

Радиозондирование экваториальной ионосферы с высоты из окрестности ее максимума

Н.Г. Котонаева

*Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова,
129128, Москва, Ростокинская, 9,
e-mail: kongt@yandex.ru*

Статья посвящена анализу результатов эксперимента по радиозондированию экваториальной ионосферы ионозондом, находившимся на борту орбитального комплекса «Мир». В работе приведены распределения плазменных частот ионосферы вдоль орбиты комплекса в различное время суток. Приводятся расположения максимумов гребней экваториальной аномалии по данным ОК «Мир» и проводится сравнение с прогнозом модели IRI-2001. Участки наибольшего изменения электронной плотности и одновременного увеличения высоты максимума сопровождались появлением на ионограммах дополнительных следов с большими групповыми задержками. Проводится анализ времени и места регистрации подобных ионограмм. Результаты исследования качественно совпадают с результатами исследования Center World Data по определению полного электронного содержания.

Ключевые слова: орбитальный комплекс «Мир», ионосфера, спутниковое радиозондирование, ионограмма, критическая частота, плазменная частота, задержанный нижний след, экваториальная аномалия.

Введение

В 1999 г. проводился эксперимент по радиозондированию ионосферы с высот близких к высоте максимума концентрации электронов. Ионозонд располагался на борту орбитального комплекса (ОК) «Мир», высота орбиты которого составляла 350 ± 20 км. Наклонение орбиты составляло $51,65^\circ$. Наиболее интересные результаты были получены при исследовании экваториальной аномалии (ЭА). Эти районы, в особенности в дневные часы, характеризуются локальным увеличением высоты максимума электронной концентрации ионосферы ($h_m F2$) в районе геомагнитного экватора. При этом ОК на сравнительно коротком расстоянии менял свое расположение относительно этой высоты. Распределение электронной плотности в зоне ЭА обладает существенной неоднородностью, выраженной наличием в дневные часы двух, а в ночные одного «гребня» повышенной электронной плотности. Схематически расположение орбиты ОК «Мир» представлено на рис. 1. Расположение ионозонда выше и ниже $h_m F2$ меняет расположение основных следов на ионограммах (зависимостях действующей дальности от частоты). В статье (Данилкин, Котонаева, 2009) описаны основные правила интерпретации ионограмм, полученных при различном расположении спутника относительно максимума ионосферы. В результате эксперимента были получены длинные серии ионограмм, позволяющие судить об основных параметрах ЭА. Рассмотрим основные результаты эксперимента и сопоставим их с общепринятыми представлениями об ЭА, изложенными, например, в работе (Брюнелли, Намгаладзе, 1988).

Распределения $f_o F2$ вдоль орбиты ОК «Мир» в районе низких широт

Как уже говорилось выше, особенностью экваториальной ионосферы является наличие в суточном ходе критических частот в дневное время двух «гребней» повышенной электронной плотности. Гребни начинают формироваться в предполуденные часы вблизи геомагнитного экватора, затем перемещаются от экватора, до широт $\pm 15 \dots 20^\circ$ и затем опять сближаются к экватору, образуя один гребень в полуночные часы.

Приведем несколько рисунков, показывающих экспериментальное распределение f_oF2 в различное время суток в азиатской зоне. Результаты относятся к разным датам в районе марта – начала мая 1999 г.

6 мая на двух последовательных витках проводилось радиозондирование экваториальной ионосферы в утренние часы. Распределение f_oF2 представлено на рис. 2. Электронной концентрация возрастала вдоль орбиты ОК до географического экватора. Высота максимума, рассчитанная по следу отражения от ионосферы, незначительно повышалась до высоты сравнимой с высотой ОК (353 км) на широтах, близких к геомагнитному экватору — от 15 до 6° с.ш., и дальше начинала снижаться. Таким образом, в 9–10 LT механизм образования ЭА приводит к повышению высоты h_mF2 над геомагнитным экватором, однако диффузионное растекание плазмы в это время проходит преимущественно в южном направлении.

Исследование районов экватора в полуденные часы проходило 3 и 31 марта. В это время «гребни» ЭА ярко выражены. На рис. 3 приведено распределение f_oF2 и распределение плазменной частоты на высоте ОК f_s 6 мая 1999 г. При прохождении этого участка ОК пересекает магнитный экватор (~4,2° ю.ш.). Вершина южного «гребня» соответствовала точке с координатами (15,35° ю.ш., 121,26° з.д.), местное время ~12 ч LT. Вершина северного «гребня» соответствовала точке с координатами (6,09° с.ш., 105,75° з.д.), местное время ~13 ч LT. Критические частоты на вершинах «гребней» близки и соответствуют 14,7 МГц на южном, 14 МГц на северном «гребне». Величина гребней обычно неодинакова, симметрия для американского региона наблюдается в феврале (Брюнелли, Намгаладзе, 1988), что подтверждается экспериментом. Для сравнения на рис. 3 приведено распределение f_oF2 , полученное с использованием модели IRI-2001. В модельном распределении «гребни» ЭА расположены дальше от геомагнитного экватора и значения f_oF2 на их вершинах меньше эмпироза. Подобное отличие наблюдалось в большинстве рассмотренных случаев.

По каждой ионограмме рассматриваемой серии (см. рис. 3) были восстановлены зависимости плазменной частоты f_n от высоты и проведена интерполяция значений плазменных частот на одной высоте по каждому из этих профилей. Это позволило восстановить картину распределения плазменных частот вдоль орбиты ОК «Мир» в районе ЭА на расстоянии 4500 км. На рис. 4 горизонтальной линией показана высота орбиты ОК «Мир» h_s , а дугой — линия высоты максимума электронной концентрации. Распределение частот в области между ними, обозначенное I, может быть восстановлено по следам отражения от ионосферы на ионограммах; область II — ниже этих линий — может быть скорректирована по следу отражения от Земли; область III — выше этих линий — является модельным продуктом IRI-2001.

Как отмечается в работе (Брюнелли, Намгаладзе, 1988), два «гребня» ЭА в американском долготном секторе существуют до 22 LT. Подобную картину ионозонд ОК «Мир» наблюдал 10–11 марта в районе Южной Америки на 4 витках. Одно из этих распределений приведено на рис. 5. Сравнение с моделью IRI-2001 показывает резкое расхождение в величинах f_oF2 .

Известно, что в годовом ходе f_oF2 максимальные значения приходятся на февраль – апрель и октябрь – ноябрь (Брюнелли, Намгаладзе, 1988). Основные результаты по исследованию экваториальной ионосферы, полученные в марте – начале мая 1999 г., пришлись именно на период максимальных значений критических частот. Ионозонд на борту ОК «Мир» работал в интервале частот от 3 до 16 МГц. В большинстве случаев критические частоты на вершинах «гребней» ЭА превосходили указанные значения. Поэтому значения в интервале выше 16 МГц брались условно. На рис. 5 эта область показана овалом.

В часы около полуночи экваториальная ионосфера характеризуется наличием одного явно выраженного «гребня» ЭА, причем в азиатском секторе — севернее геомагнитного экватора (Брюнелли, Намгаладзе, 1988). Подобная картина была зарегистрирована 5 и 6 мая на трех витках. Одно из распределений представлено на рис. 6.

Пространственно-частотные характеристики максимумов «гребней» ЭА весной 1999 г. по результатам исследования ОК «Мир»

В табл. 1 приведены данные расположения максимумов «гребней» ЭА и значений f_oF2 днем по всем сеансам радиозондирования с ОК «Мир».

Координаты максимумов «гребней» согласуются с нахождением геомагнитного экватора, что иллюстрирует рис. 7. На рисунок нанесен прогноз модели IRI-2001 для 12 ч LT 31 марта 1999 г. Все вершины «гребней» находятся в интервале (12° ; 18°) к северу и к югу от геомагнитного экватора. Можно отметить, что в азиатском секторе расстояния между гребнями больше, чем в американском за счет смещения к югу южного «гребня».

Таблица 1. Характеристики максимумов «гребней» ЭА по результатам ОК «Мир»

№ п/п	Дата	«Южный» гребень ЭА				«Северный» гребень ЭА			
		Широта	Долгота	LT	f_oF2	Широта	Долгота	LT	f_oF2
1	2.03	-3,00	76,45	13	13,50	17,54	61,96	12	13,75
2	3.03	-13,00	141,00	13	16,30	26,31	111,61	11	16
3	3.03	-10,33	116,39	13	15,25	25,58	89,14	11	~16,50
4	3.03	-11,12	93,70	13	~17,00	24,78	66,51	11	~16,50
5	10.03	-14,0	-39,6	20,8	~16,5	16,31	-17,5	22	12,9
6	10.03	-27	-74	20	~17,00	6,25	-48,24	22	~16,5
7	11.03	-30	-66,2	19,3	~17,00	зондирование не проводилось			
8	11.03	-12,7	-27,2	20,5	~17,00	18,6	-4,7	22	~16,2
9	31.03	зондирование не проводилось				17,24	-27,63	13,5	16,05
10	31.03	-25,58	-83,53	11,5	13,9	0,39	-63,32	12,5	14,25
11	31.03	-19,77	-101,6	11,8	15,15	4,91	-83,35	13	14,85
12	31.03	-15,35	-121,26	12	14,7	6,09	-105,75	13	13,95
13	1.04	-17,37	-146,11	12	16,6	7,33	-128,11	13	13,25
14	1.04	-12,56	-165,61	12	14,2	15,11	-145,55	14	16,4
15	1.04	-11,54	171,91	12	15,85	19,46	-165,202	13,5	~16,55
16	1.04	-5,56	153,15	12,3	16,2	22,25	173,86	14	15,7
17	1.04	-9,33	127,05	12	15,3	зондирование не проводилось			
18	1.04	-8,09	104,7	12	16,1	зондирование не проводилось			
19	21.04	зондирование не проводилось				17,13	123,82	15,5	12,4
20	23.04	зондирование не проводилось				23,56	118,44	14	~17

Особенности ионограмм спутникового радиозондирования из районов ЭА

В те моменты, когда ОК «Мир» пересекал ЭА на ионограммах, с завидной регулярностью, появлялся длительный по частоте дополнительный след с большими групповыми задержками, получивший название задержанный нижний след (ЗНС). 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 $h_m F2$, причем на соседних ионограммах можно отметить процесс «формирования» следа и, если позволяла длительность сеанса зондирования, процесс его распада. На рис. 3, 6 отмечены зоны регистрации ионограмм с ЗНС. В том случае, когда в этих районах высота максимума ионосферы не превышала высоты ОК, ЗНС на ионограммах не фиксировались. Так, например, в случае 11 марта, изображенном на рис. 5, высота $h_m F2$ была близка к h_s , следы отражения от ионос-

феры были почти вертикальными и ЗНС не регистрировались. На следующем витке на тех же широтах в то же местное время высота максимума увеличилась, и след ЗНС на ионограммах стал отчетливым. Две ионограммы из этой серии представлены на рис. 8 (внизу). На этом же рисунке сравниваются ионограммы из двух серий 10 и 11 марта. Ионограммы получены приблизительно в одно и то же местное время (~20 ч LT) на одной широте и демонстрируют идентичность расположения следов отражения. Места регистрации приведенных ионограмм на рис. 8 справа выделены двумя черными ромбами на каждом следе.

Появление таких ионограмм связывают (Котонаева, Скоморох, 2009) с горизонтальными градиентами электронной плотности в районах ЭА и с существованием траекторий зондирующих радиолучей особого типа, возвращающихся на комплекс после дифракции в ионосфере. Информация о времени и месте регистрации ионограмм с ЗНС приведена в табл. 2. В ней указывается московское зимнее декретное время (МВ), и местное время начала серии (LT) с точностью до 0,5 ч.

Таблица 2. Участки орбиты, на которых были зафиксированы ЗНС

№ п/п	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	6.05.1999	18,5	23,5	18,02	115,83	32,18	129,39
15	7.05.1999	2	0	29,23	9,68	33,23	14,20
16	7.05.1999	4	9,5	12,37	122,22	7,87	125,54
17	2.06.1999	19,5	20,5	34,71	65,51	32,95	67,69

Качественное сравнение результатов радиозондирования с ОК «Мир» и исследований полного электронного содержания

Качественно сравним результаты исследования экваториальной зоны ОК «Мир» с исследованием полного электронного содержания (ТЕС). Для сравнения использовались карты ТЕС Мирового Центра Данных (<ftp://cddis.nasa.gov>), которые строятся каждые два часа по комплексным данным навигационных спутников за этот интервал времени. На карту ТЕС (рис. 9) нанесен фрагмент следа орбиты ОК «Мир». Белым цветом выделен участок, на кото-

ром зафиксированы ионограммы с ЗНС. На рис. 9 видно, что ОК «Мир» пересекает область ЭА, причем область с наибольшим значением TECU 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 рис. 3. На карте не просматриваются два «гребня» ЭА и наибольшее значение ТЕС соответствует долине между «гребнями». Несмотря на это, неоспоримо качественное совпадение определения положения ЭА в двух космических экспериментах.

Наиболее интересно и неожиданно появление ионограмм с ЗНС в полуночное время. Было зафиксировано четыре таких случая. Карты ТЕС, с нанесенными следами орбиты ОК «Мир» для двух из них представлены на рис. 10. Красными точками на этом рисунке выделены участки регистрации ЗНС.

Распределение f_oF2 , представленное на рис. 6, соответствует правой карте рис. 10. Можно отметить качественное совпадение определения положения одного «гребня» ЭА в двух экспериментах. Однако наличие ЗНС на ионограммах свидетельствует о существенных горизонтальных градиентах электронной плотности. Двухчасовые карты ТЕС дают более сглаженную картину распределения электронной плотности.

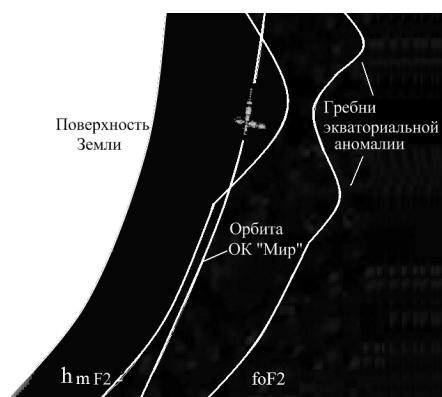


Рис. 1. Схематическое изображение пересечения орбитой ОК «Мир» ЭА в дневные часы



Рис. 2. Распределения f_oF2 вдоль орбиты ОК «Мир» в районе Юго-Восточной Азии 6 мая 1999 г. 7:30–10:30 LT

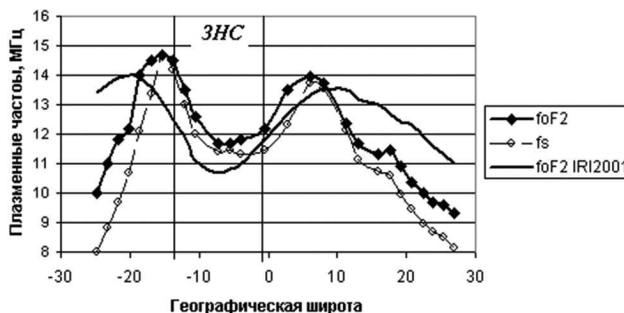


Рис. 3. Распределение f_oF2 и f_s вдоль орбиты ОК «Мир» 31 марта, 11:45–14:15 LT, 130–90° з.д., виток 2923

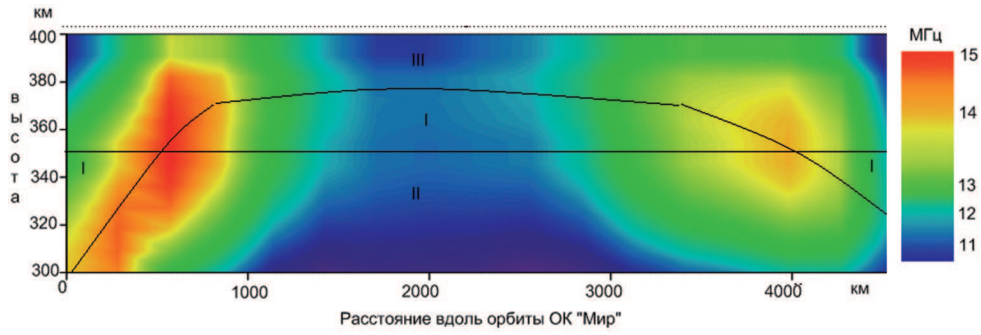


Рис. 4. Распределение f_o вдоль орбиты ОК «Мир» в районе ЭА 11:45–14:15 LT, 130–90° з.д., виток 2923

11 марта 1999 г. 1:15-1:35 МВ, 18:30-22:30 LT

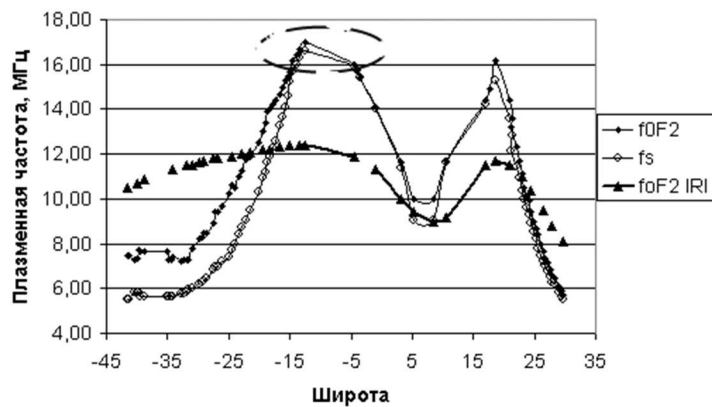


Рис. 5. Распределения плазменных частот вдоль орбиты ОК «Мир» 11 марта 1999 г. 18:30–22:30 LT, 50–5° в.д.

6 мая 1999 г. (18:21-18:31 МВ; 22:50 - 0:30 LT)
(№ 543-613)

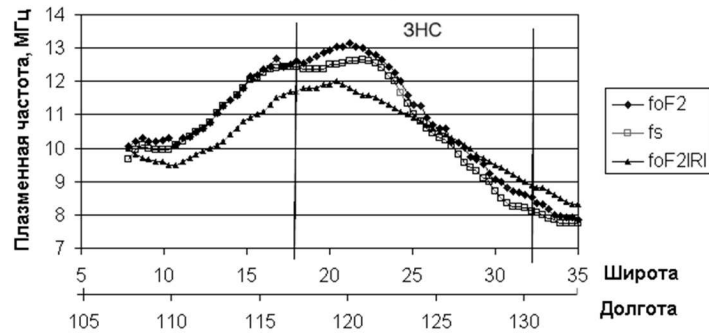


Рис. 6. Распределение плазменных частот вдоль орбиты ОК «Мир», виток 3488, 6 мая 1999 г. 22:50–0:30 LT

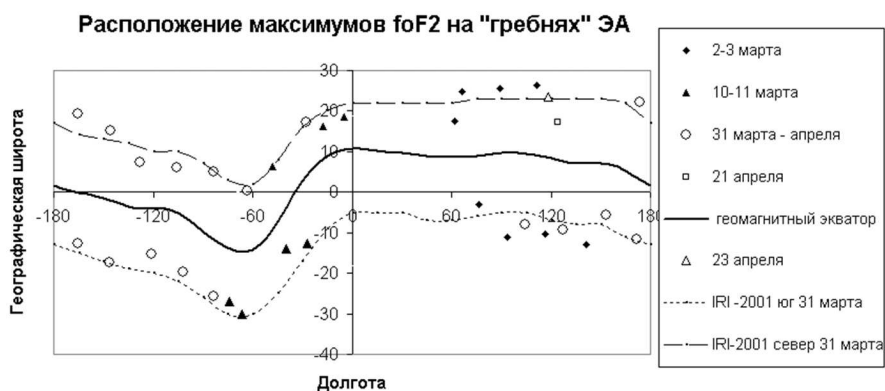


Рис. 7. Расположение максимумов «гребней» ЭА

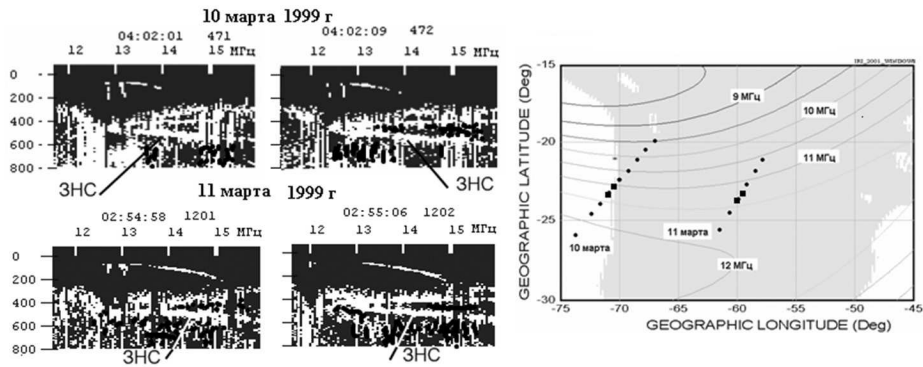


Рис. 8. Слева — ионограммы, полученные в районе Южной Америки 10 и 11 марта, справа — участки орбит ОК «Мир» на фоне прогноза плазменных частот на высоте 360 км, модель IRI-2001

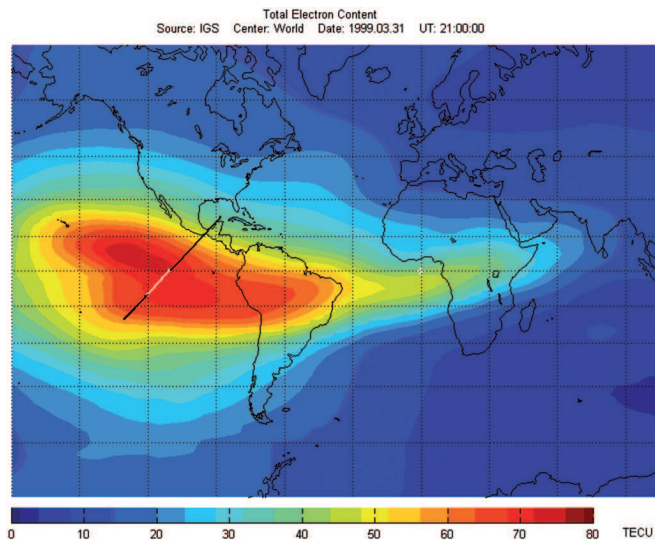


Рис. 9. Карта распределения TEC по данным WDC 31 марта 1999 г. 21:00 UT с нанесенными участками следа орбиты ОК «Мир», виток 2923

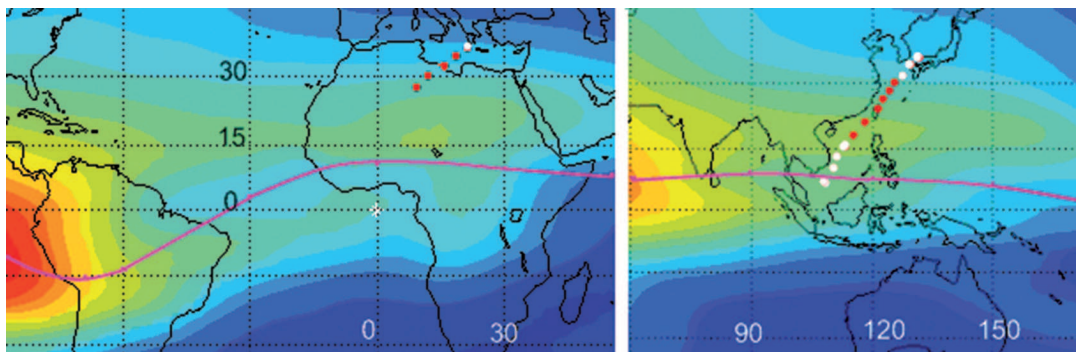


Рис. 10. Карты распределения TEC по данным WDC 6 мая 1999 г. с нанесенными участками следа орбиты ОК «Мир»: слева — 23:00 UT; справа — 15:00UT. Красная линия — геомагнитный экватор

Выводы

Радиозондирование с высот из окрестности максимума ионосферы позволяет получить информацию о состоянии ионосферы в районе ЭА на ряду с другими методами исследования. Результаты эксперимента на ОК «Мир» в целом не противоречат и подтверждают

известные представления об ЭА. Присутствие дополнительных следов на ионограммах в районах «гребней» ЭА при нахождении спутника ниже максимума электронной концентрации может интерпретироваться как признак существенных горизонтальных градиентов электронной плотности, не сонаправленных орбите.

Литература

1. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 527 с.
2. 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.
3. Котонаева Н.Г., Скоморох Р.В. Горизонтальные градиенты электронной плотности в экваториальной области по данным радиозондирования с орбитального комплекса «Мир» // Тр. Международной науч. конф. «Излучение и рассеяние электромагнитных волн ИРЭМВ-2009». Таганрог, 2009. С. 558–562. [Электрон. текст]. Режим доступа: <ftp://cdis.nasa.gov/gps/products/ionex/1999/>.

Equatorial ionosphere radiosounding from the height of the vicinity of its maximum

N.G. Kotonaeva

*Fedorov Institute of Applied Geophysics,
129128, Moscow, Rostokinskiy, 9,
e-mail: kongt@yandex.ru*

This article analyzes the results of an experiment on radio sounding of the equatorial ionosphere, with the help of ionosonde, who was on board the space station (SS) Mir. The paper presents the distribution of the plasma frequency of the ionosphere along the orbit of the complex at different times of day. An arrangement of the maxima of the equatorial anomaly crests according to data of the OS “Mir” are shown and this location is compared with the forecast model IRI-2001. Zones of the greatest change of electron density and a simultaneous increase in the maximum height were accompanied by the appearance of additional traces on ionograms with large group delays. The analysis of the time and place of registration of such ionograms are made. Results of the study agree qualitatively with the results of studies IGS Center World Date, by definition, the total electron content.

Keywords: space station Mir, the ionosphere, satellite radio sounding, ionograms, the critical frequency, plasma frequency, retarded lower trace, the equatorial anomaly.