УДК 550.388.2
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-451
ORCID: 0000-0003-4106-4978

РЕЗУЛЬТАТЫ ТРАНСИОНСОФЕРНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ «ЛАЭРТ» (КА «ИОНОСФЕРА-М») – «ПАРУС-А» (СТ. «ЭЛЕКТРОУГЛИ», СТ. «КАЛИНИНГРАД»)

И.В. Романов[1], И.А. Носиков[2], С.А. Пулинец[3], М.М. Могилевский[3], Н.Г. Котонаева[1], М.В. Клименко[2], А.В. Тимченко[2], И.С. Янковский[2]

[1]Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, г. Москва, Россия
[2]Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Калининград, Россия,
e-mail: ianosikov@wdizmiran.ru
[3]Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

RESULTS OF LAERT (IONOSFERA-M SPACECRAFT) – PARUS-A (ELEKTROUGLI, KALININGRAD) TRANSIONOSPHERIC RADIO SOUNDING

I.V. Romanov[1], I.A. Nosikov[2], S.M. Pulinets[3], M.M. Mogilevskii[3], N.G. Kotonaeva [1], M.V. Klimenko[2], A.V. Timchenko[2], I.S. Yankovsky[2]

[1]Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russia
[2]West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences (RAS), Kaliningrad, Russia,
e-mail: ianosikov@wdizmiran.ru
[3] Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

Аннотация. С 2025 г. в рамках проекта «Ионозонд» проводятся регулярные наблюдения методом прямого и обратного трансионосферного радиозондирования (ТИЗ). Первые эксперименты по синхронизации бортового ионозонда «ЛАЭРТ» космических аппаратов «Ионосфера-М» с наземными ионозондами «Парус-А» сети станций ФГБУ «ИПГ» были осуществлены в октябре 2025 г. В ходе эксперимента были получены ионограммы (ВЗ) с характерными следами ТИЗ одновременно на ионосферной станции «Электроугли» (Московская обл.) и в Калининградской магнитно-ионосферной обсерватории ИЗМИРАН (Калининградская обл.). В настоящее время ТИЗ осуществляется ежемесячно на постоянной основе. В работе рассматриваются особенности данных наблюдений в зависимости от геометрии эксперимента и гелиогеофизических условий.

Ключевые слова: проект «Ионозонд», КА «Ионосфера-М», трансионосферное радиозондирование, ионозонд, мониторинг, космическая погода.

Abstract. Since 2025, regular observations have been conducted under the Ionozond project using the method of direct and reverse transionospheric radio sounding (TIS). The first practical synchronization experiments between the LAERT ionosonde onboard the Ionosfera-M spacecraft and the PARUS-A ground-based ionosondes of the IAP station network were carried out in October, November and December 2025. During these experiments, vertical incidence ionograms exhibiting characteristic TIS traces were obtained simultaneously at the Elektrougli ionospheric station (Moscow region) and the Kaliningrad observatory of IZMIRAN (Kaliningrad region). Currently, TIS measurements are performed on a regular monthly basis. This paper presents the features of the obtained data as functions of experimental geometry and heliogeophysical conditions.

Keywords: Ionozond project, Ionosfera-M spacecraft, transionospheric radio sounding, ionosonde, monitoring, space weather.

ВВЕДЕНИЕ

В 2024 и 2025 гг. в ходе реализации проекта «Ионозонд» была успешно запущена и введена в эксплуатацию группировка геофизических спутников, осуществляющих глобальный мониторинг ионосферы и магнитосферы Земли [Pulinets et al., 2026a]. В ее состав входят четыре спутника «Ионосфера-М», расположенных на солнечно-синхронной орбите с наклонением 98°. Проект «Ионозонд» направлен на решение актуальных задач мониторинга космической погоды и фундаментальных исследований волновых процессов в космической плазме. Научная аппаратура спутников, включающая бортовой ионозонд «ЛАЭРТ», позволяет проводить вертикальное зондирование (ВЗ) ионосферы и получать восстановленные профили электронной плотности, а также работать в режиме высокочастотного радиоспектрометра. Ионозонд ЛАЭРТ работает в диапазоне частот 0.1–20 МГц, включая активный и пассивный режимы. Ионозонд установлен на всех четырех спутниках «Ионосфера-М», что создало систему трехмерного глобального мониторинга ионосферы в реальном времени с четырех различных секторов местного времени.

На основе данных ионозонда ЛАЭРТ проводятся фундаментальные и прикладные исследования ионосферной плазмы, включая разработку современной эмпирической модели ионосферы с учетом верхней части профиля электронной плотности, недоступной для наземных измерений методом вертикального зондирования. Непрерывно пополняемый массив данных внешнего радиозондирования позволяет на качественно новом уровне исследовать экваториальную аномалию, главный ионосферный провал, авроральные и другие явления в широком диапазоне гелиогеофизических условий [Pulinets et al., 2026b]. Среди новых актуальных задач можно выделить изучение таких явлений, как поляризационный джет и STEVE,

представляющих собой узкие высокоскоростные потоки в высокоширотной ионосфере [Sinevich et al., 2026].

В настоящее время проводятся эксперименты по синхронизации бортовых ионозондов ЛАЭРТ как с наземными станциями вертикального зондирования, так и друг с другом [Романов и др., 2026]. Бортовая синхронизация позволяет получать принципиально новые результаты при наклонном зондировании (НЗ) внешней ионосферы. В рамках данной работы приводятся результаты согласованного радиозондирования с использованием бортовых ионозондов ЛАЭРТ и наземных ионозондов «Парус-А» наблюдательной сети ФГБУ «ИПГ». В ходе экспериментов синхронизация осуществлялась со станциями «Электроугли» (Московская обл.) и «Калининград» (Калининградская область, обсерватория КФ ИЗМИРАН). Расстояние между наземными станциями превышает 1100 км, что позволяет одновременно проводить наклонное и трансионосферное зондирование (ТИЗ).

ТРАНСИОНОСФЕРНОЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Трансионосферное радиозондирование осуществляется при условии синхронизации режимов работы ионозондов ЛАЭРТ и Парус-А [Гивишвили и др., 2015; Данилкин, 2017]. Ключевым аспектом является временная синхронизация с использованием ГНСС-приемника. Режим работы во время сеанса зондирования состоит из последовательности радиоимпульсов с заданным шагом по частоте и времени излучения. Для осуществления ТИЗ перед пролетом спутника над наземной станцией выполняется предварительная настройка режима работы «Парус-А», аналогичного режиму работы бортового ионозонда ЛАЭРТ. В наших экспериментах регистрация ТИЗ выполняются в 20-секундном режиме, который соответствует наиболее устойчивой работе ионозонда «Парус-А».

Первые совместные сеансы ТИЗ на трассах «Ионосфера-М» № 1, 2 — ст. «Электроугли» (№ 34504), «Ионосфера-М» №1, 2 — ст. «Калининград» (№ 32508) были получены 20–22 октября 2025 г. На рис. 1, *а* представлены ионограммы, которые подтвердили на практике возможность синхронной работы бортовых и наземных ионозондов в эксперименте. Эксперименты, проведенные 22 октября, позволили получить сигналы ВЗ, НЗ и ТИЗ. Так, на рис. 1, *а* можно отметить наличие вертикального отражения от ионосферы с f_oF2 = 9.25 МГц, сигнала наклонной трассы «Калининград» – «Электроугли» с максимально наблюдаемой частотой 18 МГц, а также сигнала ТИЗ в диапазоне частот выше 14 МГц на дальности 900 км. Заметим, что во время пролета спутника дальность сигнала ТИЗ уменьшается до значения, соответствующего наиболее близкому положению относительно наземной станции. На рис. 1, *б* представлена ионограмма, где сигнал ТИЗ наблюдался на минимально наблюдаемой дальности. Здесь также следует отметить хорошее разделение на О- и Х-моды сигнала ЛАЭРТ.

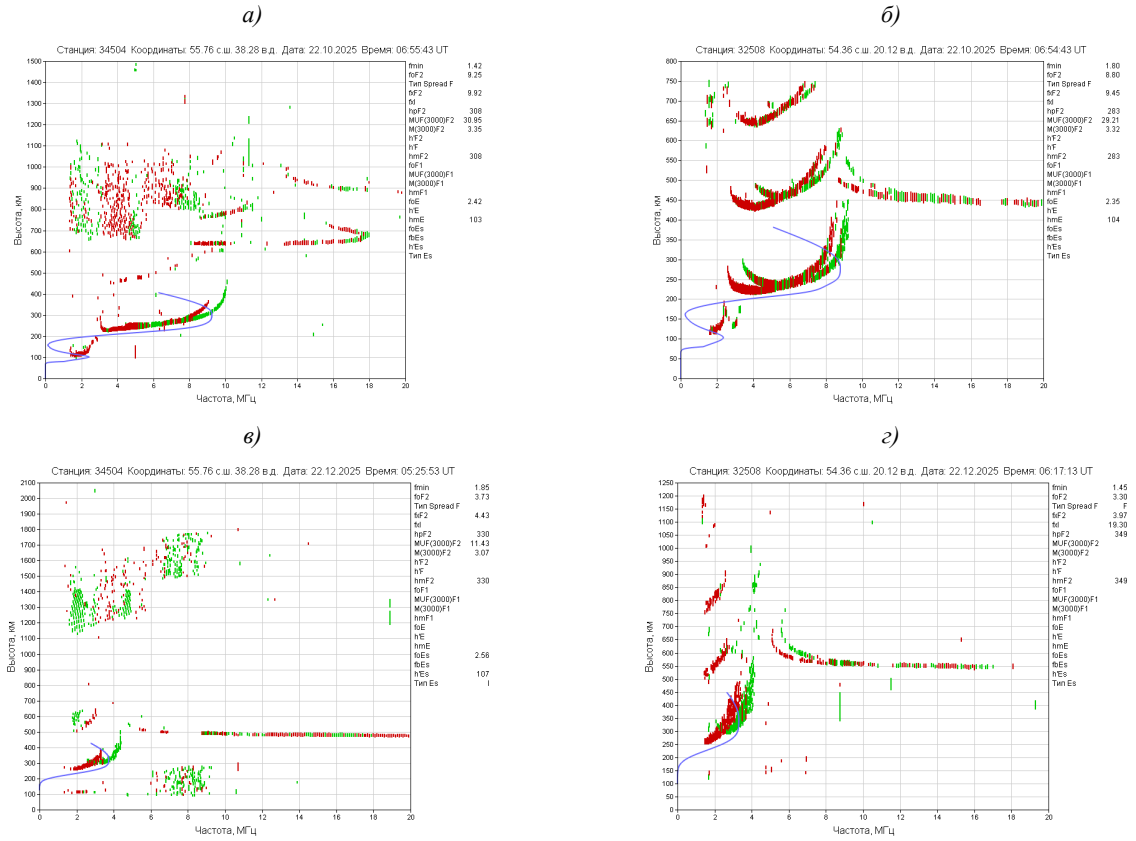

Рис. 1. Ионограммы прямого трансионосферного радиозондирования ионосферы: *а* — КА «Ионосфера-М» № 2 — ст. «Электроугли», 22.10.2025; *б* — КА «Ионосфера-М» № 2 — ст. «Калининград», 22.10.2025; *в* — КА «Ионосфера-М» № 1 — ст. «Электроугли», 22.12.2025; *г* — КА «Ионосфера-М» № 2 — ст. «Калининград», 22.12.2025

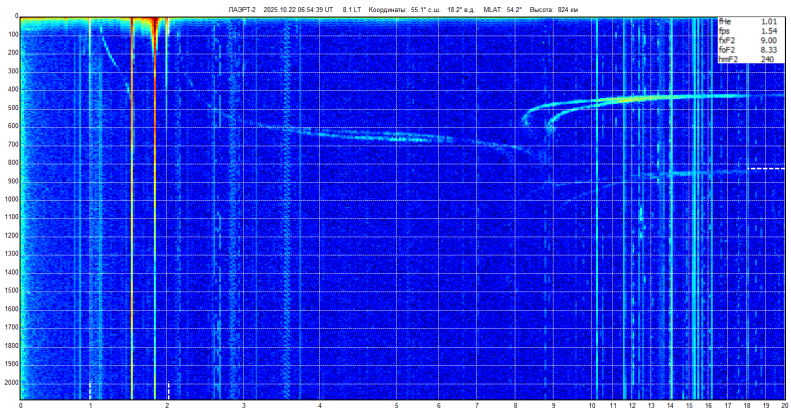

Рис. 2. Ионограмма обратного трансионосферного радиозондирования ионосферы: КА «Ионосфера-М» № 2 — ст. «Калининград», 22.10.2025

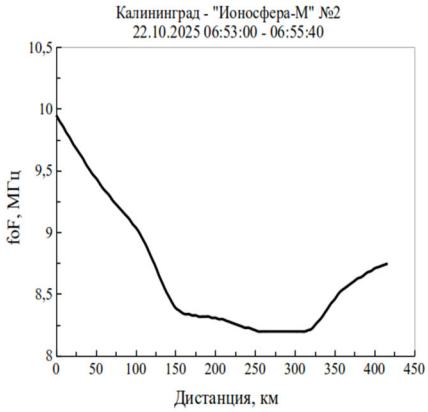

Рис. 3. Профиль f_oF по данным ОТИЗ на ст. «Калининград», 22.10.2025

Регулярные сеансы ТИЗ позволяют наблюдать различные модовые комбинации. Так, на рис. 1, *в*, *г* представлены ионограммы в предрассветные часы в день зимнего солнцестояния. В результате пролета КА «Ионосфера-М» № 2 над ст. «Калининград» на ионограммах ТИЗ наблюдается многолучевое распространение на частотах в окрестности критической частоты главного ионосферного максимума (см. рис. 1, *г*). Причиной многолучевости может служить положение спутника в освещенной области, тогда как наземный ионозонд находится в зоне тени. Наличие значительных широтно-долготных градиентов электронной плотности приводит к формированию дополнительной моды сигнала на короткий период прохождения терминатора и геометрического положения быстролетящего спутника.

На рис. 2 представлен пример ионограммы обратного трансионосферного радиозондирования (ОТИЗ) пролета КА «Ионосфера-М» № 2 над ст. «Калининград» 22.10.2025 в 06:54:40. Следует отметить совпадение значений критической частоты, измеренных методом вертикального радиозондирования на ст. «Калининград», и данных f_oF, измеренных методами прямого ТИЗ и внешнего радиозондирования (ВнЗ), что можно объяснить пролетом космического аппарата «точно» над ст. «Калининград». На «следах» принятого сигнала наземного передатчика вблизи критических частот f_oF и f_xF различим характерный изгиб, который можно объяснить наличием положительного возмущения в области пролета космического аппарата [Данилкин и др., 2017]. На рис. 3 представлен горизонтальный профиль распределения по широте критической частоты f_oF, построенный по результатам сеансов ОТИЗ. Изгиб «следов» на ионограммах ОТИЗ можно объяснить наличием значительного перепада (~ 1 МГц / 100 км).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синхронизация режимов работы бортового ионозонда «ЛАЭРТ» и наземных ионозондов «Парус-А» позволяет проводить наблюдения методом прямого и обратного трансионосферного радиозондирования. В настоящее время сеансы трансионосферного зондирования проводятся на регулярной основе ежемесячно. В ходе экспериментов успешно реализовано одновременное вертикальное, наклонное и трансионосферное зондирование, что обеспечивает получение наиболее полной информации о параметрах ионосферы и условиях распространения радиоволн.

Постобработка данных (Клименко М.В., Носиков И.А., Тимченко А.В., Янковский И.С.) выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 26-12-00513, https://rscf.ru/project/ 26-12-00513/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гивишвили Г.В., Данилкин Н.П., Гудков О.И. и др. Трансионосферное радиозондирование на основе бортового ионозонда «ЛАЭРТ» и наземного ионозонда "ПАРУС-А" // Гелиогеофизические исследования. 2015. №. 12. С. 21–28.

Данилкин Н.П. Трансионосферное радиозондирование (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57, № 5. С. 543-554. DOI 10.7868/S0016794017050042.

Данилкин Н.П., Жбанков Г.А., Журавлев С.В., Котонаева Н.Г. Трансионосферное радиозондирование с учетом отражения радиоволн от Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 54, № 4. С. 508–519. DOI 10.7868/S0016794014040130.

Романов И.В., Котонаева Н.Г., Носиков И.А. Обратное трансионосферное радиозондирование: ионосферные станции сети Росгидромета – КА «Ионосфера-М» // Двадцать первая ежегодная конференция Физика плазмы в Солнечной системе 9-13 февраля 2026. Сборник тезисов докладов. ИКИ РАН, 2026. С. 162.

Pulinets S., Kotonaeva N., Depuev V., et al. Ionospheric response to the geomagnetic storm of 12–14 November 2025, based on multi-parameter analysis of data from the LAERT topside sounder // Atmosphere. 2026a. V. 17, N 2. C. 150.

Pulinets S., Tsybulya K., Depuev V., et al. Ionospheric topside sounding revival // Adv. Space Res. 2026b. V. 77. P. 2574–2587.

Sinevich A.A., Chernyshov A.A., Pulinets S.A., et al. First study of polarization jet/SAID using onboard ionosonde on Ionosfera-M satellite // Adv. Space Res. 2026. V. 77, N 3. P. 3618–3627. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.11.097.