# Предварительные результаты исследования явления *F*-рассеяния по данным ионозонда DPS-4 в Москве

В.А. Телегин, В.А. Панченко, В.И. Рождественская

Институт земного магнетизма и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН Москва, Россия E-mail: telvika@gmail.com

Представлены основные характеристики ионозонда DPS-4 с аппаратной селекцией поляризации и измерением углов прихода отражённых от ионосферы радиоволн. Обсуждаются методика и некоторые результаты регулярных наблюдений ионосферы, проводившихся в ИЗМИРАН с 2008 по 2013 год. Отмечается, что возможность DPS-4 измерять углы прихода радиоволн отличает его от большинства ионозондов, применяемых для исследования явления F-рассеяния, и позволяет локализовать в пространстве область, занятую неоднородностями. Новые измерения подтвердили полученные ранее закономерности поведения ионосферы, в том числе закономерности появления F-рассеяния. Представлен суточный ход вероятности появления F-рассеяния в зимний период, проведено сравнение данных DPS-4 за 2012–2013 гг. с данными, полученными в максимуме солнечной активности 1979–1980 гг. на ионозонде АИС. Отмечено, что качественно кривые вероятности F-рассеяния в зимние периоды 1979–1980 гг. и 2012–2013 гг. очень похожи, но по данным DPS-4 вероятность появления F-расссеяния ночью почти вдвое выше, чем было получено ранее на ионозонде AИС. Обсуждаются две возможные причины этого: различие в солнечной активности и различие в аппаратных характеристиках использованных ионозондов.

Ключевые слова: ионосфера, ионозонд, ионограмма, рассеяние, суточный ход, вероятность появления.

#### Введение

Прохождение радиоволны через плазменный слой с неоднородностями сопровождается изменением свойств поля волны. В рамках модельных задач можно пытаться восстановить параметры слоя с неоднородностями по измерениям распределения амплитуд и фаз во времени и пространстве в некотором интервале частот.

Рассмотрим случай вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы. В стандартном случае мы будем иметь в точке приёма суммарное поле волн, однократно и многократно отразившихся от ионосферы. При ионосферном распространении радиоволн 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 прямых измерений поляризации отражённых от ионосферы ры декаметровых 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 селективности по дальности и поляризации радиоволн. ИЗМИРАН располагает такой установкой - ионозондом DPS-4.

## Ионозонд DPS-4 и его особенности

Типичная ионограмма, снятая в ИЗМИРАН зондом DPS-4 в режиме с селекцией по углам прихода, приведена на *рис. 1* (красным цветом показан трек «обыкновенной» поляризации, зелёным – «необыкновенной»). В диапазоне частот от 3,0 МГц до 7,8 МГц видны сигналы «О» и «Х» компонент, однократно и двукратно отражённых от ионосферы.



Рис. 1. Стандартная ионограмма вертикального зондирования в спокойных условиях

Для условий Москвы поляризации «обыкновенной» и «необыкновенной» волн близки к круговым. Поляризации этих волн различаются направлением вращения вектора электрического поля, что облегчает сложную, в общем случае, задачу их разделения. Поляризационная селекция в DPS-4 обеспечивается как при излучении, так и при приёме радиоволн. При передаче селекцию обеспечивают двухканальный передатчик и скрещенная передающая антенна (*puc. 2, a*). 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.

Приём ведётся на четыре разнесённые скрещенные рамочные антенны, размещённые в виде равностороннего треугольника со стороной 60м (*рис. 2, б*).



Рис. 2. а) передающая антенна «Скрещенная Дельта», б) расположение приёмных антенн DPS-4



Рис. 3. Внешний вид и конструкция приемных антенн

Каждая из приёмных антенн (*puc. 3*) представляет собой «скрещенную рамку». Фазы выходных сигналов одной из рамок сдвигаются на +/- 90 град. и складываются в подантенном усилителе-переключателе поляризации. Скрещенная рамка с подантенным усилителем-переключателем поляризации принимает только «обыкновенную» или («необыкновенную», по выбору) волну. В результате принимается практически одна, «О» (или «Х») компонента. Имея скрещенные передающие и приёмные антенны, DPS-4 как излучает, так и принимает отдельно волны либо «О», либо «Х»-поляризации. Это даёт выигрыш сигнал/шум +12 дБ и облегчает интерпретацию всех измерений. Временная селекция сигналов в DPS-4 обеспечивается (Reinisch, 2007), применением фазово-кодовой модуляции (ФКМ) (*puc. 4*). В ионозонде DPS-4 реализованы два режима учёта распределения поля по пространству: амплитудный и фазовый.

В первом режиме, при работе на скользящей частоте (снятие ионограмм), возможно одновременное цифровое формирование семи диаграмм направленности, одна из которых (красная на *рис. 5*) направлена прямо в зенит, а остальные расположены вокруг.



Рис. 4. Характеристики излучаемого сигнала (ФКМ) в DPS-4



Рис. 5. 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).

Во втором режиме, при работе на наборе из 2-х или 4-х фиксированных частот порядок действий иной. Измеренные разности фаз на 4-х 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 волны, (Reinisch, 2007).



Рис. 6. Ночная ионограмма с сильным F-рассеянием. Красные отражения – близкие к зениту, а цвета морской волны – отражения с северо-северо-востока

На *рис.* 6 представлен пример применения в ИЗМИРАН ионозонда DPS-4 для изучения явления F-рассеяния. В данном случае по (Brigs, 1958) S = 3 и на черно-белых ионограммах ионозондов предыдущего поколения определить критическую частоту было бы вообще невозможно. Здесь критическая частота успешно определяется.

В левом столбце *рис.* 6 видно, что по сравнению с *рис.* 1 не все параметры ионограммы были определены программой автоматизированной обработки ионограмм Artist 5. Согласно (Руководство URSI, 1978) вместо значений частот и высот проставлены оценочные буквы.

Кроме стандартной оценки уширения следа по частоте на *рис.* 6 можно оценить и направление, с которого происходит отражение от неоднородностей ионосферной плазмы. В ряде случаев это может быть полезно для понимания и интерпретации результатов. На-

пример, на частоте 3 МГц действующая высота отражения для «О»-компоненты составляет 400 км, а для «Х»-компоненты – 325 км. Отклик «О»-компоненты приходит в основном с северо-востока, небольшие вкрапления – с северо-запада, а отражение «Х»компоненты имеет место с северо-северо-востока и отдельными откликами с юго-юговостока. Слой *F1* уверенно не определяется, так же как и слой *Es*. Основное отражение происходит от неоднородностей, расположенных северо-северо-восточнее точки наблюдения, однако в данной работе учёт направлений не производился.

### Методика и экспериментальные результаты

Ионозонды изначально разрабатывались и создавались для определения параметров регулярных слоев *E* и *F* ионосферы, знание которых обеспечивало создание надежной радиосвязи и прохождение радиоволн в КВ-диапазоне. Наличие в ионосфере неоднородностей приводит к рассеянию волны на неоднородностях и как следствие, к ухудшению условий радиосвязи. На ионограммах наличие неоднородностей проявляется в виде уширения отраженных сигналов (*puc. 6*). На *puc. 1* в условиях спокойной ионосферы, ширина следа около 0,1 МГц на частоте 7,5 МГц. В ионозондах первого поколения компоненты принятых сигналов не разделяются, обе ветви ионограммы отображаются черно-белыми и их идентификация осуществляется оператором по расположению следов. В этом случае наличие неоднородностей в ионосфере, приводит сначала к незначительному уширению следа, а затем, по мере их развития, – к невозможности точного отсчета критических частот. В ряде случаев уширение настолько велико, что «О» и «Х»-компоненты сливаются и определить критическую частоту становится невозможно. Было предложено несколько квалификационных схем данного явления. Наибольшее распространение получила четырех бальная (*S* = 0;1;2;3) система отсчета (Brigs, 1958).

Индекс S = 0 – означает полное отсутствие рассеяния ( $\Delta f \le 0.25 \text{ M}\Gamma \mu$ ); S = 1 – наблюдается очень слабое рассеяние, критическая частота слоя F2 легко определяется; ( $\Delta f \ge 0.25 \text{ M}\Gamma \mu$ ); S = 2 – рассеяние довольно значительное и определение критических частот становится затруднительным ( $\Delta f \ge 0.5 \text{ M}\Gamma \mu$ ); S = 3 – рассеяние настолько сильное, что определить критическую частоту становится невозможно ( $\Delta f \ge 0.75 \text{ M}\Gamma \mu$ ). Данная классификация оказалась настолько удобной, что принята повсеместно (Руководство UR-SI, 1978) по настоящее время. Она позволила объединить данные различных ионозондов: современных и тех, которым уже более 40 лет.

С одной стороны это позволяет проследить изменения параметров ионосферы на длительном протяжении времени (более 60 лет) и проанализировать широтно-долготные закономерности. С другой стороны, в ряде работ (например, Поляков и др., 1968) было проведено сравнение индексов рассеяния со стандартными суточными таблицами  $f_0F2$  и показано, что индексы *S* равные 1, 2 и 3 соответствуют  $\Delta f$ , соответственно, 0,25, 0,5 и 0,75 МГц. Данная классификация предназначена для выбора критерия достоверности определения критических частот и фактически не учитывает наличие относительно слабых неоднородностей, приводящих к рассеянию менее 0,25 МГц.

Представление о широтно-долготных закономерностях *F*-рассеяния сложились ещё в середине прошлого века. В работе (Singleton, 1968) были собраны результаты по 13 ионосферным станциям западного полушария и спутника Alouete 1 (1964 г.) по явлению *F*-рассеяния, впервые были сформулированы временные и широтные закономерности и исследовано влияние солнечной и магнитной активности. В работе (Гершман и др., 1984) были обобщены эти результаты, проанализированы возможные механизмы развития неоднородностей, их особенности для разных географических условий.

Для анализа пространственных и временных статистических характеристик удобно ограничиться упрощенной двухуровневой классификацией: индекс *S*=0 для спокойной ионосферы и *S*=1 для случаев ∆*f* ≥0,25 МГц.

Для зимних условий, в годы минимума солнечной активности, на станции Москва (координаты: широта – 55,5<sup>°</sup> N, долгота – 37,3<sup>°</sup> E, геомагнитная широта – 50<sup>°</sup>) в соответствии с (Singleton, 1968) вероятность появления *F*-рассеяния ночью достигает 80%, а для максимума солнечной активности – не превышает 40%. На *рис.* 7 приведены результаты, полученные для Москвы вблизи максимума солнечной активности 1979 - январь 1980 гг. по данным наземной ионосферной станции (АИС, ИЗМИРАН) (Карпачев, Телегин, 2005). Кривая 1, относится к измерениям на наземной станции АИС. Получены значения вероятности появления *F*-рассеяния в ночные часы  $\approx 0.4$ , которые оказались близки к аналогичным в работе (Гершман и др., 1984). В то же время, по данным спутника ИК-19 в этом же максимуме солнечной активности 1979–1981 вероятность *F*-рассеяния в зимний период значительно больше - кривая 2 на рис. 7 (Карпачев, Телегин, 2005), и отличается в ночной период почти вдвое. Сопоставляя эти два результата, можно предположить, что различие может быть частично связано с аппаратными характеристиками наземных и орбитальных ионозондов, различной зашумлённостью их ионограмм, а частично и с тем, что верхняя ионосфера более изменчива, чем область ниже максимума *F*-слоя. С появлением в ИЗМИРАН нового ионозонда DPS-4 представилась возможность вернуться к этому вопросу. Ионограммы ионозонда DPS-4, подобные приведённой на рис. 6, выбраны также для зимнего периода, но уже 24-го максимума солнечной активности. С использованием данных DPS-4 были рассчитаны значения вероятности появления F-рассеяния в январе 2012 г. (кривая 3 на рис. 7) и для января 2013 г. (кривая 4 на рис. 7). В обоих случаях критерием появления *F*-рассеяния считалось уширение  $\Delta f \ge 0.25$  МГц.



Рис. 7. Суточный ход вероятности F-рассеяния: 1) для зимнего периода 1979–1980 гг. по данным наземного зондирования АИС; 2) для зимнего периода 1979–1980 гг. по данным орбитального ионозонда ИК-19; 3) для января 2012 г. по данным DPS-4; 4) для января 2013 г. по данным DPS-4

При качественном подобии всех кривых (*рис.* 7), вероятность появления *F*-рассеяния (по данным ионозонда DPS-4) в 2012–2013 гг. значительно выше, чем в 1979–1980 гг. по данным АИС. По отношению к спутниковым данным 1979–1981 гг., данные DPS-4 за 2012–2013 гг. тоже показывают более высокую вероятность появления *F*-рассеяния, однако здесь отличие значительно меньше.

Различие в вероятностях *F*-рассеяния на ионограммах наземных станций в 1979–80 и 2012–2013 гг. может быть связано, во-первых, с тем, что максимум нынешнего цикла (2012–2013 гг.) выражен слабее, чем максимум 1979–1980 гг. Однако, различие в солнечной активности полностью не может объяснить количественных различий, так как по нашим данным, даже в минимуме солнечной активности 1976–1977 гг., вероятность *F*-рассеяния не приближалась к единице. Вторым, и видимо главным, фактором количественной разницы в вероятностях, является различие в энергопотенциале и особенно в пороге отображения рассеянных сигналов у ионозондов АИС и DPS-4. У станций АИС с регистрацией на фотоплёнке динамический диапазон отображаемых сигналов невелик и, обычно отображаются не все рассеянные сигналы, а только имеющие мощность больше пороговой. Динамический диапазон при цифровой обработке и отображении сигналов DPS-4 существенно выше и обычно для ионограмм DPS-4 установлен порог отображения ниже, чем у АИС и им подобных станций. Чем ниже порог, тем более протяжённые по дальности и уширенные по частоте следы мы получаем на ионограмме, следовательно, ширина следа чаще превышает 0,25 МГц и чаще будет зафиксировано наличие *F*-рассеяния.

### Заключение

Появление ионозондов с аппаратным выделением одной поляризации и измерением углов прихода отражённых радиоволн, позволяет увереннее интерпретировать результаты зондирования. 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 *рис.* 7, относящихся к зимнему периоду годового цикла в максимумах солнечной активности 2012–2013 гг. и 1979–1980 гг., показало, что качественно кривые очень похожи и имеет место уверенная корреляция появления *F*- рассеяния, несмотря на использование различной аппаратуры. Тем не менее, отмечено, что на ионограммах DPS-4 вероятность появления *F*-рассеяния в течение суток вдвое выше, чем было получено ранее. Причины отличия полученных результатов, в основном, определяются тем, что ионозонд DPS-4 имеет относительный порог отображения рассеянных сигналов ниже, чем у предыдущих поколений ионозондов, поэтому даже относительно слабые неоднородности показывают на DPS-4 большее уширение следа, трактуемое как появление *F*-рассеяния.

### 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. 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.
- 3. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. М.: Наука, 1978, 342 с.
- 4. Поляков В.М., Щепкин Л.А., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д. Ионосферные процессы. Новосибирск: Наука, 1968. 535 с.
- 5. *Brigs B.H.* A study of the ionospheric irregularities which cause spread-F echoes and scintillations of ratio stars // J. Atmos. and Terr. Phys. 1958. Vol. 12. No. 1. P. 34–42.
- 6. *Reinisch B*. The digisonde portable sounder DPS // Technical manual. University of Massachusetts Lowell Center for Atmospheric Research, 2007, Version 4.3. 404 p.
- Singleton D.G. The morphology of spread-F occurrence over half a sunspot cycle // J. Geophys. Res.. 1968. Vol. 73. No. 6. P. 295–308.

# Preliminary study results of the *F*-scattering phenomenon based on ionosonde DPS-4 data for Moscow

## V.A. Telegin, V.A. Panchenko, V.I. Rozhdestvenskaya

Institute of Terrestrial Magnetism and Radio Wave Propagation RAS, Moscow, Russia E-mail: telvika@gmail.com

The main characteristics of ionosonde DPS-4 with hardware selection of polarization and measurement of the arrival angles of radio waves are presented. Some results of regular ionosphere observations carried out in the Institute of Terrestrial Magnetism and Radio Wave Propagation RAS from 2008 to 2013 are discussed. It is noted that the capability of DPS-4 to measure the arrival angles of the scattered radio waves distinguishes it from most ionosondes used for the study of the F-scattering phenomenon, allowing to localize in the space the scattering region. New measurements with DPS-4 confirmed the previous regularities in the behavior of the ionosphere acquired by means of ionosondes AIS, including the laws of F-scattering occurrence. The diurnal probability of F-scattering in the winter season of 2012-2013 is compared with the data obtained during the winter season of another maximum of solar activity -1979-1980. The probability of occurrence of F-scattering acquired by means of DPS-4 is significantly higher than that obtained earlier with AIS. Two possible reasons for this difference are discussed: the difference in solar activity and the difference in hardware characteristics of the ionosondes used.

Keywords: ionosphere, ionosonde, ionogram, scattering, daily motion, the probability of occurrence.

## References

- 1. Gershman B.N., Kazimirovskii E.S., Kokourov V.D., Chernobrovkina N.A. *Yavlenie F-rasseyaniya v ionosfere* (F-scattering phenomenon in ionosphere), Moscow: Nauka, 1984, 140 p.
- Karpachev A.T., Telegin V.A. Issledovanie F-rasseyaniya po dannym vneshnego zondirovaniya ionosfery na ISZ "Interkosmos-19" i "Kosmos 1809", (Study of the F - scattering according to external sounding of the ionosphere from satellites "Intercosmos-19" and "Cosmos 1809"), report, state registration No. 01200302876, inventory No. 02200604293, 2005, 27 p.
- 3. *Rukovodstvo URSI po interpretatsii i obrabotke ionogramm* (URSI Handbook of ionogram interpretation and reduction), Moscow: Nauka, 1978, 342 p.
- 4. Polyakov V.M., Shchepkin L.A., Kazimirovskii E.S., Kokourov V.D. *Ionosfernye protsessy* (Ionospheric processes), Novosibirsk: Nauka, 1968, 535 p.
- 5. Brigs B.H. A study of the ionospheric irregularities which cause spread-*F* echoes and scintillations of ratio stars, *J. Atmos. and Terr. Phys.*, 1958, Vol.12, No. 1, pp. 34–42.
- 6. Reinisch B. *The digisonde portable sounder DPS. Technical manual*. University of Massachusetts Lowell Center for Atmospheric Research, 2007, Version 4.3, 404 p.
- 7. Singleton D.G. The morphology of spread-*F* occurrence over half a sunspot cycle, *J. Geophys. Res.*, 1968, Vol. 73, No. 6, pp. 295–308.