

## **Сравнение данных внешнего зондирования в области Экваториальной Аномалии на спутниках Интеркосмос-19 (1979-1981) и ИОНОСФЕРА-М (2025-2026)**

А.Т. Карпачев<sup>1</sup>, Н.Г. Котонаева<sup>2</sup>, К.Г. Цыбуля<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской Академии Наук*  
108840, г. Троицк, Калужское шоссе, д.4

E-mail: karp@izmiran.ru

<sup>2</sup> *Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова*  
129128, г. Москва, ул. Ростокинская, д.9

E-mail: kotonaeva@ipg.geospace.ru

*Проведено сравнение данных внешнего зондирования ионосферы, полученных на 4-х спутниках «ИОНОСФЕРА-М» в 2025-2026 г и спутнике Интеркосмос-19 в 1979-1981 г. Для этого использованы данные с ионозондов ЛАЭРТ за период 25-28 декабря 2025 г. Данные относятся к спокойным ( $K_p=1-3+$ ) условиям высокой солнечной активности  $F10.7=170-185$  в секторах местного времени 03 (15) LT и 09 (21) LT. Данные сравниваются с моделью Экваториальной Аномалии, построенной в ИЗМИРАН по данным Интеркосмос-19 [1], для высокой солнечной активности  $F10.7=200$ .*

*Ключевые слова: внешнее зондирование, Интеркосмос-19, ИОНОСФЕРА-М, экваториальная аномалия*

## **Comparison of the topside sounding data in the Equatorial Anomaly region from the Intercosmos-19 (1979-1981) and IONOSPHERE-M (2025-2026) satellites**

A.T. Karpachev<sup>1</sup>, N.G. Kotonaeva<sup>2</sup>, K.G. Tsybulya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *IZMIRAN, Moscow.*

<sup>2</sup> *Institute of Applied Geophysics, Moscow*

*The comparison of topside ionosphere sounding data obtained from four IONOSPHERE-M satellites in 2025-2026 and onboard the Intercosmos-19 satellite in 1979-1981. The data from the LAERT ionosondes for the period December 25-28, 2025 were used. The data relate to quiet ( $K_p=1-3+$ ) conditions of high solar activity  $F10.7=170-185$  in the local time sectors of 03 (15)LT and 09 (21)LT. The data are compared with the Equatorial Anomaly model constructed in IZMIRAN based on the Intercosmos-19 data [1] for high solar activity  $F10.7=200$ .*

*Keywords: topside sounding, Intercosmos-19, IONOSPHERE-M, equatorial anomaly*

### **Введение**

В 2024-2025 г. был проведен запуск 4-х космических аппаратов (КА) «ИОНОСФЕРА-М» (Ион-М) космической системы «ИОНОЗОНД». Спутники обращаются на около круговой (820 км) полярной (98.8°) солнечно-синхронной орбите. Спутники попарно расположены в секторах местного времени 03 (15) LT и 09 (21) LT и разнесены на орбите на 180°. На всех спутниках установлен ионозонд внешнего радиозондирования ЛАЭРТ. Зондирование производится со скважностью 10 сек, поэтому объем телеметрической информации за одни сутки достигает 6.3 Гб. Данные принимаются на приемных центрах в Москве, Новосибирске и Хабаровске. При таком большом объеме информации необходимо обеспечить автоматическую обработку ионограмм внешнего зондирования. Она производится с помощью алгоритма, разработанного в Институте прикладной геофизики (ИПГ). Ионограммы с высоким уровнем шумов обрабатываются оператором вручную. Цель настоящей работы оценить насколько адекватно автоматическая обработка ионограмм воспроизводит структуру

экваториальной аномалии (ЭА) и сравнить ее со структурой ЭА, полученной ранее по данным Интеркосмос-19 (ИК-19) для очень высокой солнечной активности (СА). Для сравнения были использованы данные по критической частоте слоя F2 ( $f_oF2$ ) КА Ион-М для 25–28 декабря 2025 г., когда СА была максимально близкой к СА в период работы ИК-19. Сравнение проводилось для 15 LT и 21 LT, когда ЭА достигает дневного и вечернего максимума развития [2].

### 1. Экваториальная аномалия в секторе местного времени 15 LT

Наиболее качественные ионограммы с малым уровнем шумов были получены КА Ион-М 3 и 4 в секторе местного времени 15 LT. На рис. 1 для примера приведена ионограмма, полученная в максимуме северного гребня ЭА. На этой ионограмме наблюдаются две полосы довольно сильных шумов в интервалах 2.7–3.6 МГц и 10.0–13.0 МГц, но они полностью не экранируют следы отражений. Поэтому и частоты отсечки на высоте спутника и критические частоты слоя F2 определяются уверенно. Примерно такого же качества оказались все ионограммы в секторе 15 LT во время спокойных геомагнитных условий (К<sub>p</sub> от 1о до 3+) 25–28 декабря 2025 г.

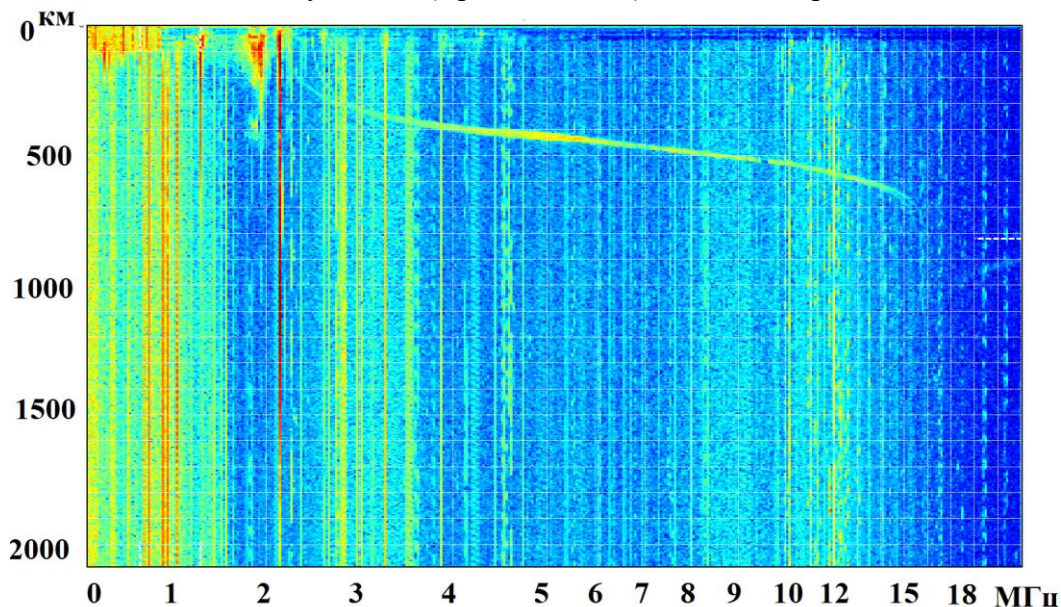
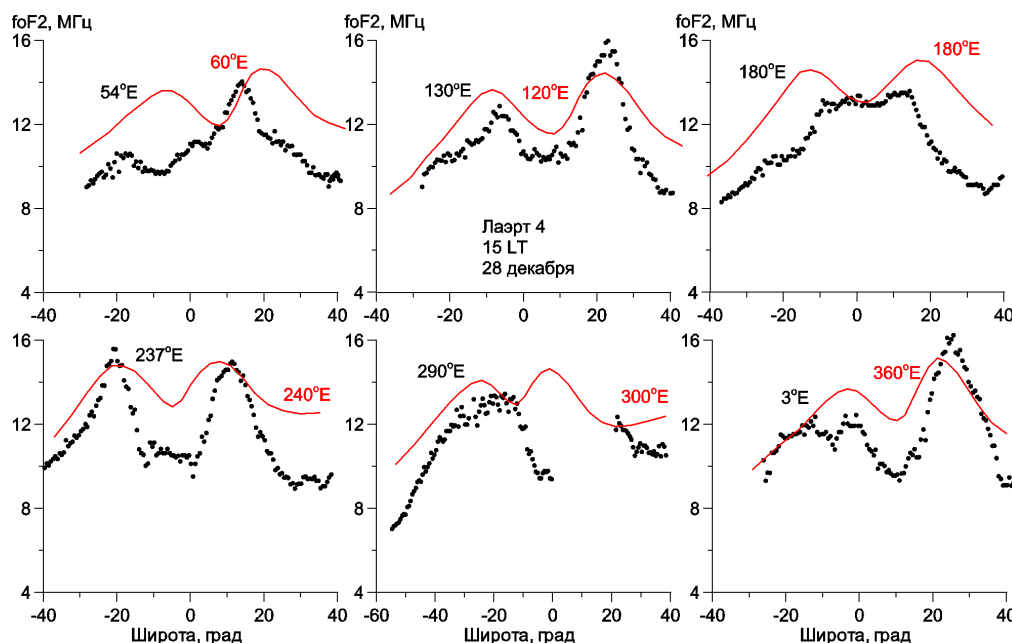


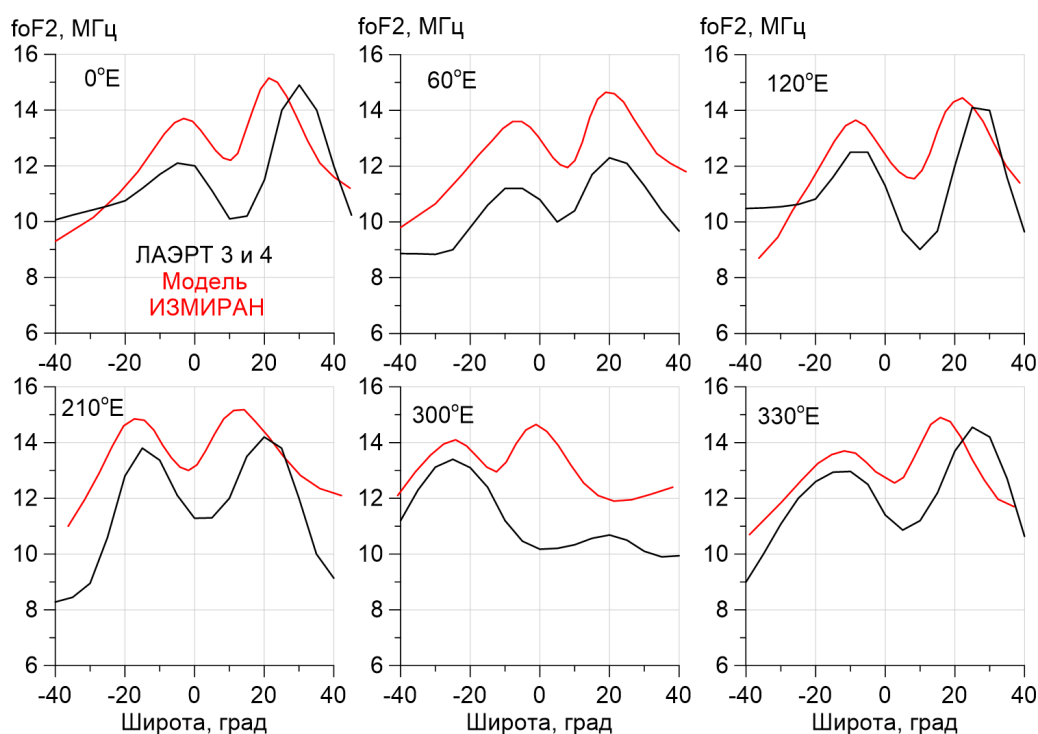
Рис. 1. Ионограмма, полученная 27.12.2025 01:49:27 UT ионозондом ЛАЭРТ 4 в максимуме северного гребня ЭА на широте 16.6°N, долготе 163.2°W, высоте 821 км в 14.9 LT.

На рис. 2 для примера приведено сравнение данных Ион-М 4 с моделью ЭА, построенной по данным ИК-19 для декабря. Сравниваются широтные профили  $f_oF2$  в разных долготных секторах, поскольку характеристики ЭА сильно зависят от долготы. Широтные профили  $f_oF2$  Ион-М 4 отбирались в долготных секторах, максимально близких к модельным долготным секторам. На рис. 2 сравниваются данные Ион-М 4 за один день 28 декабря (СА характеризовалась  $F10.7 = 185$ ) с усредненными для декабря данными ИК-19, когда СА была максимально высокой. Из рисунка видно, что значения  $f_oF2$  в декабре 2025 г. наблюдались систематически ниже, чем по модели ИК-19, которая была построена для СА  $F10.7 = 200$ . Однако широтные вариации  $f_oF2$  по данным Ион-М 4 достаточно гладкие, разброс данных незначительный, что говорит о достаточно высоком качестве автоматической обработки ионограмм внешнего зондирования. В четырех долготных секторах ЭА была более сильно развита в декабре 2025 г., чем в декабре в 1979–1981 г. В долготных секторах 60°E и 180°E ЭА наоборот, была неразвита, но этот факт требует отдельного анализа, который выходит за рамки

работы. В долготном секторе  $300^{\circ}\text{E}$  отсутствуют данные в интервале широт  $0\text{--}22^{\circ}\text{N}$ . Это связано с отключением аппаратуры спутника под действием потока энергичных частиц в максимуме Бразильской магнитной аномалии. В области аномалии магнитное поле Земли сильно ослаблено и энергичные электроны внутреннего радиационного пояса проникают на высоты спутника, нарушая функционирование аппаратуры.



**Рис. 2.** Широтные вариации  $foF2$  по данным ионозонда ЛАЭРТ 4 для 28 декабря 2025 г. в сравнении с моделью ИЗМИРАН (красные кривые) в разных долготных секторах.



**Рис. 3.** Широтные вариации  $foF2$  для 15 LT на разных долготах, усредненные по данным ЛАЭРТ 3 и 4 за 25–28 декабря 2025 г. в сравнении с моделью ИЗМИРАН.

На рис. 3 приведены широтные вариации foF2, усредненные по данным Ион-М 3 и 4 за 25-28 декабря для 15 LT в сравнении с моделью ИЗМИРАН. Хорошо видно, что значения foF2 в декабре 2025 г. в дневной ионосфере были значительно ниже, чем по модели ИЗМИРАН на всех долготах, хотя СА была ненамного ниже. Поэтому количественное сравнение данных невозможно. Что касается качественного согласия, то оно довольно хорошее. Степень развития ЭА (отношение foF2 в максимуме гребня к foF2 в провале) наоборот, немного выше по новым данным. Это вероятно связано с повышенной геомагнитной активностью. При этом положения южного (летнего) гребня практически совпадают, а северный гребень отходит немного дальше от экватора, чем в модели. Плохо согласуются данные только в секторе 300°Е, т.е. в области Бразильской магнитной аномалии. Однако есть возможность этот недостаток устранить на большом массиве данных.

На рис. 4 приведено распределение foF2 в области дневной ЭА по данным Ион-М 3 и 4 (вверху) и ИК-19 (внизу). Данные модели сглажены для декабря в 1979-1981 г., а новые данные усреднены всего за 4 дня в декабре 2025 г., поэтому в них проявляются индивидуальные особенности. Тем не менее, как и было сказано выше, хорошо видно, что качественное согласие долготно-широтных вариаций foF2 весьма высокое. Таким образом, автоматическая обработка данных Ион-М позволяет вполне адекватно воспроизводить структуру ЭА в дневной ионосфере при высокой СА.

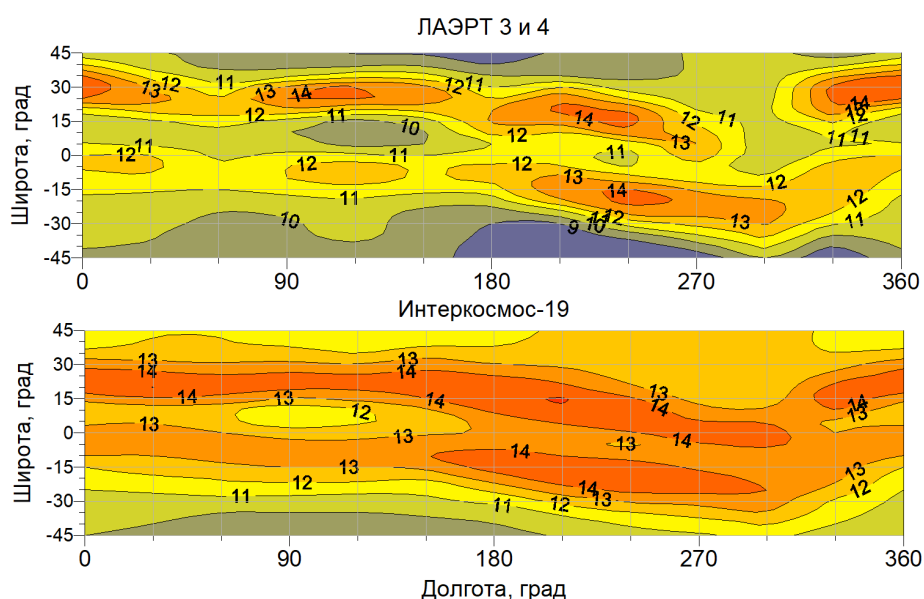
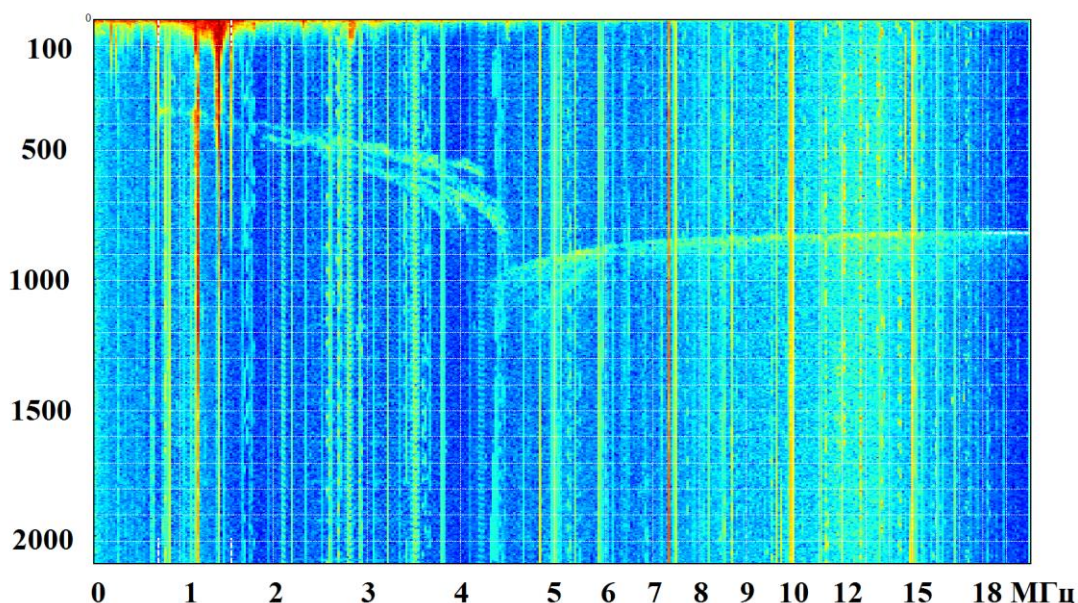


Рис. 4. Распределение foF2 в области ЭА для 15 LT по данным Ион-М 3 и 4 (вверху) и ИК-19 (внизу).

## 2. Экваториальная аномалия в секторе местного времени 21 LT

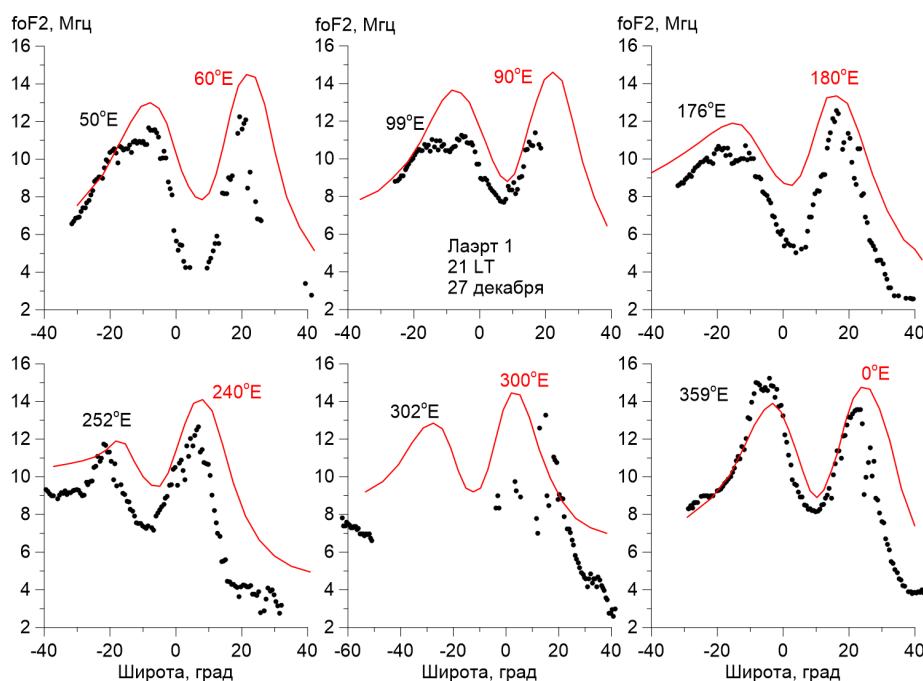
После вечернего (послезаходного) всплеска электрического поля (и соответственно вертикального дрейфа) ЭА получает новый импульс для развития. Слой F2 ионосферы поднимается и резко усиливается генерация неоднородностей, которые приводят к сильному F-рассеянию на ионограммах. Пример такой ионограммы, полученной 27 декабря 2025 г на Ион-М 1 в 21.2 LT, приведен на рис. 5. На ней наблюдаются множественные диффузные следы, при этом основные следы трудно отделить от дополнительных и определить критическую частоту слоя F2. Частоты отсечки на высоте спутника также маскируются сильными шумами. Такие ионограммы может обработать только опытный оператор.





**Рис. 5. Ионограмма, сгенерированная ионозондом ЛАЭРТ 1 27.12.2025 04:04:24 UT на широте 21.6°N и долготе 102.7°W, высота 818 км в 21.2 LT.**

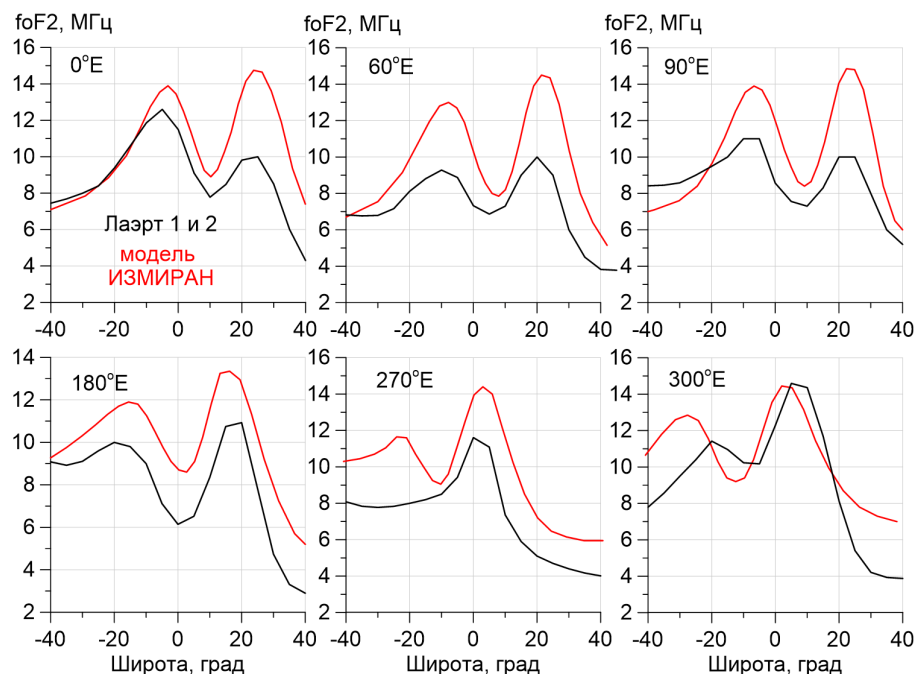
На рис. 6 для примера приведены широтные вариации foF2, полученные ионозондом ЛАЭРТ 1 на разных долготах 27 декабря 2025 г. в секторе местного времени 21 LT. Качество данных безусловно ниже, чем на рис. 2 для 15 LT, тем не менее структура ЭА воспроизводится почти на всех долготах, исключая область Бразильской магнитной аномалии. В данном случае спутник пролетал из северного полушария в южное, поэтому аппаратура отключалась после пролета аномалии. Сектор 90°E также плохо представлен. Причины обсуждаются ниже.



**Рис. 6. Широтные вариации foF2 по данным ЛАЭРТ 1 для 27 декабря 2025 г. в сравнении с моделью ИЗМИРАН в разных долготных секторах.**

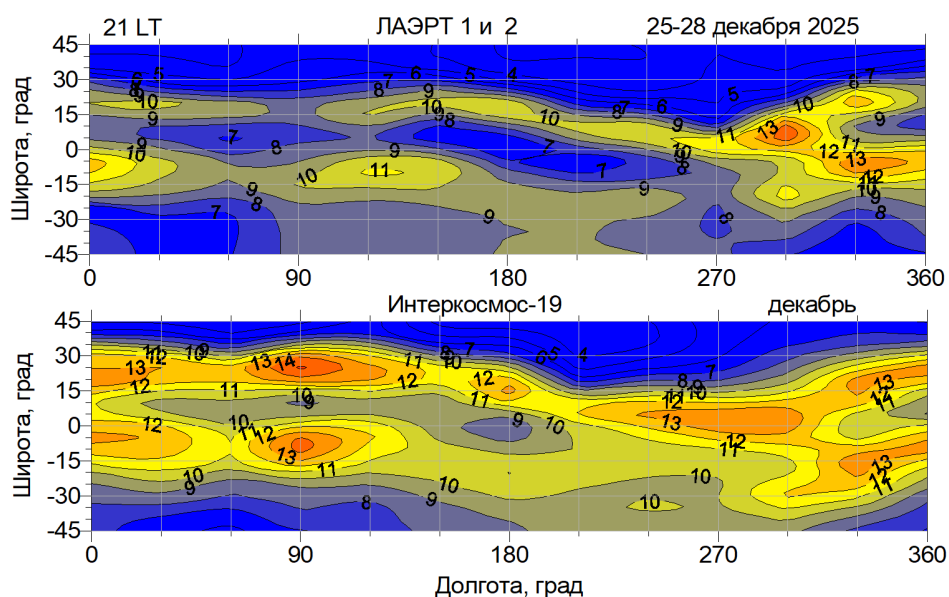
На рис.7 показаны широтные вариации foF2 на разных долготах в секторе местного времени 21 LT, усредненные по данным Ион-М 1 и 2 за четыре дня 25–28 декабря 2025 г.

Несмотря на пониженное качество ионограмм в вечернем секторе, усредненные вариации foF2 довольно гладкие. Значения foF2, так же, как и днем, намного ниже, чем по модели ИЗМИРАН. Но в отличие от дневных условий, ЭА вечером менее развита, чем по данным ИК-19 для F10.7 = 200. Положения обоих гребней практически совпадают. Южный гребень не воспроизводится в области Бразильской магнитной аномалии, что уже было видно на рис. 6. В целом качественное согласие данных довольно высокое.



**Рис. 7. Широтные вариации foF2 для 21 LT на разных долготах, усредненные по данным ЛАЭРТ 1 и 2 за 25–28 декабря 2025 г. в сравнении с моделью ИЗМИРАН.**

На рис. 8 показано распределение foF2 для 21 LT, полученное по данным ЛАЭРТ 1 и 2 25-28 декабря 2025 г. и Интеркосмос-19 в декабре 1979-1981 г.



**Рис. 8. Распределение foF2 в области ЭА для 21 LT по данным Ион-М 1 и 2 (вверху) и Интеркосмос-19 (внизу).**

Из сравнения LT-карт на рис. 8 видно, что значения foF2, измеренные ионозондами ЛАЭРТ 1 и 2, намного меньше, чем измеренные на спутнике ИК-19. Долготно-широтные вариации в принципе подобны, в частности, положения гребней согласуются хорошо. Однако это подобие довольно сильно нарушается в области Бразильской магнитной аномалии и в долготном секторе 90°E, где ЭА по данным ИК-19 лучше всего развита практически весь день. На рис. 9 приведена ионограмма, полученная 25 декабря 2025 г. ионозондом ЛАЭРТ 1 на широте 20.1°N и долготе 93.9°E. Она отличается крайне высоким уровнем шумов во всем диапазоне частот, которые почти полностью экранируют следы отражений и не позволяют определить частоты отсечки и критическую частоту слоя F2. Это типичная ситуация при зондировании над Китаем. Причины этого выясняются. Для сравнения на рис. 10 показана ионограмма, полученная спутником ИК-19 над Кубой. Она совершенно лишена шумов, даже вблизи критической частоты.

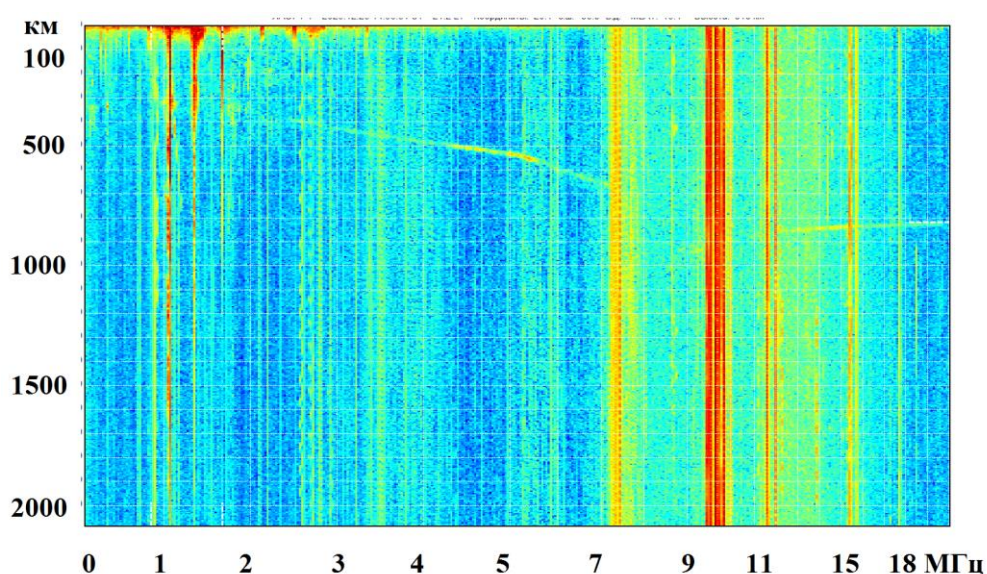


Рис. 9. Ионограмма, сгенерированная ионозондом ЛАЭРТ 1 25.12.2025 14:56:51 UT на широте 20.1°N, долготе 93.9°E, высоте 818 км в 21.2 LT.

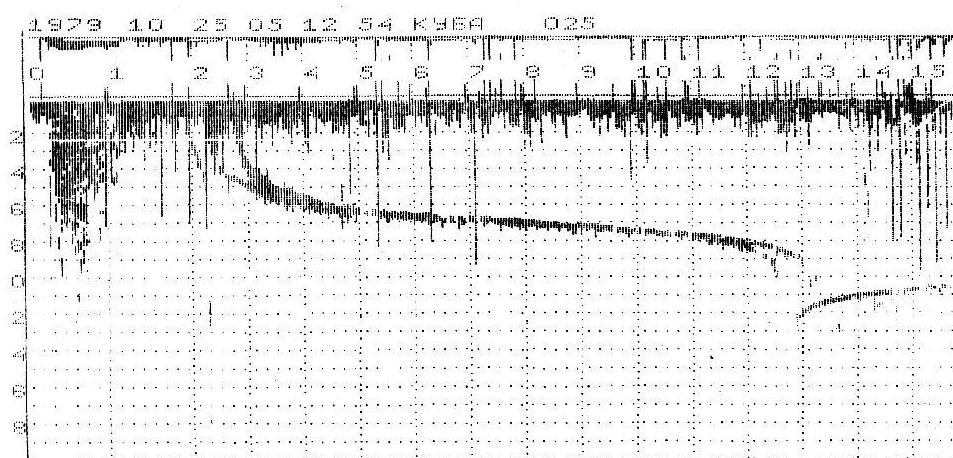


Рис. 10. Ионограмма, полученная на спутнике Интеркосмос-19 над Кубой 25 октября 1979 г.

## **Выводы**

1. Значения foF2 по данным ионозонда ЛАЭРТ были получены в основном посредством автоматической обработки ионограмм внешнего зондирования согласно алгоритму, разработанному в Институте Прикладной Геофизики.
2. Алгоритм позволяет обработать около 85% ионограмм в дневном секторе 15 LT и меньше в вечернем секторе 21 LT, где F-рассеяние гораздо сильнее. В целом автоматическая обработка позволяет вполне адекватно описывать структуру экваториальной аномалии в терминах foF2.
3. Значения foF2, полученные по данным 4-х ионозондов ЛАЭРТ при F10.7 = 170-185, оказались намного ниже, чем по данным ИК-19 при F10.7 = 200.
4. Степень развития экваториальной аномалии по новым данным оказалась в среднем несколько выше в 15 LT и ниже в 21 LT.
5. В области Бразильской магнитной аномалии из-за технических ограничений работы ионозонда объем информации для сравнения недостаточен, над Китаем получение информации ограничено из-за сильных шумов на ионограммах.

## **Литература**

1. Карпачев А.Т., Пустовалова Л.В. 2022. Модель экваториальной аномалии в foF2 по данным ИСЗ Интеркосмос-19 для высокой солнечной активности // Геомагнетизм и Аэронавигация, 2022. Т. 62, № 2, С. 227–238, 10.31857/S0016794022020109.
2. Карпачев А.Т. Суточные и долготные вариации экваториальной аномалии для зимнего солнцестояния по данным ИСЗ Интеркосмос-19 // Геомагнетизм и аэронавигация. 2021. Т. 61. № 1. С. 29–43. doi:10.31857/S0016794021010065.