

## ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ F-РАССЕЯНИЯ ПО ДАННЫМ ИК-19 В ПЕРИОД РАВНОДЕНСТВИЯ

В.А. Телегин<sup>1,2</sup>, И.В. Суровцева<sup>3</sup>, В.О. Скрипачев<sup>3,4</sup>, Е.Р. Пименова<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, (ИЗМИРАН), г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ОАО «НПК «НИИДАР», г. Москва, Россия

<sup>3</sup>АО «Российские космические системы», г. Москва, Россия

<sup>4</sup>МТУ (МИРЭА), г. Москва, Россия

e-mail: telvika@gmail.com

**Аннотация.** Изучены особенности появления F-рассеяния по результатам обработки данных внешнего зондирования ионосферы при высокой солнечной активности. С помощью разработанного программного обеспечения проведена верификация большого массива данных. По результатам статистического анализа методом обратного расстояния впервые построены трехчасовые карты вероятности появления F-рассеяния для периода равноденствия. Показана временная изменчивость глобального распределения рассеяния в максимуме F2 слоя ионосферы.

Результаты анализа и обработки большого массива данных спутника Интеркосмос-19 показывают, что эти данные позволяют проводить всестороннее исследование явления F-рассеяния в глобальных масштабах. А это дает возможность детально изучить особенности характеристик указанного явления на всех долготах и широтах, т.е. в разных областях ионосферы, в том числе и в области низких широт и над океанами, где мало станций наземного зондирования ионосферы [1].

Поскольку F3 (этот тип рассеяния отнесен авторами к максимуму слоя F2 ионосферы) наиболее часто встречается на ионограммах внешнего зондирования на всех широтах, была поставлена задача статистического анализа характеристик глобального распределения этого типа рассеяния.

Глобальное распределение вероятности появления F-рассеяния строилось и изучалось авторами на основе анализа цифровых ионограмм, а особенности этого явления - по аналоговым ионограммам. Всего для периода равноденствия (март, апрель, сентябрь, октябрь) обработано порядка 70.000 ионограмм ИК-19 при высокой солнечной активности (F10.7~200) в 1979-1981 гг.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	SEANS	n	ut	ft	alt	lat	long	ilat	i	FxS	FoF2	F1	F2	F3
2	299	646	20155	0	509.5	55.2	330.2	58.6	71.7	7.4	7.62	0	1	1
3	299	833	52123	0	509.5	55.3	279.9	67.2	80.4			1	1	1
4	385	231	200751	0	563.6	26.3	58.4	20.8	38.5			0	0	0
5	385	512	10735	0	570.5	24.3	343.6	21.4	35.6	11.5	12.9	0	0	0
6	385	699	42704	0	571.4	24.3	293.3	37.8	55.8	7.7	10.105	0	1	1
7	385	793	60720	0	577.6	22.4	268.7	34.1	52.6	5.6	7.905	0	0	0
8	2728	875	43916	0	958.7	-74	290.2	-58.2	-67.1	2.1	6.2	0	0	0
9	2856	685	215748	0	1003.3	-71.6	31.1	-66.3	-69.3	1.7	4.91	1	1	1
10	2871	129	125448	0	1004.2	-71.3	166.6	-77.4	-84.6					
11	5405	469	224028	0	512.5	74	20.1	70.2	80					
12	5405	842	51820	0	512	74	281	84.3	87	5.4	6.935	1	1	1
13	5461	364	210915	0	511	74	43.4	68.7	80.8					

**Рисунок 1.** Пример файла с исходными данными

Для решения указанных задач и уточнения исходных данных разработано программное обеспечение (ПО), позволившее в значительной степени повысить оперативность верификации большого массива данных. При работе ПО, реализованном на языке VBA [2], задавались границы прямоугольных областей, что позволило сформировать выборку ионограмм по номерам и по сеансам зондирования, подлежащих верификации.

После верификации данных информация о результатах внешнего зондирования для периода равноденствия была систематизирована и представлена таблично (Рис. 1).

Для изучения третьего типа F-рассеяния (F3) во временной динамике после сортировки значений по местному времени проведена систематизация данных в трехчасовые временные интервалы.

Построение карт распределения вероятностей рассеяния третьего типа и выявление неоднородностей в ионосфере проводилось с использованием программного обеспечения *Surfer*.

Алгоритм работы программы можно представить в виде трех основных функциональных блоков [3]:

- 1) построение цифровой модели поверхности;

- 2) вспомогательные операции с цифровыми моделями поверхности;
- 3) визуализация поверхности.

Отметим, что цифровая модель поверхности представляется в виде значений в узлах прямоугольной регулярной сетки, дискретность которой определяется в зависимости от конкретной решаемой задачи.

Для построения карты распределения вероятностей рассеяния исследуемого типа создавался файл, содержащий начальные данные для каждого временного интервала (Рис. 2).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1 s	646	20155	0	509.5	55.2	330.2	58.6	71.7	7.4	7.62	0	1	1	1
2	299	833	52123	0	509.5	55.3	279.9	67.2	80.4			1	1	1
3	385	231	200751	0	563.6	26.3	58.4	20.8	38.5				0	0
4	385	512	10735	0	570.5	24.3	343.6	21.4	35.6	11.5	12.9	0	0	0
5	385	699	42704	0	571.4	24.3	293.3	37.8	55.8	7.7	10.105	0	1	1
6	385	793	60720	0	577.6	22.4	268.7	34.1	52.6	5.6	7.905	0	0	0
7	2728	875	43916	0	958.7	-74	290.2	-58.2	-67.1	2.1	6.2	0	0	0
8	2856	685	215748	0	1003.3	-71.6	31.1	-66.3	-69.3	1.7	4.91	1	1	1
9	2871	129	125448	0	1004.2	-71.3	166.6	-77.4	-84.6					
10	5405	469	224028	0	512.5	74	20.1	70.2	80					
11	5405	842	51820	0	512	74	281	84.3	87	5.4	6.935	1	1	1
12	5461	364	210915	0	511	74	43.4	68.7	80.8					
13	5475	183	202139	0	512	73.9	54.9	68.2	81.5		6.5			
14	5475	556	25931	0	512.4	73.8	315.8	79.2	82.6					
15	5576	92	180727	0	535.7	71.9	88.7	65.6	82.9	6	7.07	1	1	1
16	5606	372	213038	0	548.5	70.8	37.6	66	79					
17	5606	745	40831	0	550.7	70.6	298.5	79.5	83.7	6.05	6.095	1	1	0
18	5691	278	200418	0	603.8	65.2	59.2	59.8	77.3		11.805			
19	5691	651	24209	0	607.3	64.7	319.8	70.2	78.4		6.825			
20	5705	93	155755	0	614.8	63.8	121	57.3	77.6		7.27	1	1	1
21	5705	466	223548	0	616.6	63.4	21.5	59.6	74.4	6.1	7.155	1	1	1
22	5705	839	51339	0	622.4	62.9	282	74.2	83.6	5.7	8.675	1	1	1
23	5750	115	151516	0	661.1	57.9	131.6	51.1	72	4.6	7.785	0	0	0

Рисунок 2. Вид окна Surfer в режиме рабочего листа

В программном обеспечении Surfer существует несколько аналитических методов, которыми обрабатываются значения и в дальнейшем строятся карты. Применительно к геофизическим данным, наиболее удовлетворяющий их специфике, авторами был выбран метод обратных расстояний (*Inverse Distance Weighting*). Метод предполагает, что каждая измеренная точка оказывает локальное влияние, которое уменьшается с увеличением расстояния. Это придает больший вес точкам, расположенным ближе всего к интерполируемому местоположению. Вес точки уменьшается как функция от расстояния.

Доля «участия» значения опорной точки в расчете искомого значения выражается в виде весового коэффициента  $\lambda_{i,j}$ .

$$Z(x_0, y_0) = \sum_{i=0}^N \lambda_{i,j} Z(x_i, y_j)$$

где  $Z(x_0, y_0)$  – значение свойства в искомой точке,  $\lambda_{i,j}$  – весовой коэффициент для значения свойства в искомой точке  $Z(x_i, y_j)$ .

Веса определяются по следующей формуле:

$$\lambda_{i,j} = d_{ij}^{-p} / \sum_{i=0}^N d_{ij}^{-p}$$

где  $d_{ij}$  – расстояние между искомой точкой и опорной точкой с координатами  $i, j$ . С увеличением расстояния вес уменьшается за счет коэффициента  $p$ . Параметр степени  $p$  влияет на присвоение весов опорным точкам. Это означает, что по мере того, как увеличивается расстояние между опорными точками и искомой точкой, влияние (или вес), которое опорная точка будет оказывать на искомую точку, уменьшается по экспоненте.

Сумма весов опорных точек, которые будут использованы при выполнении интерполяции, должна быть равна 1:

$$\sum_{i=0}^N \lambda_{i,j} = 1.$$

По сути метод обратных расстояний — это интерполатор, в котором минимальные и максимальные значения на интерполированной поверхности могут встречаться только в опорных точках. Итоговая карта чувствительна к наличию выпадающих значений, но это применительно к массиву данных изучаемого типа рассеяния, так как, во-первых, обрабатывается большой объем экспериментальных данных, во-вторых, анализируемые значения равномерно распределены по координатной плоскости [4].

Результаты внешнего зондирования ионосферы практически равномерно охватывают все долготы и широты северного и южного полушарий, что позволило построить глобальное распределение вероятности появления F-рассеяния третьего типа для трехчасовых интервалов по местному времени (LT). Получено 8 карт распределения вероятности рассеяния типа F3 для периода равноденствия (Рис. 3). По оси X отложены долготы (LONG), а по оси Y – инвариантные широты (ILAT).

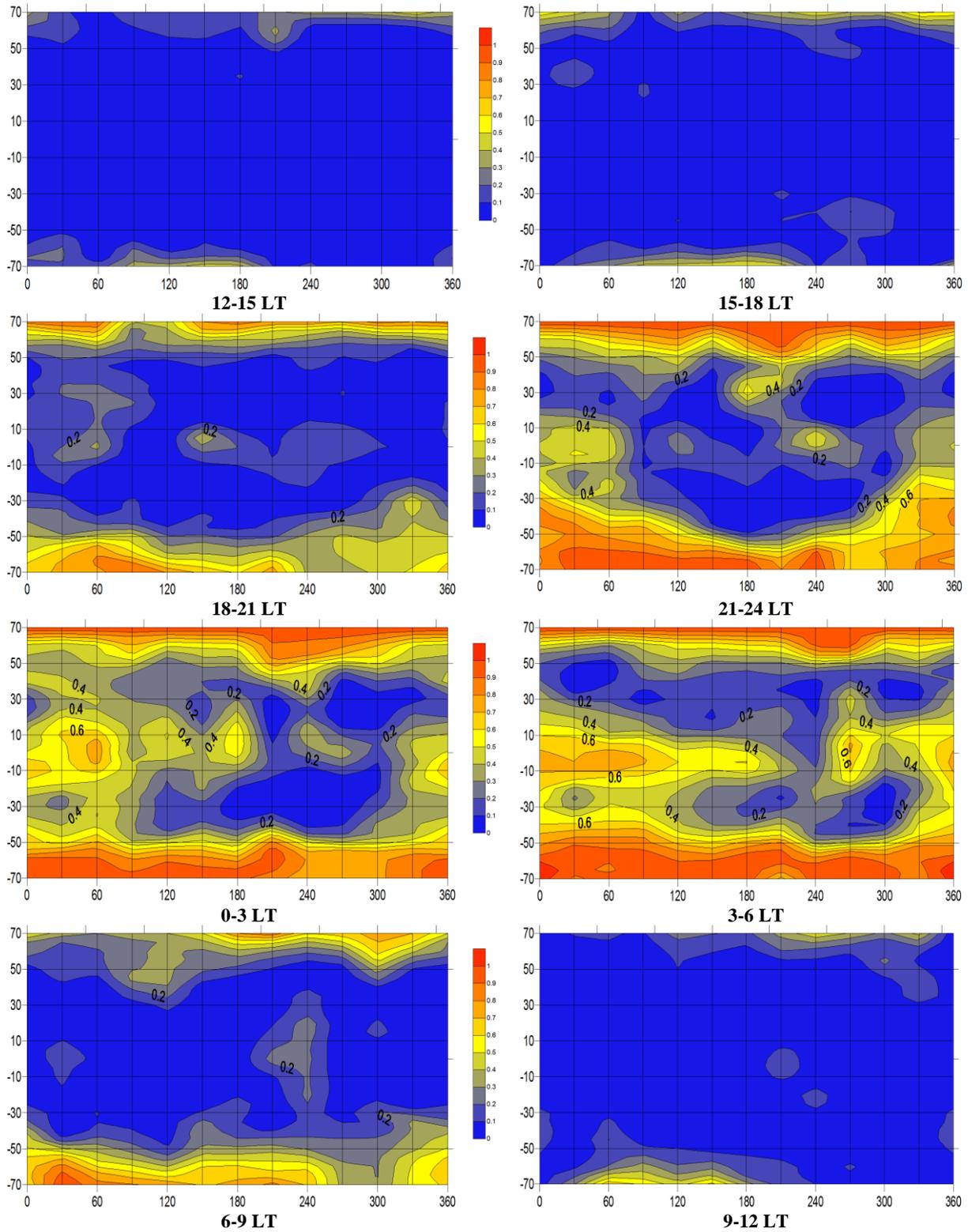


Рисунок 3. Карты распределения вероятности рассеяния типа F3

Отметим, что вероятность появления третьего типа рассеяния наиболее существенна в ночные часы. На картах дневных часов это явление практически отсутствует и присутствует только на высоких широтах из-за высыпания энергичных электронов. По мере временного перехода к ночи и уменьшения электронной концентрации в F-области ионосферы вероятность появления неоднородностей растет [5].

Наибольшая вероятность рассеяния наблюдается на высоких широтах, что соответствует широтам аврорального овала (зона полярных сияний), в которой происходит интенсивное высыпание электронов, неравномерно распределенных в пространстве. Также вероятность рассеяния повышается в районе экватора. Это связано с большими градиентами в электронной концентрации на этих широтах [6].

Таким образом, максимальный пик глобального распределения рассеяния третьего типа для периода равноденствия приходится на ночные часы в интервале от 0 до 3-х часов по местному времени. В дневные часы - от 9 до 18 часов рассеяние минимально.

Выбранный пакет *Surfer* позволяет отобразить основные закономерности F-рассеяния, полученные при обработке данных внешнего зондирования ИК-19, и является удобным инструментом представления экспериментальных данных при неравномерной сетке измерений. Однако, если экспериментальных данных недостаточно, то на построенных картах появляются небольшие экстремумы, не имеющие физического смысла. В качестве примера можно рассмотреть область для 21-24 LT на 30 градусах северной широты и 180 градусах долготы, где приведено значение вероятности рассеяния 0.5 в очень узкой области, хотя измерения проводились с шагом 400 км и обнаружить такую малую область не представляется возможным. По карте видно, что значение вероятности рассеяния в этой области должно быть порядка 0.4. Данный недостаток программного обеспечения *Surfer* был отмечен также в работе [7]. Поэтому возникает необходимость разработки программного обеспечения для более детального сглаживания данных и изучения особенностей характеристик указанного явления.

Дальнейшая работа нацелена на анализ результатов исследований F-рассеяния по ионограммам внешнего зондирования ИК-19 для совокупности зимних, летних и равноденственных условий при высокой солнечной активности.

### Список литературы

1. Карпачев А.Т., Телегин В.А. Глобальное распределение F-рассеяния по данным внешнего зондирования на спутнике ИНТЕРКОСМОС-19 для различных геофизических условий. Труды международной научной конференции. Таганрог. С. 389-390. 2005.
2. Кузьменко В.Г. VBA. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2015. – 624 с.
3. Построение моделей пространственных переменных (с применением пакета *Surfer*): Уч. пособие/ К.А. Мальцев, С.С. Мухарамова. – Казань: Казанский университет, 2014. – 103 с.
4. Karpachev A.T., Telegin V.A. and Telegina A.V. Global distribution of the F-spread occurrence probability in the midnight conditions for the winter solstice. 35<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly. Paris. France. C1.1-0035-04. 2004.
5. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. - 527 с.
6. Гершман Б.Н., Казимировский Э.С., Кокуров В.Д., Чернобровкина Н.А. Явление F-рассеяния в ионосфере. М.: Наука, 1984.- 142 с.
7. Дятко Н.А., Телегин В.А., Ферберов В.Л. Построение карт параметров слоя F2 в период 16-20.03.88г. Геомагнетизм и аэрономия. №1. С.74-76. 1993.