

ИОНОЗОНД «ПАРУС-А»: ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Г.В. Гивишвили¹, И.В. Крашенинников¹, Л.Н. Лещенко¹,
Ю.М. Власов, А.В. Кузьмин

¹ИЗМИРАН, Москва

²НИИДАР, «Радикон», Москва

Представлено описание основных функциональных возможностей сетевого ионозонда «Парус-А», включающее в себя как технические характеристики, так и особенности обработки данных радиозондирования. Анализируется достоверность результатов программы автоматической обработки данных – AutoScala в сравнении с ручной академической системой оценки ионосферных параметров. Рассмотрены эффективность мониторинга параметров максимума слоя F2 в задаче оперативного прогнозирования ионосферного прохождения радиоволн и перспективы развития ионозонда.

Ключевые слова: ИОНОЗОНД, ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ, ИОНОГРАММЫ, Ne(h) - ПРОФИЛЬ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ РАДИОВОЛН.

ВВЕДЕНИЕ

Современный сетевой ионозонд вертикального радиозондирования ионосферы, должен выполнять, как минимум, следующие базовые функции:

а) обеспечивать достаточно высокое соотношение сигнал/шум (разрешение) в широком диапазоне частот зондирования, как правило, от 1 до 20 МГц;

б) иметь систему обработки и хранения ионограмм ВЗ, в том числе, и модуль автоматической оценки основных ионосферных параметров и высотного распределения электронной плотности – Ne(h)-профиля;

в) иметь возможность пересылки в реальном времени данных в центр их сбора, с целью использования, в частности, в расчетах оперативного прогноза прохождения радиоволн через ионосферу Земли.

В данной работе представлены обзор функциональных возможностей ионозонда «Парус-А» с акцентом на системе обработки данных зондирования и рассматриваются возможные направления его развития.

1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Ионозонд «Парус-А» построен по классической схеме импульсного локатора, использующего простой радиоимпульс изменяемой частоты и предназначен для диагностики состояния ионосферы в автоматическом и ручном режимах методом вертикального зондирования (ВЗ) в соответствии с требованиями WMO, URSI и Росгидромета. Используя входящую в состав ионозонда систему синхронизации на основе GPS (ГЛОНАСС), возможны дополнительные режимы работы, в частности, реализация методов прямого трансionoсферного (ТИЗ) и обратного трансionoсферного (ОТИЗ) зондирования.

Особенностью классической схемы ионозонда является наличие достаточно мощного радиопередающего устройства (РПДУ), которое совместно с антенной системой, в общем случае разделенной на приемную и передающую части, обеспечивает высокое соотношение сигнал/шум на входе приемного устройства. Для «Паруса-А» максимальная импульсная мощность излучения при амплитудно-модулированном сигнале имеет величину ~12 кВт, хотя в обычной практике регулярных наблюдений коэффициент использования мощности составляет ~ 75%. Ионозонд имеет возможность работать как на совмещенную (прие-

мопередающую), так и на отдельные антенны. Основной конфигурацией антенной системы являются линейная передающая, типа комбинированного ромба (большой и малый ромбы для работы в нижней и верхней части диапазона зондирования), и скрещенные приемные, типа “дельта”, что позволяет осуществлять поляризационное разделение магнитоионных компонент волнового поля.

Цифровое радиоприемное устройство (РПУ) в базовом варианте служит для приема двух поляризационных компонент сигналов, прошедших сквозь плазму ионосферы, и имеет два основных и два резервных канала. РПУ имеет следующие характеристики:

- диапазон рабочих частот – 1 ÷ 20 МГц;
- уровень собственных шумов приемника – -185 дБВт/Гц;
- неидентичность коэффициентов усиления каналов по амплитуде – не более 0.5 дБ, по фазе – не более 1°;
- динамический диапазон – более 110 дБВт;
- погрешность измерения амплитуд отраженных сигналов – 1 дБ;
- погрешность привязки времени принимаемых импульсов к шкале времени GPS – менее 1 мкс.

Программа управления ионозонда осуществляет координацию работы всех его элементов, оцифровку и временное запоминание принятого сигнала, а также передачу оцифрованных данных в вычислительный комплекс. Базовые параметры работы:

- частота дискретизации – не менее 100 кГц (разрешение 1.5 км по высоте);
- число частотных каналов – не менее 1000;
- число высотных каналов – не менее 1000;
- число градаций амплитуды сигнала – не менее 255.

Пример практически одновременной работы ионозондов DPS-4 и «Парус-А» на ст. ИЗМИРАН приведен на рис. 1. Хорошо видно, что потенциала ионозонда “Парус-А” достаточно, чтобы получить следы отражений от ионосферных слоев и выполнить процедуру автоматической обработки (AutoScala), в то время как DPS-4 не смог получить ионограмму приемного качества, необходимого для автоматического распознавания следов в условиях повышенного уровня ионосферного поглощения (ARTIST).

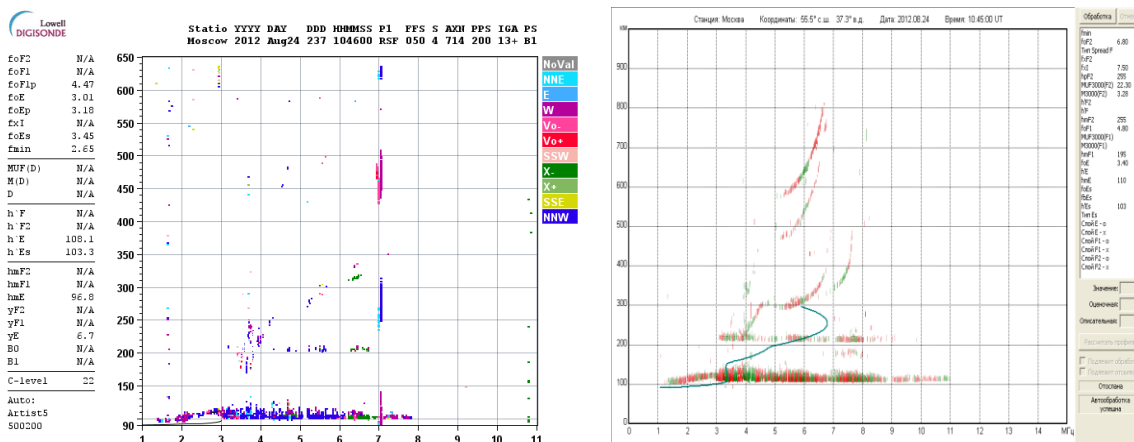


Рис. 1. Ионограммы ВЗИ, полученные ионозондом DPS-4 (слева) и ионозондом “Парус-А” (справа), в условиях повышенного уровня поглощения в спорадическом слое Es.

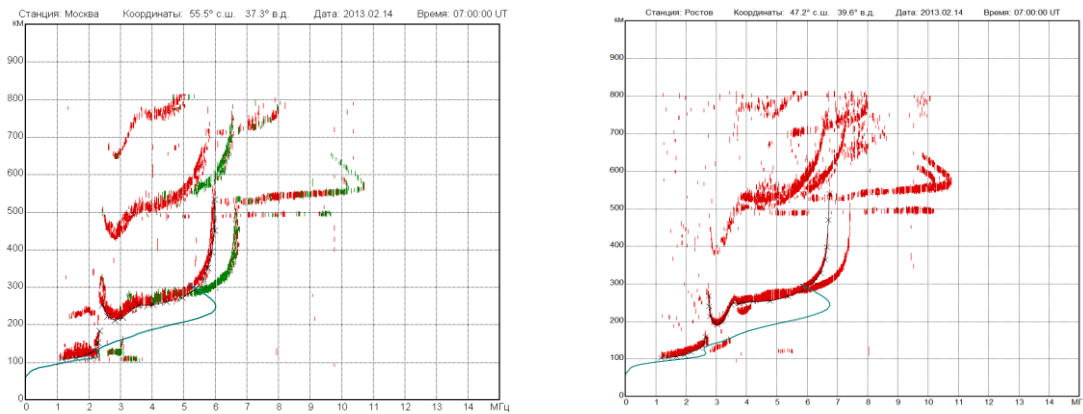


Рис. 2. Пример данных комплексного (вертикального и наклонного) радиозондирования ионосферы, полученные ионозондами на ст. ИЗМИРАН (слева, поляризационный прием) и Ростов-на-Дону (справа, совмещенная линейная антенна) 14 февраля 2013 г 07:00 UT.

Эффективность работы системы синхронизации двух ионозондов «Парус-А», размещенных на ст. ИЗМИРАН (слева) и Ростов-на-Дону (справа) иллюстрируется регистрацией взаимных ионограмм наклонного радиозондирования ионосферы (рис. 2). Здесь следует отметить два обстоятельства:

а) высокую степень совпадения группового пути следов отражения от E слоя для обеих станций, что характеризует достаточно высокую точность синхронизации и

б) совпадение МПЧ 1F2 в прямом и обратном направлении, что наглядно подтверждает принцип взаимности в ионосферном распространении радиоволн по геометрооптическим параметрам, в частности, по виртуальным лучевым траекториям и по групповому пути, но не по амплитуде поля, для которой сказывается влияние антенн.

2. ОБРАБОТКА ДАННЫХ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ

Программное обеспечение является важной составной частью современного ионозонда. Вычислительный комплекс «Парус-А» построен на тех же принципах, что и ионозонд DPS-4, т.е. с разделением функций управления процессом зондирования и обработки данных. Программа управления обеспечивает предварительную селекцию частот зондирования, прием данных зондирования от РПУ ионозонда, их очистку от шумов, сжатие и отсылку на обрабатывающий компьютер. Эффективность процедуры зондирования иллюстрируется рис. 1, на котором видно, как выбор частот позволяет от-

строиться от интенсивной помехи на частоте ~ 7 МГц. Комплексная программа обработки осуществляет автоматическое и ручное определение ионосферных параметров, архивирование полученных данных и их отсылку в центр сбора информации, поддержку работы с базой данных в локальной сети. Базовым элементом программы обработки является система полной академической интерактивной обработки и интерпретации ионограмм ВЗ с классическим представлением результатов в виде графиков и таблиц. Оперативную обработку ионограмм производит программа автоматической оценки основных ионосферных параметров – AutoScala. В настоящее время можно говорить о двух продуктах, выполняющих автоматическое масштабирование ионограмм ВЗИ – система ARTIST в DPS-4 и AutoScala, разработанная в Институте геофизики и вулканологии (Италия), приспособленная для различных ионозондов [1,2]. Основные этапы анализа ионограммы приведены на рис. 3 [1] и включают в себя следующие основные задачи:

- а) обнаружение и предварительная (общая) обработка ионограммы;
- б) выделение и масштабирование следа отражения от слоя Es;
- в) распознавание и оценка качества следа отражения от слоя F2;
- г) определение $foF2$ и M3000F2;
- д) определение параметров максимума слоя F1 (если он присутствует);
- е) и заключительная часть процедуры - восстановление $Ne(h)$ -профиля.

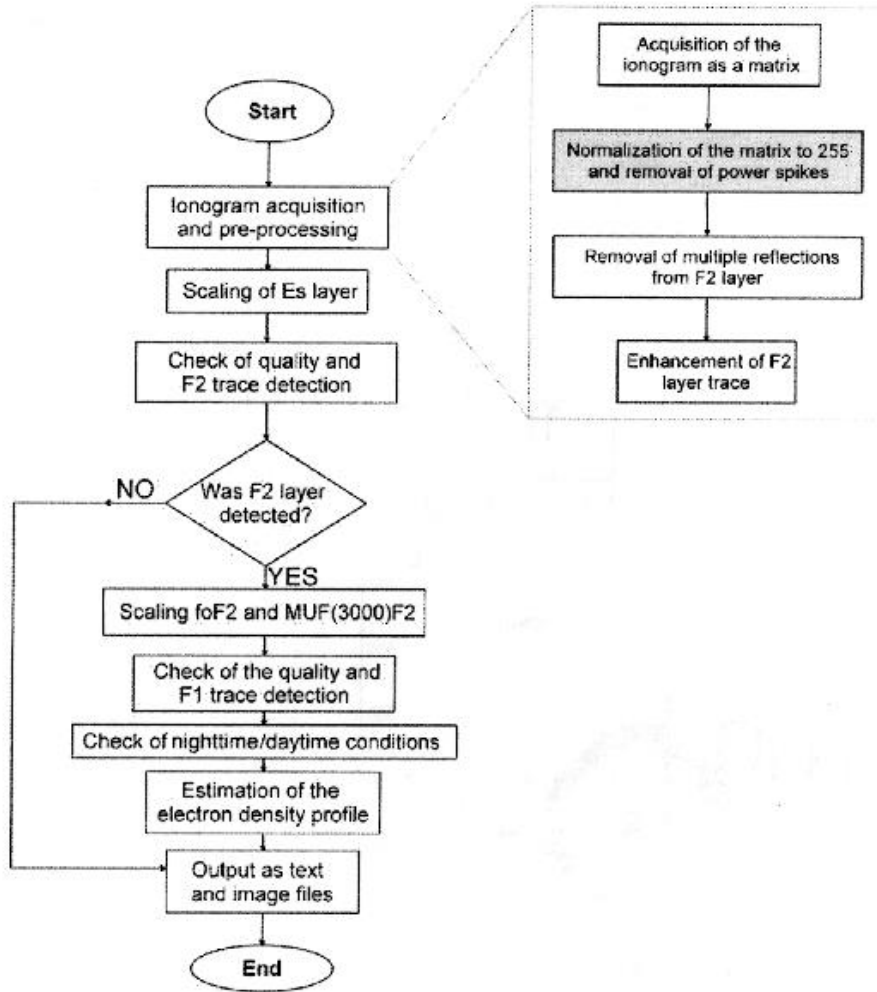


Рис. 3. Основные этапы автоматической обработки ионограммы в применении к ионозвуду «Парус-А».

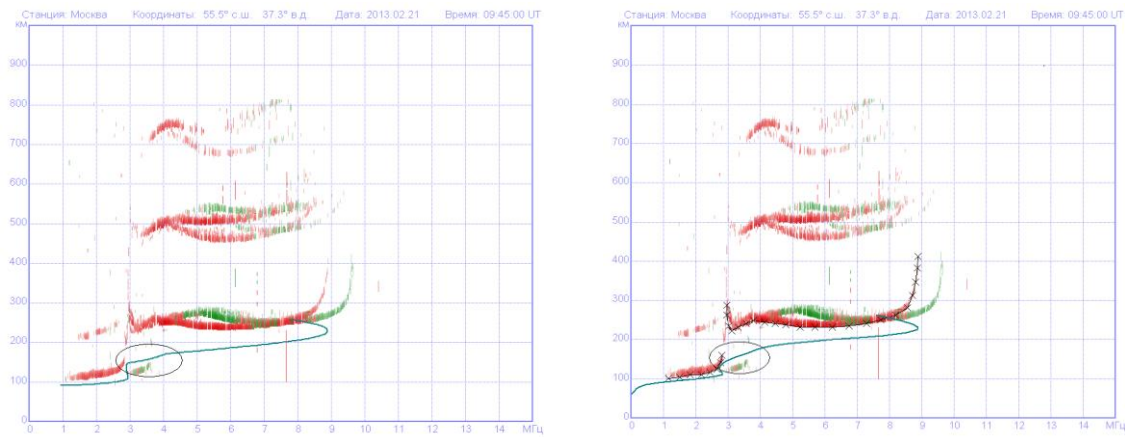


Рис. 4. Высотные профили электронной плотности, полученные в результате автоматической (левая панель) и ручной (правая панель) обработки ионограммы ВЗИ.

Существенным обстоятельством в восстановлении высотного профиля электронной плотности является использование модельного представления для E и F1 областей ионосферы в AutoScala. На рис. 4 представлены примеры оценки $Ne(h)$ – профиля, полученные в результате применения автоматической процедуры (слева) и ручной (справа) распознавания следов ионограммы ВЗИ 21.02.2013 09:45 UT. Разли-

чие наблюдается в области слабо выраженного слоя F1 и долины межслоевой ионизации (выделены овалами на рисунках), но практически нет расхождения в оценках параметров максимума слоя F2. Это пример того случая, когда при наличии почти идеальной ионограммы и зимнего сезона года результаты ручной и автоматической обработки совпадают. Однако, в целом, это не так.

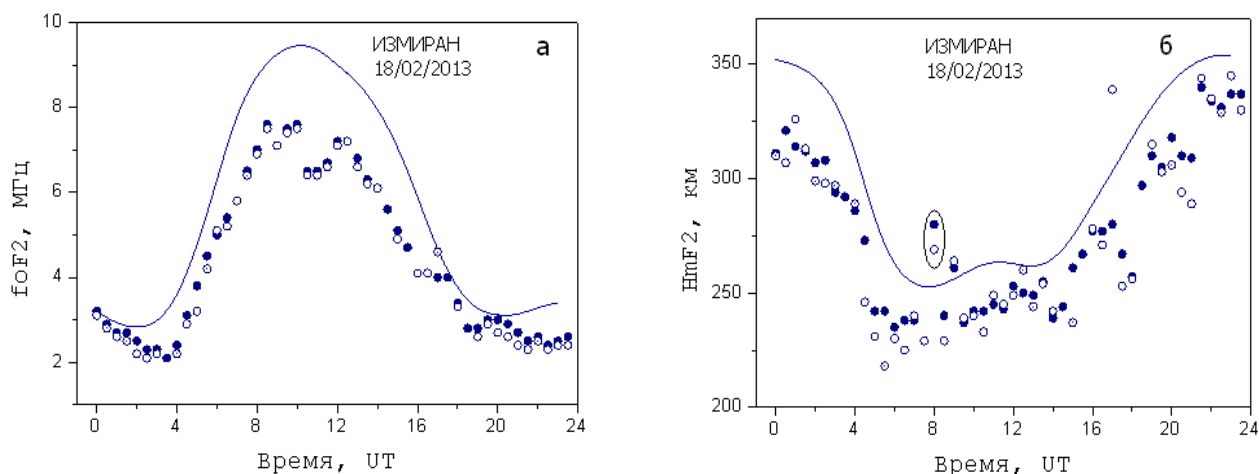


Рис. 5. Дневная зависимость параметров максимума слоя F2: $foF2$ (а) и $hmF2$ (б), полученных в автоматической и ручной обработке данных радиозондирования (зимний период).

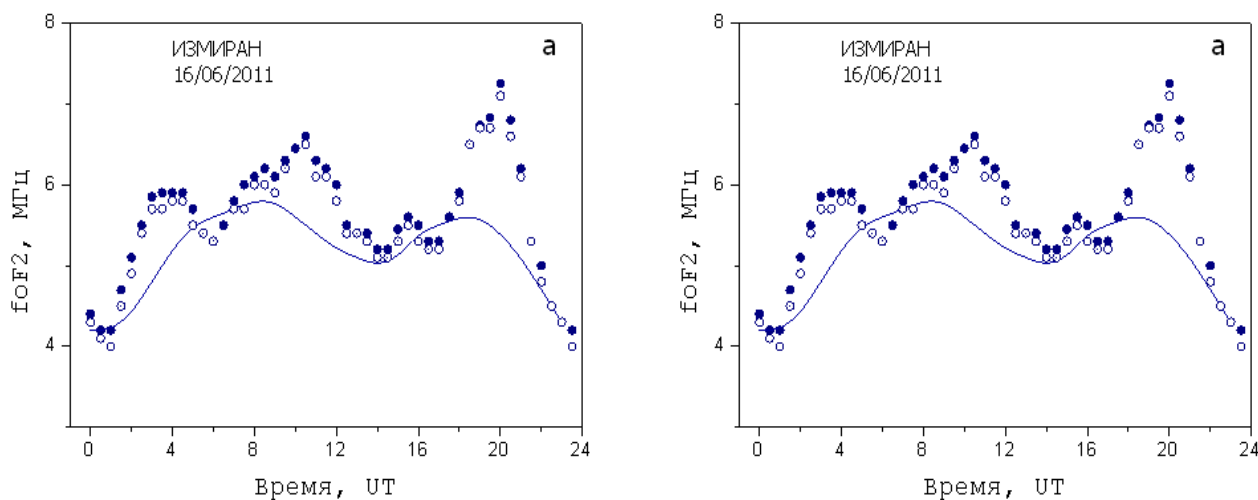


Рис. 6. Дневная зависимость параметров максимума слоя F2: $foF2$ (а) и $hmF2$ (б), полученных в автоматической и ручной обработке данных радиозондирования (летний период)

На рис. 5 приведены примеры дневных вариаций параметров максимума слоя F2: $foF2$ и $hmF2$ с получасовым интервалом в автоматическом (отмечено кружочком) и ручном (сплошные крупные точки) режимах обработки. Характер расхождений для критической частоты и высоты максимума существенно различается –

небольшая дисперсия для $foF2$ (среднеквадратичное отклонение ~ 0.2 МГц) и значительное для $hmF2$ (соответствующая величина ~ 13 км). Практически не наблюдается систематического отклонения в $foF2$ (~ 0.1 МГц) и небольшое систематическое превышение $hmF2$ в ручном режиме обработки. Для $hmF2$ можно видеть два

выброса: в 08:00 и 16:30 UT. Первый обусловлен прохождением мощного волнового возмущения и высота максимума увеличилась в фазе минимума электронной плотности над ионозондом (отмечено овалом на рис. 4,б). При этом оценки высоты максимума слоя F2 увеличились в обоих режимах обработки, причем разность осталась на уровне, характерном для этого времени суток. Второй, в 16:30, является проявлением кардинального отклонения оценки $hmF2$ в автоматической процедуре и причина этого, на наш взгляд дефекта, непонятна.

Сплошной линией на рис. 5 нанесен ход модельных величин IRI-2001 для среднемесячных значений числа солнечных пятен и видно, что для конкретного дня наблюдается существенное различие текущих и медианных параметров максимума слоя F2.

Результаты сопоставления $foF2$ и $hmF2$ для летнего периода времени представлены на рис. 6. Для него характерно даже уменьшение дисперсии для $foF2$ (рис. 6,а) примерно в 2 раза – до ~ 0.1 МГц и также отсутствие в сопоставляемых рядах значимого систематического отклонения. Для $hmF2$ дисперсия примерно на том же уровне, но имеет место регулярное отклонение величин, полученных в автоматической процедуре, от базовых ручных – систематическая погрешность составляет ~ 11 км (рис. 6,б). Сплошными линиями также отмечены медианные модельные зависимости IRI-2001.

3. ДАННЫЕ ВЗ В ОПЕРАТИВНОМ ПРОГНОЗЕ

В [3,4] изложена техника построения оперативного прогноза прохождения радиоволн,

основанная на использовании глобальной ионосферной модели IRI-2001, данных о текущей солнечной активности в форме потока солнечного радиоизлучения F10.7 и трехчасовых данных о параметрах максимума слоя F2. Рассмотрим применение этой методики на примере данных вертикального - ВЗИ и наклонного – НЗИ зондирования ионосферы (рис. 2). На рис. 7 представлен рассчитанный оперативный прогноз в форме модовой структуры волнового поля для радиотрассы Ростов-на-Дону – ИЗМИРАН 07:00 14.02.2013 для среднемесячных данных солнечной активности (рис. 7,а) и с учетом текущих солнечных и ионосферных данных (рис. 7,б) (в расчете использовались связанные типы антенн). Для этого дня характерно значительное отличие $foF2$ от медианной модельной зависимости – реальные значения плазменной частоты в максимуме слоя F2 существенно ниже модельных. Также, примерно, как и на рис. 5,а. Общее уменьшение электронной плотности по отношению к модельной проявляется и в заниженном значении максимально применимой частоты - МПЧ 1F2. Для данного момента времени экспериментальное значение составляет ~ 10.8 МГц, а медианное модельное ~ 14.8 МГц. После адаптации модели величина МПЧ 1F2 уменьшилась и составила ~ 12 МГц. В процентном отношении относительная погрешность уменьшилась с $\sim 35\%$ до $\sim 10\%$. Следует отметить, что использование данных зондирования за последние 3 часа в адаптации ионосферной модели дает сглаженное распределение электронной концентрации и, следовательно, рассчитанные характеристики, например, МПЧ 1F2 также являются сглаженными.

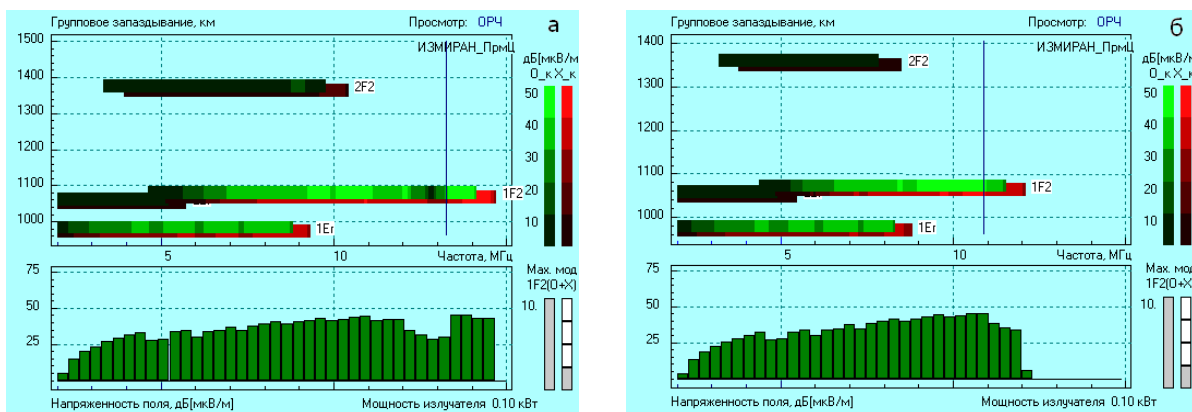


Рис. 7. Модовая структура волнового поля для радиотрассы Ростов-на-Дону – ИЗМИРАН: а) для ионосферной модели IRI-2001 при медианных значениях числа солнечных пятен; б) с дополнительным учетом текущей солнечной активности и предыдущих трехчасовых значений параметров максимума слоя F2.

В программном обеспечении ионозонда «Парус-А» в ИЗМИРАН имеется специальная утилита, автоматически формирующая данные о параметрах максимума слоя F2 за последние три часа для системы прогнозирования прохождения радиоволн «Прогноз-ИЗМИРАН».

4. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Ионозонд «Парус-А» имеет перспективы развития, как в техническом, так и в программном плане, из которых выделим три:

- а) триангуляционные измерения, т.е. формирование «карты неба» – локализации на небесной сфере видимых направлений приходящих лучей;
- б) измерение вариаций поглощения в нижней части ионосферы, с возможностью анализа высотной зависимости эффективной частоты соударений электронов;
- в) совершенствование модуля автоматизированной обработки, на основе распознавания следов ионограмм в области F1.

В настоящее время в состав базовой версии ионозонда входит четырехканальное приемное устройство, т.е., в принципе, возможна обработка сигнала с четырех антенн. Существует

возможность доведения числа каналов до восьми, что позволит работать с четырьмя поляризационными антеннами и, используя высокий потенциал в фазовых измерениях, регистрировать углы прихода зондирующих радиоволн.

Как известно, для ионосферы характерно наличие так называемого фактора ионосферной изменчивости [5,6], т.е. при, казалось бы, близких значениях гелиогеофизических параметров наблюдаются существенные различия в состоянии ионосферы. Одним из таких проявлений являются вариации поглощения. Предполагается, что их регистрация будет основана на методе A1 и, главным образом, будет затрагивать программный компонент ионозонда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, ионозонд «Парус-А», основанный на классической архитектуре ионосферного импульсного радара, имеет достаточно высокий потенциал в проведении регулярных обсерваторских наблюдений и, в частности, решении практических задач в области ионосферного распространения радиоволн.

IONOSONDE "PARUS-A": FEATURES AND PROSPECTS

G.V.Givishvili, I.V.Krasheninnikov, L.N.Leschenko, Yu.M.Vlasov, A.V.Kuzmin

Description of the basic functionalities of network ionosonde "Parus-A" including both technical characteristics and some features in the sounding data processing is presented. Reliability of the results obtained by automatic data processing module AutoScala is compared with ones in manual interactive academic system of the ionospheric parameters estimation. An efficiency of monitoring the F2 layer peak parameters in short-term forecasting problem of ionospheric radio waves propagation is demonstrated on the example of oblique sounding ionogram analysis. Some perspectives of the ionosonde development are considered.

KEYWORDS: IONOSONDE, VERTICAL SOUNDING, IONOGRAMS, NE (H) - PROFILE, IONOSPHERIC RADIO WAVES PROPAGATION FORECASTING.

ЛИТЕРАТУРА

1. Krasheninnikov I., Pezzopane M., Scotto C. Application of Autoscala to ionograms recorded by the AIS-Parus ionosonde. // *Computers & Geosciences*. 2010. V.36. P.628-635.
2. Pezzopane M., Scotto K., Tomasik L., Krasheninnikov I. Autoscala: an Aid for Different Ionosondes // *Acta Geophysica*. 2010. V.58. No.3. P.513-526.
3. Крашенинников И.В., Егоров И.Б., Павлова Н.М. Эффективность прогнозирования прохождения радиоволн в ионосфере на основе ионосферной модели IRI-2001 // *Геомагнетизм и аэронавигация*, 2008. Т.48. № 4. С. 526-533.
4. Krasheninnikov I., Egorov I.B. IRI-2001 model efficiency in ionospheric radiowave propagation forecasting. // *Jour. Advances in Space Research*. 2010. V.45. No.2. P.268-275.
5. Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. Variability of the ionosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2000. V. 62. № 8. P. 685 – 693.
6. Rishbeth H., Mendillo M. Patterns of F2-layer variability. // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2001. V. 63. № 15. P. 1661-1680.