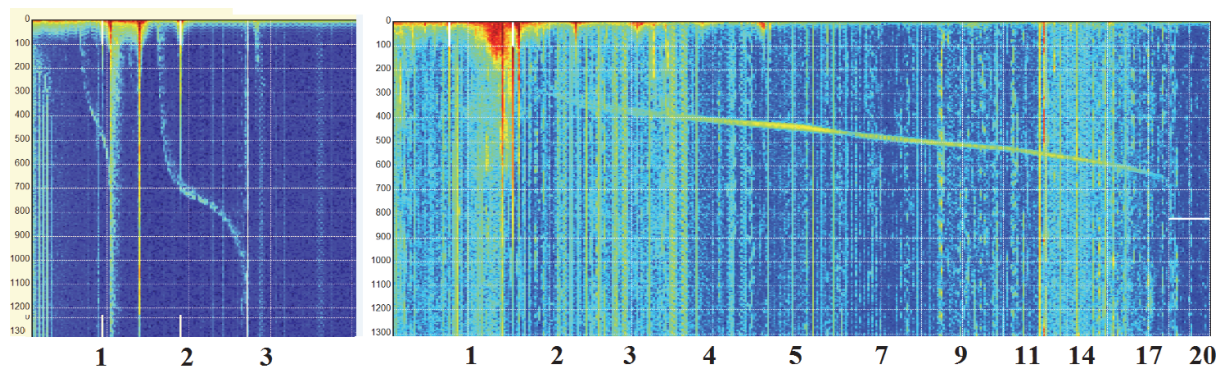


Рис. 4. Слева – Ионограмма в районе ионосферного провала $f_x F2 = 2,7$ МГц, справа – ионограмма в районе гребня экваториальной аномалии $f_x F2 = 18$ МГц

2. Восстановление высотного профиля плазменных частот позволяет определять высоты главных максимумов ионосферы. В районах между гребнями ЭА высота максимума поднималась почти до высоты КА. След отражения от ионосферы при этом становится коротким. На рис. 5 высота максимума более 600 км. Высота определяется путем восстановления высотного профиля плазменной частоты. На рис. 5 профиль показан красной линией.

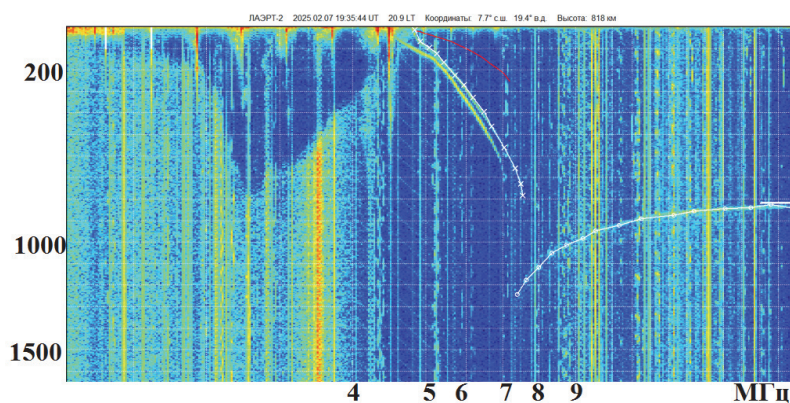


Рис. 5. Ионограмма ВнЗ 7,7 с.ш. 19,4 в.д. Высота 818 км

3. Радиозондирование в районах полярной зоны показало то, что величины градиентов плазменной частоты могут достигать 3,5 МГц на 100 км. На рис. 6 показаны две последовательные ионограммы 17 марта 2024 г.: первая получена в точке 78,3 с.ш. 171,6 з.д. в 17:03:24 UT $f_x F2 = 5,2$ МГц, вторая в точке 78,7 с. ш. 173,9 з. д. 17:03:34 UT $f_x F2 = 8$ МГц.

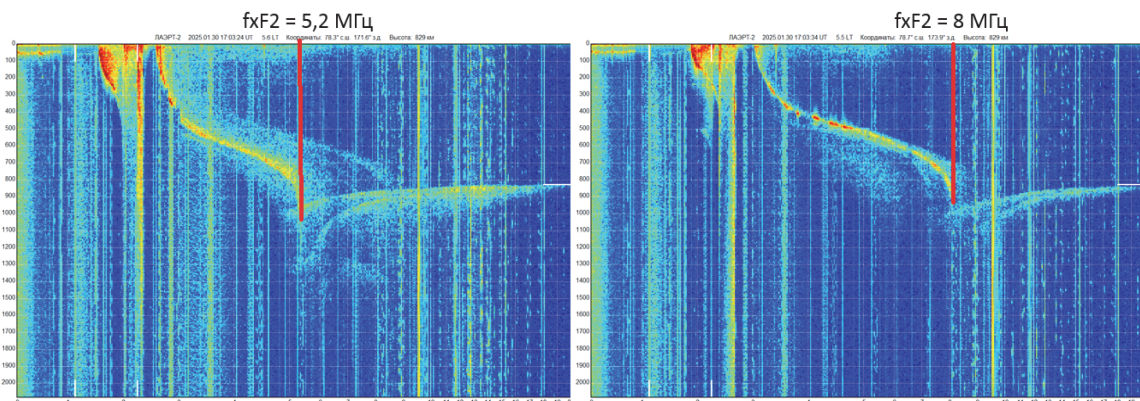


Рис. 6. Две последовательные ионограммы в районе аврорального провала ионизации

4. В районах ЭА регулярно фиксируются ионограммы с ярко выраженным F – рассеянием. Длина следа отражения от ионосферы сокращается по частоте и высокочастотный конец следа характерно рассеян. Явление в основном регистрируется вечером в 21 LT. На рис. 7 показаны две ионограммы, иллюстрирующие экваториальное F – рассеяние, полученные на интервале 50 с при пролете над северным гребнем ЭА. С легкой руки Пулинца С.А. последовательность таких ионограмм получила название «бикфордов шнур». След ионосферы буквально «сжигается» по мере приближения к геомагнитному экватору, и потом восстанавливается при приближении к второму гребню ЭА.

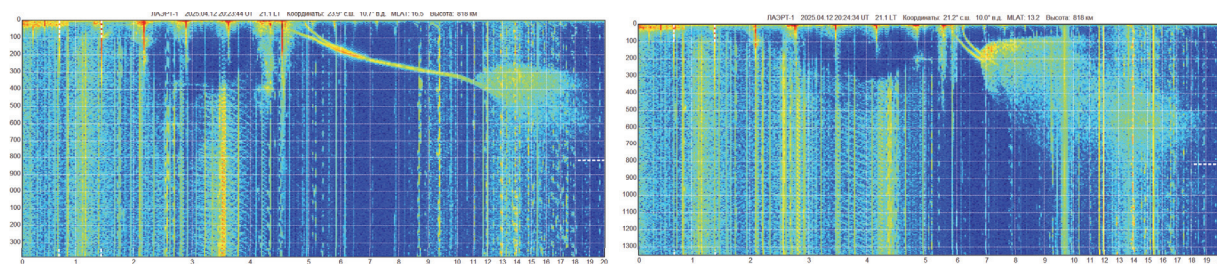


Рис. 7. Ионограммы ЛАЭРТ-1, полученные слева – 12.24.2025 20:23:44 (23,9 с.ш. 10,7 в.д.) и справа – 20:24:34 (21,2 с.ш. 10.0 в.д.).

Обратим внимание, что F-рассеяние на ионограммах в районах полюса существенно отличается от экваториального. На рисунке 8 приведен пример ионограммы с характерным антарктическим F-рассеянием. При этом явно видны следы с наибольшей амплитудой принятого сигнала.

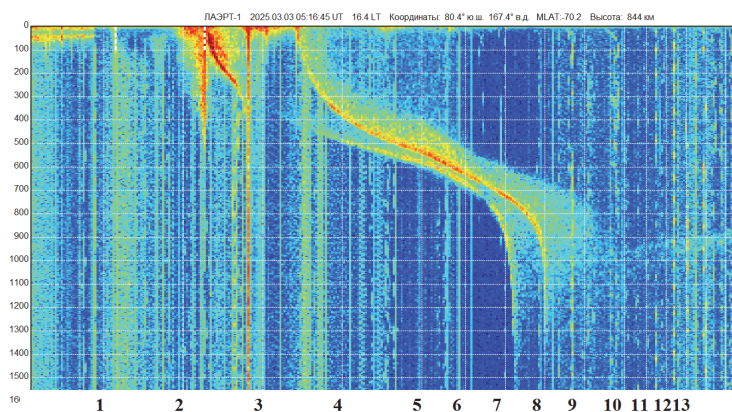


Рис. 8. Ионограмма, полученная 2025.03.03 05:16:45 80,4 ю.ш, 167,4 в.д.

Предварительный анализ показал, что для ионограмм в полярной зоне возможна интерактивная и автоматическая обработка, таким образом использование полученных данных в системе мониторинга ионосферы вполне реально. Для этого реализована ассимиляция данных наблюдений с борта КА в систему мониторинга и прогноза ионосферы SIMP.

На рис. 9 (слева) приведено распределение плазменных частот ионосферы вдоль орбиты КА в арктической области (на рисунке: зеленые маркеры – критическая частота необыкновенной компоненты, красные – f_oF_2 , синие – плазменная частота на высоте КА, голубые – гирочастота) с ярко выраженным языком ионизации на 81° с.ш. и серии провалов ионизации на широтах от 68° до 77° с.ш. и в районе 68° с.ш. Гирочастота определяется как по модели геомагнитного поля IGRF 2000, так и по 1-ой гармонике гирорезонанса. Совпадение наблюдается в подавляющем числе случаев.

На рис. 9 (справа) – карта модели SIMP, с ассимиляцией данных наблюдений как наземных станций, так и бортовых ионозондов. Места наблюдения обозначены белыми точками – это места расположения станций ВЗ на территории РФ и след орбиты КА «Ионосфера-М» № 2. По рисунку видно, что данные ионозонда внесли коррективы в распределение плазменных частот ионосферы в районе Северного Ледовитого океана в сторону повышения не менее, чем на

1 МГц. При ассимиляции выбираются данные, полученные при наблюдении в ближайшие полчаса до времени построения карты.

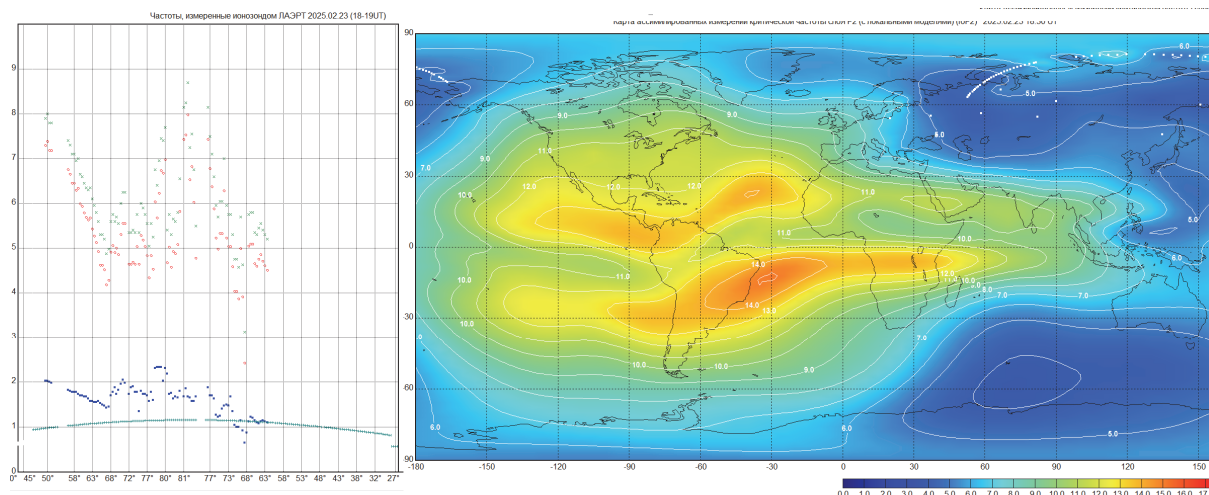


Рис. 9. Слева – распределение плазменных частот вдоль орбиты КА «Ионосфера» № 2 23.02.2025 18-19 UT; справа – карта критической частоты модели SIMP с ассимиляцией данных бортового ионозонда

Крупномасштабные неоднородности на ионограммах КА «Ионосфера – М»

Если мелкомасштабные неоднородности во многом выражены на ионограммах в виде F-рассеяния, то крупномасштабные вызывают отклонение зондирующих лучей и, следовательно, дополнительные треки на ионограммах.

На ионограммах орбитальной станции (ОС) «Мир» были зафиксированы следы наклонного отражения от Земли в виде продолжения низкочастотного края следа отражения от Земли. Эти следы получили название [5] задержанного нижнего следа (ЗНС). На рис. 10 справа приведена ионограмма ОС «Мир» с ЗНС. Обычно эти ионограммы фиксировались в момент, когда ОС опускалась ниже максимума электронной концентрации между гребнями ЭА. На рис. 10 слева приведена ионограмма КА «Ионосфера – М» №1, зарегистрированная уже выше максимума концентрации, с похожей формой следа отражения от Земли. Подробное объяснение подобного следа требует траекторного моделирования.

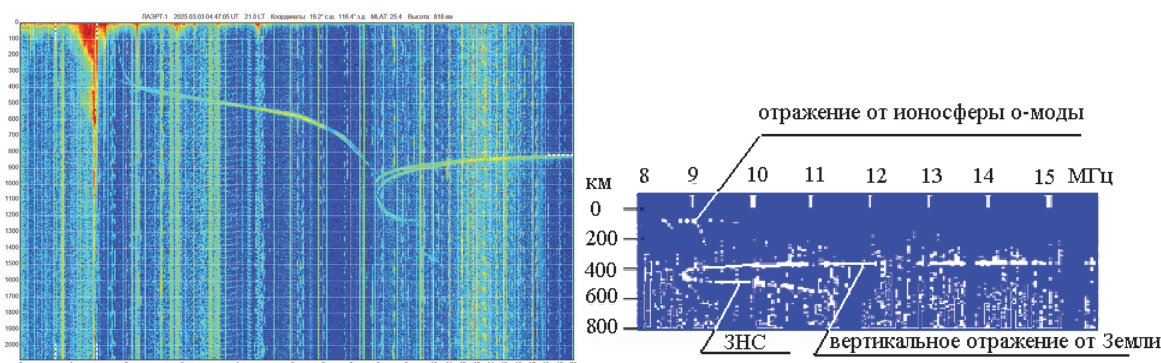


Рис. 10. Слева – Ионограмма КА «Ионосфера – М» №1, полученная 03.03. 2024 04.47.05 UT 19,2 с.ш., 116,4 з.д., высота 818 км; справа – ионограмма ОС «Мир»

Как видим, форма следа отражения от Земли несет дополнительную информацию о состоянии ионосферы, причем о слоях ниже максимума концентрации электронов. По ней можно восстановить профиль плазменных частот в этой области [6]. Кроме того, можно получить и дополнительную информацию, так на ионограмме рис.11 показан случай дополнительных кратных следов выше на 120 км от основного следа отражения от Земли. Так на ионограммах фиксируется спорадических слой. Зондирующие лучи частично проникают до

Земли, отражаются и возвращаются на КА, а частично отражаются, не доходя до Земли, от спорадического слоя, как раз располагающегося на высотах 120–130 км. Таким образом с помощью ионозонда на борту КА можно регистрировать область образования спорадического слоя.

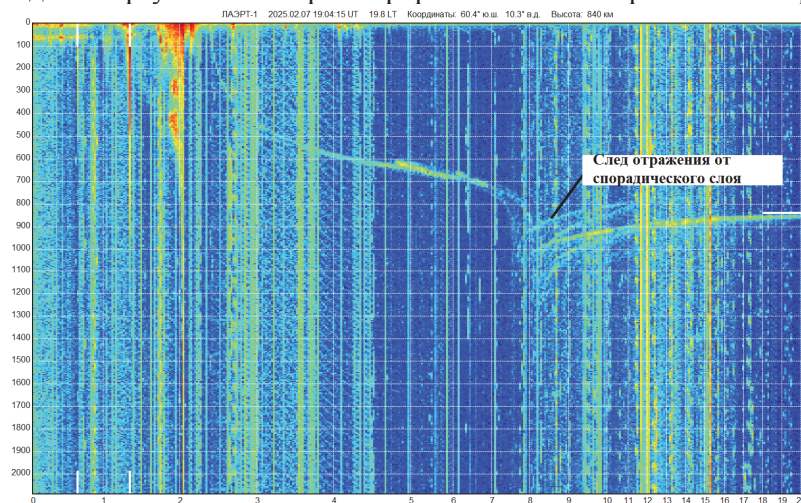


Рис. 11. Следы отражения от спорадического слоя на ионограммах ВЗ

На первых сеансах работы КА «Ионосфера-М» №1 и №2 зарегистрировано много ионограмм, требующих специального исследования и типовой классификации. Приведем некоторые из них.

На рис. 12 приведена ионограмма со следами наклонных отражений в районе критических частот на следе обыкновенной компоненты, причем дополнительные треки зарегистрированы как на следе отражения от ионосферы, так и на следе отражения от Земли.

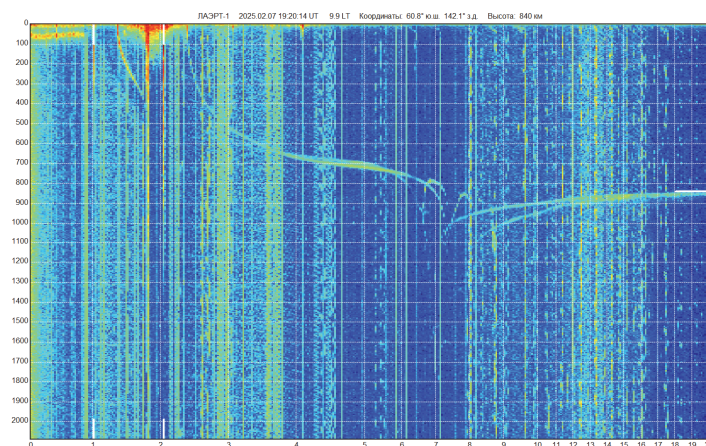


Рис. 12. Ионограмма ВнЗ (7.02.2025 19:20 UT; 60,8° ю.ш., 142,1° з.д.) с дополнительными наклонными треками в районе максимума концентрации электронов

А на рис. 13 приведена ионограмма, на которой зафиксированы множественные следы отражения от ионосферы. Явно видны три кратных отражения обеих компонент с меньшими действующими дальностями. На первый взгляд, выше максимума концентрации электронов образовались несколько слоев, аналогичных спорадическим, которые частично пропускают, сигнал, частично отражают. Однако обращает на себя внимание факт существенного отличия критической частоты ионосферы, определенной по следу отражения от Земли (6,5 МГц), и по следу отражения от ионосферы: для следа с большими действующими дальностями – это 5,5 МГц. Вероятнее всего присутствует существенная неоднородность и все эти кратные отражения результат отражения от нее под разными углами.

Подобные ионограммы сложно обрабатываются и об автоматической обработке речь не идет, однако они интересны с точки зрения анализа возможных образований в ионосфере, локализации мест турбулентности.

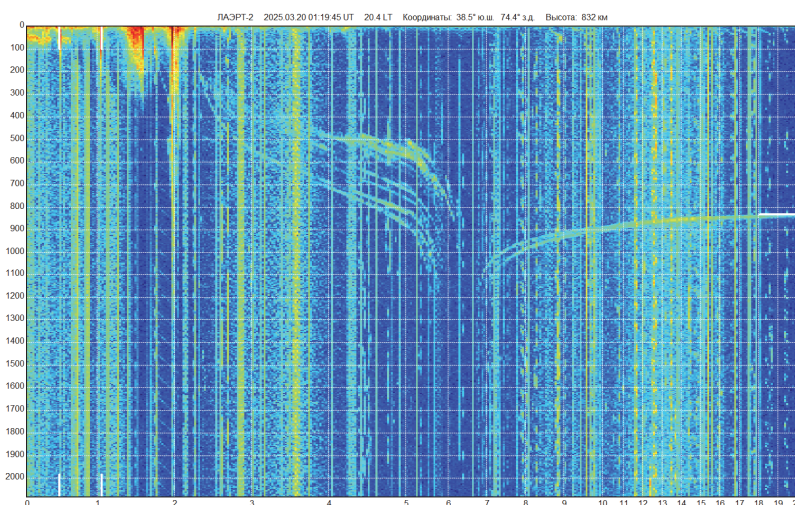


Рис. 13. Ионограмма ВнЗ (20.03.2025 01:19 UT; 38,5° ю.ш., 74,4° з.д.) с множественными отражениями

Заключение

Запуск КА «Ионосфера-М» № 1 и № 2 с ионозондами внешнего радиозондирования на борту открыл новую страницу мониторинга ионосферы в оперативном режиме. Периодичность снятия ионограмм и сброса на Землю информации позволяет, с одной стороны, обнаружить и локализовать ионосферные неоднородности размером более 80 км, с другой стороны, в квазинепрерывном режиме передавать ионосферную информацию в систему мониторинга ионосферы, ассимилировать информацию о критической частоте ионосферы и высоте главного максимума и использовать эту комплексную информацию для расчетов параметров радиотрасс.

Накопление информации позволит обновить существующие модели ионосферы. Особенно важны обновления полярных областях и в области экватора.

Запуск «Ионосфера-М» № 2 и № 3 расширит временную картину информации об ионосфере на дневной и ночной периоды, что позволит говорить о российской системе мониторинга ионосферы как о планетарной системе.

Список литературы

1. Карпачев А.Т. Суточные и долготные вариации экваториальной аномалии для зимнего солнцестояния по данным ИСЗ Интеркосмос-19 // Геомагнетизм и аэрномия. – 2021. – Т. 61. – № 1. С. 29–43.
2. Данилкин Н.П., Журавлев С.В., Котонаева Н.Г., Анишин М.М., Кураев М.А. Моделирование эксперимента по радиозондированию ионосферы с ИСЗ "КОСМОС 1809" при наличии вертикальных неоднородностей электронной плотности в арктическом регионе / Геомагнетизм и аэрномия. – 2012. – Т. 52. – № 2. – С. 242–250.
3. Котонаева Н.Г., Данилкин Н.П. Особенности радиозондирования ионосферы с орбитального комплекса «Мир» // Известия вузов. Радиофизика. – 2002. – Т. XLV – № 6. – С. 473–481.
4. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. – М.: Наука, 1978. – 342 с.
5. Данилкин Н.П., Анишин М.М., Котонаева Н.Г. Задержанный нижний след на спутниковых ионограммах – новое средство изучения макронеоднородностей ионосферы // Известия ВУЗов, Радиофизика. – 2006. – Т. XLIX. – № 1. – С. 9–20.
6. Pulinets, S. A. et al. Mir space station topside sounder: Possibilities for equatorial anomaly study // Terr. Atmos. Ocean. Sci. J. – 2001. – V.12. – № 3. – P. 525–536.