

**Сравнение результатов ионосферного радиозондирования с бортов космических аппаратов «Ионосфера-М» с данными наземного радиозондирования в части определения критической частоты и высоты максимума слоя F2**

Ю.В. Гришина<sup>1</sup>, Н.Г. Котонаева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова

129128, г. Москва, ул. Ростокинская, д.9

E-mail: kotonaeva@ipg.geospace.ru

*Проведено сравнение результатов внешнего радиозондирования ионосферы ионозондом ЛАЭРТ с борта космических аппаратов (КА) «Ионосфера-М» в части определения критической частоты и высоты максимума слоя F2 ионосферы с данными аналогичных наблюдений наземными ионозондами «Парус-А», расположенными в ионосферных наблюдательных пунктах «Москва» (г. Троицк) и «Ростов» (г. Ростов-на-Дону). Проведена стыковка высотных профилей внешнего и наземного вертикального радиозондирования. Рассчитаны статистические характеристики отклонений полученных значений.*

*Ключевые слова:* внешнее зондирование ионосферы, ИОНОСФЕРА-М, критическая частота слоя F2

**Comparison of the topside sounding data from the IONOSPHERE-M satellites and ground-based radio sounding data in terms of determining the critical frequency and maximum altitude of the F2 layer**

Ju.V. Grishina, N.G. Kotonaeva

*Institute of Applied Geophysics, Moscow*

*The results of external ionosphere radio sounding by the LAERT ionosonde from the board of the Iosfera-M spacecrafts (KA) in terms of determining the critical frequency and the height of the maximum of the F2 ionosphere layer were compared with the data of similar observations by the ground-based Parus-A ionosondes located in the ionosphere observation stations "Moskva" (Troitsk) and "Rostov" (Rostov-on-Don). The altitude profiles of external and ground-based vertical radio sounding were docked. Statistical characteristics of the deviations of the obtained values have been calculated.*

*Keywords:* topside sounding, IONOSPHERE-M, critical frequency of the F2 ionosphere layer

**Введение**

Сравнение различных, часто сильно непохожих, исследований по определению параметров ионосферы особенно ценно для убежденности в конечной правильности геофизического результата. Вертикальное радиозондирование ионосферы снизу имеет своей целью определение высотного профиля концентрации электронов в ионосфере от ее начала до высоты максимума концентрации электронов – foF2. Внешнее радиозондирование в свою очередь имеет цель определение высотного профиля концентрации электронов в ионосфере от высоты максимума концентрации электронов до высоты космического аппарата (КА). Стыковка профилей концентрации электронов позволит оценить распределение концентрации электронов в целом во всей ионосфере.

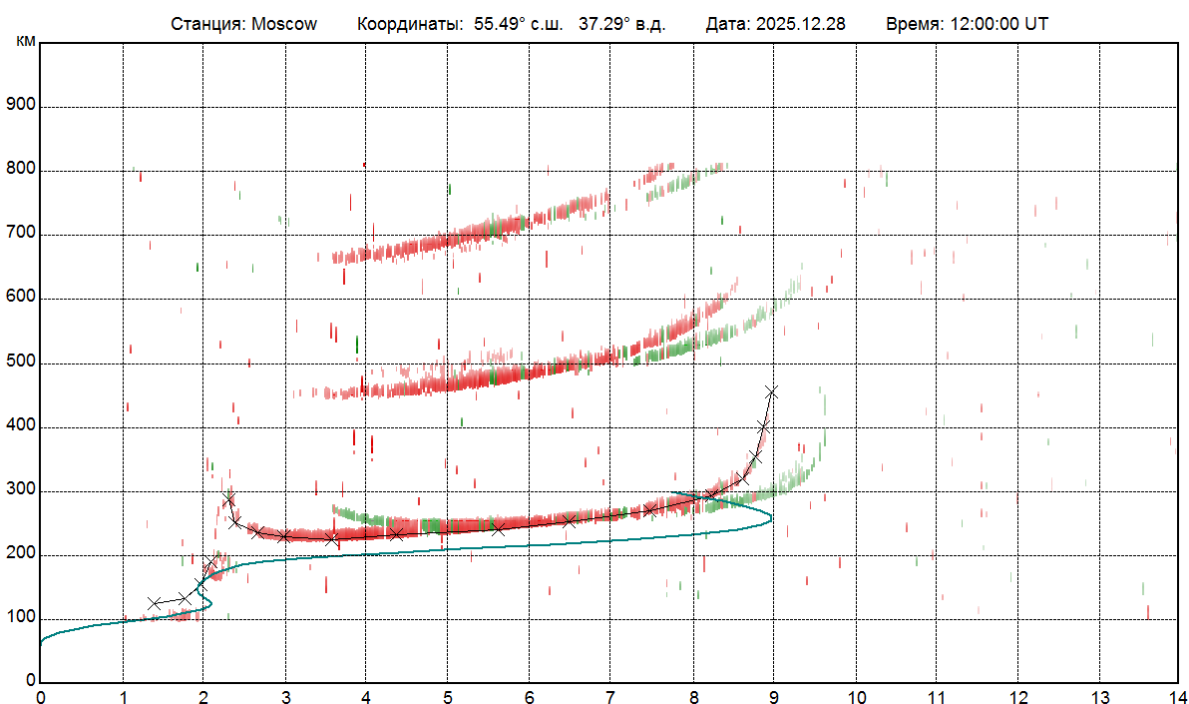
В 2024-2025 г. был проведен запуск 4-х космических аппаратов (КА) «ИОНОСФЕРА-М» (Ион-М) космической системы «ИОНОЗОНД». На всех спутниках установлен ионозонд внешнего радиозондирования ЛАЭРТ. Наличие ионозондов внешнего радиозондирования на орбитах расширило пространственные возможности ионосферного мониторинга. Доступными к непосредственным наблюдениям таких

параметров, как плазменная частота в максимуме ионосферы и его высота, стали все районы земного шара.

Вопросы применимости метода внешнего радиозондирования и совместимости его с методами наземного вертикального радиозондирования (ВЗ) поднимались, начиная с первого появления ионозонда в космосе на КА Aluette 1. В работе [1] Jackson впервые сравнил данные наземного и внешнего радиозондирования, состыковал высотные профили концентрации электронов до максимума концентрации, полученные на наземных ионозондах (станции Fort Belovir и Wallops Island), и профили выше максимума концентрации электронов, полученные Aluette 1. Он показал совпадения результатов по критической частоте слоя F2 ( $f_oF2$ ) и возможные отличия до 50 км по высоте максимума, связанные с небольшими наклонами при распространении зондирующих лучей.

### 1. Сопоставление профилей плазменных частот ионосферы наземных и бортовых ионозондов

На рис. 1 приведена типичная ионограмма вертикального радиозондирования ионозонда «Парус-А», полученная 28.12.2025 г. в 12:00 UT на ионосферной станции Москва. Ионограмма обработана оператором. На рисунке виден след обводки отражения от ионосферы обыкновенной компоненты радиозондирующего сигнала. Критическая частота слоя F2 ( $f_oF2$ ) составила 9 МГц. Алгоритм обработки ионограмм по выявленному отражению рассчитал высотный профиль плазменной частоты ( $f_h$ -профиль) (тонкая бирюзовая линия) и определил, что высота максимума слоя F2 ( $h_mF2$ ) составила 266 км. Построение профиля заканчивается на высоте  $h_mF2$  и модельно продлевается до 300 км.



**Рис. 1. Ионограмма, полученная 28.12.2025 г. 12:00:00 UT ионозондом Парус-А в наблюдательном пункте Москва на широте 55.49°N, долготе 37.29°W.**

Время получения ионограммы подобрано таким образом, что над этой точкой проводил радиозондирование бортовой ионозонд на КА Ион-М № 4. На рис. 2 приведена соответствующая ионограмма. Критическая частота  $f_oF2$  так же составила

9 МГц. Ионограмма также была обработана оператором и по обработке построен fh-профиль верхней ионосферы – красная линия. Отсчет высот идет от высоты расположения КА.

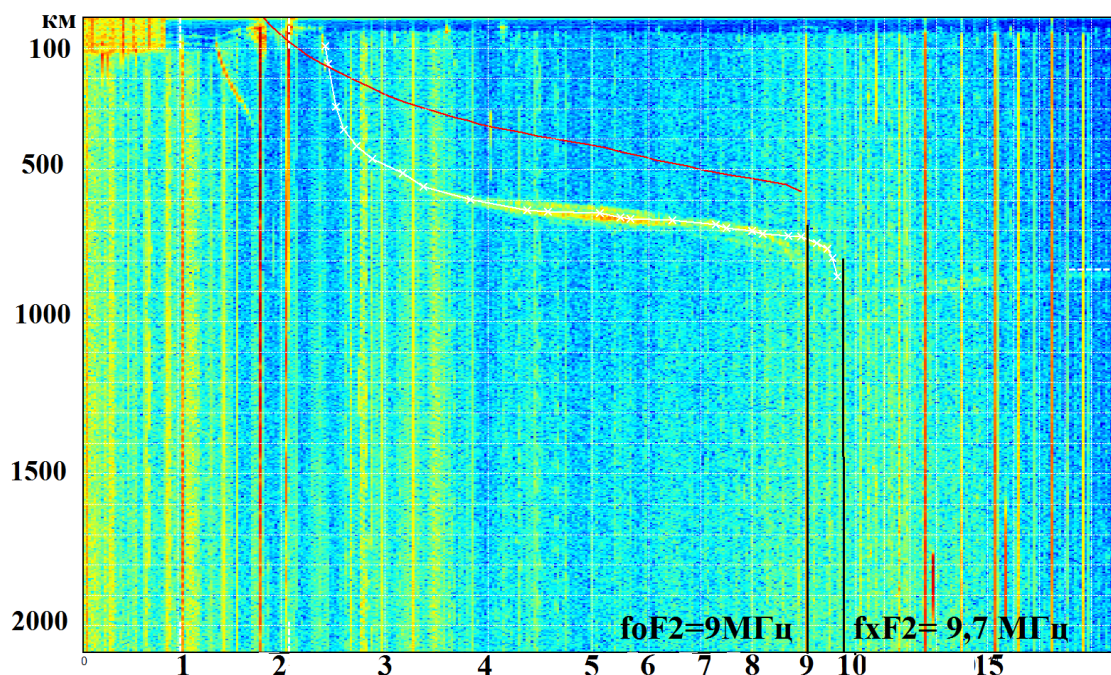


Рис. 2. Ионограмма, сгенерированная ионозондом ЛАЭРТ -4 28.12.2025 11:47:50 UT на широте 55.3 N и долготе 37.3W, высоте 829 км.

Объединяя построенные профили, получим fh-профиль ионосферы в целом (рис.3). Отметим, что модельный профиль до 300 км, изображенный на наземной ионограмме, совпал с построенным по бортовой ионограмме.

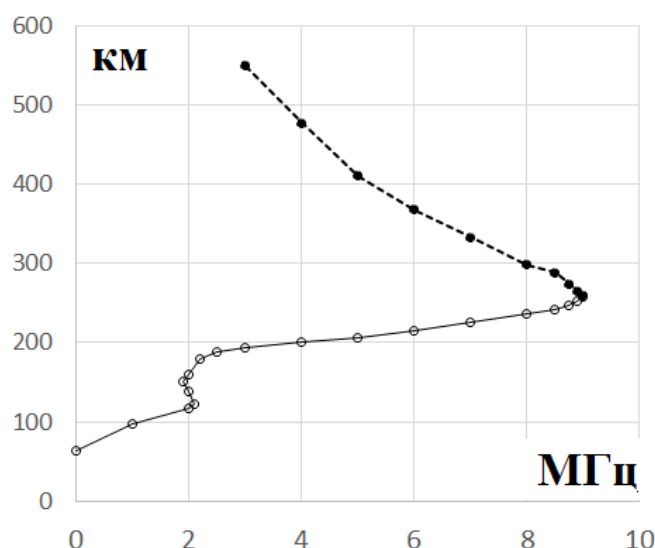
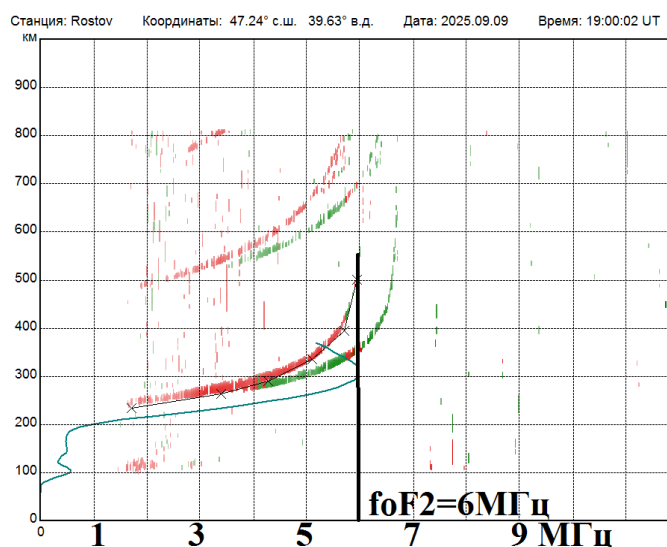


Рис. 3. Сомкнутый fh-профиль. Сплошная линия по результатам ионограммы рис.1, пунктирная линия по ионограмме рис.2.

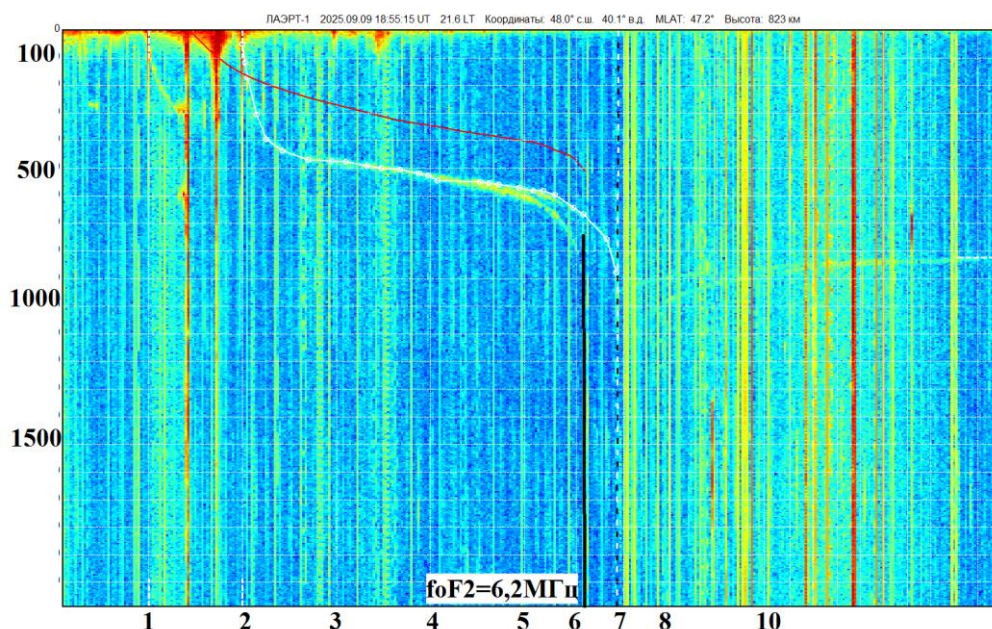
Удачный выбор близких координат и времени зондирования, а также спокойная ионосфера позволили получить полное смыкание высот и плазменных частот, полученных во время двух экспериментов.

Рассмотрим ионограмму, полученную на наблюдательном пункте «Ростов» (Ростов-на-Дону) (рис.4). По ионограмме  $foF2 = 6$  МГц. Рассчитанная высота максимума  $hmF2 = 308$  км.

На рис. 5 на ионограмме КА Ион-М №1 над станцией Ростов зарегистрирована  $foF2=6,2$  МГц. Рассчитанная высота максимума  $hmF2 = 311$  км.



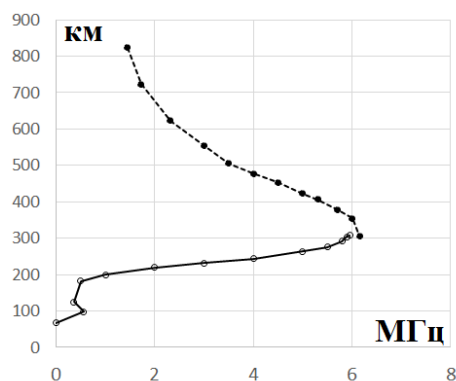
**Рис. 4. Ионограмма, полученная 9.09.2025 г. 19:00:02 UT ионозондом Парус-А в наблюдательном пункте Ростов на широте 47.24°N, долготе 39.63°W.**



**Рис. 5. Ионограмма, сгенерированная ионозондом ЛАЭРТ -1 9.09.2025 18:55:15 UT на широте 48 N и долготе 40. 1W, высоте 823 км.**

Объединяя построенные профили получим  $f_h$ -профиль ионосферы в целом (рис.6). Незначительные отличия в определении критической частоты, не вызвали различий в определении высоты максимума.





**Рис. 6. Сомкнутый f<sub>h</sub>-профиль. Сплошная линия по результатам ионограммы рис.4, пунктирная линия по ионограмме рис.5.**

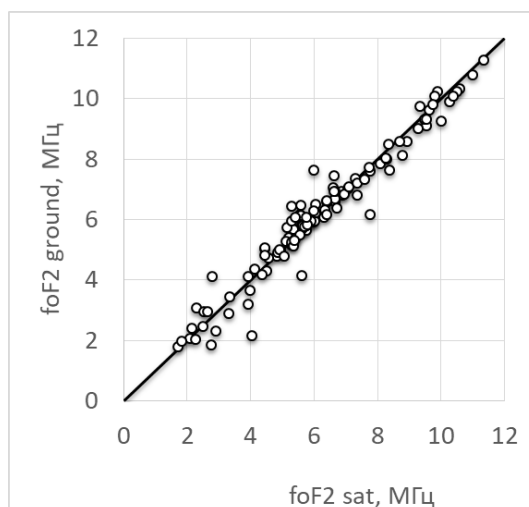
## **2. Сравнение результатов мониторинга ионосферы с использованием наземного и космического сегмента ионосферной сети Росгидромета**

Для верификации данных внешнего радиозондирования с Ион–М было проведено исследование по сравнению данных о foF2, полученных при пролете над наземными ионосферными наблюдательными пунктами «Москва» (Троицк) и «Ростов» (Ростов-на-Дону). Рассматривался массив данных за первый год эксплуатации КА - 2025 год. Наземные измерения ионозондами «Парус» выполнялись с дискретностью 15 минут. Спутниковые измерения foF2 регистрировались с временным шагом 10 секунд. Для сопоставления выбирались спутниковые значения foF2, зарегистрированные в интервале времени, ближайшем к моменту наземного измерения. Из массива бортовых наблюдений выбирались случаи, когда расположение КА отличалось от расположения наземного пункта не более чем на один градус по широте и долготе.

На рис. 7 представлено парное сопоставление значений, полученных на КА (foF2 sat) и на Земле (foF2 ground), относительно линии идеального совпадения

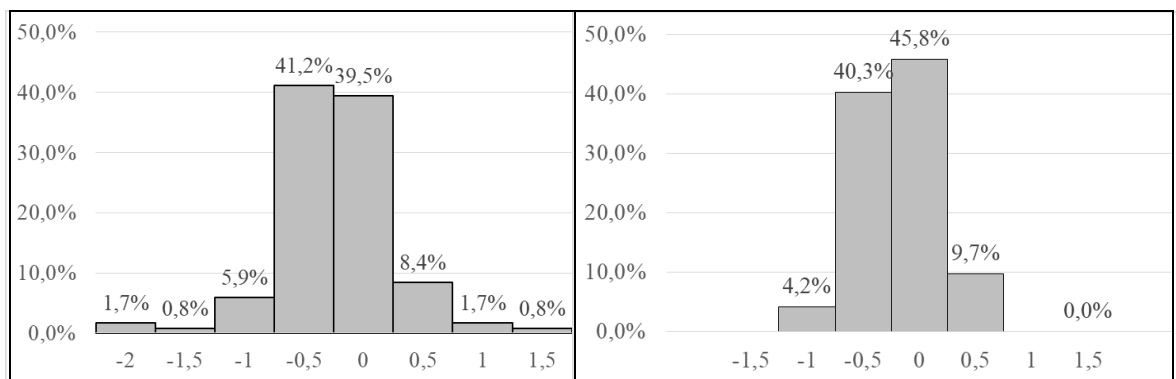
$$\text{foF2 ground} = \text{foF2 sat}.$$

Для станции Москва при выборке 119 выборки получено, что абсолютная ошибка приблизительно равна нулю, среднеквадратичное отклонение,  $\sigma = 0,474$  МГц, коэффициент линейной корреляции  $r = 0,976$ . Для станции Ростов при выборке 72 абсолютная ошибка составила менее 0,1 МГц, среднеквадратичное отклонение  $\sigma = 0,367$  МГц, коэффициент линейной корреляции  $r = 0,987$ .



**Рис. 7. Сопоставление значений foF2 sat и foF2 ground для станции "Москва". Сплошной линией показана линия идеального совпадения**

Представление результатов в виде гистограмм позволяет визуально оценить структуру распределения отклонений  $\Delta f_oF2$ , степень их концентрации вблизи нулевых значений и вероятность возникновения значительных расхождений. На рис. 8 представлены гистограммы распределения разности  $\Delta f_oF2 = f_oF2_{\text{ground}} - f_oF2_{\text{sat}}$  для Москвы и Ростова. В обоих случаях распределение носит выражено центрированный характер: более 80% наблюдений сосредоточены в интервале от  $-0,5$  до  $0,5$  МГц.



**Рис. 8. Распределение отклонений  $\Delta f_oF2$  при пролетах КА Ионосфера-М над  
а) Москвой и б) Ростовом**

### Выводы

Проведенное сравнение спутниковых измерений критической частоты слоя F2 по наземным наблюдениям на среднеширотных наблюдательных пунктах Москва и Ростов показала, что наблюдения с борта КА на высоте 820 км и на традиционных наземных пунктах ионосферных наблюдений не имеют абсолютных ошибок, а среднеквадратичные отклонения составили менее 0,4 МГц.

Объединение высотных профилей плазменной частоты показывает удовлетворительное совпадение по параметрам максимума слоя F2.

Таким образом, достигнуто сопряжение двух видов исследования ионосферы методами наземного и внешнего радиозондирования. Включение в систему мониторинга ионосферы ионозондов бортового базирования позволяет расширить традиционный мониторинг ионосферы с Земли на всю территорию земного шара, включая труднодоступные участки суши и акватории мирового океана.

### Литература

1. T. John E. Jackson Comparisons Between Topside and Ground-Based Soundings// Proceedings of the IEEE. – 1969. – V. 57. – N. 6. – P.976-985.