Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 370–371.

УДК 550.388.2
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-370
Orcid 0000-0003-0576-5443

ИОНОГРАММЫ ТРАНСИОНОСФЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ В КАЛИНИНГРАДСКОЙ МАГНИТНО-ИОНОСФЕРНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

А.В. Тимченко[1], И.В. Романов[3], М.В. Клименко[1], В.В. Носикова[1], И.А. Носиков[1], С.А. Пулинец[2], Д.В. Чугунин[2], К.Г. Цыбуля[3]

[1]Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук, Калининград, Россия, timchenko.leks@gmail.com
[2]Институт космических исследований Российской Академии Наук, Москва, Россия
[3]Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова, Москва, Россия

TRANSIONOSPHERIC SOUNDING IONOGRAMS OBTAINED AT THE KALININGRAD MAGNETIC-IONOSPHERIC OBSERVATORY

A.V. Timchenko[1], I.V. Romanov[3], M.V. Klimenko[1], V.V. Nosikova[1], I.A. Nosikov[1], S.A. Pulinets[2], D.V. Chugunin[2], K.G. Tsibulya[3]

[1]West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, Russia, timchenko.leks@gmail.com
[2]Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[3]Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russia

Аннотация. В настоящей работе анализируется серия ионограмм, полученных в ходе трансионосферного зондирования (ТИЗ). Наземная обсерватория, расположенная в Калининградском регионе (54.36° с.ш., 20.12° в.д.), оснащена ионозондом «Парус-А», который обеспечивает синхронное зондирование с космическим аппаратом (КА) «Ионосфера-М». На представленных ионограммах регистрируются отражения от регулярных слоев ионосферы, а также дополнительный след сигнала от бортового ионозонда «ЛАЭРТ», установленного на КА «Ионосфера-М». Данные ТИЗ позволяют уточнить определение основных параметров ионосферы и выявить горизонтальные градиенты электронной концентрации.

Ключевые слова: ионограмма, ионосферные параметры, трансионосферное зондирование.

Abstract. This paper analyzes a series of ionograms obtained during transionospheric sounding (TIS). The ground-based observatory, located in the Kaliningrad region (54.36° N, 20.12° E), is equipped with a Parus-A ionosonde and provides synchronous sounding with the Ionosphere-M spacecraft. The presented ionograms record reflections from regular ionospheric layers, as well as an additional signal trace from the onboard LAERT ionosonde installed on the Ionosphere-M spacecraft. The TIS data make it possible to refine the determination of the main ionospheric parameters and horizontal ionospheric gradients.

Keywords: ionogram, ionospheric parameters, transionospheric sounding.

ВВЕДЕНИЕ

Трансионосферное зондирование (ТИЗ) имеет давнюю историю, первым космическим аппаратом (КА) с ионозондом на борту стал Alouette-1, запущенный в 1962 г. [Jackson, Warren, 1969]. Под руководством ИЗМИРАН в 1979 г. был запущен отечественный КА «Интеркосмос-19», который работал в непрерывном режиме [Васильев и др., 1981]. В 2024 г. на солнечно-синхронные орбиты была запущена первая пара спутников «Ионосфера-М», оснащенных ионозондами «ЛАЭРТ». На данный момент на орбите находятся четыре спутника, которые позволяют проводить одномоментное и квазиглобальное исследование различных регионов ионосферы: утреннего, дневного, вечернего и ночного. Это позволяет исследовать глобальный отклик ионосферных параметров на различные гелиогеофизические возмущения.

Цель работы заключается в анализе первых данных, полученных при проведении трансионосферного зондирования в спокойных геомагнитных условиях.

ДАННЫЕ

В настоящей работе рассматриваются ионограммы, полученные с помощью наземного ионозонда «Парус-А», расположенного в Калининградской магнитно-ионосферной обсерватории (54.36° с.ш., 20.12° в.д.).

ТИЗ представляет собой одновременное (синхронное) зондирование с использованием двух ионозондов — наземного и космического базирования. Во время пролета КА над регионом на бортовом ионозонде устанавливается специальный 10-секундный режим зондирования; одновременно на наземном приборе активируется аналогичный режим. Однако из-за технических ограничений наземный ионозонд испускает и принимает пакеты волн каждые 20 с.

На данный момент проведено девять сеансов ТИЗ. Даты проведения сеансов и соответствующие им геомагнитные условия представлены в табл. 1. В качестве критерия спокойных геомагнитных условий в настоящей работе приняты следующие пороговые значения: $Kp < 4$ и $Dst > -40$ нТл. Как следует из табл. 1, спокойным условиям соответствуют только 5 из 9 сеансов ТИЗ.

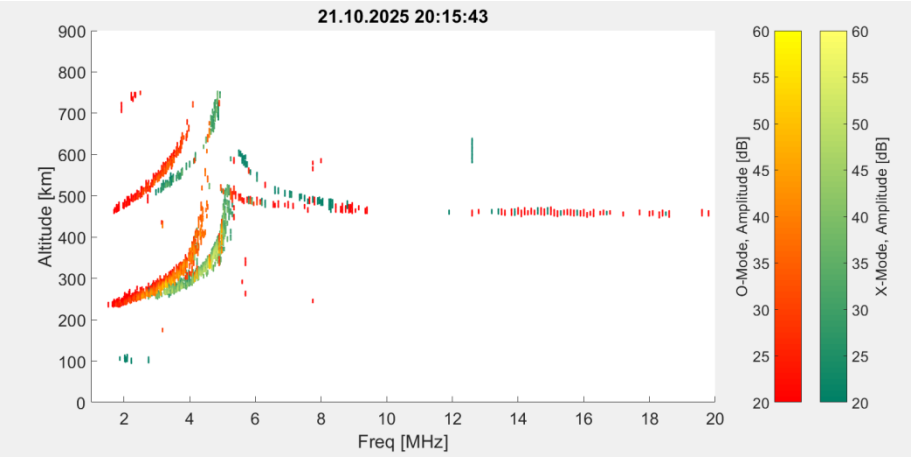

Рис. 1. Ионограмма трансионосферного зондирования, соответствующая 20:15:43 UT 21.10.2025

Таблица 1. Даты проведения ТИЗ
и соответствующие им геомагнитные условия

№	Дата	Геомагнитные условия
1	20–22 октября 2025 г.	спокойные
2	6–8 ноября 2025 г.	возмущенные
3	20–22 ноября 2025 г.	спокойные
4	20–22 декабря 2025 г.	возмущенные
5	28 января 2026 г.	возмущенные
6	25 февраля 2026 г.	спокойные
7	11 марта 2026 г.	спокойные
8	23 марта 2026 г.	возмущенные
9	22 апреля 2026 г.	спокойные

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлен пример ионограммы сеанса ТИЗ. Данная ионограмма соответствует 20:15:43 UT 21 октября 2025 г. На ионограмме присутствуют следы отражений от регулярного слоя F2 в обыкновенной (красный) и необыкновенной (зеленый) модах, а также след излучения бортового ионозонда «ЛАЭРТ», имеющий бимодальную структуру. Кроме того, на ионограмме присутствуют след отражения от спорадического E-слоя в необыкновенной моде и кратные бимодальные отражения от регулярного слоя F2.

Видно, что групповые запаздывания обыкновенной и необыкновенной компонент, отраженных от слоя F2 и принятых с ионозонда КА, соединяются на частотах ~4.5 и ~5.2 МГц. Таким образом, в спокойных геомагнитных условиях ТИЗ позволяет более точно определять критические частоты слоя F2 и оценивать горизонтальные градиенты f_oF2, которые для данного случая отсутствуют. Видно также, что след от ионозонда «ЛАЭРТ» прерывается в диапазонах частот 9.5–12 и 18.5–19.8 МГц, а также в районе 17 МГц. Указанные пропадания сигнала могут быть связаны с поглощением в среде распространения вследствие сонаправленности вектора распространения сигнала и вектора геомагнитного поля Земли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены первые результаты анализа ионограмм ТИЗ, полученных при синхронной работе наземного ионозонда «Парус-А» (Калининградская магнитно-ионосферная обсерватория) и бортового ионозонда «ЛАЭРТ» на КА «Ионосфера-М».

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

В спокойных условиях на ионограммах явно отображаются следы как регулярных ионосферных слоев, так и следы от сигнала КА.

С помощью ТИЗ можно точнее определять ионосферные параметры, такие как критическая частота F2-слоя.

Выявлены характерные пропадания сигнала ионозонда «ЛАЭРТ» на наземных ионограммах. Данные прерывания, вероятно, обусловлены поглощением радиоволн в среде распространения, связанным с сонаправленностью вектора распространения сигнала и вектора геомагнитного поля Земли.

Таким образом, первые эксперименты по трансионосферному зондированию с использованием бортового ионозонда «ЛАЭРТ» КА «Ионосфера-М» и наземного ионозонда демонстрируют принципиальную возможность уточнения параметров ионосферы (в первую очередь f_oF2 и f_xF2) и выявления тонких эффектов распространения сигналов в магнитоактивной плазме. Полученные результаты открывают перспективы для дальнейших исследований глобального отклика ионосферы на гелиогеофизические возмущения с использованием квазиглобальной системы из четырех спутников, функционирующих в различных местных временных секторах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-12-00513.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Васильев Г.В., Гончаров Л.П., Кушнеревский Ю.В., и др. Предварительные результаты зондирования внешней ионосферы с борта ИСЗ ИК-19 // Геомагнетизм и аэрономия. 1981. Т. 21, № 3. С. 451–456.

Jackson J.E., Warren E.S. Objectives, history, and principal achievements of the topside sounder and ISIS programs // Proc. IEEE. 1969. V. 57, N 6. P. 861–865. DOI: 10.1109/PROC.1969.7130.