

ИОНОЗОНД «ПАРУС-А»: НОВЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ИЗМИРАН

Г. В. Гивишвили, И. В. Крашенинников, Л. Н. Лещенко

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)

Представлено описание основных функциональных возможностей нового сетевого ионозонда «Парус-А», включающее в себя как технические характеристики, так и особенности обработки данных радиозондирования. Рассмотрены перспективы развития ионозонда.

Ключевые слова: ионозонд, вертикальное радиозондирование ионосферы, ионограммы, $Ne(h)$ -профиль, прогнозирование прохождения радиоволн.

ВВЕДЕНИЕ

Метод вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы был и остаётся до настоящего времени самым информативным и доступным инструментом изучения физики околоземного космического пространства (ОКП), характера солнечно-земных связей, а также регулярного и оперативного диагностирования (мониторинга) состояния ионизованной компоненты верхней атмосферы. Кроме того, он обеспечивает решение задач радиосвязи в коротковолновом (КВ) диапазоне, кратко- и долгосрочного прогноза ионосферного распространения радиоволн, контроля за естественными и антропогенными возмущениями ОКП. До появления персональных компьютеров (ПК) качество ионозондов ВЗ различалось, прежде всего, аналоговыми характеристиками соответствующих приёмно-передающих устройств. Самым удачным и распространённым в стране ионозондом эпохи аналоговых ионозондов был ионозонд АИС (автоматизированная ионосферная станция), исключительно большую роль в разработке которого сыграли сотрудники ИЗМИРАН: Г. В. Васильев, Л. П. Гончаров и К. Н. Васильев.

Между тем к концу XX — началу XXI столетия отечественная сеть АИС оказалась морально устаревшей и физически предельно изношенной. Однако заполнить образовавшийся вакуум было нечем. Различные, создававшиеся в тех или иных организациях ионозонды, подобные «Авгуру», «Базису», «Вертикаль», «У», «Z», не удовлетворяли требованиям времени. Проблему не решал и аналоговый ионозонд «Парус», первая версия которого была разработана в 1993 г. В период до 2009 г. было изготовлено 11 экземпляров этого устройства, которое по сей день эксплуатируется на ряде обсерваторий РФ и за рубежом.

В современных цифровых ионозондах, подобных Digisonde (DPS-4) (см. *McNamara L. F. Quality figures and errors bars for autoscaled Digisonde vertical incidence ionograms // Radio Science. 2006. V. 41. Iss. 4. RS4011. doi: 10.1029/2005RS003440*), большую роль стали играть программные средства

Гивишвили Гиви Васильевич — заведующий лабораторией, givi@izmiran.ru

Крашенинников Игорь Васильевич — заведующий лабораторией, krash@izmiran.ru

Лещенко Людмила Николаевна — старший научный сотрудник, givi@izmiran.ru

управления режимом зондирования и обработки данных измерений — высоотно-частотных характеристик, ионограмм ВЗ. Таким образом, современный отечественный ионозонд ВЗ должен был 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 расчётах оперативного прогноза прохождения радиоволн через ионосферу Земли.

На решение этих задач был нацелен цифровой ионозонд нового поколения «Парус-А». Качественный скачок в технических характеристиках и программном обеспечении ионозонда был осуществлён благодаря приёмному устройству прямого усиления и автоматизации процедуры обработки, хранения и передачи данных измерений. Первый экземпляр этого ионозонда был изготовлен в 2010 г.

К настоящему времени сделано четыре экземпляра ионозонда «Парус-А», которым переоснащается ионосферная сеть Росгидромета, а в 2014—2015 гг. должны быть изготовлены и запущены в эксплуатацию ещё восемь его экземпляров. На рис. 1 представлен общий вид ионозонда «Парус-А».

1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Размеры радиопередающего устройства (РПДУ), не более ... 480×335×435 мм
 Размеры радиоприёмного устройства (РПУ), не более 448×315×375 мм
 Масса РПДУ, не более 25 кг
 Масса РПУ, не более 27 кг
 Потребляемая мощность, не более 800 Вт



Рис. 1. Ионозонд «Парус-А»

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Ионозонд «Парус-А» предназначен для диагностики состояния ионосферы в автоматическом и ручном режимах методом вертикального зондирования в соответствии с требованиями WMO (World Meteorological Organization), URSI (International Union of Radio Science) и Росгидромета. Он построен по классической схеме импульсного локатора, использующего простой радиоимпульс переменной частоты в диапазоне 1...20 МГц. Используя входящую в состав ионозонда систему синхронизации на основе GPS (ГЛОНАСС) (Global Positioning System; Глобальная навигационная спутниковая система), возможны дополнительные режимы работы, в частности, реализация методов прямого трансionoсферного (ТИЗ) и обратного трансionoсферного (ОТИЗ) зондирования.

2.1. Характеристики радиопередающего устройства

Диапазон рабочих частот 1...20 МГц
Длительность импульсов 100...200 мкс
Максимальная импульсная мощность излучения 12 кВт
Средняя мощность излучения, не более 60 Вт

2.2. Характеристики радиоприёмного устройства

Диапазон рабочих частот 1...20 МГц
Уровень собственных шумов -185 дБ·Вт/Гц
Динамический диапазон, более 110 дБ·Вт
Погрешность измерения амплитуд отражённых сигналов 1 дБ
Погрешность привязки времени к шкале времени GPS 1 мкс

2.3. Спутниковое навигационное устройство

Спутниковое навигационное устройство (СНУ), используя навигационные сигналы GPS и/или ГЛОНАСС, обеспечивает:

- предоставление стандарта частоты для РПУ и РПДУ;
- привязку к шкале времени GPS времени посылки и приёма импульсов с точностью 1 мкс, а также время начала зондирования для режимов НЗ, ТИЗ и ОТИЗ.

2.4. Устройство управления

Устройство управления (УУ) осуществляет координацию работы всех элементов ионозонда, оцифровку и временное запоминание принятого сигнала, а также передачу оцифрованных данных в вычислительный комплекс.

2.5. Приёмник спутниковых данных по каналу 137 МГц

Приёмник П137 служит для приёма данных спутникового зондирования при пролёте спутника над местоположением ионозонда, приниматься могут как ионограммы, полученные спутниковым ионозондом независимо, так и данные, полученные в режиме ОТИЗ.

2.6. Вычислительный комплекс

Вычислительный комплекс (ВК) обеспечивает приём данных зондирования от РПУ ионозонда, их очистку от шумов, сжатие, автоматическое и ручное определение ионосферных параметров, архивирование полученных данных и их отсылку в базу сбора информации. Комплекс построен на принципе разделения функций управления процессом зондирования и обработки данных. 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, разработанная в Национальном институте геофизики и вулканологии, Италия (National Institute of Geophysics and Volcanology; Italian: Istituto Nazionale Geofisica e Vulcanologia, INGV). В настоящее время идёт работа по составлению отечественной программы, способной её заменить. Кроме того, ВК обеспечивает восстановление высотного профиля электронной концентрации $Ne(h)$ в каждом сеансе измерений.

3. КАЧЕСТВО РЕГИСТРИРУЕМЫХ ИОНОГРАММ

С 2010 г. было изготовлено четыре экземпляра ионозонда «Парус-А», установленных в Троицке (ИЗМИРАН), Подкаменной Тунгуске, Ростове-на-Дону и Звенигороде. Для определения качества получаемых ими ионограмм ВЗ последние сравнивались с ионограммами, регистрируемыми, в частности, ионозондами DPS-4 и CADI. Сравнение «Парус-А» с DPS-4 производилось между экземплярами ионозондов, расположенных в ИЗМИРАН. Один из примеров такого сопоставления при сеансе зондирования практически в одно и то же время (24.08.2012, 10:45 и 10:46 UT (Universal Time)) показан на рис. 2.

Видно, что потенциала ионозонда «Парус-А» достаточно, чтобы получить следы отражений от ионосферных слоёв и выполнить процедуру автоматической обработки, в то время как DPS-4 не смог получить ионограмму приемлемого качества, необходимого для автоматического распознавания следов в условиях даже небольшого повышения уровня ионосферного поглощения.

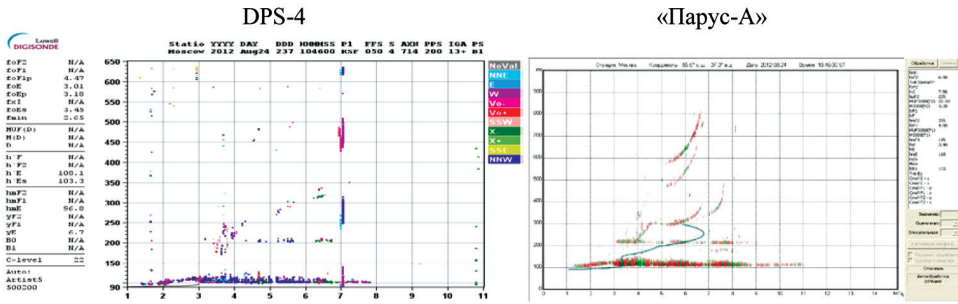


Рис. 2. Ионограммы ВЗ, полученные ионозондом DPS-4 (слева) и ионозондом «Парус-А» (справа), в условиях повышенного уровня поглощения в спорадическом слое Es. Здесь и на рис. 3 синей линией показаны $Ne(h)$ -профили, рассчитанные для данных сеансов измерений

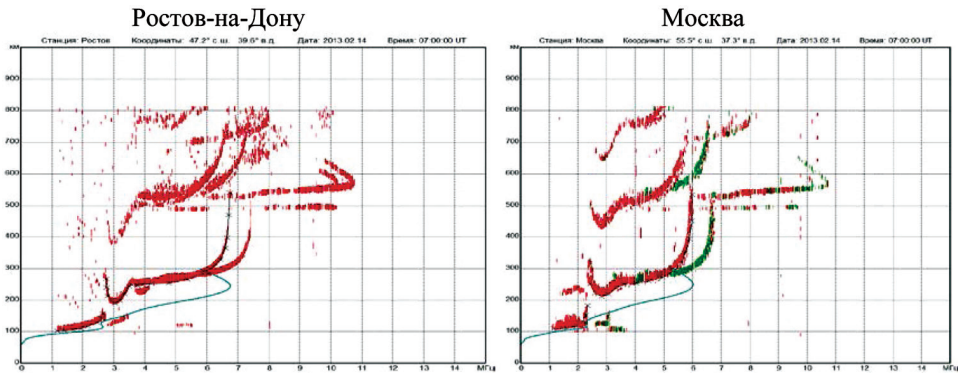


Рис. 3. Ионограммы ВЗ, полученные в одно и то же время в Москве и Ростове-на-Дону

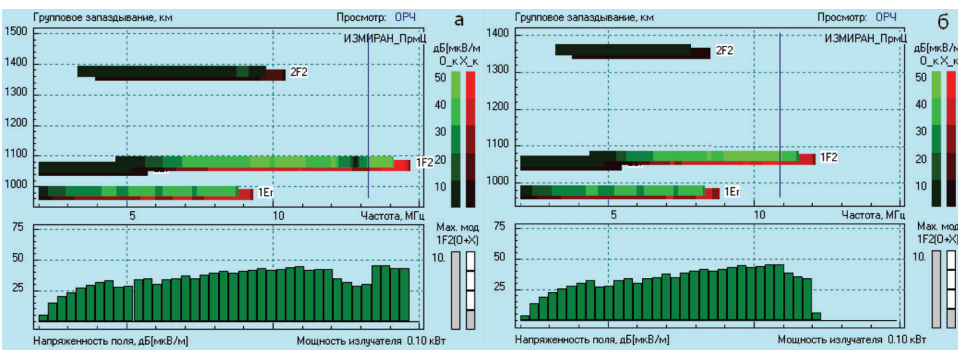


Рис. 4. Модовая структура волнового поля для радиотрассы Ростов-на-Дону — ИЗМИРАН: а — для ионосферной модели IRI-2001 при медианных значениях числа солнечных пятен; б — с дополнительным учётом текущей солнечной активности и трёхчасовых значений параметров максимума слоя F2

Готовность ионозонда «Парус-А» регистрировать сигналы ТИЗ и ОТИЗ иллюстрирует рис. 3, на котором представлены ионограммы ВЗ, зафиксированные при синхронной работе двух экземпляров этого ионозонда в Троицке и Ростове-на-Дону.

На обоих ионозондах видны следы отражённых сигналов не только при вертикальном падении, но и сигналы наклонного зондирования, а именно: приёмник ионозонда «Парус-А», расположенного в Москве, регистрирует следы передатчика «Парус-А», расположенного в Ростове-на-Дону, и наоборот.

4. ДАННЫЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ОПЕРАТИВНОМ ПРОГНОЗЕ

На рис. 4 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. 4а) и с учётом текущих солнечных и ионосферных данных (рис. 4б). Для этого дня характерно значительное отличие f_oF2 от медианной модельной зависимости — реальные значения плазменной частоты в максимуме слоя F2 существенно ниже модельных, также, примерно, как и на рис. 4а. Уменьшение электронной плотности по отношению к модельной проявляется и в заниженном значении МПЧ (максимально применимая частота) 1F2. Для данного момента времени экспериментальное значение составляет $\sim 10,8$ МГц, а медианное модельное — $\sim 14,8$ МГц. После адаптации модели величина МПЧ 1F2 уменьшилась и составила ~ 12 МГц. В процентном отношении относительная погрешность уменьшилась с ~ 35 до ~ 10 %. Следует отметить, что использование данных зондирования за последние 3 ч в адаптации ионосферной модели даёт сглаженное распределение электронной концентрации и, следовательно, рассчитанные характеристики, например, МПЧ 1F2 также являются сглаженными.

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».

5. НОВЫЕ ЭФФЕКТЫ, ОБНАРУЖЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ ИОНОЗОНДА «ПАРУС-А»

5.1. Аномальные отражения

Высокое качество ионограмм ВЗ, получаемых с помощью ионозонда «Парус-А», позволило обнаружить не известное ранее явление существования аномальных отражений (АО) необычного типа на высотах 100...200 км. Они «оторваны» от основного $Ne(h)$ -профиля ионосферы. Типичный образец этого явления представлен на рис. 5.

В результате анализа данных, полученных на ст. «Москва» за период 1964–2010 гг., было показано, что продолжительность наблюдаемых аномальных отражений меняется от 15 мин до нескольких часов. В летний период АО наблюдаются чаще и имеют большую продолжительность. Суточный ход появления АО меняется в зависимости от сезона. Связь вероятности появления АО с солнечным циклом требует дальнейшего изучения.

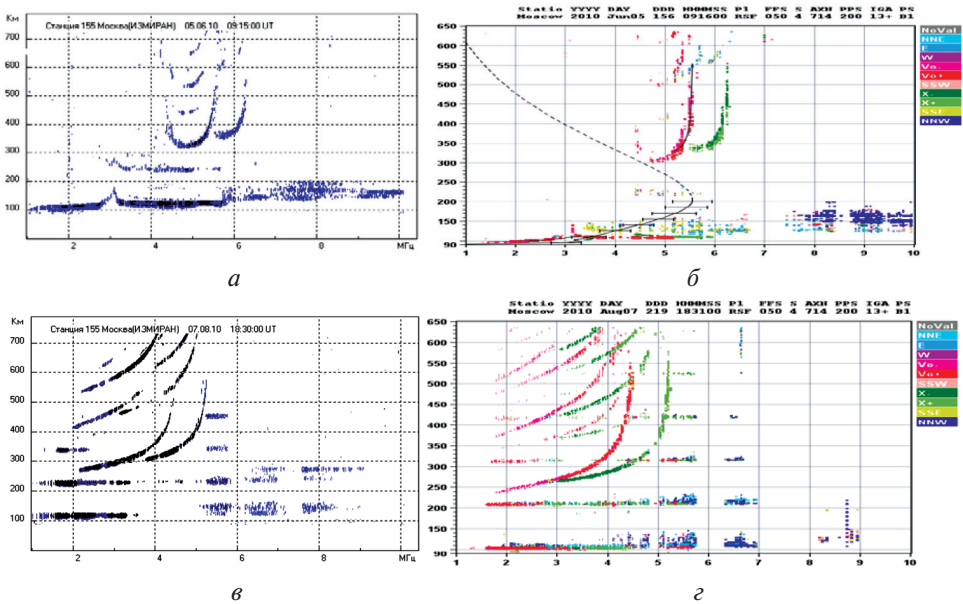


Рис. 5. Ионограммы с хорошо выраженными АО, зарегистрированные в один и тот же момент времени ионозондами DPS-4 (б, в) и «Парус-А» (а, г) на ст. «Москва»

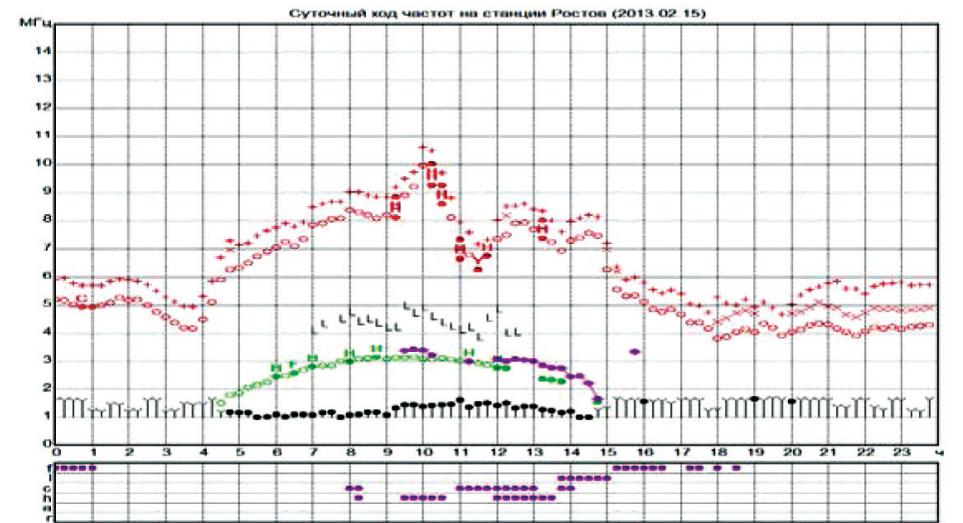


Рис. 6. Суточный ход частотных характеристик ионосферы в день падения Челябинского метеорита

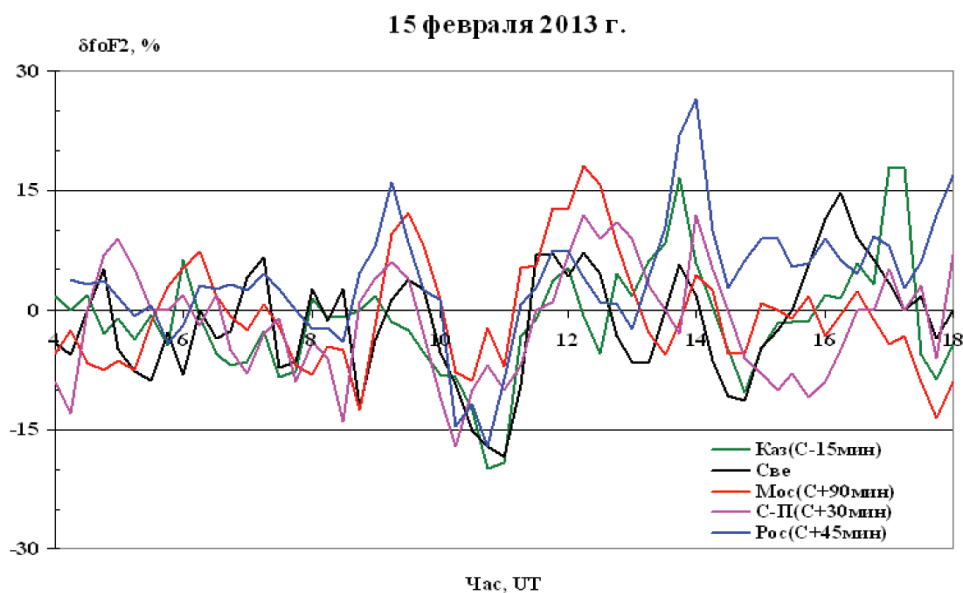


Рис. 7. Значения $\delta foF2$ сдвинуты относительно друг друга на время от 15 до 90 мин в зависимости от расстояния до Свердловска, как наиболее близкого к Челябинску пункта наблюдений. Отчётливо проявляется почти полная синфазность возмущений слоя F2 на них

5.2. Ионосферные эффекты Челябинского метеорита

Основываясь на данных измерений, главным образом, ионозонда «Парус-А», впервые был обнаружен эффект влияния падения крупного метеорита не только на область E (с образованием спорадических слоёв Es), но на всю ионосферу, включая слой F2. В данном случае эффект проявился как следствие падения Челябинского метеорита 15.02.2013 г. К анализу привлекались данные станций Москвы, Свердловска, Ростова, Санкт-Петербурга и Казани. Пример суточного хода критических частот различных слоёв ионосферы в этот день в Ростове представлен на рис. 6.

Анализ данных показал, что наблюдавшиеся на них возмущения критической частоты слоя F2 ($\delta foF2$) 15.02. 2013 г. имели отчётливо выраженный региональный характер, стимулированный вторжением и взрывом метеорита (рис. 7).

6. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

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

Во-первых, отработаны технические решения, реализующие измерение не только «стандартных» (для панорамного зондирования) параметров ионосферы — критических частот f_o и действующих высот h_m , но также

и энергетического потенциала сигналов, распространяющихся в ионосфере, и контролируемого величиной поглощения (L) на ряде частот. Решения основаны на использовании:

- а) мощного (12 кВт излучаемой мощности), но малогабаритного радиопередающего (РПД) устройства;
- б) восьмиканального поляризационного радиоприёмного устройства (РПУ);
- в) соответствующего функционально программного обеспечения.

Во-вторых, так как вопрос о повышении оперативности обработки данных ионосферных измерений становится всё более актуальным, в системе обработки данных измерений (СОД) последней версии «Паруса» проходит успешные испытания система программного обеспечения автоматизации обработки и передачи данных в реальном времени.

В-третьих, так как блок управления (БУ) и РПУ «Парус-А» унифицированы с БУ и РПУ спутниковых ионозондов, его режим зондирования легко синхронизируется с работой бортовых ионозондов. Что существенно облегчает взаимную синхронизацию режимов их работы и повышает надёжность каналов, обеспечивающих прямое трансionoсферное и обратное трансionoсферное зондирование ионосферы.

7. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

На данный момент ионозонд Парус-А является легитимным средством измерений в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. Испытания в целях утверждения его в качестве сертифицированного средства определения характеристик ионосферы методом ВЗ были успешно завершены в 2012 г. (свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.С.35.001.А № 48409 от 12.10.2012 г.)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт эксплуатации четырёх экземпляров ионозонда «Парус-А» показал исключительную устойчивость воспроизводимой им структуры ионосферы в условиях самых разнообразных возмущений — ионосферных бурь, F-рассеяний, наклонных отражений, волн широкого спектра и т. д. В этом качестве он не только не уступает, но даже превосходит западные образцы. Что же касается точности оцениваемых характеристик, оперативности обработки и доведения конечной информации до потребителя, он сравним с ними.

IONOSONDE PARUS-A: NEW IONOSPHERIC METERING COMPLEX IZMIRAN

G. V. Givishvili, I. V. Krashennnikov, L. N. Leschenko

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation
of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN)

Description of the basic functionalities of the new network ionosonde Parus-A including both technical characteristics and some features in the sounding data processing is presented. Some perspectives of the ionosonde development are considered.

Keywords: ionosonde, vertical sounding, ionograms, Ne(h)-profile, ionospheric radio waves propagation forecasting.

Givishvili Givi Vasilievich — head of laboratory, givi@izmiran.ru

Krashennnikov Igor Vasilievich — head of laboratory, krash@izmiran.ru

Leschenko Ludmila Nikolaevna — senior scientist, givi@izmiran.ru