

DOI: 10.51981/2588-0039.2024.47.026

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПОЯВЛЕНИЯ F-РАССЕЯНИЯ ПО ДАННЫМ ИОНОЗОНДА DPS-4 (МОСКВА) В 24-ОМ ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

В.А. Телегин<sup>1</sup>, Г.А. Жбанков<sup>2</sup>, В.А. Панченко<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета  
(НИИ физики ЮФУ), г. Ростов-на-Дону*

### Аннотация

Ионосферная плазма представляет собой неравновесную среду, содержащую неоднородности различных масштабов от нескольких метров до сотен километров. Неоднородности, обусловленные различными процессами, протекающими в ионосфере, вызывают появление на ионограммах дополнительных следов, т.н. «серпов» и «крючков», уширения следов по высоте и частоте. Последнее получило название F-рассеяния. В работе проведен анализ характерных особенностей появления F-рассеяния в 24-ом цикле солнечной активности (СА) на ионограммах ионозонда DPS-4 при регулярном вертикальном зондировании ионосферы.

### Введение

Наличие в ионосфере неоднородностей приводит к рассеянию электромагнитных волн. На ионограммах вертикального зондирования наличие т.н. среднемасштабных неоднородностей проявляется в виде уширения отраженных сигналов, которое оценивается нами по общепринятой 4-х бальной шкале (типы 0, 1, 2, 3) [1]. Тип 0 соответствует уширению следа менее 0.25 МГц, т.е. случаю, когда рассеяние практически отсутствует, далее типы 1, 2 и 3 с шагом 0.25 МГц. Было проведено осреднение суточного хода вероятности появления типов F-рассеяния по годам в 24-м цикле солнечной активности. Расчеты вероятности появления F-рассеяния проводились по программе, алгоритм которой подробно описан в работе [2], с контролем ручной обработкой в тех случаях, когда не срабатывало штатное программное обеспечение ионозонда DPS-4.

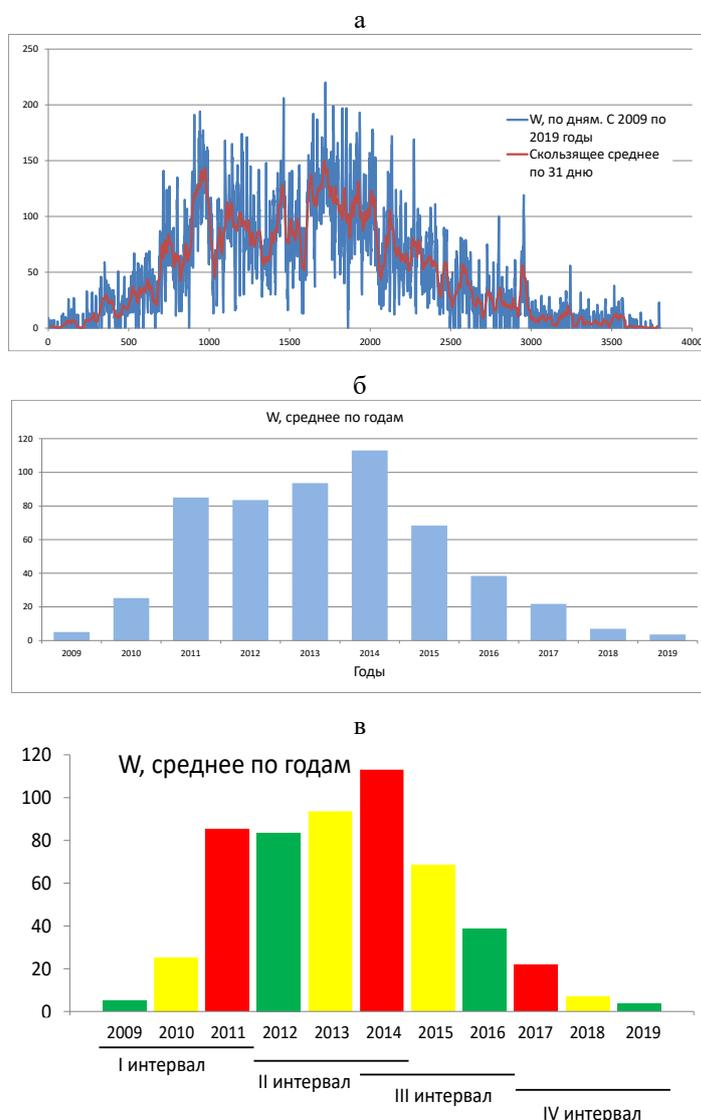
### Аппаратурное и программное обеспечение исследования

Ионозонд DPS-4 – это прибор с высокой степенью автоматизации определения ионосферных параметров, создающий *базы данных* в различных форматах, имеющий малый уровень создаваемых помех. Выделение одной поляризации и измерение углов прихода отражённых радиоволн позволяет легче интерпретировать результаты зондирования. Возможность выставления ионограмм, параметров ионосферы и МПЧ трасс в интернете с задержкой всего 2-4 минуты очень удобно для прикладных целей. Энергопотенциал зонда DPS-4, благодаря применению доплеровской фильтрации и свёртки сигналов, выше, чем у предыдущих поколений ионозондов, на которых были получены основные данные по F-рассеянию. Это необходимо учитывать, при сравнении современных и более ранних результатов. Сопоставление данных в двух максимумах солнечной активности 1979-1980 и 2012-2013 гг. показало, что качественно кривые очень похожи и имеет место уверенная корреляция появления F-рассеяния, несмотря на использование различной аппаратуры [3]. Тем не менее, отмечено, что на ионограммах DPS-4 вероятность появления F-рассеяния иногда существенно выше, чем было получено ранее на АИС. Причин, видимо, две. Первая – различие в солнечной активности в 1979-1980 гг. и в 2012-2013 гг. Вторая – различие аппаратурных характеристик АИС и DPS-4. Большая вероятность увидеть F-рассеяние на ионограммах DPS-4 отчасти определяются тем, что у DPS-4 относительный порог отображения рассеянных сигналов ниже, чем у предыдущих поколений ионозондов, поэтому даже относительно слабые неоднородности у DPS-4 вызывают уширение следа, трактуемое как появление F-рассеяния. Кроме того, свой вклад в кажущуюся ширину следа по частоте у DPS-4 даёт дискретный шаг перестройки станции по частоте – обычно это 50 кГц.

### Статистический анализ

На рис. 1(а) приведен график изменения чисел Вольфа с первого января 2009 года по 31 декабря 2019 года. На рис. 1(б) приведены усредненные по годам значения чисел Вольфа. На рис. 1(в) 24-й цикл СА разбит на 4 интервала по 3 года каждый. Первый интервал – это рост от минимума к началу максимума. Вторым – начало максимума и сам максимум. Третьим – сам максимум и начало спада. Четвертым – спад к минимуму и сам минимум. В каждом из этих интервалов выделены три года, в которых усредненные значения СА отмечены

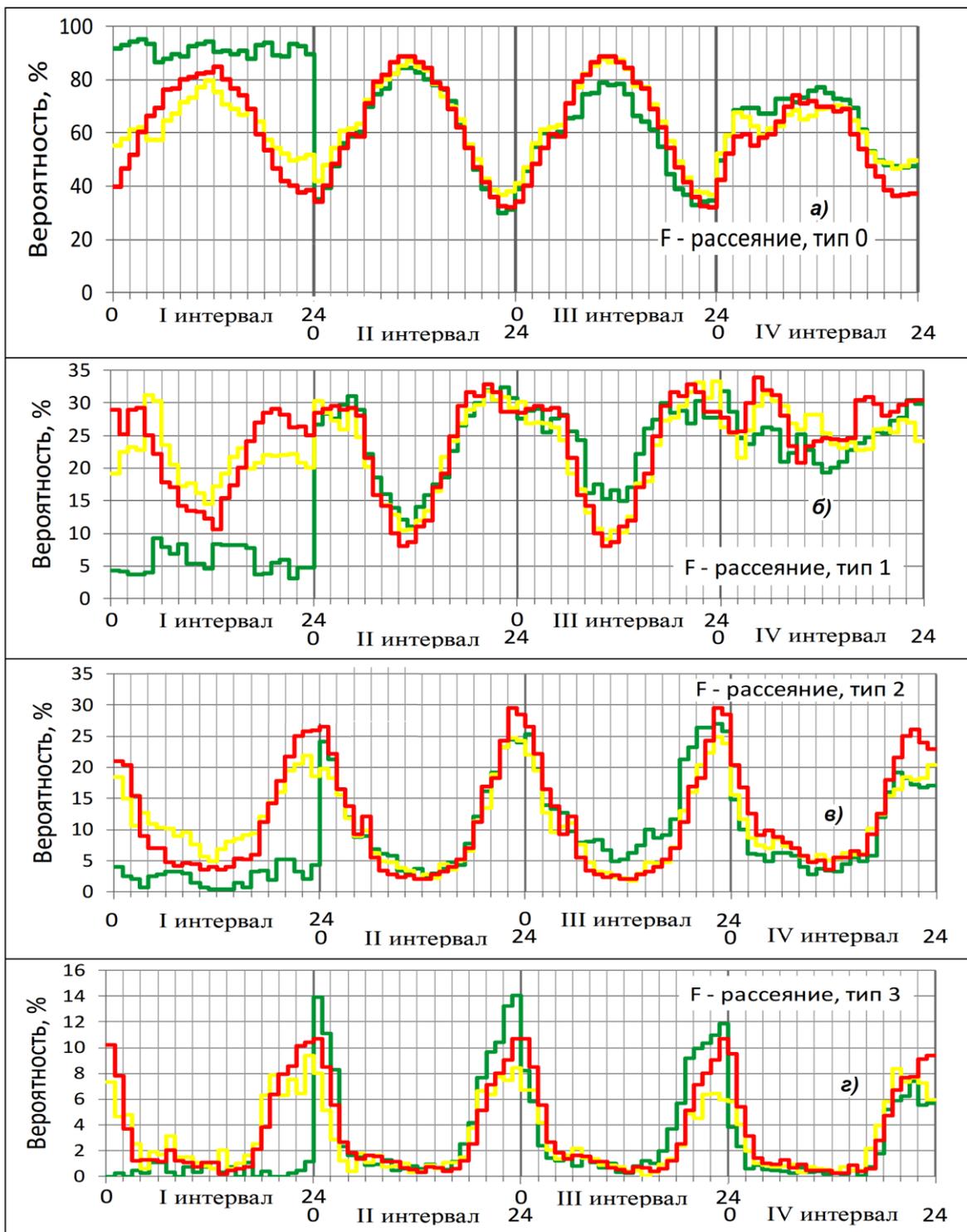
три цвета: красным, желтым и зеленым. Это сделано для удобства рассмотрения данных по F-рассеянию на рис. 2, так как используется принцип «светофора», который хорошо всем известен: цвета красный, желтый и зеленый располагаются сверху вниз. Такой подход облегчает восприятие рисунков на каждом интервале, где приводится зависимость в суточном ходе усредненных за год значений вероятности рассеяния отраженного от ионосферы сигнала.



**Рисунок 1.** (а, б, в) Числа Вольфа в 24-м цикле солнечной активности.

Для выявления статистических закономерностей и исследования вариаций критической частоты слоя F2 за период 24-го солнечного цикла (2009-2019 гг.) проведен тщательный анализ пятнадцатиминутных ионограмм. Для упорядочения величин уширения по частоте  $\Delta f_{oF2}$  применена четырехбальная шкала (от 0 до 3) для определения уширения ионограммы от 0.25 до 1 МГц.

На рис. 2 по горизонтали отложены время суток для 4-х выбранных интервалов, по вертикали отложены, соответственно, вероятности поведения типов F-рассеяния (0, 1, 2, 3). Видно, что графики поведения для всех типов рассеяния сильно отличаются в интервале I. Это связано с тем, что в 2009 году (зеленый цвет) было много технических остановок в работе ионозонда DPS-4. Общая продолжительность работы ионозонда в течение 2009 года не превышало двух месяцев (ионозонд работал только в январе и феврале). В 2010 году ионозонд работал более стабильно (на графике показано желтым цветом), но начал работу только во втором полугодии. В 2011 году (красный цвет) перебои в работе ионозонда были на уровне среднего для всего 24-го цикла SA. Тем не менее, мы решили сохранить данную последовательность представления данных, чтобы сохранить преемственность для анализа поведения суточного хода F-рассеяния в 24-м цикле SA.



**Рисунок 2.** Суточный ход вероятности появления типов F-рассеяния, усредненной по годам.

Рассмотрим подробнее рис. 2. Начнём с верхней панели а). В I и IV интервалах (малая СА) чем меньше СА, тем выше вероятность отсутствия рассеяния (тип 0) в дневное время. В ночное время в I и IV интервалах картина обратная. Во II и III интервалах (вокруг максимума СА) ночные вероятности появления типа 0 не зависят от СА, а днем чем выше СА, тем вероятнее тип 0.

Панель б), тип 1, относительно слабое рассеяние. В интервалы I и IV (относительно слабой СА) чем ниже СА, тем ниже в целом вероятность появления рассеяния типа 1. Во II и III интервалах, т.е. вокруг максимума СА, вероятность типа 1 ночью практически не зависит от СА, а днем чем выше солнечная активность, тем

меньше вероятность рассеяния типа 1. Обращает внимание повышенная вероятность наличия типа 1 сразу после заката и вплоть до восхода Солнца, в отличие от панелей **в)** и **г)**.

Панель **в)**, тип 2, умеренное рассеяние. В интервалы 1 и 4 (относительно слабой СА) наименьшая вероятность появления типа 2 в годы минимальной активности (зеленая линия). В интервалы III и IV в ночное время, чем выше СА, тем вероятнее появления типа 2. В дневное время в интервале II, (т.е. перед максимумом СА) практически отсутствует зависимость вероятности типа 2 от СА. А на этапе спада СА после максимума (период III), в дневное время, чем выше СА, тем меньше вероятность рассеяния типа 2.

Панель **г)**, тип 3, сильное рассеяние. В дневное время во все интервалы I-IV вероятность сильного рассеяния мала и зависимости от СА практически нет. А в ночное время есть различия. Так при малой СА, (интервалы I и IV) чем выше СА, тем выше вероятность сильного рассеяния (тип 3). В противоположность этому во II и III интервалах, максимум вероятности типа 3 наблюдается в годы с меньшей СА (зеленая линия), а минимум вероятности появления рассеяния типа 3 наблюдается в годы, когда была средняя активность Солнца (желтая линия).

## Заключение

Анализ полученных данных показал, что в год минимума солнечной активности все типы F-рассеяния не имеют явно выраженного суточного хода. Вероятность появления рассеяния типа 0 приближается к единице или близка к 100%. Можно сказать, что в год минимума солнечной активности ионосфера является практически спокойной. С ростом солнечной активности для F-рассеяния типа 0 наблюдается суточный ход, подобный ходу  $f_oF2$  для зимних месяцев среднеширотного слоя F2.

Типы F-рассеяния от 1 до 3 с ростом солнечной активности имеют суточный ход обратный по отношению к общепринятому суточному ходу  $f_oF2$ . Появления F-рассеяния типа 1 и 2 равновероятны, а рассеяние 3-его типа появляется на порядок реже. С ростом солнечной активности до максимального значения все три типа F-рассеяния сохраняют суточный ход, причем суточный ход типа 0 повторяет суточный ход критической частоты  $f_oF2$ , а рассеяние типов 1-3 имеет суточный ход противоположный. Вероятность рассеяния типов 1-3, в целом, сохраняет свои значения.

На ниспадающей ветви солнечной активности все четыре типа F-рассеяния сохраняют суточный ход, характерный для фазы роста солнечной активности. Вероятностные значения всех типов рассеяния различаются незначительно при солнечной активности более 40.

При падении солнечной активности от 20 до 0 рассеяние типа 0 теряет суточный ход, становясь независимым от времени суток. Вероятность появления других типов рассеяния уменьшается от 32 до 20% для типов 1 и 2, и до 0% для типа 3, особенно в дневные часы.

Выявленные закономерности появления F-рассеяния могут представлять интерес на этапе проектирования сложных радиотехнических систем.

Работа выполнена в рамках государственного задания ГР № 01201356396 (ИЗМИРАН) и ГЗ0110/23-10-ИФ (ЮФУ).

Авторы выражают благодарность Константиновой Т.М., Дятко Н.А. и Кочетову И.В. за участие в обработке экспериментальных данных и плодотворное обсуждение полученных результатов.

## Литература

1. Гершман Б.Н., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д., Чернобровкина Н.А. Явление F-рассеяния в ионосфере. М.: Наука, 1984, 140 с.
2. Телегин В.А., Панченко В.А., Жбанков Г.А., Рождественская В.И. Автоматизированная обработка данных F-рассеяния // "Physics of Auroral Phenomena", Proc. XXXIX Annual Seminar, Apatity, 2016, с.130-133.
3. Панченко В.А., Телегин В.А., Воробьев В.Г., Жбанков Г.А., Ягодкина О.И., Рождественская В.И. F-рассеяние в среднеширотной ионосфере по данным ионозонда DPS-4 // Геомагнетизм и аэронавигация, 2018, том 58, № 2, с. 241–249.