

УДК 550.388.2

АПРОБАЦИЯ МЕТОДА РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ С НИЗКИХ ВЫСОТ КАК МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ ВДОЛЬ ОРБИТЫ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСФЕРЫ

© 2012 г. Н. Г. Котонаева, Д. В. Давиденко

ФГБУ Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова, Росгидромета г. Москва
e-mail: kongt@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.05.2011 г.
После доработки 29.12.2011 г.

В работе представлены сопоставления значений критических частот, определенных ионозондом орбитального комплекса (ОК) “Мир” и наземных автоматических ионосферных станций в различных районах мира. Сравнения с европейскими АИС показало совпадение результатов с высоким уровнем значимости. Распределения критических частот в районах экватора в Южной Америке и в Юго-Восточной Азии, полученные по результатам ОК “Мир”, качественно сопоставляются с данными Международной службы GPS (IGS) по определению полного электронного содержания. Картина распределения электронной плотности качественно совпадает с данными IGS. Участки наибольшего изменения электронной плотности в этих районах сопровождались появлением на ионограммах дополнительных следов с большими групповыми задержками.

1. ВВЕДЕНИЕ

В 1999 году проводился эксперимент по радиозондированию ионосферы с высот близких к высоте максимума концентрации электронов. Ионозонд располагался на борту ОК “Мир”, высота круговой орбиты которого составляла 350 ± 20 км, наклонение 51.83° . Соответственно орбитальные следы на поверхности Земли достигают 51.83° N и 51.83° S. Эксперимент по радиозондированию впервые проводился на спутнике с подобной орбитой и не являлся основным научным экспериментом комплекса. Он ставил своей целью исследование возможности изучения ионосферы с высот, близких к высоте главного максимума концентрации электронов. Наклонение орбиты комплекса существенно ниже предшествующих высокоорбитальных непилотируемых спутников с ионозондами на борту. В частности, для “Алуэтт-1” оно составляло 80.4° . Орбита ОК “Мир” сужает диапазон возможностей исследования ионосферы Земли, исключая такие интересные, с точки зрения распределения электронной плотности, ионосферные структуры, как авроральные области, главный ионосферный провал и др. Однако подобная орбита позволяет исследовать среднеширотные области при прохождении спутника практически на одной географической широте, области экваториальной аномалии, а также регистрировать различные нерегулярные явления в ионосфере.

2. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ С ОК “МИР” С РЕЗУЛЬТАТАМИ НАЗЕМНЫХ ИОНОЗОНДОВ ЕВРОПЫ

При оценке достоверности полученных результатов главное внимание уделялось сравнению значений критической частоты слоя F_2 по данным наземного и спутникового радиозондирования. Основное внимание было направлено на проверку утверждения о том, что критические частоты, определенные в эксперименте при высоте расположения спутника до 350 км, совпадают с данными наземных АИС.

Эксперимент по радиозондированию на ОК “Мир”, как правило, проводился над европейской территорией. Он начинался, когда комплекс находился в районе нулевого меридиана на широтах от 40 до 52° и продолжался в течение 15–20 мин. Однако проводились так же и эксперименты в течение 1–1.5 часов, а также суточный сеанс зондирования. Таким образом, наибольшую выборку для сопоставления данных спутникового и наземного радиозондирования можно получить при сравнении с данными сети европейских АИС, помещающих информацию в сети Интернет [<http://car.uml.edu/common/DIDBFastStationList>].

Для сопоставления были выбраны АИС Chilton ($51.5; -0.6$), Roquetes ($40.8; 0.5$), Rome ($41.9; 12.5$), Ruegen ($54.6; 13.4$), Pruhonice ($50; 14.56$). Здесь и далее в скобках приведены географические широта и долгота. Проведенный полный анализ ионограмм выделил все случаи, когда след

Таблица 1. Результаты сравнения $foF2$ ОК “Мир” с АИС Chilton

| № п/п | № кадра | Дата | Время UT | | Широта ОК “Мир” | Долгота ОК “Мир” | S_{Lat} , км | S_{Lon} , км | $foF2$, МГц | |
|-------|---------|-------|----------|-------|-----------------|------------------|----------------|----------------|--------------|-------|
| | | | ОК “Мир” | АИС | | | | | ОК “Мир” | АИС |
| 1 | 109 | 10.02 | 14:10 | 14:00 | 51.36 | -0.81 | 16 | 15 | 7.6 | 7.48 |
| 2 | 364 | 11.02 | 13:02 | 12:30 | 49.74 | -1.10 | 196 | 35 | 8.1 | 8.23 |
| | | | | 13:00 | | | | | | N/A |
| 3 | 207 | 16.02 | 10:35 | 10:30 | 48.85 | 1.67 | 295 | 157 | 9.2 | 9.36 |
| 4 | 523 | 17.02 | 11:03 | 11:00 | 51 | 0.57 | 56 | 81 | 10.2 | 10.18 |
| 5 | 59 | 02.03 | 05:51 | 06:00 | 50.9 | 0.11 | 67 | 52 | N/A | N/A |
| 6 | 114 | 02.03 | 07:26 | 07:30 | 51.5 | -0.87 | 0 | 19 | N/A | 5.98 |
| 7 | 216 | 03.03 | 04:43 | 05:00 | 49.52 | 2.86 | 220 | 240 | N/A | N/A |
| 8 | 272 | 03.03 | 06:19 | 06:30 | 51.71 | 6.44 | 23 | 487 | 4.4 | 3.82 |
| 9 | 664 | 10.03 | 01:28 | 01:30 | 47.99 | 3.46 | 390 | 281 | 4.5 | 3.03 |
| 10 | 605 | 31.03 | 17:24 | 17:30 | 49.78 | -0.12 | 191 | 37 | 7.6 | 7.43 |
| 11 | 736 | 31.03 | 18:59 | 19:00 | 51.76 | 1.14 | 29 | 121 | 7.2 | 7.61 |
| 12 | 865 | 31.03 | 20:34 | 20:30 | 48.91 | -1.28 | 288 | 50 | 5.3 | 5.33 |
| 13 | 82 | 20.04 | 09:35 | 09:35 | 50.48 | 0.45 | 141 | 72 | 7.0 | 6.78 |
| 14 | 192 | 20.04 | 13:10 | 13:00 | 51.66 | 0.23 | 84 | 57 | 6.95 | 7.2 |
| 15 | 631 | 21.04 | 08:25 | 09:30 | 50.49 | 12.14 | 111 | 879 | 7.8 | 8.22 |
| 16 | 621 | 21.04 | 08:24 | 08:30 | 48.95 | 4.69 | 284 | 366 | 7.45 | 7.42 |
| 17 | 717 | 21.04 | 09:58 | 10:00 | 51.66 | -0.34 | 18 | 25 | 7.7 | 7.76 |
| 18 | 513 | 23.04 | 07:35 | 07:30 | 49.76 | 8.28 | 194 | 614 | 4.8 | 4.71 |
| 19 | 603 | 23.04 | 09:10 | 09:00 | 51.69 | 0.44 | 86 | 72 | 4.95 | 4.98 |
| 20 | 468 | 07.05 | 02:20 | 02:30 | 49.48 | 1.49 | 225 | 145 | 5.8 | 5.02 |
| 21 | 565 | 07.05 | 03:55 | 04:00 | 51.8 | -1.07 | 33 | 37 | 4.7 | 4.68 |
| 22 | 215 | 02.06 | 16:23 | 16:20 | 51.16 | -0.7 | 38 | 7 | 6.4 | 7.35 |
| 23 | 205 | 03.06 | 15:14 | 15:00 | 49.52 | 0.21 | 220 | 58 | 7.15 | 6.98 |
| | | | | 15:30 | | | | | | 7.08 |
| 24 | 105 | 24.06 | 06:50 | 06:30 | 50.11 | 3.24 | 155 | 266 | 8.95 | 9.03 |
| 25 | 208 | 24.06 | 08:25 | 08:30 | 51.75 | 3.27 | 28 | 268 | 7.75 | 8.33 |

орбиты проходил в окрестности АИС. В таблице 1 представлены результаты сравнения измеренных ОК “Мир” критических частот ионосферы $foF2$ с данными аналогичных исследований АИС Chilton. Здесь и далее величины плазменных частот измеряются в МГц, и введены обозначения S_{Lat} — расстояние между АИС и ОК “Мир” по широте, S_{Lon} — расстояние между АИС и ОК “Мир” по долготе на широте АИС, № кадра — номер ионограммы в общей базе данных ионограмм с ОК “Мир”.

Для дальнейших исследований отбирались случаи, когда точки регистрации наземной и спутниковой ионограмм находились не более чем на 220 км по широте, не более 300 км по долготе и различие во времени зондирования составляло менее 15 мин. В дальнейшем их будем называть

близкими. В остальных случаях использовались линейные интерполяции по времени почасовых либо получасовых данных АИС по определению $foF2$. В тех случаях, когда расстояние по долготе превышало выбранные 300 км, но было не более 800 км, проводилась интерполяция в предположении, что долготная зависимость может быть упрощенно интерпретирована как зависимость от времени. Случаи, когда расстояние по широте превышало 220 км, не использовались для дальнейшего анализа. Так были исключены из дальнейшего анализа случаи сравнения с АИС Ruegen, находившейся более чем 300 км по широте от самой северной точки следа орбиты. Отметим только, что отличия с этой АИС в шести выявленных близких по долготе и времени случаях составляли не более 0.8 МГц. Кроме этого проводи-

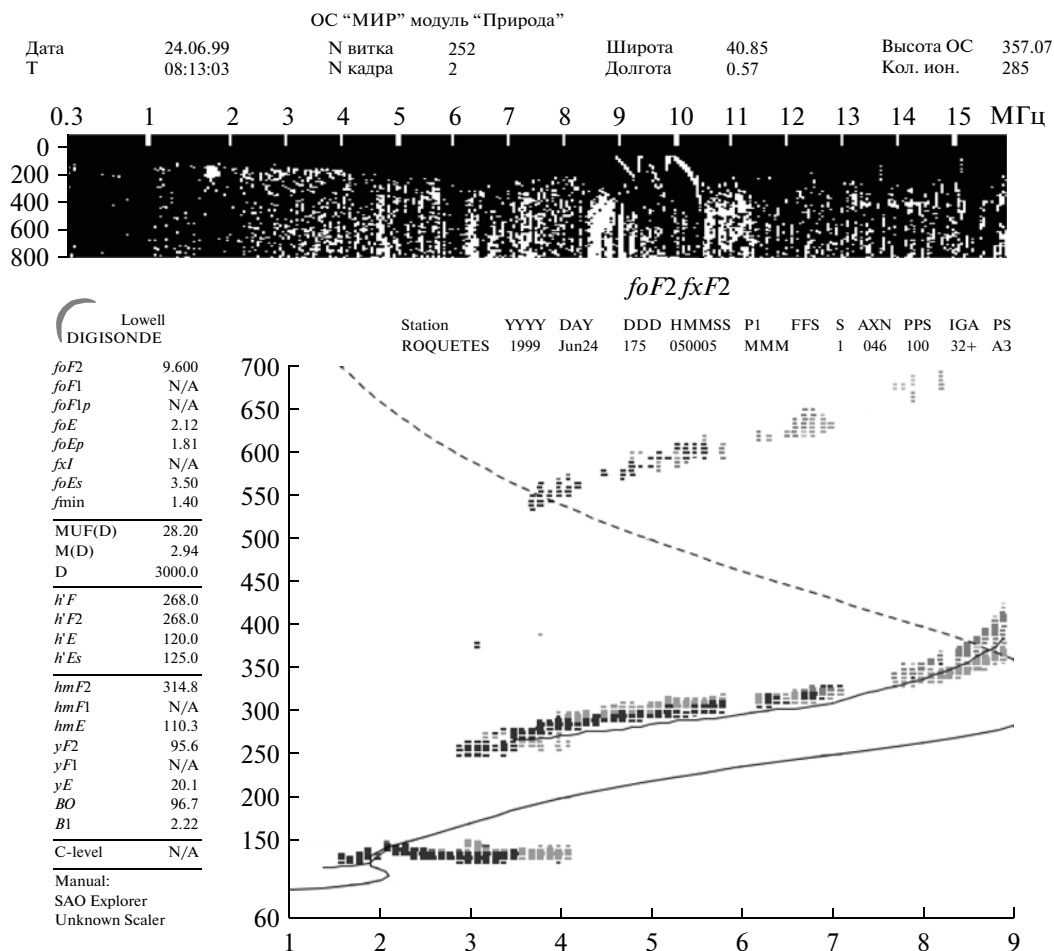


Рис. 1. Вверху: ионограмма ОК "Мир", полученная 24 июня 1999 г. 05:13 UT в точке (40.85; 0.57) , с высоты 357 км с отмеченными критическими частотами foF2 и fxF2. Внизу: ионограмма АИС Roquetes 24 июня 1999 г. 05:00 UT.

лась линейная интерполяция по широте для случаев регистрации ионограмм на долготе близкой к нулевому меридиану и по широте между АИС Chilton и Roquetes. В этом случае интерполяция проводилась по одновременным данным названных АИС. Любая интерполяция вносит дополнительные ошибки, в некоторых случаях улучшая согласованность критических частот, а в отдельных случаях ухудшая. Отметим, что в ряде эпизодов следы отражения от ионосферы на спутниковых ионограммах отсутствовали в результате сильного поглощения сигналов, что, однако, тесно коррелировалось с данными наземных АИС, ионограммы которых в этот момент были нечеткими либо неопределенными. В таблице они обозначены N/A. Во многих случаях был не поглощен след только x-компоненты, и по ионограммам определялась только критическая частота fxF2, поэтому критическая частота ионосферы foF2 пересчитывалась с использованием модели магнитного поля, определяющей гирочастоту fH, по формуле:

$$foF2^2 = fxF2^2 - f_H fxF2.$$

Отметим, что проверка возможности такого пересчета, проведенная по двум не поглощенным следам, во многих случаях дала совпадение с погрешностью менее 0.1 МГц. Это во многом определяется низкой высотой зондирования, позволяющей уменьшить расстояние между точками отражения двух компонент, в противовес случаям, описанным, например, в [Данилкин и Мальцева, 1972], где отклонение точек отражения двух компонент было более 100 км.

Так была создана выборка всех случаев сопоставления данных ОК "Мир" и перечисленных европейских АИС объемом n = 35. По названным критериям из табл. 1 было отобрано 17 случаев (14 близких/3 интерполированных). Аналогичная таблица сравнения со станцией Rome дала 7 (5/2) случаев совпадения, со станцией Roquetes 5 (3/2) случаев, Pruhonice – 3 близких случая. Для примера на рис. 1 приведены реальные ионограммы ОК "Мир" (вверху) и АИС Roquetes (внизу), полученные 24 июня 1999 года в близких пространственно временных условиях. На ионограм-

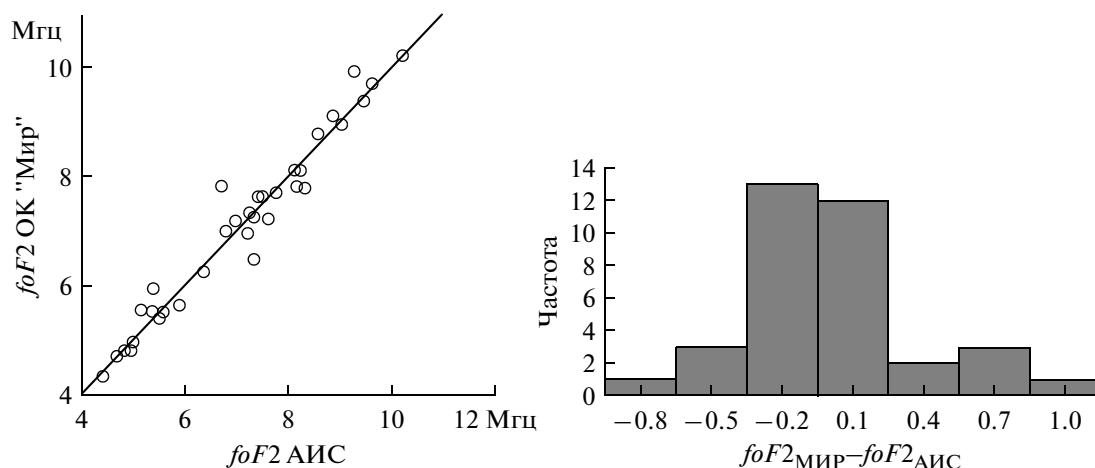


Рис. 2. Слева: сравнение значений $foF2$ по данным ОК "Мир" и наземных европейских АИС, справа: диаграмма величин отклонений критических частот наземных АИС и ионозонда ОК "Мир".

ме ОК "Мир" прослеживаются три следа отражения от ионосферы и отмечены критические частоты обыкновенной ($foF2 = 9.8$ МГц) и необыкновенной ($fxF2 = 10.45$ МГц) компонент. Критическая частота ионосферы превзошла используемый на АИС в это время диапазон частот, но декларируется АИС как 9.6 МГц.

По полученным результатам построено облако точек вокруг прямой регрессии $foF2_{МИР} = foF2_{АИС}$ (рис. 2 слева). Точечная оценка среднего значения случайной величины $\Delta foF2 = foF2_{АИС} - foF2_{МИР}$ по описанной выборке составила $\Delta foF2 = 0.02$ МГц при соответствующей точечной оценке среднего квадратического отклонения $\bar{\sigma} = 0.34$ МГц. Размах выборки ($-0.58; 1.0$). На рисунке 2 (справа) представлена диаграмма распределения $\Delta foF2$. Проверка гипотезы о нормальном распределении этой случайной величины с указанными числовыми характеристиками по критерию Пирсона χ^2 показала высокий, более 0.4, уровень значимости. Следовательно, ошибки отклонения от среднего можно считать случайными. Отметим, что отклонение 0.02 МГц находится в пределах погрешности ионозонда ОК "Мир", составляющей 0.05 МГц, и может быть связано с тем, что частот-

ные показания частот снимались по правой границе следа отражения от ионосферы.

Не приводя в данной статье полную таблицу сравнения с АИС Rome, отметим отдельно случай близкого прохождения с ней ОК "Мир" 2 июня 1999 г. В таблице 2 приведены результаты, полученные по трем ионограммам с небольшими интервалами времени, когда ОК двигался по орбите над Италией (рис. 3а). Наиболее близко с АИС Rome (42 км по широте и 130 км по долготе) была зафиксирована ионограмма № 15. Отличия в определении $foF2$ составили 0.2 МГц.

Этот случай был выбран для сравнения данных, полученных на ОК "Мир" с исследованием ионосферы с использованием радиотомографии. В районе Италии располагается почти по меридианному разрезу ($\approx 10^\circ$ E) цепочка трех ионосферных станций Италии, которые в это время вели наблюдения за навигационными спутниками системы NNSS.

На фрагменте а рис. 3 показаны эти станции на карте черными кружками. Черными квадратами показаны проекции на поверхность Земли расположения ОК "Мир" в местах снятия трех ионограмм 2 июня 1999 г. (фрагмент в рис. 3).

Таблица 2. Результаты сравнения данных ОК "Мир", АИС Rome и результатами томографической реконструкции fs NNSS на высоте спутника hs

| № | Время UT | Широта ОК "Мир" | Долгота ОК "Мир" | Высота ОК "Мир" hs , км | fs , МГц ОК "Мир" | $foF2$, МГц ОК "Мир" | $foF2$, МГц АИС Rome 13:20 UT | fs NNSS, МГц |
|----|----------|-----------------|------------------|---------------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------|
| 7 | 13:12:29 | 39.07 | 9.89 | 359.33 | 8.6 | 9.15 | | 9 |
| 9 | 13:12:45 | 39.70 | 10.9 | 359.38 | 8.45 | 9.1 | | 8.5 |
| 15 | 13:13:33 | 41.52 | 14.07 | 359.51 | 8.05 | 8.75 | 8.55 | 8 |

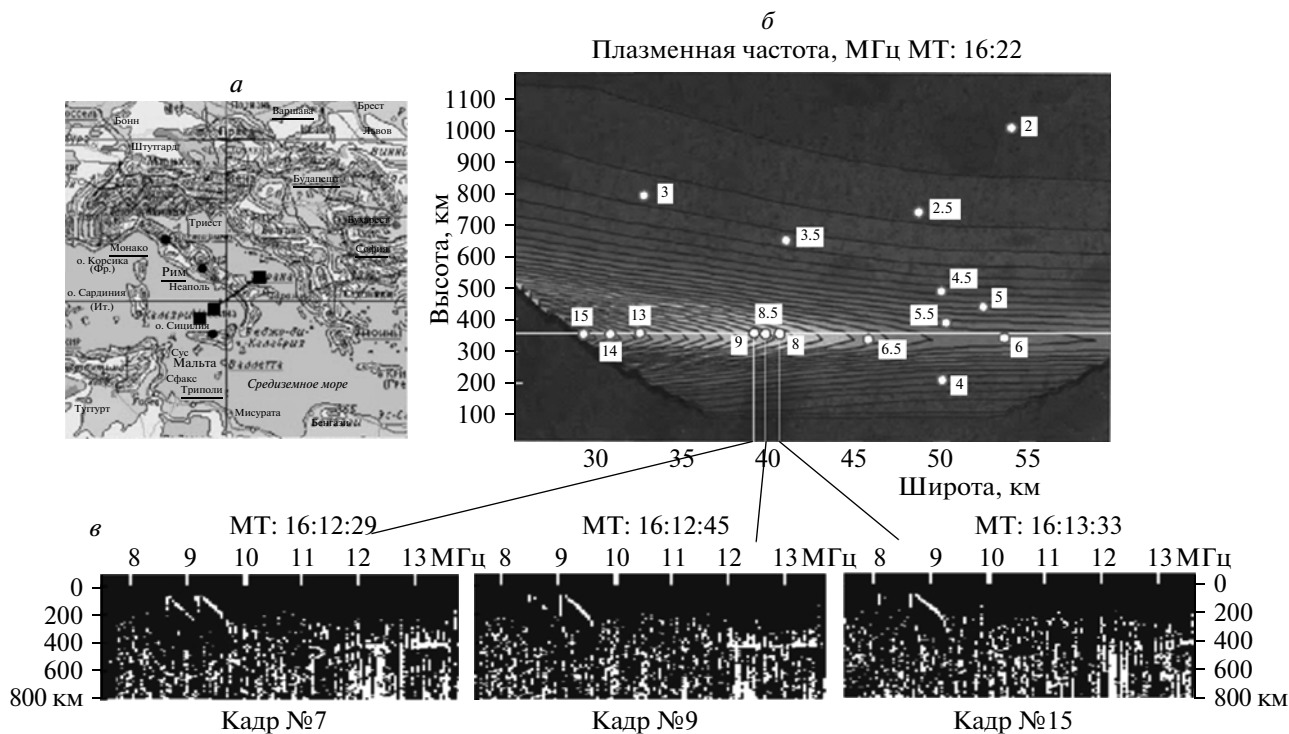


Рис. 3. Сравнение результатов зондирования с ОК “Мир” с данными радиотомографической реконструкции по наблюдениям за спутниками системы NNSS 2 июня 1999 г.

На фрагменте *б* рис. 3 представлен плоскостной разрез ионосферы на меридиане, соответствующему расположению цепочки станций, полученный К. Митчелл и любезно предоставленный авторам [Danilkin et al., 2003]. В связи с тем, что отклонение по долготе между тремя ионограммами в табл. 2 сравнимо с различием по долготе в цепочке станций Италии, в дальнейшем сравнении пренебрегалось долготным отличием. Линии, соединяющие фрагменты *б* и *в* рис. 3, устанавливают соответствие между ионограммами и широтами точек их регистрации. В таблице 2 в графу “*f_s* NNSS” внесены эти значения. Сравнение показывает совпадение результатов определения плазменной частоты на высоте спутника *f_s* обоими способами. Результаты зондирования (внешний вид ионограмм) показывают, что ОК “Мир” находился выше максимума концентрации слоя *F2*, но в окрестности *h_m*. Этот результат подтверждается ионосферным разрезом (белая горизонтальная линия на фрагменте *3б*).

Учитывая проведенное статистическое исследование и то, что в выборку попали все результаты возможного сравнения, можно сделать вывод, что ионозонд, находящийся на высотах 350 ± 20 км, определяет критическую частоту ионосферы не хуже ионозондов европейских АИС.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ЧАСТОТ В ИОНОСФЕРЕ ВДОЛЬ ОРБИТЫ ОК “МИР” В ЮЖНОЙ АМЕРИКЕ И СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ АИС LISAMARCA

За время эксперимента 1999 г. на ОК “Мир” 31 марта–1 апреля был проведен суточный сеанс практически непрерывного радиозондирования ионосферы (ионограммы снимались через 32 с). В этом сеансе комплекс многократно пересекал экватор, как в дневные, так и в ночные часы. На трех витках сеансы радиозондирования захватывали область экватора в районе Южной Америки и проходили относительно близко от АИС Lisamarca, координаты которой составляют (−12.00; −76.8). В таблице 3 приведены данные сравнения результатов радиозондирования наземной и бортовой АИС.

Отметим, что Lisamarca в дневные часы попадает в зону экваториальной аномалии. Эта особенность ионосферы заключается в том, что над геомагнитным экватором образуется область с резко увеличенным значением высоты максимума ионосферы, но с минимумом в распределении критических частот, а в приэкваториальной области днем по обе стороны от геомагнитного экватора на геомагнитных широтах 10–20° образуются максимумы (или “гребни”) ионизации.

Таблица 3. Результаты сравнения $foF2$ ОК “Мир” с АИС Jisamarca

| № п/п | № кадра | | | Дата, время UT | | Широта ОК “Мир” | Долгота ОК “Мир” | S_{Lab} , км | S_{Low} , км | $foF2$, МГц | |
|-------|----------|----------|---------------|----------------|---------------|-----------------|------------------|----------------|----------------|--------------|--|
| | ОК “Мир” | ОК “Мир” | АИС Jisamarca | ОК “Мир” | АИС Jisamarca | | | | | | |
| 1 | 562 | 31.03 | 31.03 | -12.86 | -72.85 | 96 | 430 | 10.65 | 11.05 | | |
| | 563 | 17:00 | 17:00 | -11.22 | -71.62 | 87 | 564 | 10.9 | | | |
| 2 | 687 | 31.03 | 31.03 | -11.64 | -95.18 | 40 | 2000 | 10.95 | 11.45 | | |
| | | 18:31 | 19:00 | | | | | | | | |
| 3 | 1606 | 01.04 | 01.04 | -12.34 | -72.28 | 38 | 492 | 9.6 | 10.4 | | |
| | | 06:05 | 06:00 | | | | | | | | |

Рассмотрим один из таких участков орбиты ОК “Мир” длиной более 7000 км с началом в точке с географическими координатами $(-26.01; -107.19)$ и конечной точкой с координатами $(19.58; -72.2)$. Местное время в точках проведения радиозондирования составило для первой – (0 км) 11:30 LT, а в последней (7000 км) – 13:50 LT, что соответствовало $\approx 18:30$ UT. Проекция этого участка орбиты показана на рис. 4. След орбиты нанесен на фрагмент карты с результатами исследования IGS по определению полного электронного содержания (ТЕС) [ftp://cdis.nasa.gov/gps/products/ionex/1999/]. Карты ТЕС Мирового Центра Данных строятся каждые два часа по комплексным данным навигационных спутников за этот интервал времени. Надо отметить, что эта система широко развита в настоящее время, однако в 1999 году количество

спутников, по данным которых строились карты ТЕС, было мало. Результаты исследования на рис. 4 отнесены к 19:00 UT. На карте выделяется область повышенного значения ТЕС, соответствующая экваториальной аномалии. На следе орбиты отмечены критические частоты ионосферы на границах участка следа 13.65 и 11.2 МГц, а также места пересечения максимумов гребней экваториальной аномалии. Точка максимума критической частоты на южном “гребне” имеет координаты $(-19.77; -101.6)$ и соответствует 15.15 МГц, а на северном “гребне” $(4.91; -83.35)$ и соответствует 14.85 МГц. Между ними, почти на широте геомагнитного экватора, находится точка минимума критической частоты ионосферы с координатами $(-8.35; -92.76)$, соответствующая 10.5 МГц.

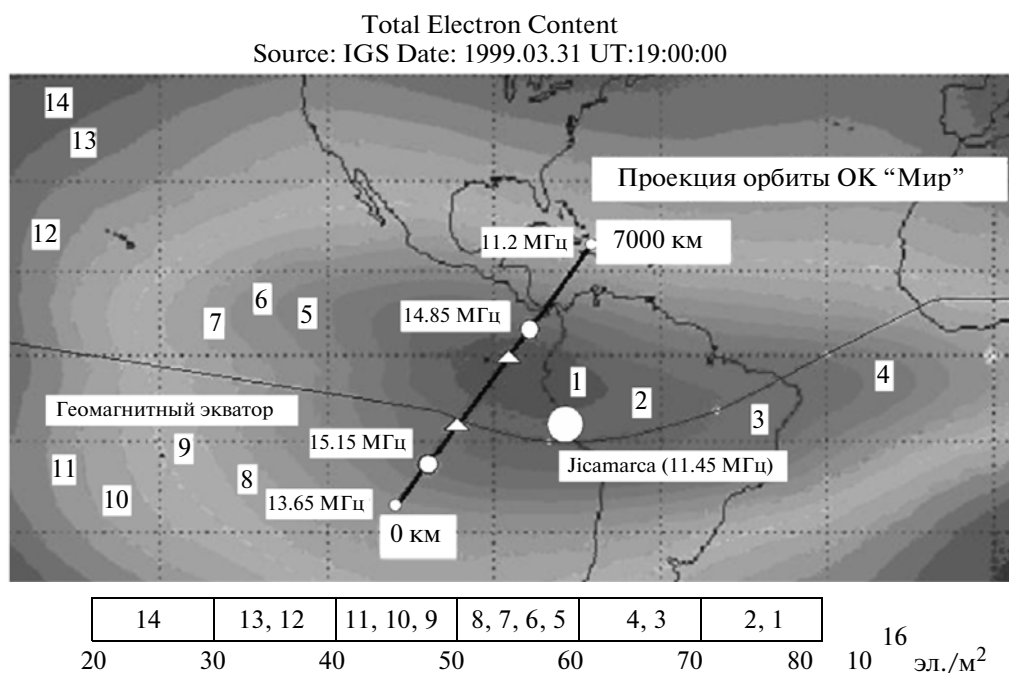


Рис. 4. Карта распределения полного электронного содержания по данным IGS 31 марта 1999 г. 19:00 UT с нанесенным участком следа орбиты ОК “Мир”.

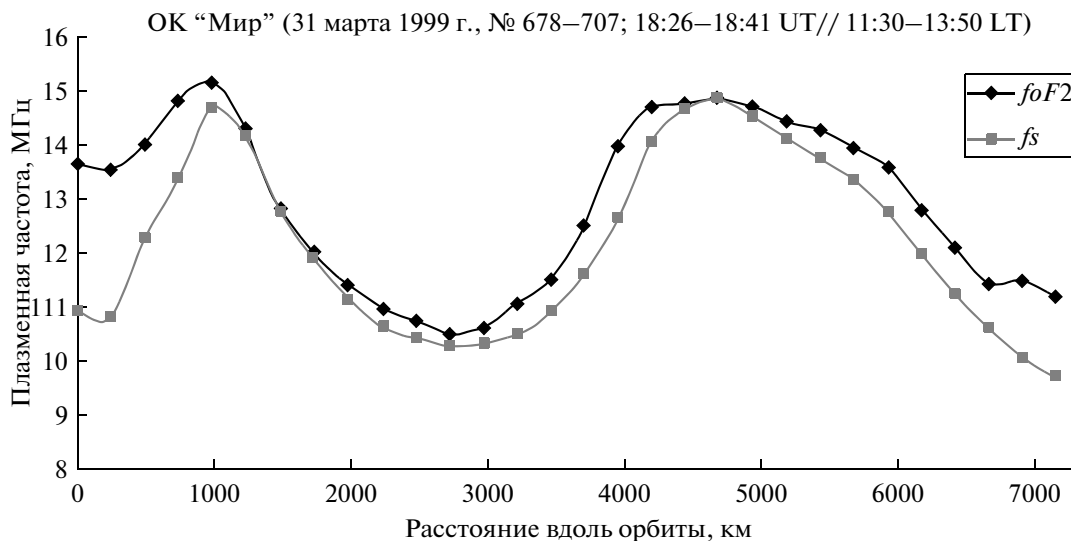


Рис. 5. Распределение критической частоты $foF2$ и частоты на высоте ОК “Мир” f_s вдоль орбиты.

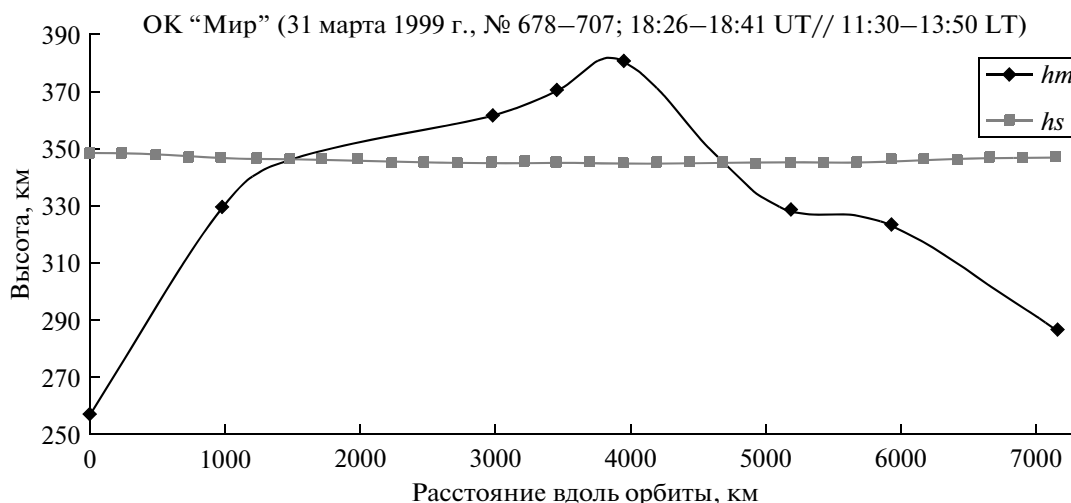


Рис. 6. Распределение высоты максимума электронной концентрации hm вдоль орбиты ОК “Мир” с высотой hs .

Полные результаты исследования критической частоты $foF2$ по данным ОК “Мир” для этого участка орбиты представлены на рис. 5. На этом рисунке ярко выражены “гребни” экваториальной аномалии и падение концентрации электронов в области экватора. На рисунке 5 отмечены также плазменные частоты на высоте ОК “Мир” – f_s . Места пересечения этих графиков указывают на те точки орбиты, где ОК “Мир” находился на высоте максимума электронной концентрации hm . Отметим, что АИС Jisamarca в этот момент времени фиксировала 11.45 МГц. Долготные аппроксимации в этом районе теряют смысл, из-за больших горизонтальных градиентов плотности электронов, однако, судя по рис. 4, результаты исследования полного электронного содержа-

ния, результаты АИС Jisamarca и ионозонда ОК “Мир” не противоречат друг другу и дополняют общую картину состояния ионосферы.

По отдельным ионограммам этой серии по следам отражения от ионосферы были рассчитаны высоты максимума электронной концентрации. Результаты представлены на рис. 6. Наибольшая высота $hm = 381$ км соответствует точке с координатами (0; –86.87).

Особенностью ионограмм с ОК “Мир” стала регистрация на них дополнительного следа с большими групповыми задержками (задержанного нижнего следа – ЗНС [Данилкин и Котонаева, 2009]) на тех участках орбиты, когда ОК “Мир” опускался ниже максимума электронной концентрации и находился в районе резкого ро-

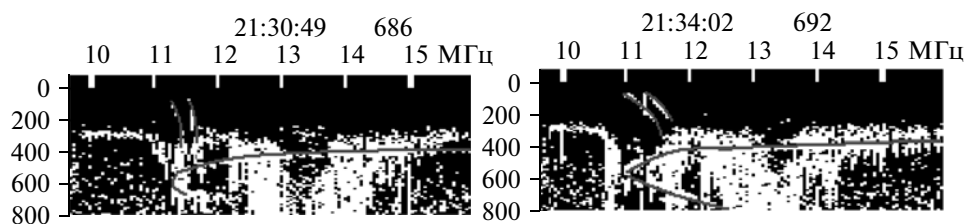


Рис. 7. Ионограммы ОК “Мир” 31 марта 1999 г. с ЗНС (время московское).

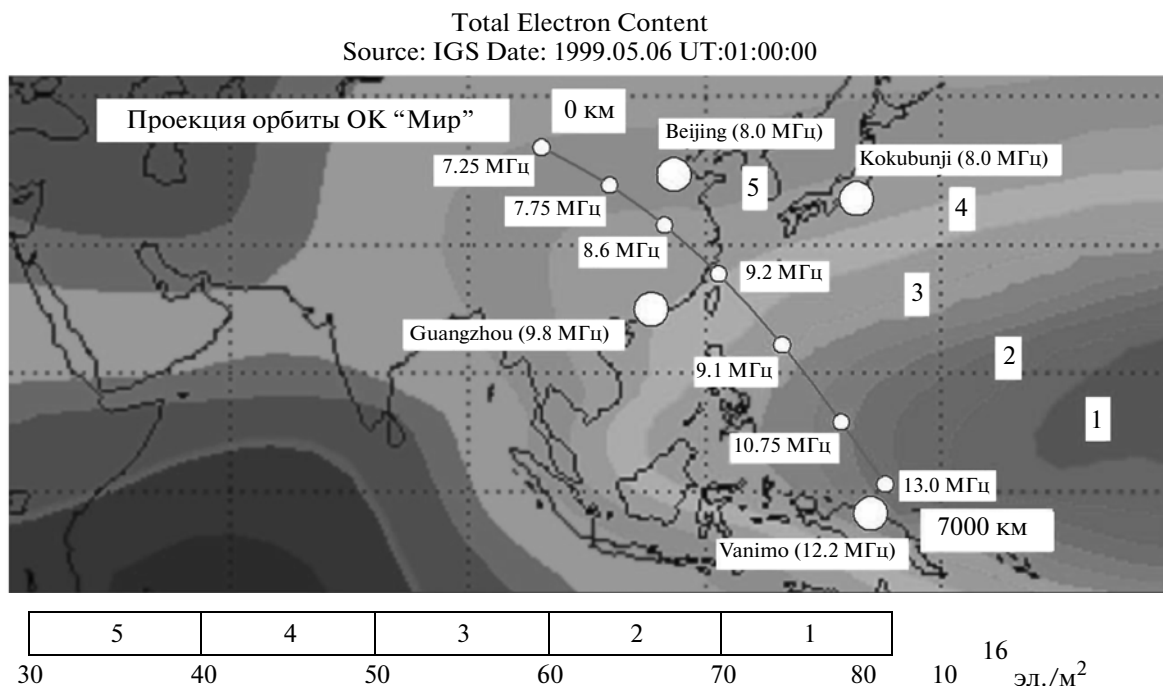


Рис. 8. Карта распределения полного электронного содержания по данным IGS 6 мая 1999 г. 01:00 UT с нанесенным участком следа орбиты ОК “Мир” и наземными АИС.

ста плазменных частот на высоте ОК. Не был исключением и рассматриваемый участок. На рисунке 4 границы участка, на котором зафиксированы ионограммы с ЗНС отмечены треугольниками. На

рисунке 7 представлены две ионограммы с прорисованными ЗНС в начале участка орбиты, когда высота h_m стала выше высоты ОК “Мир” h_s и в конце участка, в точке с наибольшим значением h_m .

Таблица 4. Результаты сравнения foF_2 ОК “Мир” с АИС Ашхабад

| № п/п | № кадра | Дата, время UT | | Широта ОК “Мир” | Долгота ОК “Мир” | S_{Lab} , км | S_{Lon} , км | foF_2 , МГц | |
|-------|---------|----------------|-------------|-----------------|------------------|----------------|----------------|---------------|-------------|
| | | ОК “Мир” | АИС Ашхабад | | | | | ОК “Мир” | АИС Ашхабад |
| 1 | 160 | 20.04 | 20.04 | 42.73 | 58.84 | 532 | 47 | 10.8 | 11.6 |
| | 162 | 09:46 | 10:00 | 42.16 | 59.97 | 474 | 145 | 11.05 | |
| 2 | 798 | 21.04 | 21.04 | 37.90 | 55.56 | 33 | 240 | 9.8 | 10.0 |
| | | 10:09 | 10:00 | | | | | | |
| 3 | 676 | 22.04 | 22.04 | 37.61 | 56.09 | 32 | 194 | 8.4 | 8.8 |
| | | 09:20 | 10:00 | | | | | | |
| 4 | 513 | 06.05 | 06.05 | 37.85 | 62.89 | 5 | 403 | 10.3 | 10.2 |
| | | 03:40 | 04:00 | | | | | | |

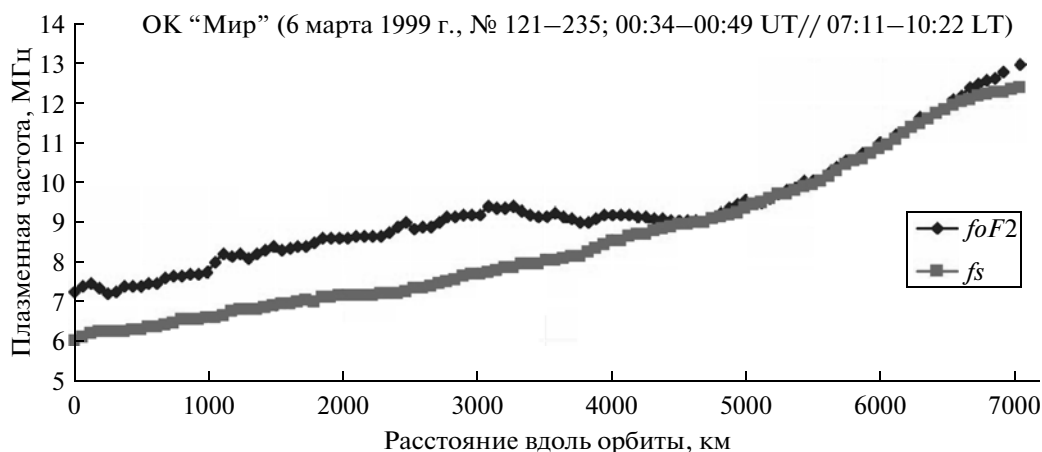


Рис. 9. Распределение критической частоты $foF2$ и частоты на высоте ОК "Мир" fs вдоль орбиты 6 мая 1999 г. 00:34–00:49 UT

4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ЧАСТОТ В ИОНОСФЕРЕ ВДОЛЬ ОРБИТЫ ОК "МИР" В АЗИИ И СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ МЕСТНЫХ АИС

В районах Средней Азии результаты радиозондирования можно было сопоставить с данными АИС в Ашхабаде (37.9, 58.3). Было зафиксировано 4 случая, когда след орбиты ОК "Мир" в момент эксперимента по радиозондированию проходил в окрестности этой АИС (табл. 4). Во всех случаях значения критических частот были близки с учетом отличия в местах и времени зондирования.

На отдельных витках проводилось радиозондирование и в районах Юго-Восточной Азии. Рассмотрим след орбиты ОК "Мир" 6 мая 1999 г. 00:34–00:49 UT (рис. 8). След орбиты проходит между наземными АИС Beijing, Kokubunji, Guangzhou, Vanimo. Сравнение значений крити-

ческих частот ионосферы, определенных этими станциями с данными ближайших по широте ионограмм ОК "Мир" приведено в табл. 5. Расположение АИС и следа орбиты ОК "Мир" не было близким в этом случае, однако явных противоречий между этими экспериментами замечено не было.

След орбиты на рис. 8 нанесен на фрагмент карты TEC IGS, отнесенную по времени к 01:00 UT. На карте виден западный край экваториальной аномалии, выраженный в увеличении полного электронного содержания в районе экватора. Подобная картина изменения критической частоты ионосферы и плазменной частоты на высоте орбиты была зафиксирована ОК "Мир" (рис. 9). Однако ионозонд фиксирует не только существенное увеличение критической частоты до 13 МГц на нулевых широтах, но небольшое увели-

Таблица 5. Результаты сравнения $foF2$ ОК "Мир" с АИС, расположенными в Юго-Восточной Азии

| № п/п | АИС | № кадра ОК "Мир" | Дата, время UT | | Координаты ОК "Мир" | Координаты АИС | S_{Lab} км | S_{Lon} км | $foF2$, МГц | |
|-------|-----------|------------------|----------------|-------------------------|---------------------|------------------|--------------|--------------|--------------|------|
| | | | ОК "Мир" | АИС | | | | | ОК "Мир" | АИС |
| 1 | Beijing | 133 | 06.05 00:35 | 06.05 00:00 01:00 | 40.03; 106.03 | 40.08; 116.26 | 6 | 870 | 7.65 | 7.9 |
| 2 | Kokubunji | 147 | 06.05 00:37 | 06.05 00:00 01:00 | 35.46; 112.83 | 35.71; 139.49 | 28 | 2400 | 8.35 | 7.7 |
| 3 | Guangzhou | 181 | 06.05 00:42 | 06.05 01:00 | 22.93; 126.31 | 23.1; 113.4 | 19 | 1320 | 9.21 | 9.8 |
| 4 | Vanimo | 235 | 06.05 00:49 | 06.05 01:00 | 0.98; 143.13 | -2.7; 141.3 | 409 | 203 | 13.0 | 12.2 |

чение $foF2$ в районе северного “гребня” на широтах $10-14^\circ N$.

Из рисунков 8 и 9 видно, что результаты исследования полного электронного содержания, результаты наземных АИС и ионозонда ОК “Мир” так же не противоречат друг другу и дополняют общую картину состояния ионосферы.

ВЫВОДЫ

Использование низкоорбитальных спутников для проведения радиозондирования ионосферы позволяет определять величину концентрации электронов в максимума слоя $F2$ не менее уверенно, чем радиозондирование с других высот. Это подтверждается сравнением с наземными АИС и отдельными результатами радиотомографических реконструкций.

Результаты обработки последовательностей ионограмм в районе геомагнитного экватора позволяют определить расположение “гребней” экваториальной аномалии. Качественно результаты подтверждаются картами исследования IGS по определению полного электронного содержания. Для одного из приведенных примеров вершина южного “гребня” в полдень в районе Южной

Америки соответствовала $20^\circ S$, а вершина северного “гребня” – $5^\circ N$. Значения максимумов $foF2$ в большинстве рассмотренных случаев превосходили 15 МГц . Между “гребнями” аномалии существует область с повышенной высотой максимума электронной концентрации, где ОК опускался ниже hm . На таких участках на ионограммах в большинстве случаев фиксировались ЗНС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилкин Н.П., Котонаева Н.Г. Обработка и интерпретация ионограмм радиозондирования ионосферы со сверхнизких орбит спутников // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 49. №1. С. 74–87. 2009.
- Данилкин Н.П., Мальцева О.А. $N(h)$ -профили и учет горизонтальной неоднородности ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 12. № 4. С. 625–630. 1972.
- Danilkin N.P., Kotonaeva N.G., Mitchell C.N. Comparison of the results of ionospheric radiosounding on board the MIR Manned Space Station with the data of ionospheric ground-based network and the TRANSIT signal observations // Int. J. Geomagn. Aeron. V. 4. № 1. P. 29–36. 2003.
- <http://car.uml.edu/common/DIDBFastStationList>
- <ftp://cddis.nasa.gov/gps/products/ionex/1999/>