

ВОЗМОЖНОСТИ ИОНОЗОНДА DPS-4 ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ F-РАССЕЯНИЯ

В.А. Телегин, В.А. Панченко, В.И. Рождественская
(Институт земного магнетизма и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
(ИЗМИРАН) Москва, Россия)

Аннотация. Приведены примеры ионограмм, полученные с помощью ионозонда DPS-4 при регулярных наблюдениях за состоянием ионосферы в ИЗМИРАН, которые подтвердили выявленные ранее закономерности явления F- рассеяния. Представлен суточный ход F- рассеяния в зимний и летний периоды в максимумах солнечной активности 1979-1980 гг. и 2012-2013 гг. Объяснено повышение вдвое вероятности появления F-рассеяния на DPS -4 по сравнению с данными, полученными ранее на другой аппаратуре.

Введение

При вертикальном зондировании (ВЗ) ионосферы, в точке приёма регистрируется суммарное поле волн, однократно и многократно отразившихся от ионосферы. Даже после селекции однократно отражённых сигналов в точку приёма обычно приходят две волны, отличающиеся по поляризации, так называемые «обыкновенная» («О» -компонента) и «необыкновенная» волны («Х» -компонента). Из-за наклона магнитного поля Земли «обыкновенная» и «необыкновенная» волны распространяются в ионосфере по различным пространственным траекториям, и рассеиваются от двух разных областей, содержащих неоднородности, разнесённых друг от друга, как по вертикали, так и по горизонтали. Это сильно затрудняет диагностику ионосферных неоднородностей с использованием отражённых от ионосферы дециметровых радиоволн. Задачу диагностики можно упростить выделением волн одной, например «обыкновенной» поляризации, однократно отражённой от ионосферы, т.е. измерительная система для определения параметров неоднородностей ионосферы должна обладать свойством высокой избирательности по поляризации радиоволн.

Для условий Москвы поляризации «обыкновенной» и «необыкновенной» волн близки к круговым и различаются только направлением вращения вектора электрического поля, что облегчает сложную, в общем случае, задачу их разделения. Задачу выделения сигналов одной из поляризаций хорошо решает работающий в ИЗМИРАН ионозонд DPS-4.

Ионозонд DPS-4 и его особенности

Зонд двухканальный на передачу (2 по 150 Вт) и 4-х канальный на приём [Reinisch, 2007]. В DPS-4 используются ФКМ- последовательности, селекция по поляризации при передаче, селекция по поляризации при приёме, доплеровская селекция по частоте, т.е. применены практически все известные способы улучшения соотношения сигнал/шум.

При передаче поляризационную селекцию обеспечивают двухканальный передатчик и скрещенная передающая антенна (рис. 1,а). Каждый из двух передатчиков работает на свою антенну, типа «Дельта». Фазы выходных сигналов передатчиков сдвинуты на +/-90 град., сложение сигналов производится уже в пространстве, обеспечивая излучение одной - либо «О», либо «Х»-поляризации.

Приёмные антенны представляют собой скрещенные рамки с подантенным усилителем-переключателем поляризации и могут принимать только «обыкновенную» (или «необыкновенную») волну. В совокупности поляризационная селекция даёт выигрыш сигнал/шум +12 дБ, а главное, облегчает интерпретацию всех измерений.

Использование свёрток фазоманипулированных сигналов – ФКМ даёт дополнительный выигрыш ещё +15 дБ.

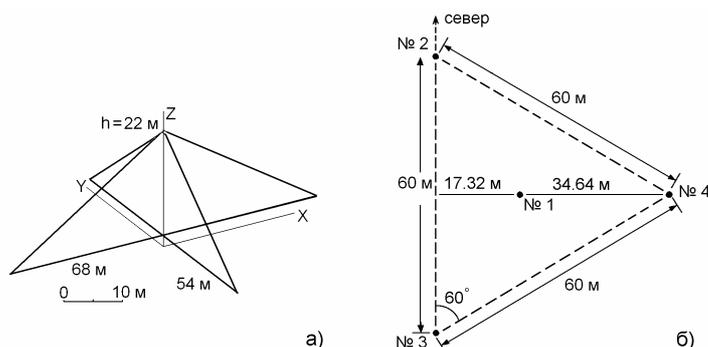


Рисунок 1. а) передающая антенна «Скрещенная Дельта», б) расположение приёмных антенн DPS-4

Излучаются по несколько импульсов на каждой частоте. После быстрого преобразования Фурье (БПФ) сигналов с каждой из 4-х приёмных антенн вычисляют 4 комплексных спектра, т.е. спектра амплитуд и фаз. Это эквивалентно когерентному накоплению и узкополосной фильтрации по частоте, давая дополнительный выигрыш сигнал/шум более 10 дБ.

Приём ведётся на четыре разнесённые скрещенные рамочные антенны, размещённые в виде равностороннего треугольника со стороной 60 м (рис. 1,б).

Амплитуды и фазы сигналов с 4-х антенн используются для определения углов прихода радиоволн. В ионозонде DPS-4 реализованы два способа оценки углов прихода: амплитудный и фазовый или два режима работы ионозонда.

В первом режиме, при работе на скользящей частоте (снятие ионограмм), возможно одновременное цифровое формирование семи диаграмм направленности, одна из которых (красная на рис. 2) направлена прямо в зенит, а остальные расположены вокруг.

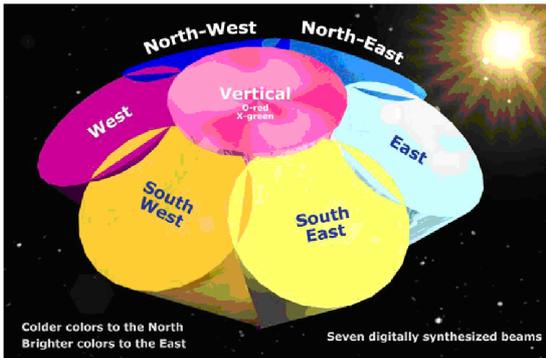


Рисунок 2. Семь виртуальных диаграмм направленности для приёмной антенной системы из 4-х антенн

За направление угла прихода волны теперь принимается то направление, куда смотрит виртуальная диаграмма, которая принимает сигнал с самой большой амплитудой. Так происходит съём ионограмм в формате RSF [Reinisch, 2007].

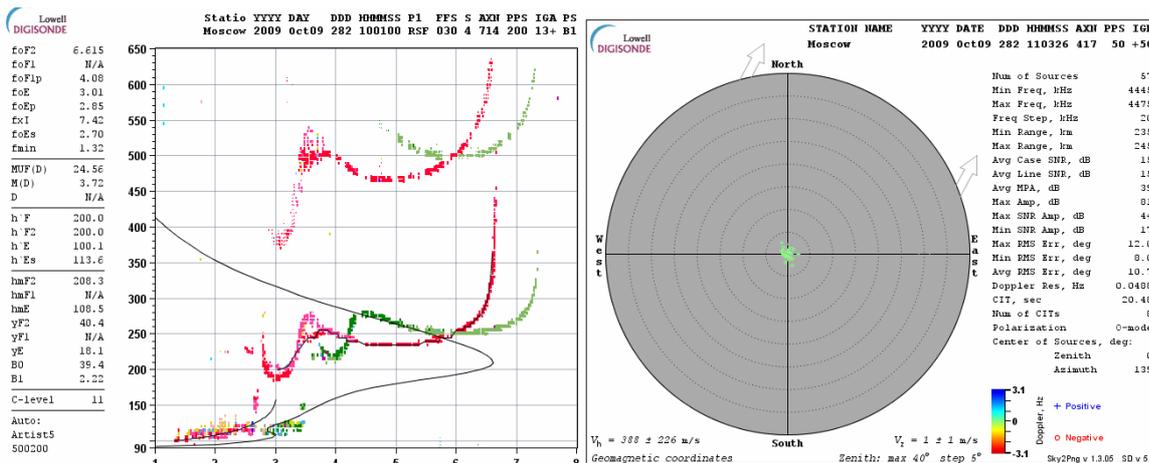


Рисунок 3. Слева ионограмма DPS-4 в формате RSF без признаков F-рассеяния, день, Москва. Справа - распределение мощности по углам прихода для этого момента времени. Яркие точки в центре свидетельствуют об одностороннем приёме из зенита.

Приведенная ионограмма на рис. 3, характеризует очень спокойную ионосферу, наблюдающуюся в Москве. Колонка параметров слева – это автоматически определённые параметры ионосферы. Это один из режимов работы DPS-4.

Во втором режиме ионозонд работает на наборе из нескольких фиксированных частот и порядок действий иной. Измеренные разности фаз на четырех разнесённых по плоскости Земли антеннах позволяют построить в пространстве плоскость равных фаз и рассчитать нормаль к фронту волны, которая и даёт в этом случае углы прихода волн [Reinisch, 2007].

При этом производится расчёт углового спектра принимаемых радиоволн, или так называемых «карт неба». Справа на рис. 2 дана «Карта неба» для ионограммы слева. По осям: углы от вертикали, окружности - через каждые 5 градусов угла. Яркие точки – это энергия с данного направления. В данном случае кроме отражения из зенита, в центре рисунка, ничего не видим, рассеяния нет.

Наличие или отсутствие рассеяния по частоте определяется по ионограммам. На рис. 4 приведен пример ионограммы, с ярко выраженным присутствием F-рассеяния на «O» и «X» поляризованных компонентах.

В литературе существуют классификации F-рассеяния как по виду: экваториальное, среднеширотное, высокоширотное, диапазонное, частоте, так и по силе: от 0 до 3 баллов. Рассчитаем вероятности появления F-рассеяния по частоте для типично среднеширотной ионосферы Москвы. Примем, согласно [Singleton, 1968], что F-рассеяние отсутствует, если ширина следа на почти вертикальном участке ионограммы менее 0,25 МГц, как на фрагменте ионограммы слева (рис. 5) (это 0 баллов). Если же ширина следа превышала 0,25 МГц, как на фрагменте справа, то считалось, что наблюдается F-рассеяние. 0,25 МГц в 1 балл, по данной классификации. Такая методика была выбрана для простоты и возможности сравнения с более ранними данными, полученными в ИЗМИРАН.

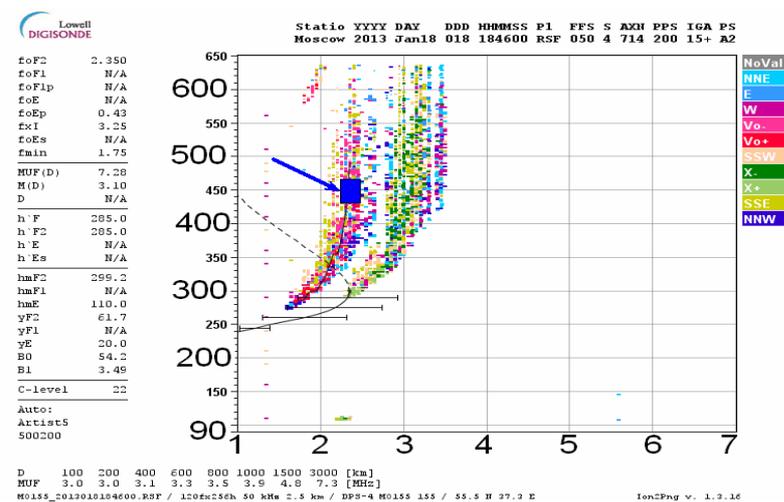


Рисунок 4. Пример ионограммы с наличием F-рассеяния. Ионограмма DPS-4 с признаками F-рассеяния, ночь, Москва. Красный цвет (слева) – обыкновенная компонента из зенита. Остальное - рассеянное сбоку. Цвет связан с направлением. Шкала цвет – направление дана справа

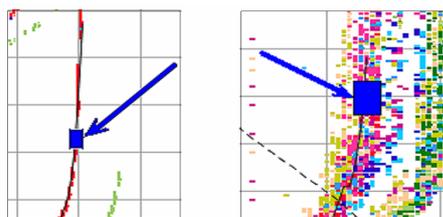


Рисунок 5. Иллюстрация методики определения наличия F-рассеяния: на почти вертикальном участке ионограммы сравниваем ширину следа с меркой (синий прямоугольник), ширина которой 0.25 МГц: без рассеяния (слева), с наличием F-рассеяния (справа).

На рис.6 приведены кривые вероятности появления F-рассеяния в Москве, полученные с помощью различных зондов: зондированием сверху, данные спутника Интеркосмос-19 сверху [Карпачёв и Телегин, 2005], наземным зондированием с помощью ионозонда АИС (1979 г.), ионозонда DPS-4 (2013 г.). На рис.6 можно видеть, что качественно кривые очень похожи и имеет место уверенная корреляция появления F-рассеяния, несмотря на использование различной аппаратуры. Штрихами справа и слева показаны значения P – вероятности появления рассеяния, восстановленные по рисунку карты, согласно [Гершман и др., 1984]. Как видим, значения P, по данным DPS-4 в 2013 г. практически вдвое выше данных АИС 1979 г. и данных из книги.

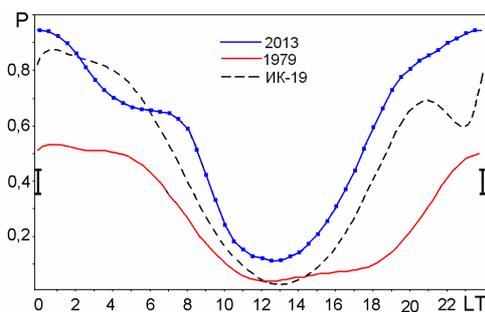


Рисунок 6. Суточный ход вероятности F-рассеяния зимой 2013г. (DPS-4) и 1979 г. (АИС). Сравнение с зондированием сверху на спутнике ИК-19. [Карпачев и Телегин, 2005]

На рис. 6 представлена вероятность появления F-рассеяния зимой 2013, и 1980 годов. Пунктирной линией даны вероятности F-рассеяния при зондировании сверху спутником ИК-19. [Карпачев и Телегин, 2005].

Аналогичные расчёты были сделаны и для летних месяцев в максимумах двух солнечных циклов (рис. 7).

Дополнительные возможности DPS-4. Измерение углов и скоростей дрейфа

Доплеровская селекция плюс измерения углов прихода радиоволн дают возможность определить три проекции скорости для каждой неоднородности, выделенной по дальности, углу и доплеровскому сдвигу частоты, точно так же, как это делается в классической радиолокации. Далее можно подсчитать средние скорости V_z , V_{north} и V_{east} , а также дисперсии скоростей. В верхней части рисунка представлены суточные зависимости вероятности появления F-рассеяния в июне 1980 г. (красная кривая с кружками) и июле (синяя кривая с квадратами). Аналогично, внизу данные за июнь 2013 г. даны красным с кружками, а за июль – синим с квадратами. Видим качественное подобие всех четырёх кривых.

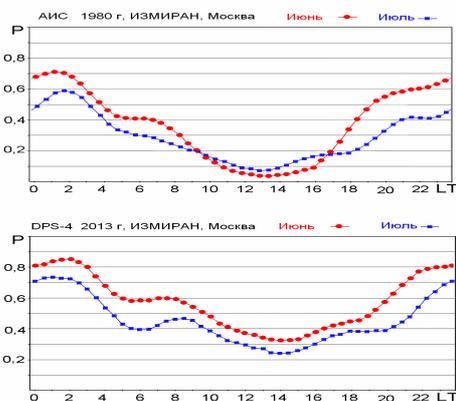


Рисунок 7. Суточный ход вероятности появления F-рассеяния летом 2013-го (DPS-4) и 1980-го (АИС) годов.

Обращает на себя внимание повторяемость деталей формы кривых. Однако есть количественные отличия – вероятности F-рассеяния по данным DPS-4 всегда выше, чем по данным АИС. Почему – рассмотрим позже. На рис. 8 представлены распределения мощности радиоволн по углам прихода («карты неба») и определённые по ним скорости дрейфа неоднородностей.

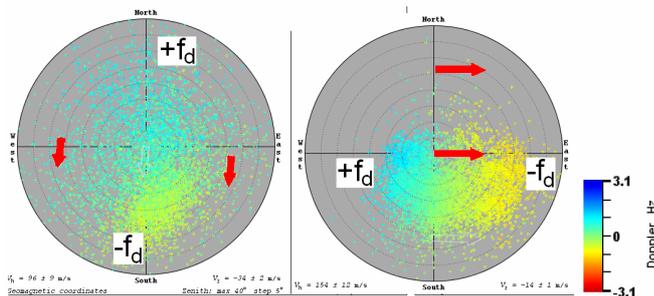


Рисунок 8. Одновременное измерение углов прихода и доплеровских сдвигов позволяет оценивать скорость движения неоднородностей. Где минус f_d – туда и дрейф.

Такого рода измерения могут дать представления о движении плазмы ионосферы в процессе развития того или иного ионосферного возмущения (рис. 8).

Представленная на рис. 9 последовательность «карт неба» с интервалом в полчаса между отдельными изображениями отражает динамику картины дрейфа во время магнитного возмущения. Такого рода данные помогают лучше представить себе, где сосредоточены рассеивающие неоднородности, вызывающие F-рассеяние и куда, с какой скоростью они движутся.

Вероятности появления F-рассеяния, определённые по данным DPS-4 в 2013 г. стабильно превышают таковые, определённые по данным АИС в 1979-80 гг. [Телегин и др., 2014].

Кроме различия в характеристиках 21-го и 24-го солнечных циклов, существенную роль играют аппаратные характеристики, в частности способность ионозонда отображать рассеянные сигналы относительно небольшой энергии. В станции АИС соотношение сигнал/шум, весьма невелико, так как единственным видом обработки является сравнение амплитуды сигнала с аппаратно выставленным порогом: больше порога - будет отображён, меньше – потерян навсегда. Кроме того, передаточные функции почернения киноплёнки дополнительно снижают динамический диапазон отображения рассеянных сигналов. Очевидно, что аналоговая регистрация ионограмм на киноплёнку не способна зафиксировать слабые рассеянные сигналы.

Покажем экспериментальным путём, что ширина ионограммы по частоте на почти вертикальном её участке зависит от порога отображения. Стандартные ионограммы DPS-4, выставляемые в сеть, отображены с порогом 6 дБ. Данные DPS-4 в исходном формате RSF были обработаны с помощью программы SAO-explorer, при работе с которой можно менять порог отображения на ионограммах с шагом 3 дБ. В результате

обработки нескольких десятков ионограмм с признаками F-рассеяния различной силы были количественно подтверждены высказанные выше интуитивные соображения о зависимости ширины ионограммы по частоте на почти вертикальном её участке от порога отображения сигналов.

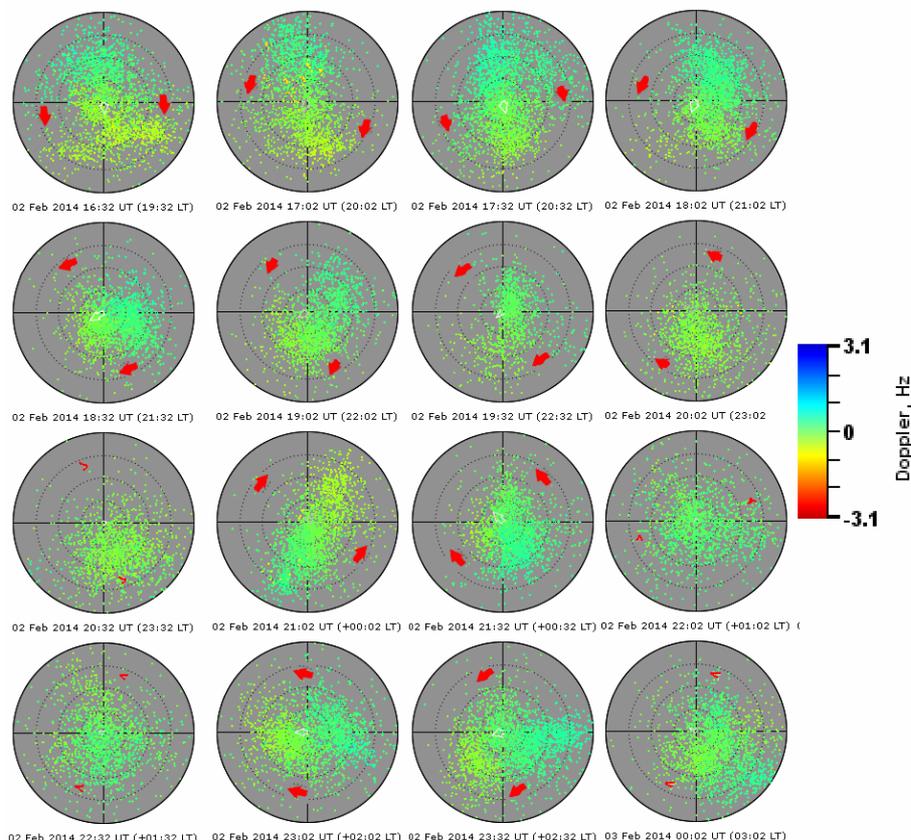


Рисунок 9. Изменения направления и скорости дрейфа ионосферных неоднородностей в течение 8 часов ночью 02.02.2014 г., г. Москва, ИЗМИРАН. Север сверху, восток справа. Направление дрейфа дано красными стрелками. Длина стрелки отражает модуль скорости дрейфа.

Как для зимнего периода (рис. 10), так и для летнего (рис. 11), наблюдается чёткое падение средней ширины следа по частоте при повышении порога отображения на ионограммах. Налицо уменьшение оценки F-рассеяния в баллах по мере роста порога, т.е. по мере удаления с ионограммы более слабых рассеянных сигналов. Это надо всегда иметь в виду при сравнении данных DPS-4 с данными ионозондов, имеющими низкий энергopotенциал и высокий порог отсечки рассеянных сигналов.

В данной работе нас, в первую очередь, интересует зависимость ширины следа в 0...1 бал, поскольку именно, начиная с 1 балла, мы считали, что F-рассеяние на ионограмме есть.

Выберем те ионограммы, где относительно неширокие следы, а именно те ионограммы, где при стандартном пороге 6 дБ ширина следа была летом 250 - 350 кГц. Именно такие случаи при пороге 6 дБ классифицируются как 1 балл (есть F-рассеяние). При пороге 11 дБ средняя ширина следа становится менее 250 кГц (кривая с квадратиками на рис. 11) и уже при пороге 12 дБ многие из таких ионограмм были бы классифицированы как не имеющие признаков F-рассеяния. Аналогично, даже весьма широкие зимние следы на рис. 10 с повышением порога уменьшаются по ширине и, в среднем, пересекают уровень 250 кГц при пороге 17 дБ, т.е. при пороге 18 дБ теряется большая часть случаев F-рассеяния.

Заключение

Установленные зависимости вероятности появления F-рассеяния и его оценки в баллах от порога отображения на ионограммах объясняют численные различия кривых, построенных по ранним и современным данным F-рассеяния. Эта зависимость от аппаратных параметров всегда должна приниматься во внимание при сравнении данных различных ионозондов.

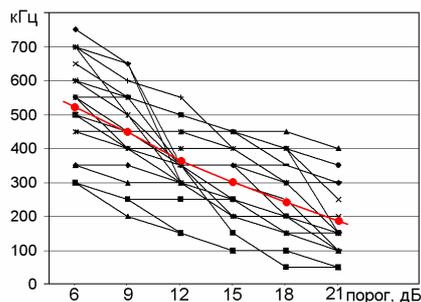


Рисунок 10. Ширина ионограммы по частоте в зависимости от выбранного порога отображения. Чёрные – индивидуальные зависимости, красная с кружками - усреднённая кривая. (DPS-4, зима 2013 г.)

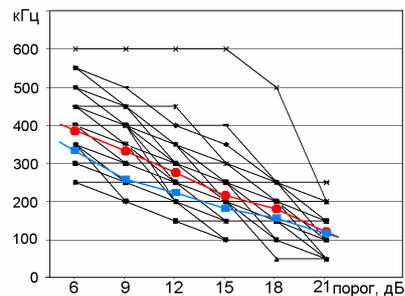


Рисунок 11. Ширина ионограммы по частоте в зависимости от выбранного порога отображения. Чёрные – индивидуальные зависимости, красная с кружками - усреднённая кривая для всей летней выборки, голубая кривая с квадратами - среднее значение ширины для выборки следов с начальной шириной 250-350 кГц. (DPS-4, лето 2013г.)

Список литературы

- Гершман Б.Н., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д., Чернобровкина Н.А. Явление F-рассеяния в ионосфере. М.: Наука, 1984, 140 с.
- Карпачев А.Т., Телегин В.А. Исследование F – рассеяния по данным внешнего зондирования ионосферы на ИСЗ «Интеркосмос-19» и «Космос 1809», ГР № 01200302876, Инв. № 02200604293, 2005, 27 с.
- Телегин В.А., Панченко В.А., Рождественская В.И. Предварительные результаты исследования явления F-рассеяния по данным ионозонда DPS-4 в Москве./ Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т.11, №1, с. 97-106.
- Reinisch V. et al., The digisonde portable sounder – DPS. Technical manual. University of Massachusetts Lowell Center for Atmospheric Research, 2007, Version 4.3, 404 с.
- Singleton D.G., The morphology of spread-F occurrence over half a sunspot cycle. – J.Geophys. Res., 1968, vol. 73, N 6, p. 295-308.