

УДК 550.388.2

## РЕГИСТРАЦИЯ ЗАДЕРЖАННЫХ НИЖНИХ СЛЕДОВ НА ИОНОГРАММАХ ОК «МИР» ПРИ РАДИОЗОНДИРОВАНИИ С ВЫСОТ НИЖЕ МАКСИМУМА СЛОЯ F2

Н. Г. Котонаева

В статье проводится анализ времени и места регистрации аномальных ионограмм вертикального радиозондирования ионосферы с борта орбитального комплекса «Мир». На ионограммах присутствует дополнительный след с групповыми задержками, существенно превышающими действующие расстояния следа отражения от Земли. Проведено косвенное сравнение результатов радиозондирования и результатов определения полного электронного содержания.

Ключевые слова: вертикальное радиозондирование, орбитальный комплекс «Мир», задержанный нижний след, экваториальная аномалия

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В 1998-1999 годах проводились эксперименты по исследованию ионосферы ионозондом, установленным на ОК «Мир» [1]. Орбита комплекса находилась на высотах в интервале от 330 до 380 км, на многих участках, особенно в низких широтах, была ниже высоты максимума концентрации электронов в ионосфере  $h_m F2$ . Наклонение орбиты составляло  $51,65^\circ$ , это привело к тому, что след орбиты в момент пересечения экватора для каждого последующего витка проходил  $\sim$  на  $23^\circ$  западнее предыдущего, при этом местное время менялось менее чем на 1,5 мин.

На рисунке 1 приведены ионограммы радиозондирования с высот ниже максимума ионосферы с основными следами отражений на них. Эти следы делятся на несколько групп.

Во-первых, это следы отражения от ионосферы. Их оставляют радиоволны, которые распространяются от ОК вверх видами «z», «o» и «x» и, отражаясь от внутренней ионосферы, возвращаются обратно. Данное распространение происходит в частотном диапазоне между частотами отсечки всех трех компонент магниторасщепленного сигнала и соответствующими критическими частотами ионосферы. Следы обыкновенной и необыкновенной компонент магниторасщепленной волны являются одинаково законченными, несут информацию об ионосфере на интервале от высоты ОК до высоты  $h_m F2$ . Эти следы являются зависимостями действующей высоты от частоты –

$h'_o(f)$  и  $h'_x(f)$ . Поведение следа "z"-волны  $h'_z(f)$  отличается от случая зондирования с высот порядка 1000 км. В [2] показано, что при радиозондировании с высот ниже 400 км в большинстве случаев "z"- компонента так же, как и "x"- и "o"-компоненты достигает максимума ионосферы и от него отражается, т. е. достигает своей критической частоты  $f_z F2$ .

Во-вторых, одновременно на частотах от значений плазменной частоты ионосферы на высоте ОК до максимальной частоты рабочего диапазона происходит распространение радиоволн вниз к Земле, отражение от нее и возвращение обратно на ОК. Эти радиоволны на ионограмме дают след отражения от Земли для "o"- и "x"-компонент.

В-третьих, на большинстве ионограмм появляется задержанный нижний след (ЗНС), который, как было объяснено в результате математического моделирования [3], является результатом наклонного распространения радиолуча, отражением его от Земли и последующим отражением (либо преломлением) от горизонтальных неоднородностей ионосферы. Целью настоящей статьи является анализ времени и места появления на ионограммах ЗНС, исходя из общих представлений о строении ионосферы и исследования полного электронного содержания в местах регистрации аномальных ионограмм.



Рис. 1. Ионограммы, полученные с ОК «Мир» с высоты ниже максимума концентрации электронов слоя F2

## 2. МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИОНОГРАММ С ЗНС

*Непрерывность ЗНС.* Главная, бросающаяся в глаза, морфологическая особенность ЗНС есть его монотонная непрерывность вдоль оси частот. При этом наблюдается всегда практически линейная зависимость действующей дальности от частоты. Отсутствуют какие-либо перегибы на кривых ЗНС. От ионограммы к ионограмме может изменяться угол наклона к оси частот, но он остается в пределах погрешности измерений, которые были на ОК «Мир», просто прямой линией. На отдельных ионограммах ЗНС имеет разрывы по частоте. Однако анализ большого числа ионограмм с ЗНС показал, что разрывы встречаются в разных местах ионограмм и хорошо коррелируют с разрывами в частотном ходе вертикального отражения от Земли. Они не имеют видимых закономерностей, и с большой вероятностью можно утверждать, что они являются следствием технических причин, которые не связаны с разворотом луча внутри неоднородности и происходящей вследствие этого его монотонной непрерывности.

Второй также очень характерной особенностью ЗНС является *непрерывность перехода от следа отражения от Земли к самому ЗНС*. Ни на одной ЗНС ионограмме не было замечено разрывов, которые характерны для разрывов в действующих высотах или глубинах, возникающих при радиозондировании на долинах или хотя бы на резких перегибах в монотонном нарастании (или убывании) электронной концентрации.

*Длительность существования ЗНС.* Особенностью ионограмм с ЗНС является длительность их непрерывного существования на по-

следовательности ионограмм. При этом конкретные параметры ионосферы, определяемые по этим ионограммам, могут изменяться весьма значительно. На последовательности ионограмм можно проследить процесс формирования и разрушения ЗНС. На первых ионограммах последовательностей ЗНС короткий, не ярко выраженный, более рассеянный. Далее этот тракт продлевается на весь интервал зондирования и четко определяется, и в конце становится не четко выраженным, но прослеживаемым на большом интервале частот.

## 3. АНАЛИЗ ВРЕМЕНИ И МЕСТА РЕГИСТРАЦИИ ИОНОГРАММ С ЗНС

При анализе ионограмм с ОК «Мир» было замечено, что ионограммы, на которых был зафиксирован ЗНС, всегда регистрировались в виде серий из нескольких ионограмм в тех случаях, когда высота орбиты была меньше  $h_m F2$ . Одиночные ионограммы были получены только в редких случаях в конце сеансов зондирования, либо в те сеансы, например, 3 марта 1999 г., когда временной интервал между соседними ионограммами составлял 64 с.

В некоторых случаях процесс формирования следа был быстрым (16-24 с), это было связано с тем, что резко менялась высота максимума ионосферы (высота ОК практически не изменялась), и ОК оказывался ниже высоты  $h_m F2$ .

Серии ионограмм с ЗНС были зафиксированы в разных долготных регионах земного шара (рис. 2). Широтный диапазон изменялся от  $-26^\circ$  до  $+35^\circ$ , местное время от 9,5 до 24 часов. Всего было получено ~200 ионограмм, на

которых можно отчетливо выделить задержанный нижний след.

Информация о времени и месте регистрации ионограмм с ЗНС приведена в таблице. В ней указывается московское зимнее декретное

время (МВ) и местное время начала серии (LT) с точностью до 0,5 часа.

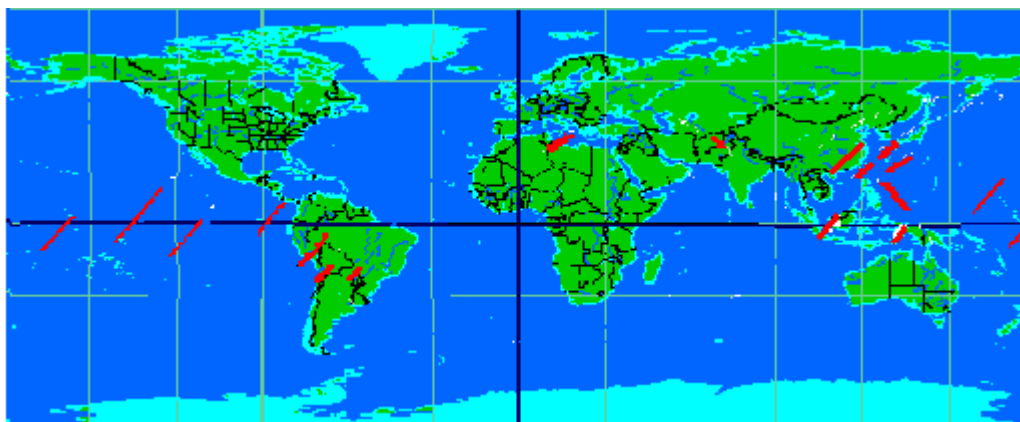


Рис.2. Фрагменты следов орбиты ОК «Мир», на которых зафиксированы последовательности ионограмм с ЗНС

#### Участки орбиты, на которых были зафиксированы ЗНС

№	Дата	Время (ч)		Начало серии ионограмм с ЗНС		Конец серии ионограмм с ЗНС	
		МВ	LT	Широта	Долгота	Широта	Долгота
1	3.03.1999	10	12,5	-4,53	88,92		
2	10.03.1999 (9.03.1999 LT)	4	20	-26,18	-73,25	-21,54	-69,00
3	11.03.1999 (10.03.1999 LT)	3	20	-25,52	-61,66	-21,25	-57,79
4	31.03.1999	20	11,5	-25,58	-83,53	- 2,97	-65,66
5	31.03.1999	21,5	12,5	- 13,32	-96,45	- 0,07	-86,87
6	31.03.1999	23	12,5	- 15,35	-121,26	- 0,54	-110,44
7	1.04.1999 (31.03.1999 LT)	0,5	13	-4,27	-136,33	9,29	-126,68
8	1.04.1999 (31.03.1999 LT)	2	14	-12,56	-165,61	-6,39	-161,09
9	1.04.1999	3,5	12,5	-11,54	171,91	-1,73	178,97
10	1.04.1999	5	13	8,00	162,64	17,48	169,84
11	1.04.1999	7	13	-6,03	129,43	-1,05	132,96
12	1.04.1999	8	13	-4,68	107,15	-1,47	109,42
13	21.04.1999	10,5	16	14,71	125,73	134,85	350,63
14	5.05.1999	18	0	29,70	139,33	42,28	157,23
15	5.05.1999	19,5	0,5	31,73	118,29	39,53	128,88
16	6.05.1999	18,5	23,5	18,02	115,83	32,18	129,39
17	7.05.1999	2	0	29,23	9,68	33,23	14,20
18	7.05.1999	4	9,5	12,37	122,22	7,87	125,54
19	2.06.1999	19,5	20,5	34,71	65,51	32,95	67,69

Для подтверждения того, что причиной появления ЗНС на ионограммах являются горизонтальные градиенты электронной плотности, проведем качественное сравне-

ние всех случаев регистрации ЗНС на ионограммах с результатами исследования полного электронного содержания (TEC).

## 2.1 ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ 3 МАРТА 1999 Г.

2-3 марта 1999 г. проходили долгосрочные сеансы зондирования на нескольких участках орбиты, захватывающих весь широтный диапазон орбиты ОК «Мир». Ионограммы снимались через 64 с. Однако только в одном из случаев пересечения экватора ОК опустился ниже высоты максимума концентрации ионосферы. На рис. 3 представлено распределение критической частоты слоя F2 –  $f_oF2$  и частоты на высоте орбиты ОК –  $f_s$  вдоль этого фрагмента орбиты.

Местное время, соответствующее точке начала рассматриваемого участка орбиты – (52° N; 6° E) 6:40 LT, а точке конца участка (38° S; 122° E) 15:00 LT. Картина распределения плазменных частот соответствует типичной схеме

дневного распределения электронной плотности в районе экватора – два характерных полуденных «гребня» с резким уменьшением плазменной частоты между ними. Структуру ионосферы в этом районе называют экваториальной аномалией (ЭА). Местное время прохождения северного «гребня» ЭА ~ 11 LT, а южного ~13 LT. Величины плазменных частот на обоих «гребнях» больше 16 МГц и поэтому точное их определение невозможно, но по характеру изменения  $f_oF2$  можно сделать вывод об их примерном равенстве на северном и южном «гребнях». На рис. 3 отмечены также плазменные частоты на высоте ОК «Мир» –  $f_s$ . Места касания этих графиков указывают на те участки орбиты, где ОК «Мир» находился на высоте максимума электронной концентрации  $h_mF2$ .

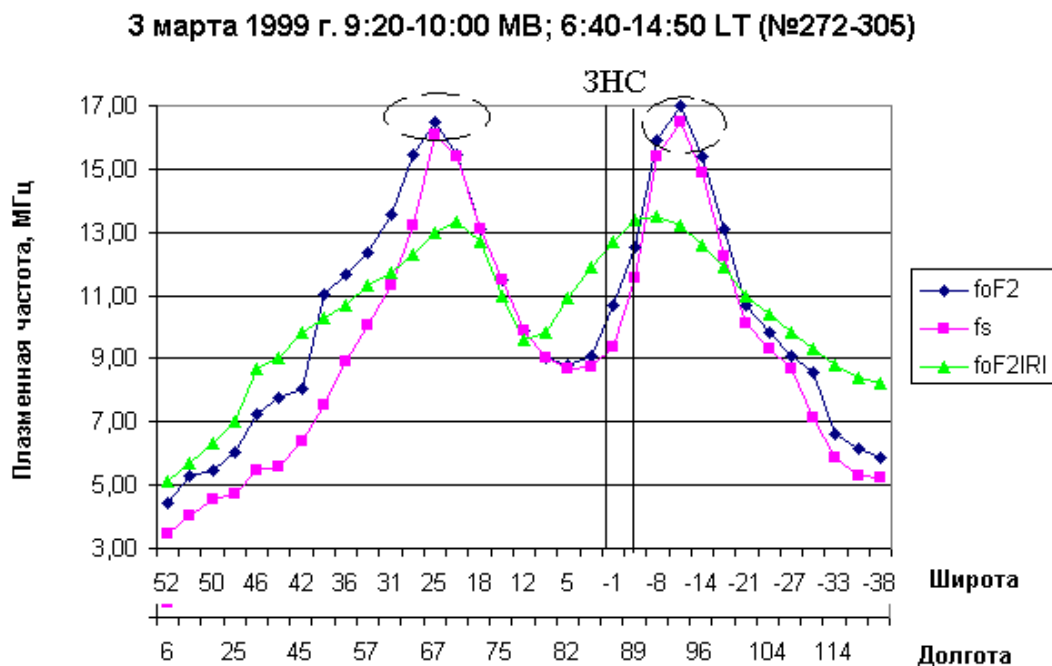


Рис.3. Распределение  $f_oF2$  и  $f_s$  вдоль орбиты ОК «Мир» 3 марта 1999 г. 9:20-10:00 МВ; 6:40-15:00 LT (№ 272-305)

Почти на всем участке зондирования, включая районы «гребней», ОК «Мир» находился на высоте выше  $h_mF2$ . На южном склоне северного «гребня» высота ОК сравнялась с высотой максимума ионограммы и приобрели характерный вид с вертикальными следами отражения от ионосферы. На северном склоне южного «гребня» комплекс опустился ниже максимума слоя F2. На этом участке была

зафиксирована одна ионограмма с ЗНС. Этот участок отмечен на рис.3. Далее при подходе к северному гребню высота ОК вновь стала больше высоты  $h_mF2$ .

На рис. 3 приведено сравнение экспериментальных значений  $f_oF2$  и критических частот  $f_oF2IRI$ , определяемых моделью IRI-2001. Сравнение показывает удовлетворитель-

ное совпадение в положении гребней ЭА, но расхождение в величине критических частот. Модель в большинстве случаев давала заниженный прогноз  $f_oF2$  в районах ЭА. Аналогичные сравнения приведены на последующих рисунках.

## 2.2 ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ 10-11 МАРТА 1999 Г.

Подтверждением предположения, что ионозонд на ОК «Мир» регистрировал резкие горизонтальные изменения плазменной частоты, являются две серии ионограмм с ЗНС, полученные 10 и 11 марта 1999 года. В локальном времени это были вечерний сеанс зондирования – южный «гребень ЭА пересекался в 20 ч., а северный в 21:30 LT.

Распределения плазменных частот 10 и 11 марта представлено на рис. 4. Появление ЗНС на ионограммах сопровождалось резким уменьшением критической частоты  $f_oF2$  от 15 до 8,5 МГц. Скорость уменьшения плазменных частот на высоте орбиты достигала 0,75 МГц/100 км. На вершинах «гребней» плазменные частоты как  $f_oF2$ , так и  $f_s$  превысили диапазон зондирования. Причем, как только критическая частота зондирования оказалась в диапазоне зондирования (стала менее 16 МГц), сразу стал появляться задержанный нижний след. 10 марта ЗНС на ионограммах регистрировался как на северном склоне южного «гребня», так и на южном склоне «северного гребня» ЭА. Уникальностью данного результата является то, что задержанный нижний след был за-

фиксирован в соседних районах на расстоянии около 1000 км (рис. 5 справа) примерно через 23 часа, т.е. в одно и то же местное время суток. Это подтверждает гипотезу о том, что причиной появления ЗНС были регулярные пространственные структуры ионосферы, свойственные этому району и этому времени в конкретном случае – восточный край ЭА.

Обратим внимание на идентичность ионограмм полученных в этих двух экспериментах на одной долготе (рисунок 5 слева). На этом же рисунке справа на карте прогноза плазменной частоты на высоте 360 км модели IRI показаны черными ромбами места получения ионограмм в сериях ионограмм с ЗНС. На представленных ионограммах особенно отмечается длинный след отражения от ионосферы, начинающийся на частоте  $f_s$ . Это свидетельствует о том, что ОК находился глубоко под максимумом ионосферы.

Качественно сравним результаты исследования экваториальной зоны ОК «Мир» с исследованиями полного электронного содержания (ТЕС). Для сравнения здесь и далее использовались карты ТЕС Мирового Центра Данных [4], которые строятся каждые два часа по комплексным данным навигационных спутников за этот интервал времени. Нанесем фрагменты следа орбит, на которых фиксировались ионограммы с ЗНС на карты ТЕС. В обоих случаях положение следа так же соответствует восточному краю ЭА (рис.6). На картах ТЕС использовано международное время UT (МВ = UT + 3 часа).

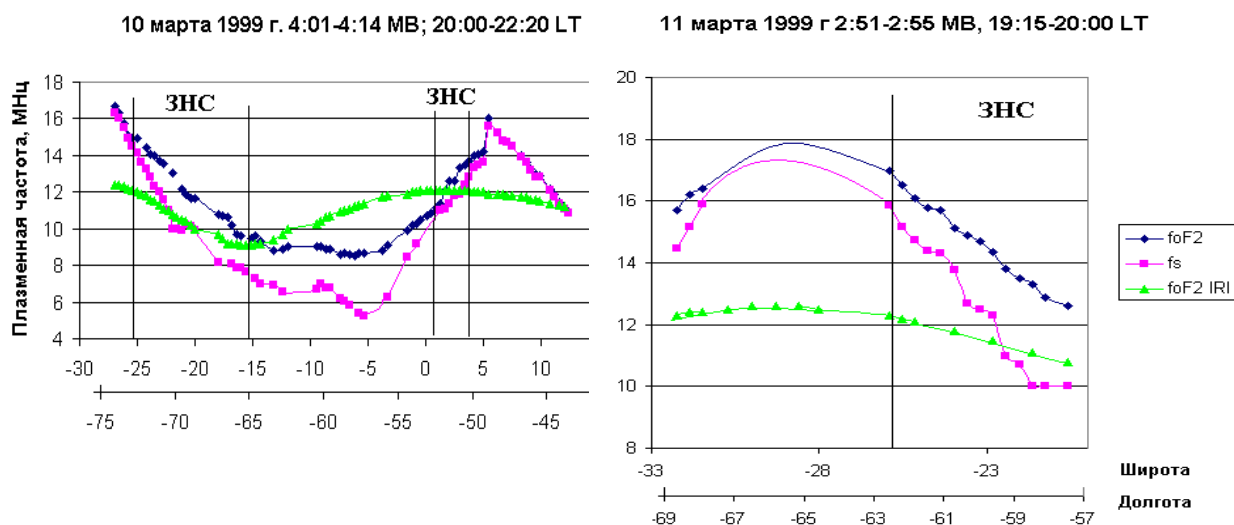


Рис.4. Распределения плазменных частот вдоль орбиты ОК «Мир»:

Слева – 10 марта 1999 г. при пересечении геомагнитного экватора, справа – 11 марта 1999 г. при пересечении южного «гребня» ЭА.

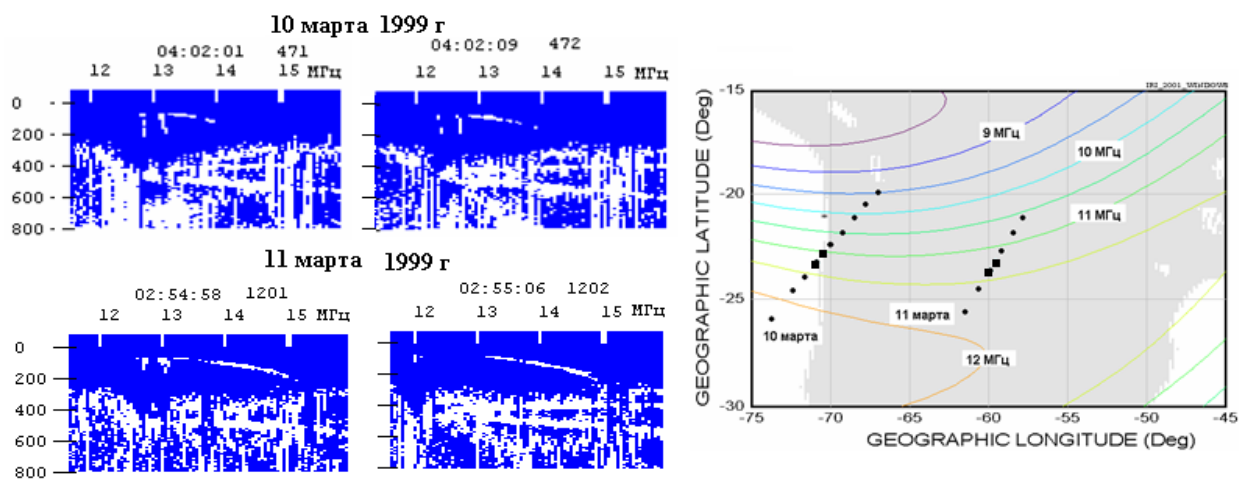


Рис. 5. Слева – ионограммы, полученные в районе Южной Америки 10 и 11 марта, справа следы орбит ОК «Мир» на фоне прогноза плазменных частот на высоте 360 км модель IRI-2001. Дважды черными ромбами на каждом следе выделены места регистрации приведенных ионограмм.

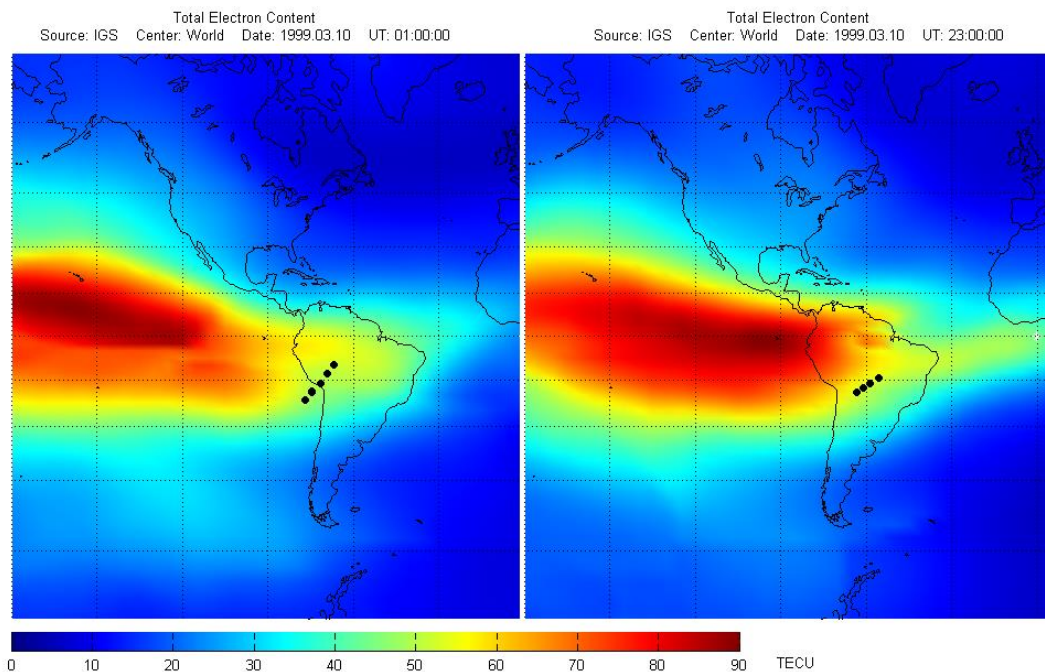


Рис. 6. Фрагменты карты распределения ТЕС по данным IGS 10 марта 1999 г с нанесенными участками следа орбиты ОК «Мир»: слева – 1:00 UT; справа – 23:00 UT

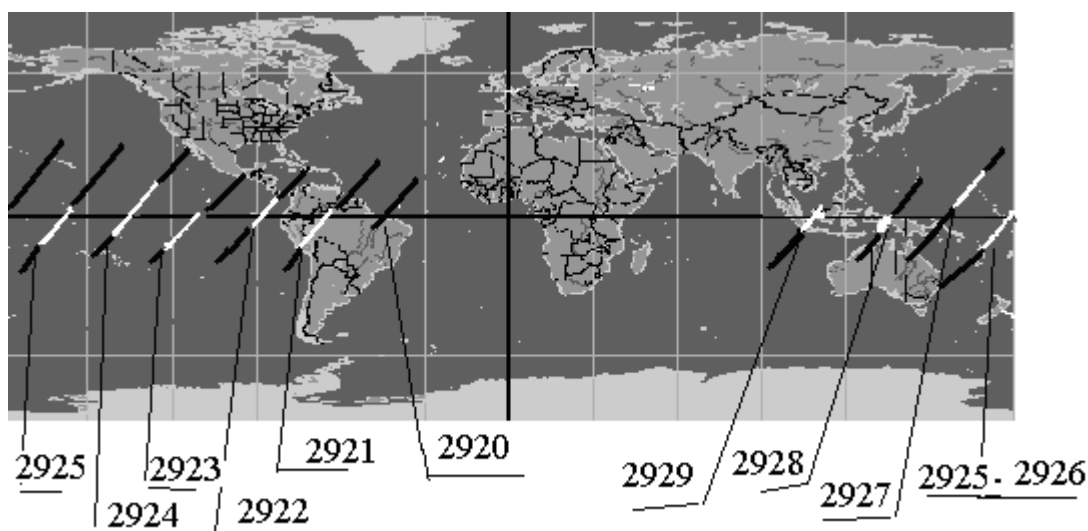


Рис. 7. Следы орбиты ОК «Мир» при пересечении экваториальной зоны в послеполуденные часы 31 марта – 1 апреля 1999 г. Светлые участки – фрагменты следов орбиты, на которых фиксировался ЗНС на ионограммах. Числами отмечены номера витков.

### 2.3 ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ 31 МАРТА – 1 АПРЕЛЯ 1999 Г.

За время эксперимента 1999 г. на ОК «Мир» было проведен суточный сеанс практически непрерывного радиозондирования ионосферы 31 марта – 1 апреля (ионограммы снимались через 32 с). За время этого сеанса ОК «Мир» пересекал экваториальную зону в полуденное время 10 раз. Следы орбит построены на рис.7.

Рассмотрим результаты исследования на двух последовательных витках на тех участках, где ОК днем пересекал экватор. Рассмотрим участок орбиты ОК «Мир» 2922 витка длиной более 7000 км с началом в точке с географическими координатами (26,01° S; 107,19° W) и концом в точке с координатами (19,58° N; 72,2°W). Местное время вдоль этого участка орбиты изменялось от 11:30 LT до 13:50 LT, что соответствовало  $\approx 21:30$  МВ. На рис. 8 представлено распределение  $f_oF2$  и  $f_s$  вдоль орбиты (виток 2922). Изменение плазменных частот показывает наличие с обеих сторон от геомагнитного экватора областей повышенной плотности электронов – «гребней» ЭА. Вершина южного «гребня» соответствовала  $\sim(19, 77^\circ$  S; 101,6° W), местное время  $\sim 11:50$  LT. Вершина северного «гребня»  $\sim(4,91^\circ$  N; 83,35° W), местное время  $\sim 13$  LT. Значения  $f_oF2$  на вершинах «гребней» близки и соответствуют  $\approx 15$  МГц. Между ними, почти на широте геомагнитного экватора, находится точка минимума критической частоты ионосферы с координата-

ми (8,35° S; 92,76° W), соответствующая 10,5 МГц.

Между «гребнями» ЭА находилась зона существенного увеличения высоты  $h_mF2$ , причем ОК на витках 2921-2929 оказывался ниже максимума концентрации электронов. На части такого участка, выделенной на рис. 8 и на рис. 7 светлой частью на следе орбиты, была зафиксирована серия ионограмм с ЗНС.

Качественно сравним результаты исследования экваториальной зоны ОК «Мир» с исследованием ТЕС.

Проекция этого участка орбиты на карте ТЕС показана на рис. 9. Результаты исследования, показанные на рис. 9. отнесены к 19:00 UT. На карте выделяется область повышенного значения ТЕС, соответствующая ЭА. На следе орбиты отмечены кружками места пересечения максимумов гребней экваториальной аномалии, а треугольниками – область появления ЗНС на ионограммах. Неоспоримо качественное совпадение определения положения ЭА в двух космических экспериментах.

Рассмотрим участок орбиты на следующем 2923 витке 31 марта с 22:59 по 23:07 МВ. Распределения  $f_oF2$  и  $f_s$  представлены на рис.10.

При прохождении этого участка ОК пересек магнитный экватор (широта  $\approx 4,2^\circ$  S [5]), отмеченный на рис. 10 треугольником. Характер изменения плазменных частот близок к предыдущему витку. Вершина южного «гребня» соответствовала точке с координатами (15,35° S; 121,26° W), местное время  $\sim 12$  LT. Вершина северного «гребня» соответствовала

точке с координатами (6,09° N; 105,75° W), местное время ~13 LT. Критические частоты на вершинах «гребней» близки и соответствуют 14,7 МГц на южном, 14 МГц на северном «гребне». Изменения плазменных частот на высоте спутника были меньше, чем в вечернее время 10-11 марта. Так в районе регистрации

ионограмм № 807, 808, 809 (на рис. 10 данные ионограммы 807 отмечены ромбом) скорость уменьшения плазменной частоты в направлении движения ОК на высоте 348 км была наибольшей в серии и составила 0,36 МГц на 100 км.

**31 марта 21:30 МВ, 11:30-14:00 LT  
(виток 2922, №678-707)**

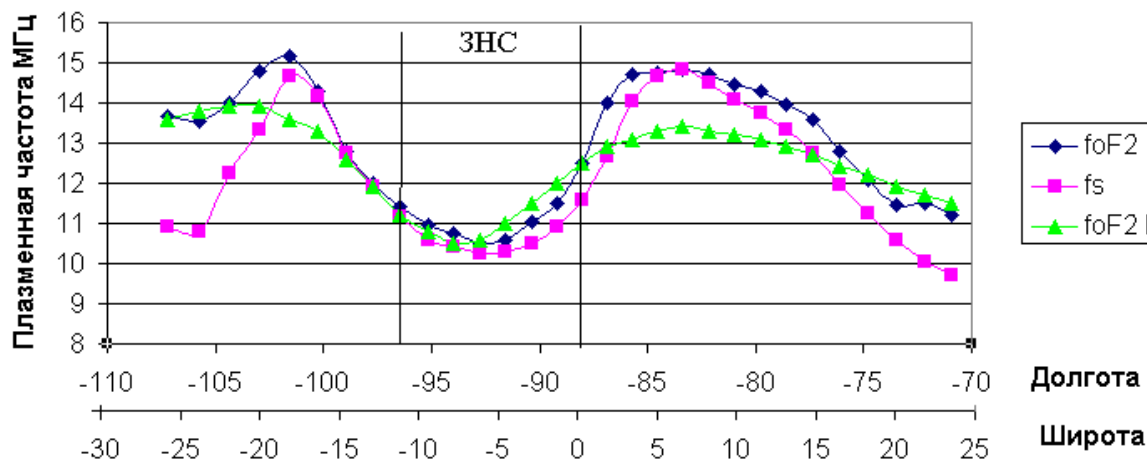


Рис. 8. Распределение  $f_{OF2}$  и  $f_s$  вдоль орбиты ОК «Мир» 31 марта 1999 г. 21:26-21:40 МВ; 11:30-13:50 LT виток 2922, № 678-707.

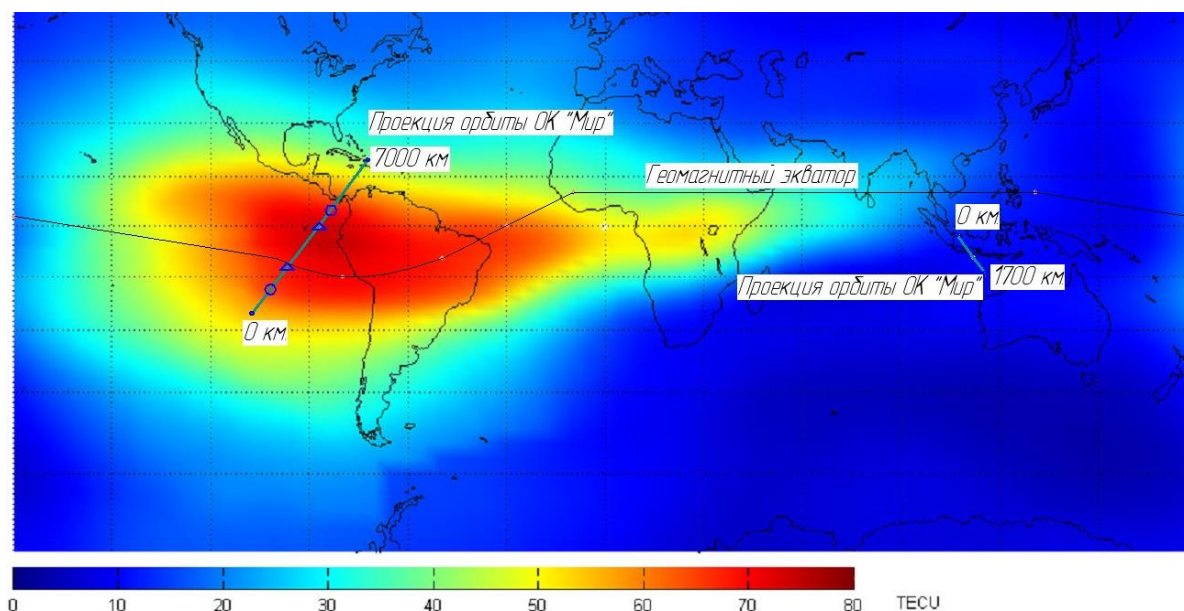


Рис. 9. Карта распределения TEC по данным IGS 31 марта 1999 г. 19:00 UT с нанесенными участками следа орбиты ОК «Мир».



**31 марта 23:00-23:15 МВ, 11:45-14:15 LT  
(виток 2923 № 800-831)**

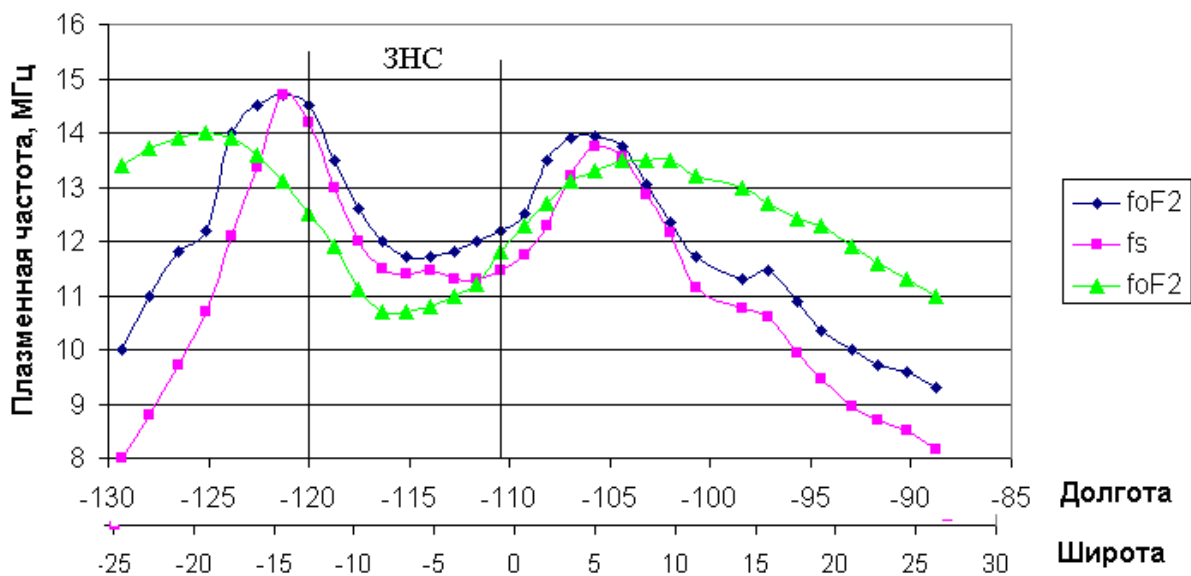


Рис. 10. Распределение  $f_oF2$  и  $f_s$  вдоль орбиты ОК «Мир» 31 марта 23:00-23:15 МВ, 11:45-14:15 LT, виток 2923, № 800-831.

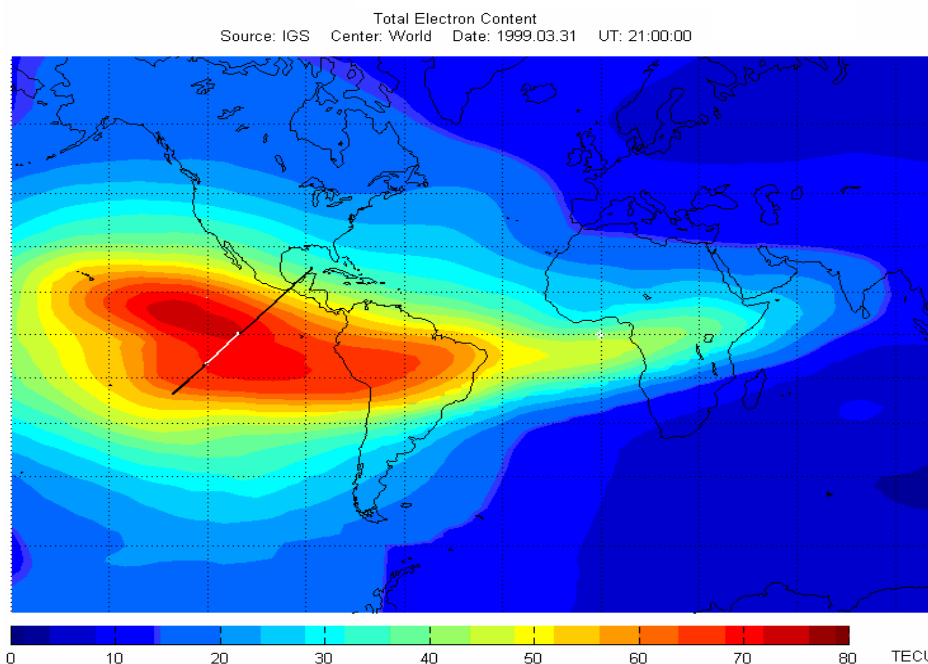


Рис. 11. Карта распределения ТЕС по данным IGS 31 марта 1999 г. 21:00 UT с нанесенным участками следа орбиты ОК «Мир», виток 2923.

На 2923 витке между «гребнями» ЭА фиксировалась серия ионограмм с ЗНС, уверенно продолжавшаяся одну минуту. Этот участок отмечен на рис.10. Местное время практически не изменилось относительно предыдущего витка и составило 12,5 LT. Перед началом серии

высота спутника совпала с высотой максимума электронной концентрации при плазменной частоте 14,5 МГц, после этого на следующих трех ионограммах зафиксирован ЗНС протяженностью 1-1,5 МГц, критическая частота

$f_oF2$  при этом уменьшилась от 14,5 до 12,5 МГц.

Продолжим качественное сравнение результатов радиозондирования с ОК «Мир» с данными ТЕС (рис.11).

Рис. 11 показывает, что ОК «Мир» пересекает область ЭА, причем область с наибольшим значением ТЕС остается в стороне от орбиты. Отметим, что на приведенной карте ТЕС картина распределения полного электронного содержания не идентична распределению  $f_oF2$  и  $f_s$ . На карте не просматриваются два «гребня» ЭА, и наибольшее значение ТЕС соответствует долине между «гребнями». Остальные случаи сравнения карт ТЕС 31 марта и распределений  $f_oF2$  в послеполуденной ионосфере выглядят аналогично.

В этом сеансе ОК пересекал экватор в полуденные часы 10 раз (на первом витке 2920 – ОК пересекал только северный «гребень», на последнем 2929 – только «южный» гребень ЭА). В каждом случае картина изменения параметров ионосферы соответствовала рассмотренной выше.

Эффект ЗНС в послеполуденное время явно определялся, но во многих случаях сопровождался сильным шумом, след в большинстве случаев был коротким, не более 2 МГц.

## 2.4 ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ 21 АПРЕЛЯ 1999 Г.

Очередной сеанс радиозондирования в экваториальной ионосфере проходил 21 апреля 1999 года. На рис. 12 построено полное распределение  $f_oF2$  и  $f_s$  этой серии вдоль орбиты ОК «Мир». Начало серии (26,59°N; 115,5°E), конец серии (2,81°N; 134,45°E). Эта серия интересна длительной и ярко выраженной серией ионограмм с ЗНС, зона регистрации которой показана на рис. 12. Было зафиксировано 30 ионограмм с ЗНС с интервалом 8 секунд в период с 10:14:42 по 10:18:26 МВ.

На рис. 13 приведены несколько ионограмм из серии, полученной 21 апреля 10:10–10:18 МВ, иллюстрирующей процесс формирования ЗНС. Цифрами вверху графика рис. 12 обозначены точки, соответствующие ионограммам с рис.13. Ионозонд ОК наблюдал пересечение северного «гребня» ЭА и зону над геомагнитным экватором. Высота  $h_mF2$  изменилась от 290 км у подножья северного склона «гребня» до 400 км в районе геомагнитного экватора.

Карта ТЕС (рис. 14) подтверждает тот факт, что ОК в рассматриваемый момент пересекает ЭА.

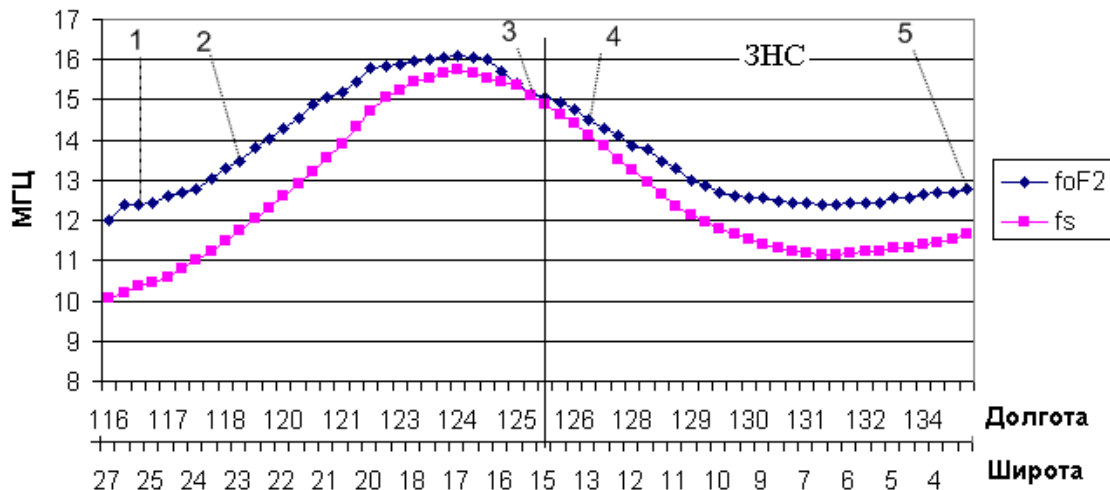


Рис. 12. Распределение  $f_oF2$  и  $f_s$  вдоль орбиты ОК «Мир» 21 апреля 10:15 МВ, 14:50-16:15 LT, виток 3246, № 550-609.

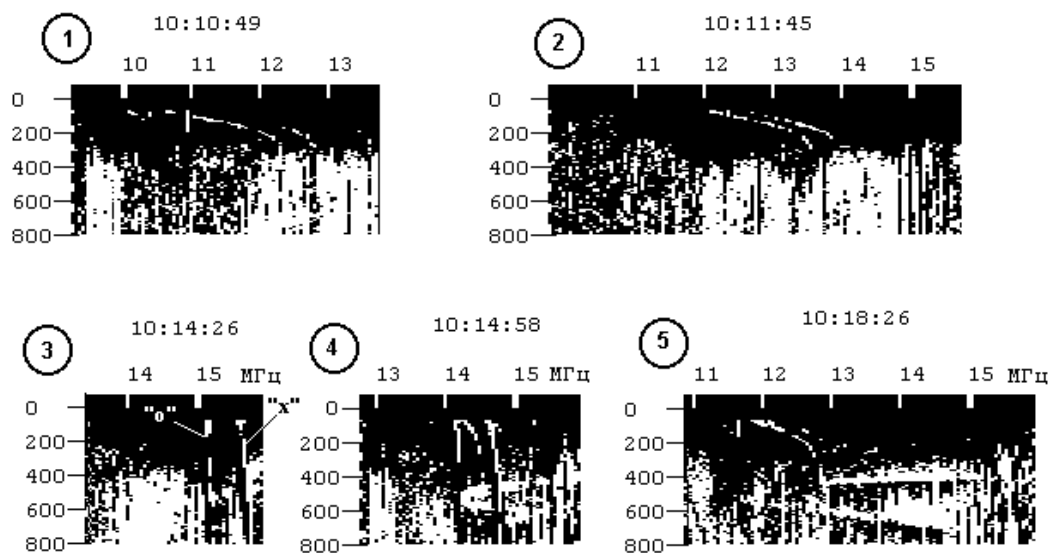


Рис. 13. Ионограммы ОК «Мир» 21 апреля 1999 г.

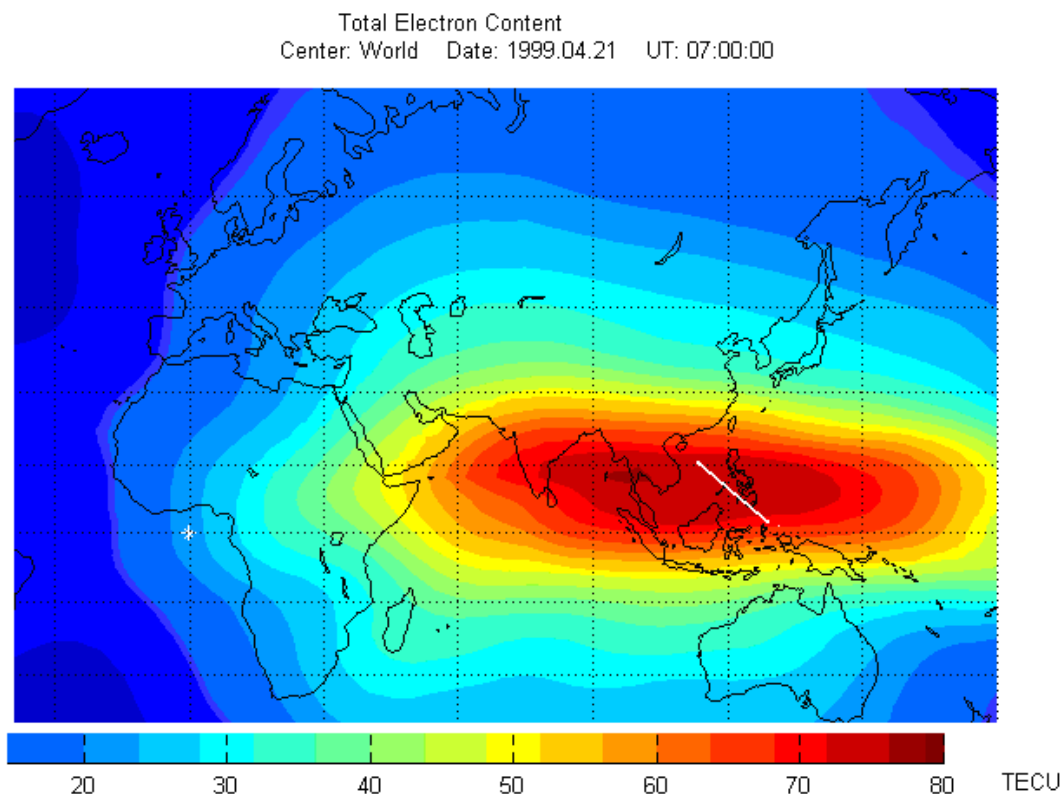


Рис. 14. Карта распределения TEC по данным IGS 21 апреля 1999 г. 7:00 UT с нанесенным участком следа орбиты ОК «Мир».

**2.5 АНАЛИЗ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ, НАБЛЮДАЕМЫХ ИОНОЗОНДОМ ОК «МИР» В ПОЛУНОЧНЫЕ ЧАСЫ 5, 6 И 7 МАЯ 1999 Г**

5 мая 1999 г. в период с 18:00 до 18:09 МВ и 19:30 до 19:40 МВ на двух последовательных витках 3472 и 3473 проводилось радиозондиро-

вание ионосферы в районе Тихого океана и побережья юго-восточной Азии. Местное время составило от 23:30 5 мая до 1:30 LT 6 мая. В это время ионосфера этого района обладает особенностью, выраженной в том, что ЭА характеризуется наличием одного «гребня», плазменные частоты резко уменьшаются на 20-40° N, однако высота максимума электронной концентрации на этих же широтах существенно уве-

личивается. На рис. 15 изображена модельная иллюстрация состояния ионосферы в этот пространственно-временной период.

На рис. 16 представлено распределение критических частот вдоль орбиты ОК «Мир» на рассматриваемых витках. Изменение долготы для витка 3472 составило  $125^{\circ}$ - $157^{\circ}$  E, а для витка 3473 –  $107^{\circ}$ - $131^{\circ}$  E.

На рис. 17 след орбиты наложен на карту ТЕС по данным IGS. Наблюдается качественное совпадения положения полуночного «гребня» ЭА и увеличения значения ТЕС вдоль орбиты ОК.

Через сутки 6 мая проводилось радиозондирование ионосферы в этом же районе. Местное время изменялось от 22:50 LT при пересечении экватора, до 0:30 LT. Распределение критических частот и частоты на высоте орбиты приведено на рис.18. Картина распределе-

ния несколько отличается от предыдущих суток. На распределении явно просматривается увеличение критической частоты на широте  $15$ - $25^{\circ}$ N, а не на  $25$ - $32^{\circ}$ N как на ионограммах 5 мая. Сравнение с моделью IRI-2001 также дает удовлетворительное совпадение в положении «гребня» и завышение величины максимума критической частоты на вершине «гребня» на 1 МГц. Такое занижение наблюдалось и в сравнениях с предыдущими событиями. В предыдущие сутки – 5 мая –наблюдалось существенное отличие от модели, как в положении «гребня», так и в значении критических частот (рис.16). Этот эксперимент также зафиксировал серию ионограмм с ЗНС в этом районе. Было зафиксировано 19 ионограмм с ЗНС, а затем, после перерыва в 32 с, еще 14 ионограмм.

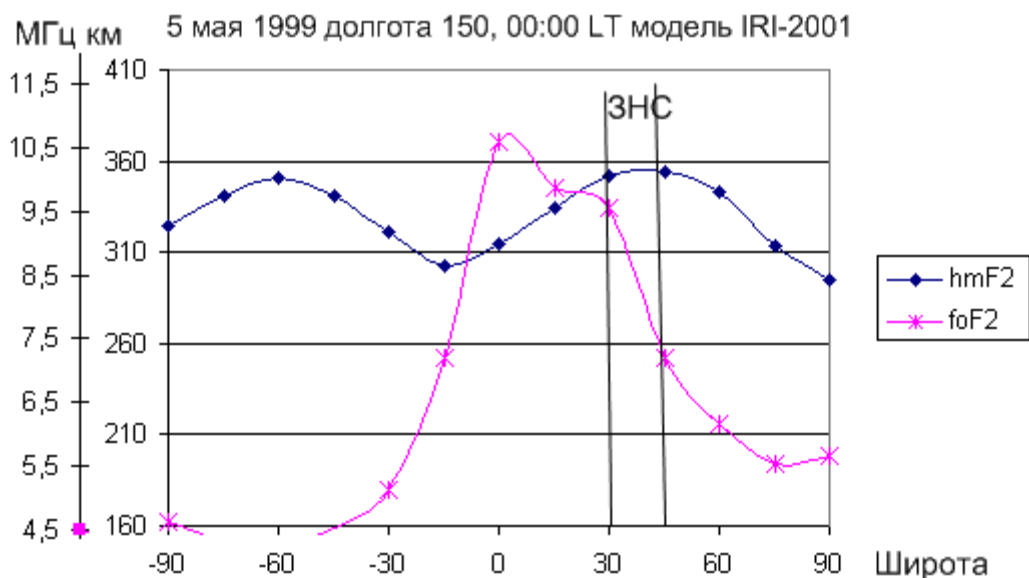


Рис. 15. Меридианный модельный разрез  $f_oF2$  и  $h_m$  на долготе  $150^{\circ}$  00:00 LT 5 мая 1999 г., выполненный с использованием модели IRI-2001

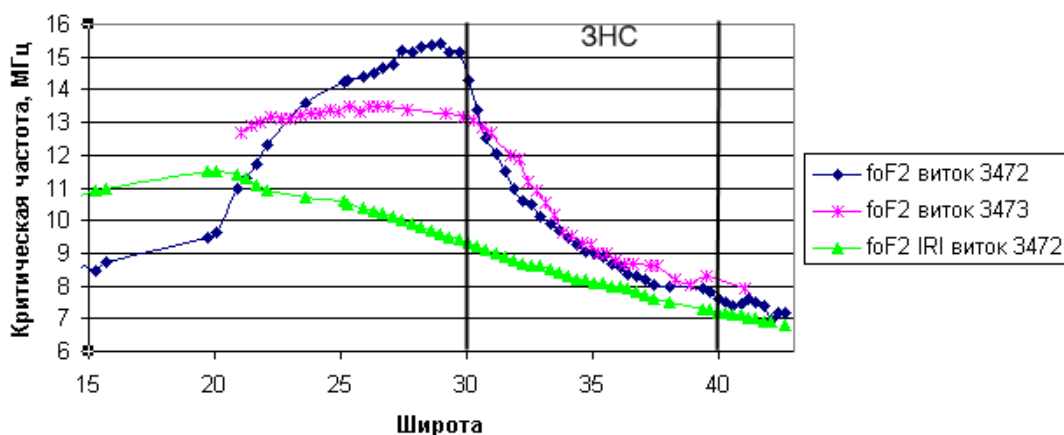


Рис. 16. Распределение  $f_oF2$  вдоль орбиты ОК «Мир» 5 мая 3472 виток 18:00-18:09 МВ и 3473 виток 19:31-19:40 МВ, 23:00-1:30 LT.

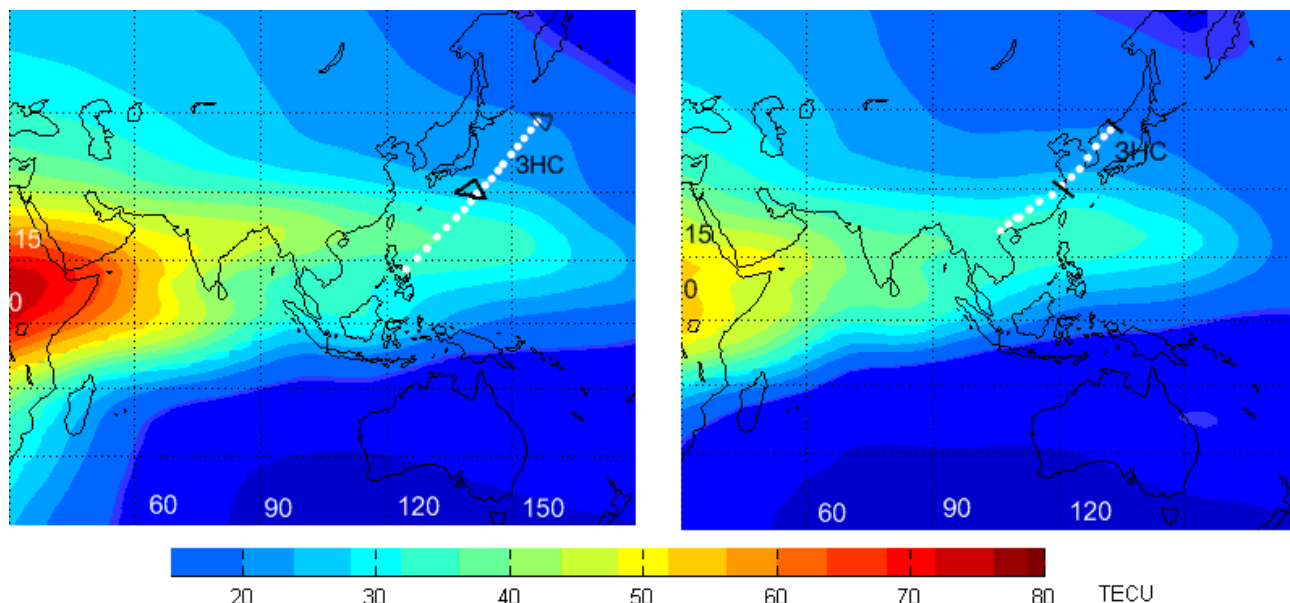


Рис. 17. Карты распределения ТЕС по данным IGS 5 мая 1999 г. с нанесенными участками следа орбиты ОК «Мир»

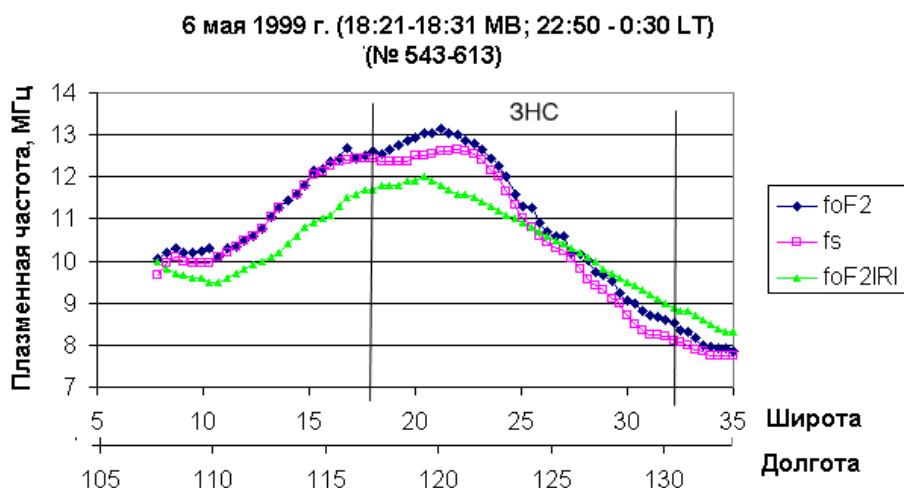


Рис. 18. Распределение плазменных частот вдоль орбиты ОК «Мир», виток 3488, 6 мая 1999 г. 18:21-18:31 МВ.

До появления ЗНС на ионограммах ОК находился выше максимума электронной концентрации, на широте  $\approx 17^\circ$  N, высота  $h_s$  сравнялась с  $h_m F2$ , и далее ОК «Мир» опустился ниже максимума концентрации. Одновременно на ионограммах стал просматриваться ЗНС. Зона регистрации серии ионограмм с ЗНС указана на рис. 18.

Эксперимент показывает, что в это время суток в экваториальной ионосфере этих широт существуют существенные горизонтальные градиенты электронной плотности, способные возвращать наклонно излученный сигнал об-

ратно на спутник. Подтверждением этого стал следующий эксперимент.

Через 5 витков в это же местное время 7 мая 1999 г. приблизительно на широтах, соответствующих  $30^\circ$  N, в районе Северной Африки была зафиксирована серия ионограмм с ЗНС. Нижние следы на ионограммах уверенные, но продолжительностью менее 2 МГц от частоты  $f_s$ . Как и в случаях 5 и 6 мая, ОК «Мир» пересекал северный склон ночного «ребня» ЭА.

Местное время 23:50-0:30 часа. Распределение плазменных частот на этом участке орбиты дано на рис.19.

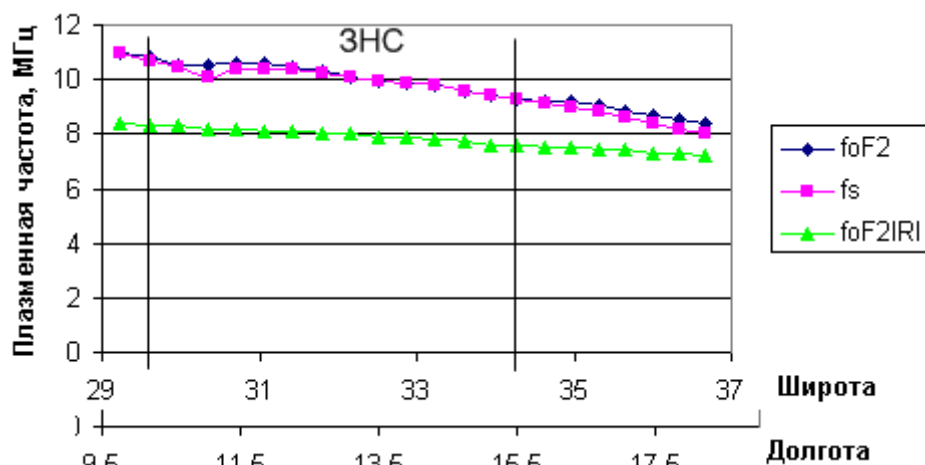


Рис. 19. Распределение плазменных частот вдоль орбиты ОК «Мир», виток 3493, 7 мая 1999 г. 2:07-2:10 МВ. 23:50-0:30 LT

Сравним два участка карт ТЕС для случая 6 мая 15 UT и 23 UT (рис.20). И в том и другом случаях карты ТЕС показывают незначительное увеличение полного электронного содержания. След ЗНС на ионограммах заканчивается на

одной геомагнитной широте. Начало появления следа сравнить затруднительно, так как ЗНС на ионограммах на витке 3493 начали появляться с самого начала эксперимента.

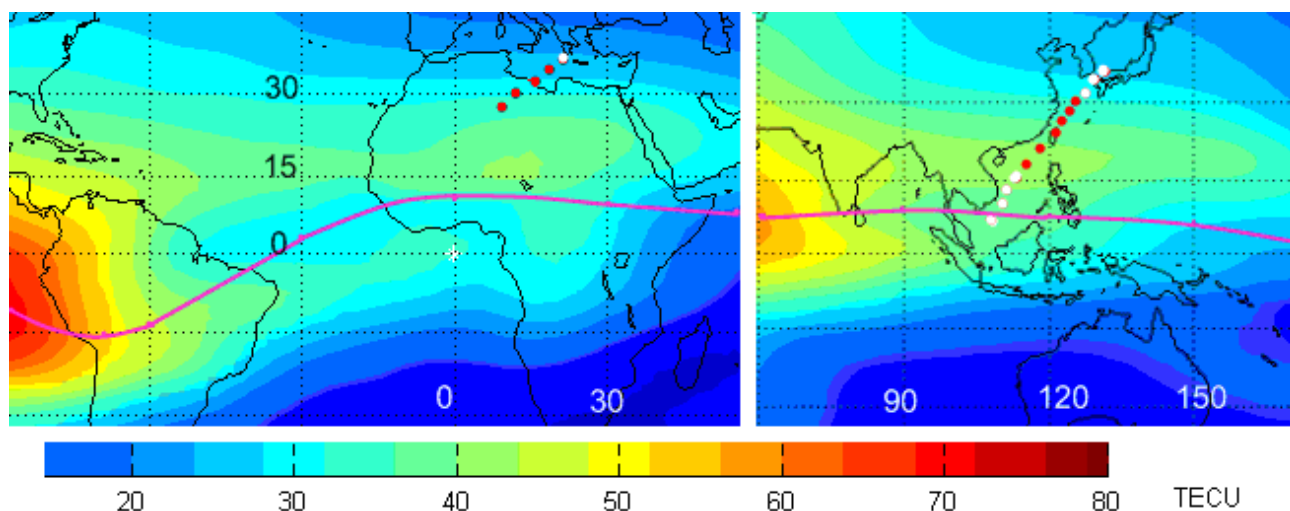


Рис. 20. Карты распределения ТЕС по данным IGS 6 мая 1999 г. с нанесенными участками следа орбиты ОК «Мир»: слева – 23:00 UT; справа – 15:00 UT. Розовая линия – геомагнитный экватор.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение места и времени регистрации ионограмм с задержанными нижними следами ионозондом ОК «Мир» с результатами определения полного электронного содержания показали, что в дневное локальное время ионограммы с ЗНС появлялись в районе экваториальной аномалии, а именно на северном склоне южного «ребра» или на южном склоне северного «ребра».

В часы, близкие к полуночи, уверенные серии ионограмм были зарегистрированы на нескольких витках на северном склоне ночного

«ребра» ЭА. Это свидетельствует о существенной неоднородности ионосферы в этот период.

Прослеживается тенденция регистрации схожего явления на близких широтах, но различных долготах в одно и то же локальное время, что свидетельствует о систематическом суточном характере исследуемого феномена.

**REGISTRATION OF RELATED LOW TRACES ON MIR MAN SPACE IONOGRAMS WITH RADIO SOUNDING AT ALTITUDES BELOW F2-LAYER MAXIMUM**

N. G. Kotonaeva

The paper analyzes the time and place of registration of the anomalous vertical radiosounding ionograms from “Mir” man space station.

On ionograms has an additional track with group delay, significantly greater than the existing distance for traces which reflected from the Earth.

Indirect comparison of the radiosounding results and the total electron content results studied.

KEYWORDS: VERTICAL RADIOSOUNDING, “MIR” MAN SPACE STATION”, RELATED LOW TRACE, EQUATORIAL ANOMALY.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Данилкин Н.П., Котонаева Н.Г. Обработка и интерпретация ионограмм радиозондирования ионосферы со сверхнизких орбит спутников // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т. 49. № 1. С. 74-87.
2. Котонаева Н.Г. Z-компонента магниторасщепленного сигнала при радиозондировании из окрестности максимума концентрации слоя F2 // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2009. Т. LII. № 5-6. С.390-399.
3. Котонаева Н. Г. Математическая модель радиозондирования ионосферы с искусственного спутника Земли на высотах ниже максимума концентрации электронов // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46. № 2. С. 234-242.
4. <ftp://cddis.nasa.gov/gps/products/ionex/1999/>
5. ГОСТ Р 25645.158-94 Ионосфера Земли верхняя. Модель распределения концентрации электронов в плоскости геомагнитного экватора. М.: Изд-во Госстандарт России, 1994