

УДК 550.388.2

## СЕТЕВОЙ ИОНОЗОНД ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

С.А. Колесник, А.А. Колмаков, В.Т. Сарычев, Р.К. Хаитов

*Томский государственный университет*

Работа посвящена развитию новых методов исследования состояния ионосферы. В работе представлен российский сетевой ионозонд «ТОМИОН», на котором реализованы новые подходы и методы дистанционного радиозондирования ионосферы на основе мировых технологических достижений последних лет и наиболее передовых методов анализа данных с использованием методов Диназонда. Реализация этих методов была осуществлена на базе Томской ионосферной станции.

Ключевые слова: мониторинг ионосферы Земли, метод вертикального радиозондирования ионосферы, цифровой ионозонд

### ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени в мире для задач вертикального радиозондирования ионосферы достаточно широкое распространение получили такие системы, как ионозонд «Парус» («ИЗМИРАН»), CADI (Канада), «Циклон» (Казанский государственный университет), Digisonde (США) и цифровой ионозонд «Dynasonde-21» (Scion Associates Inc. & Dynasonde Solution Ltd., США). Среди перечисленных ионозондов наиболее гибкой и функциональной системой до последнего времени являлся цифровой ионозонд «Dynasonde-21», который выполнен на идеологии Диназонда.

Диназонд [1–5] – это общее имя уникальной идеологии ионосферного радиозондирования, которая начала развиваться примерно четыре десятилетия тому назад в организации-предшественнике современной NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) в Боулдере, Колорадо. Сейчас в мире действует пять таких систем, одна из которых находится в России в Томске.

Научными продуктами Диназонда являются [1–5]: надежное автоматическое определение стандартных ионосферных параметров; трехмерная инверсия электронной концентрации методом NeXtYZ, диагностика спектра мелко-масштабных неоднородностей методом структурной функции фазы, и векторные скорости движения ионосферных слоев, все получаемые в стандартном режиме работы, непосредственно из данных ионограммы.

Развитие методов дистанционного радиозондирования ионосферы Земли претерпевает в настоящее время революцию, связанную с переходом на ВЧ-радиосистемы с полностью цифровой обработкой как излучаемого, так и принимаемого сигнала, что до последнего времени было технически неосуществимо. Полностью цифровая обработка сигналов облегчает применение прецизионных принципов ионосферных измерений, предложенных в концепции Диназонда.

Целью работы является развитие и применение методов дистанционного радиозондирования ионосферы на основе мировых технологических достижений последних лет и наиболее передовых методов анализа данных.

Так как, авторы считают, что передовыми методами исследования ионосферы являются методы Диназонда, то в работе будут приводиться сравнения разработанного ионозонда «ТОМИОН» с наилучшей разработкой наших американских коллег (по мнению авторов) ионозонда «Dynasonde-21».

Далее в работе приведены основные технические характеристики разработанного современного российского цифрового ионозонда – сетевого ионозонда «ТОМИОН», реализующего в работе принципы Software Defined Radio [6]. Разработанный инструмент совместим с методами и режимами ионосферного радиозондирования, применяемыми Диназондом. Отдельное внимание уделено некоторым новым результатам, полученным на сетевом ионозонде «ТОМИОН» на Томской ионосфер-

ной станции, с использованием программ обработки данных, основанных на методах Диназонда.

### 1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ СЕТЕВОГО ИОНОЗОНДА «ТОМИОН»

Основные технические характеристики разработанного в 2010 году сетевого ионозонда «ТОМИОН» и ионозонда «Dynasonde-21» приведены в таблице 1. Здесь указаны 20 основных технических характеристик.

Исходя из таблицы 1, разработанный сетевой ионозонд «ТОМИОН» по основным техническим характеристикам превосходит самый лучший в мире действующий ионозонд «Duна-

sonde-21», в котором частота дискретизации  $I$  и  $Q$  компонент составляет всего лишь 100 кГц. В ионозонде «ТОМИОН» частота дискретизации  $I$  и  $Q$  компонент составила 100 МГц. Указанный момент позволяет кардинальным образом улучшить разрешение по пространственным координатам и, в частности, по высоте или дальности. Главной особенностью является прием сигналов на фазированную антенную решетку, состоящую из 6 антенн, что позволяет не только измерять доплеровское смещение частоты лучей (при многолучевом отражении), но и измерять углы прихода сигналов. Третьим преимуществом ионозонда «ТОМИОН» является существенное сокращение времени радиозондирования ионосферы до 1 с.

Таблица 1. Технические характеристики ионозондов

№	Характеристики	Dynasonde-21	ТОМИОН
1	Мощность, Вт	100 – 4000	100 – 4000
2	Диапазон частот, МГц	0.5 – 30	0.5 – 30
3	Шаг перестройки частоты, кГц	любой	любой
4	Количество приемных антенн	8	6
5	Максимальная длительность импульса, мкс	100	500
6	Форма импульса	трапеция	любая
7	Наличие доплеровского смещения частоты	есть	есть
8	Минимальное время зондирования	100 – 300 с	1 с
9	Возможность фазовых измерений	есть	есть
10	Трехмерная ионограмма	есть	есть
11	Аналоговое или цифровое преобразование сигналов	есть	есть
12	Цифровая обработка сырых данных	нет	есть
13	Частота дискретизации отраженных сигналов, МГц	80	100
14	Частота дискретизации $I$ и $Q$ компонент, МГц	0.1	до 100
15	Автоматическая обработка ионограмм	есть	есть
16	Возможность исследования мелкомасштабной структуры ионосферы	есть	есть
17	Возможность пассивного наклонного зондирования	нет	есть
18	Возможность оперативного предоставления данных в сети Интернет	есть	есть
19	Предоставление данных в Мировой центр базы данных	есть	есть
20	Предоставление данных в Росгидромет	есть	есть

Идея Software Defined Radio (SDR) развивается в течение нескольких последних лет. Примером реализации данного подхода могут служить открытые проекты: GNU Radio (<http://gnuradio.org>) и High Performance Software Defined Radio (<http://hpsdr.org>). Аналогичная идея активно эксплуатируется разработчиками систем сотовой связи и систем специального назначения («Cognitive Radio»). Однако, научные применения таких систем пока немногочисленны, и для зондирования ионосферы Земли широко они пока еще не применяются.

Сетевой ионозонд «ТОМИОН» выполнен по стандартной схеме, характерной для многих известных ионозондов. Отличительной чертой этого ионозонда является цифровое представление излучаемых и принимаемых ВЧ-сигналов. Все цифровые блоки (ЦАП и АЦП) ионозонда выполнены в виде PCI плат. Управление ионозондом осуществляется управляющим персональным компьютером. Структурная

структурная диаграмма ионозонда «ТОМИОН» представлена на рисунке 1. Ионизационный канал ионозонда «ТОМИОН» выполнен по стандартной схеме, характерной для многих известных ионозондов. Отличительной чертой этого ионозонда является цифровое представление излучаемых и принимаемых ВЧ-сигналов. Все цифровые блоки (ЦАП и АЦП) ионозонда выполнены в виде PCI плат. Управление ионозондом осуществляется управляющим персональным компьютером. Структурная

схема сетевого ионозонда «ТОМИОН» представлена на рисунке 1. На рисунках 2 и 3 представлены лицевая и задняя стороны ионозонда «ТОМИОН».

Самым главным отличием разработанного сетевого ионозонда «ТОМИОН» от цифрового ионозонда «Dynasonde-21» является два принципиально важных момента.

Первый момент, это замена интерфейса управления и сбора данных USB на интерфейс PCI. Эта замена позволила осуществлять зондирование ионосферы на мощности излучаемого сигнала, превышающего 2 кВт. При использовании цифрового ионозонда «Dyna-sonde-21» на мощности излучаемого сигнала, превышающего 2 кВт, происходят сбои в интерфейсе сбора данных радиозондирования, который реализован на USB.

Второй момент, все функции корреляционного приема и обработки данных осуществляет многоядерный процессор управляющего компьютера, а не стандартные цифровые микросхемы. Это обстоятельство является новым, не имеющего аналогов в мире, и позволяет реализовывать любые схемы радиозондирования путем программирования. При этом нет необходимости что-то менять в технической реализации ионозонда. На сетевом ионозонде «ТОМИОН» можно реализовать любой режим работы всех известных на сегодняшний день ионозондов мира. Для этого достаточно написать соответствующее математическое обеспечение. На ионозонде «ТОМИОН» можно осуществить все режимы работы ионозондов: «Парус», CADI, «Циклон», Digisonde, а также «Dyna-sonde-21» и других.

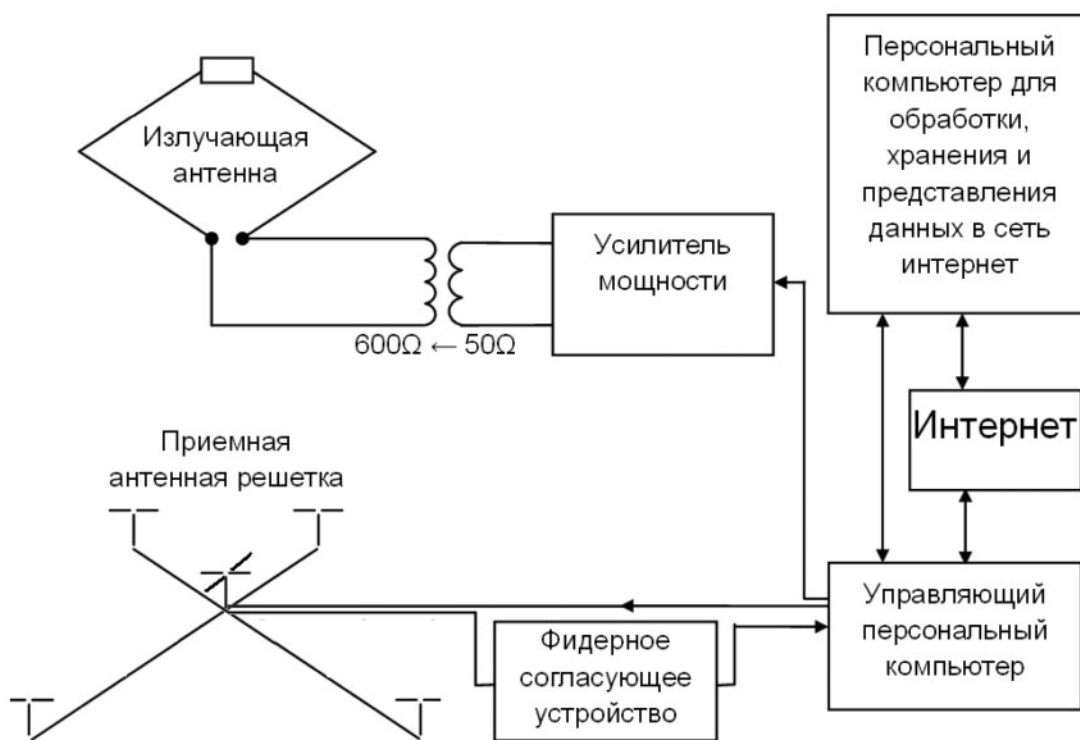


Рис. 1. Структурная схема сетевого ионозонда «ТОМИОН»

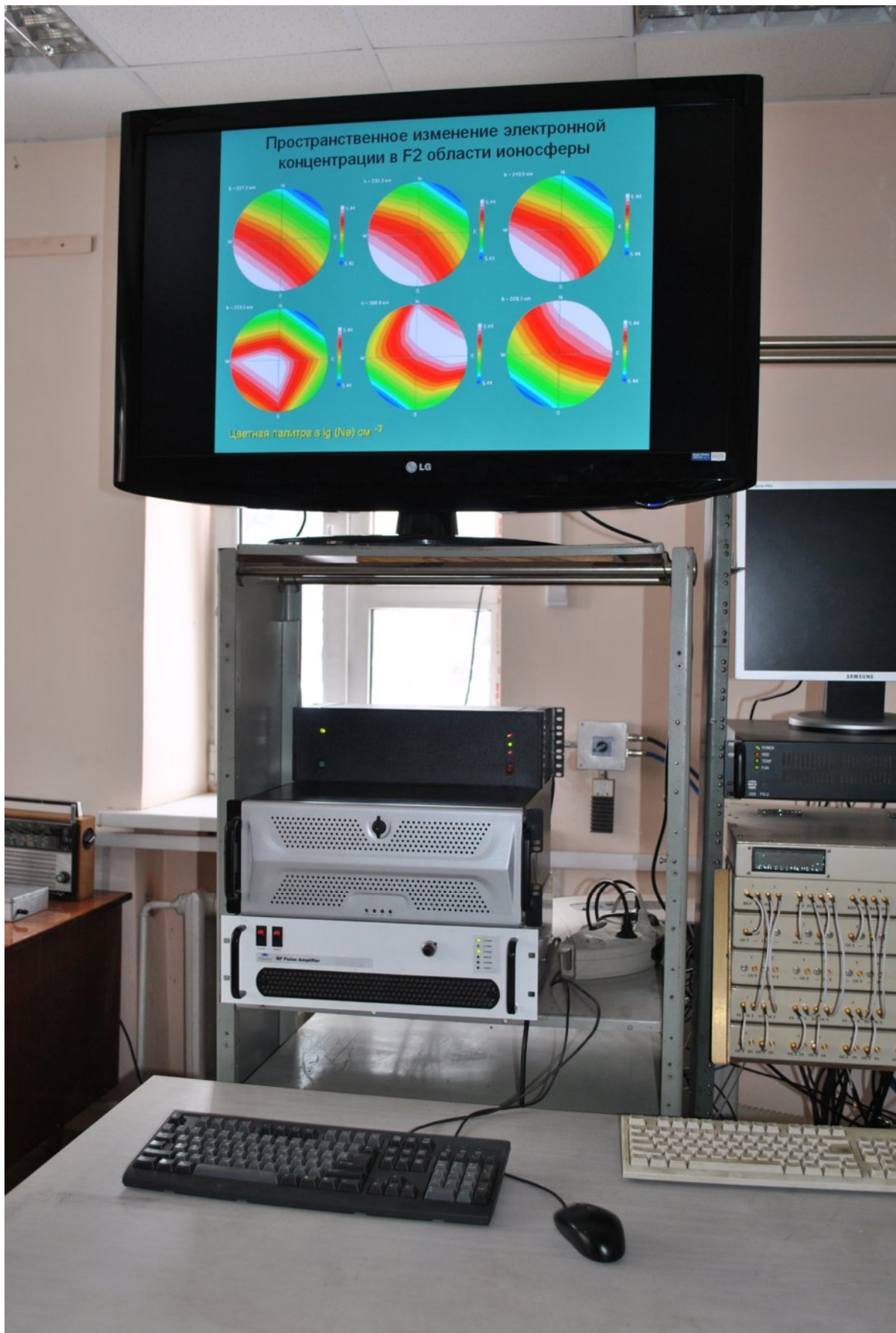


Рис. 2. лицевая сторона ионозонда «ТОМИОН»

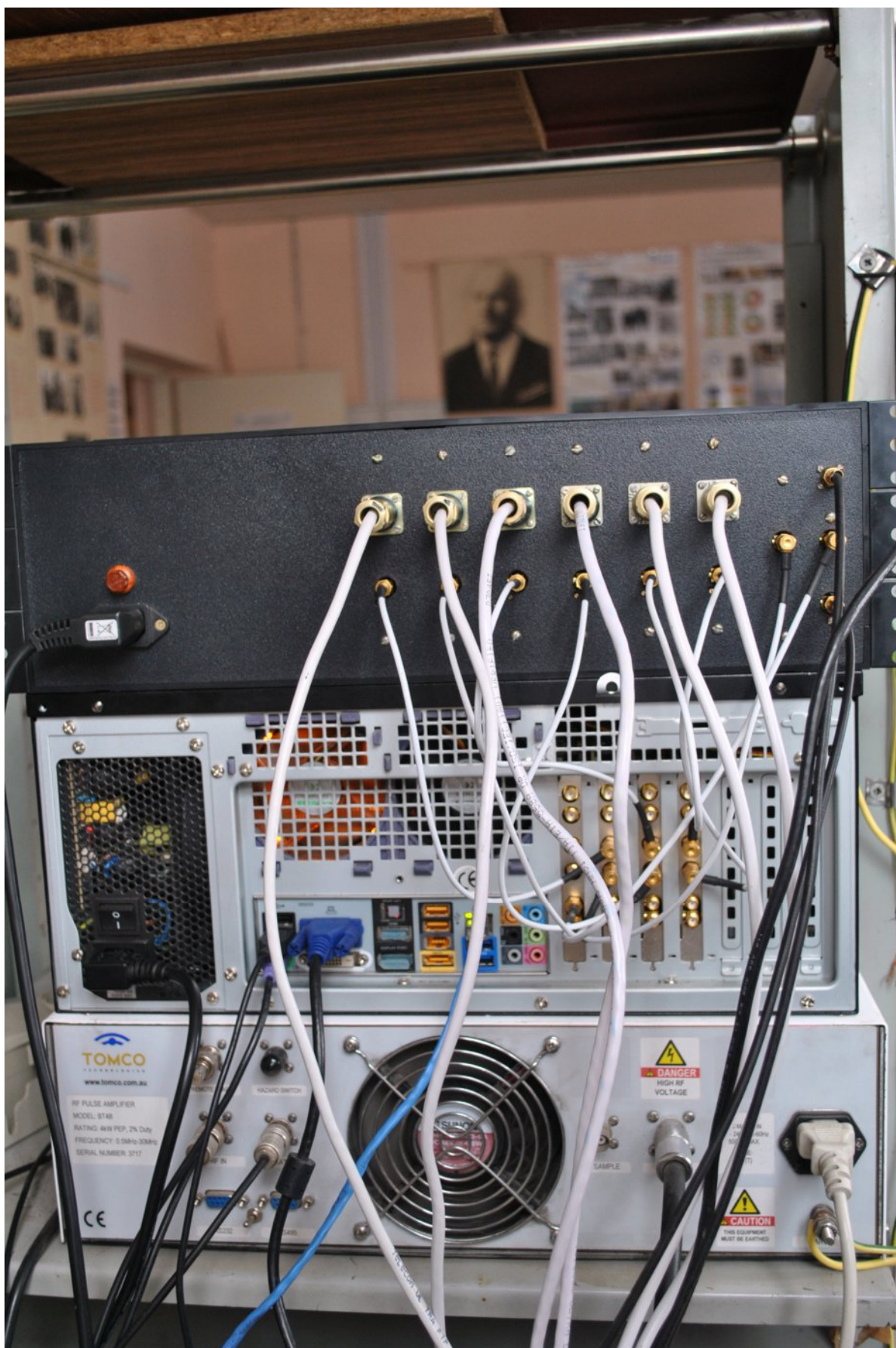


Рис. 3. Задняя сторона ионозонда «ТОМИОН»

При этом в сетевом ионозонде «ТОМИОН» реализованы лучшие моменты, которые используются в ионозонде «Dynasonde-21».

Первый момент, реализована функция калибровки всего антенно-фидерного тракта прямо в режиме радиозондирования. Это обстоятельство позволяет с высокой точностью проводить фазовые измерения и реализовывать принцип стационарной фазы, который позволяет существенно повысить точность по определению дальности отраженного сигнала. Авторы считают, что если в ионозонде нет возможности контроля калибровки антенно-фидерного тракта в режиме радиозондирования, то результатам фазовых измерений можно доверять только косвенно, а метод стационарной фазы реализовать вообще невозможно.

Второй момент, реализовано предварительное усиление сигнала на приемные антенны с целью компенсации потери уровня сигнала при прохождении антенно-фидерного тракта. Это усиление осуществляется с помощью специально разработанных приемных антенных усилителей, способных работать при температуре окружающего воздуха от  $+50^{\circ}\text{C}$  до  $-60^{\circ}\text{C}$ .

Третий момент, весь приемный фидерный тракт выполнен в стандарте витой пары 7E категории, что существенно упрощает и удешевляет в целом всю систему.

## 2. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РАБОТЫ СЕТЕВОГО ИОНОЗОНДА «ТОМИОН» В РЕЖИМЕ ДИНАЗОНДА

Для обеспечения работоспособности системы (проведения зондирования, обработки эхо-сигнала и определения ионосферных параметров) был разработан пакет прикладных программ. Процесс обработки данных радиозондирования ионосферы происходит поэтапно. Вначале производится выбор сценария радиозондирования и задается необходимая форма зондирующего импульса [7]. Далее проводится сеанс зондирования с последующим определением эхо-сигналов. Процесс обработки заключается в вычислении углов наклона электронной концентрации, вычислении скоростей дрейфа электронной плотности, инверсии ионограмм, и визуализации полученных параметров плазмы. Полученные результаты радиозондирования заносятся в локальную базу данных, выборочные параметры отсылаются в Росгидромет и Мировой центр баз данных.

Так как для разных исследований возможны разные варианты зондирования, то пользователь сам в праве выбирать именно те режимы

и ту последовательность операций, которые ему необходимы для поставленной цели. Типовой сеанс радиозондирования на разработанном ионозонде «ТОМИОН» состоит из последовательных восьми этапов.

1) Быстрое зондирование по заранее рассчитанной таблице частот.

2) Предварительная обработка принятых эхо-сигналов для определения количественного распределения всех следов на ионограмме.

3) Дополнительное зондирование для более точного определения местонахождения на ионограмме отсечек отраженных сигналов в  $E$ ,  $E_s$ ,  $F1$  и  $F2$  областях ионосферы.

4) Анализ местонахождения на ионограмме отсечек отраженного сигнала в  $E$ ,  $E_s$ ,  $F1$  и  $F2$  областях ионосферы. Точное местонахождение отсечек отраженного сигнала в основных областях ионосферы необходимо для точного воспроизведения высоты в максимуме электронной концентрации каждой области ионосферы.

5) Дополнительное зондирование для более точного определения мелкокомасштабных неоднородностей в ионосфере на интересующих пользователя частотах, полученных в результате предварительной обработки принятых эхо-сигналов.

6) Полная обработка и анализ полученной трехмерной ионограммы.

7) Инверсия ионограммы – восстановление высотного профиля электронной концентрации в ионосфере.

8) Запись данных зондирования в базу данных.

Все численные операции предварительной обработки принятых эхо-сигналов и анализа местонахождения на ионограмме отсечек отраженного сигнала в  $E$ ,  $E_s$ ,  $F1$  и  $F2$  областях ионосферы происходят практически в реальном времени. А полная обработка и анализ полученной трехмерной ионограммы осуществляется позже зондирования и занимает несколько секунд.

Все перечисленные восемь этапов радиозондирования изначально заложены в разработанное математическое обеспечение. Пользователь ионозонда «ТОМИОН» может поменять стандартную схему зондирования (удалить описанные или добавить другие этапы зондирования). Есть возможность сохранения выбранного сценария радиозондирования, а также загрузки ранее сохраненных сценариев. По сформированному сценарию в дальнейшем будет осуществляться весь сеанс радиозондирования.

Методика выделения эхо-сигналов заключается в применении корреляционного приема, с использованием излученного сигнала. Далее происходит разделение на обыкновенную и необыкновенную компоненты. Если у эхо-сигнала  $\Delta\varphi > 0$ , то это необыкновенная мода, а если  $\Delta\varphi < 0$ , то это обыкновенная мода (обычно значения  $\Delta\varphi$  близки к  $90^\circ$  и  $-90^\circ$  соответственно). В результате получаются ионограммы с разделенными компонентами. Все последующие функции выполняются раздельно для  $I$  и  $Q$  компонент. В этих функциях используются различные критерии выделения сигнала на фоне эфирного шума. Критерием выделения эхо-сигналов является; превышение амплитуды сигнала выше рассчитанного динамического порога, соответствие по углам прихода и по доплеровскому смещению эхо-сигналов. Все эти критерии позволяют однозначно выделять эхо-сигналы на фоне шума.

Пример очищенной от шума ионограммы с разделенными модами представлен на рисунке 4 (красный цвет – обыкновенная мода, зеленый – необыкновенная, по оси абсцисс – частота в МГц, по оси ординат – действующая высота в км).

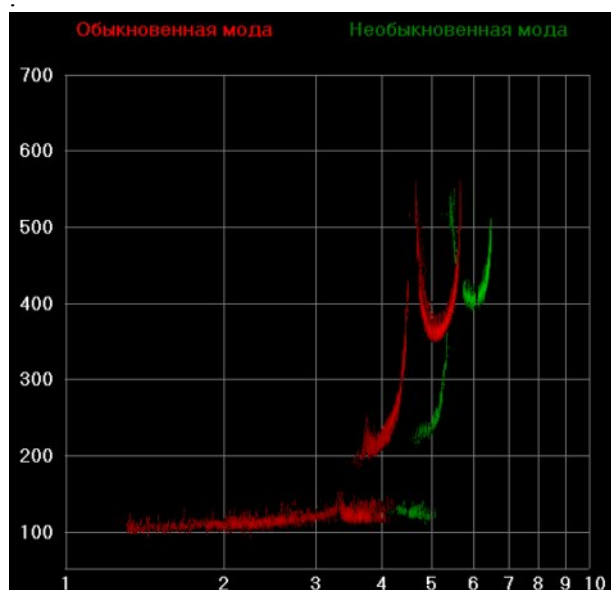


Рис. 4. Пример очищенной от шума ионограммы

Дополнительное зондирование позволяет более точно определить местонахождения на ионограмме отсечек отраженных сигналов в  $E$ ,  $E_s$ ,  $F1$  и  $F2$  и оценить пространственные характеристики и структуру мелкомасштабных неоднородностей в ионосфере. Это зондирование происходит на частотах, полученных в резуль-

тате предварительной обработки принятых эхо-сигналов.

Применение фазовых измерений также существенно расширяет возможности системы. В частности можно определять углы наклона электронной концентрации над областью зондирования [8]. Углы наклона электронной плотности определяются в зависимости от действующей высоты.

Для вычисления истинной высоты ионосферных слоев используется метод инверсии ионограмм. Задача инверсии ионограммы – пересчитать действующие значения высот в истинные высоты. Результаты инверсии представлены на рисунке 5. Здесь слева вверху представлены зависимости плазменной частоты для обыкновенной (желтый цвет) и необыкновенной (красный цвет) компонент от действующей высоты и рассчитанный профиль плазменной частоты от истинной высоты (белый цвет). Справа вверху представлены углы наклона электронной концентрации в градусах (направление Север – Юг синим цветом, направление Восток – Запад красным цветом). Также в низу рисунка 5 представлено трехмерное распределение плазменной частоты от высоты в угле раскрытия излучающей антенны. Так как телесный угол раскрытия излучающей антенны составляет  $30^\circ$ , то геометрические размеры определяемых мелкомасштабных неоднородностей зависят от высоты (диаметр высотных разрезов плазменной частоты, представленной на рисунке 5 равен высоте ионосферы). В дополнении к представлению данных, изображенных на рисунке 5, есть возможность просмотра данных радиозондирования на любой высоте в угле раскрытия излучаемой антенны (см. рисунки 6 и 7).

Кроме определения углов наклона электронной плотности для каждой моды эхо-сигнала рассчитываются скорости движения электронной плотности по доплеровскому смещению частоты. В итоге после обработки трехмерной ионограммы появляется возможность построения пространственной структуры ионосферы над измерительным пунктом. В качестве примера на рисунке 8 представлены сезонно-суточные изменения распределение вертикальной компоненты скорости дрейфа ионосферной плазмы в  $F2$  области ионосферы, полученные в 2012 году на Томской ионосферной станции на ионозонде «ТОМИОН».

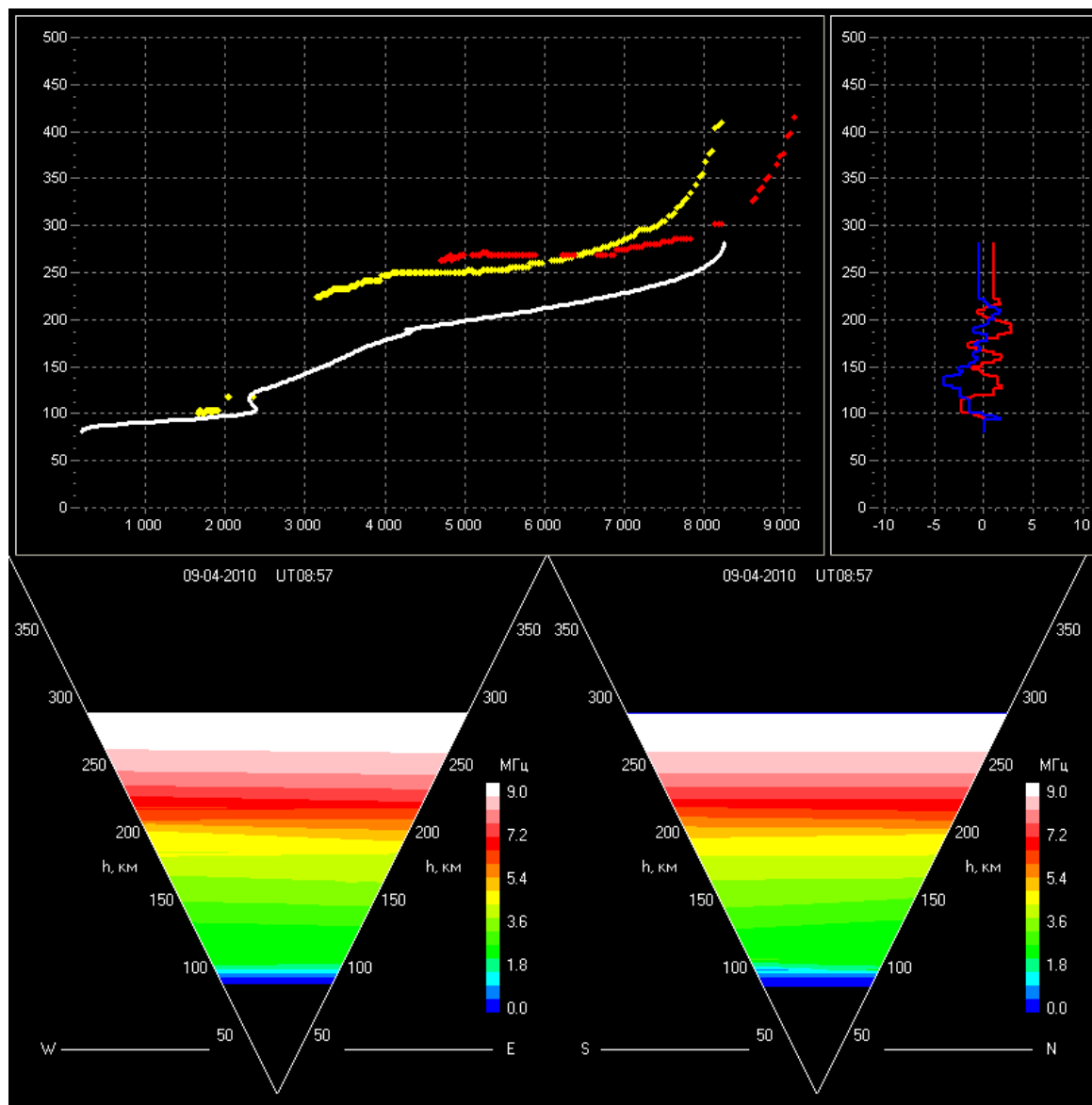


Рис. 5. Пример предоставления данных радиозондирования

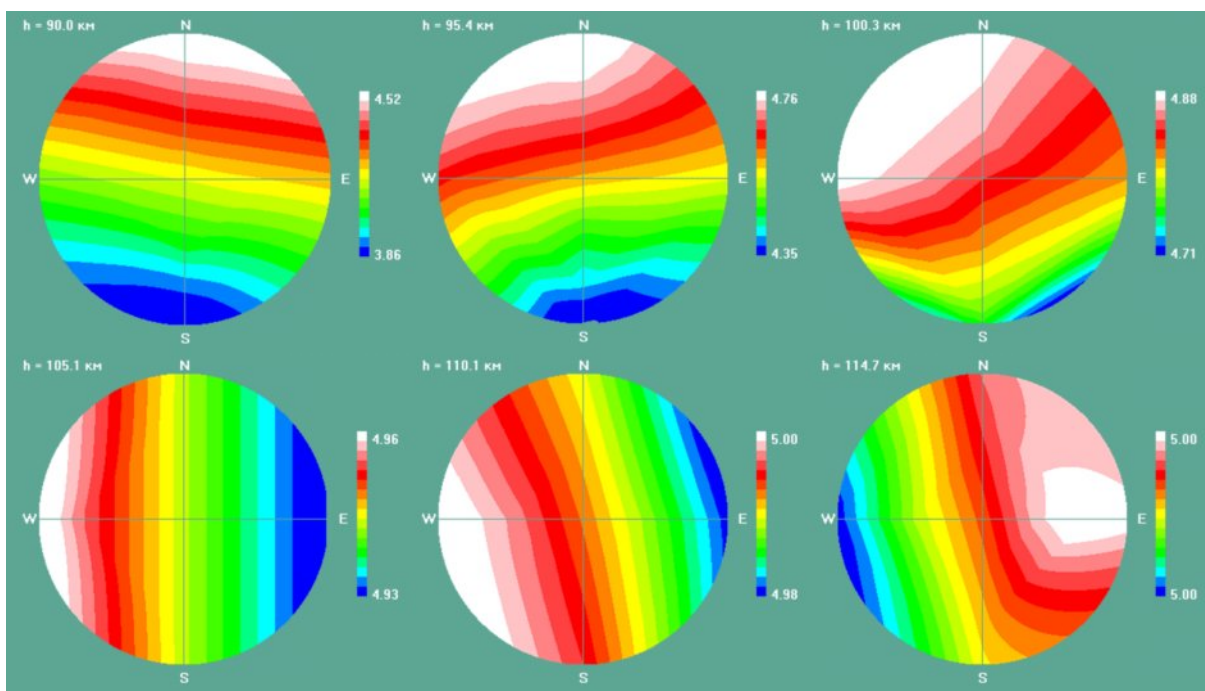


Рис. 6. Пространственное распределение электронной концентрации в E-области ионосферы

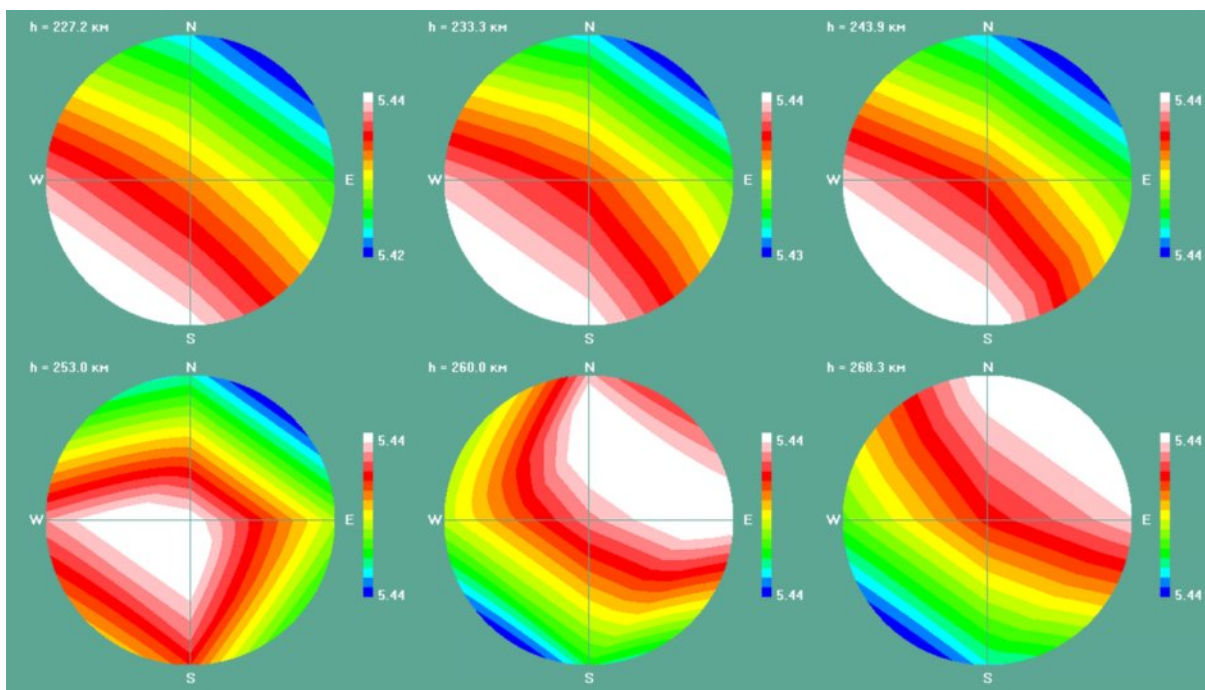


Рис. 7. Пространственное распределение электронной концентрации в E-области ионосферы

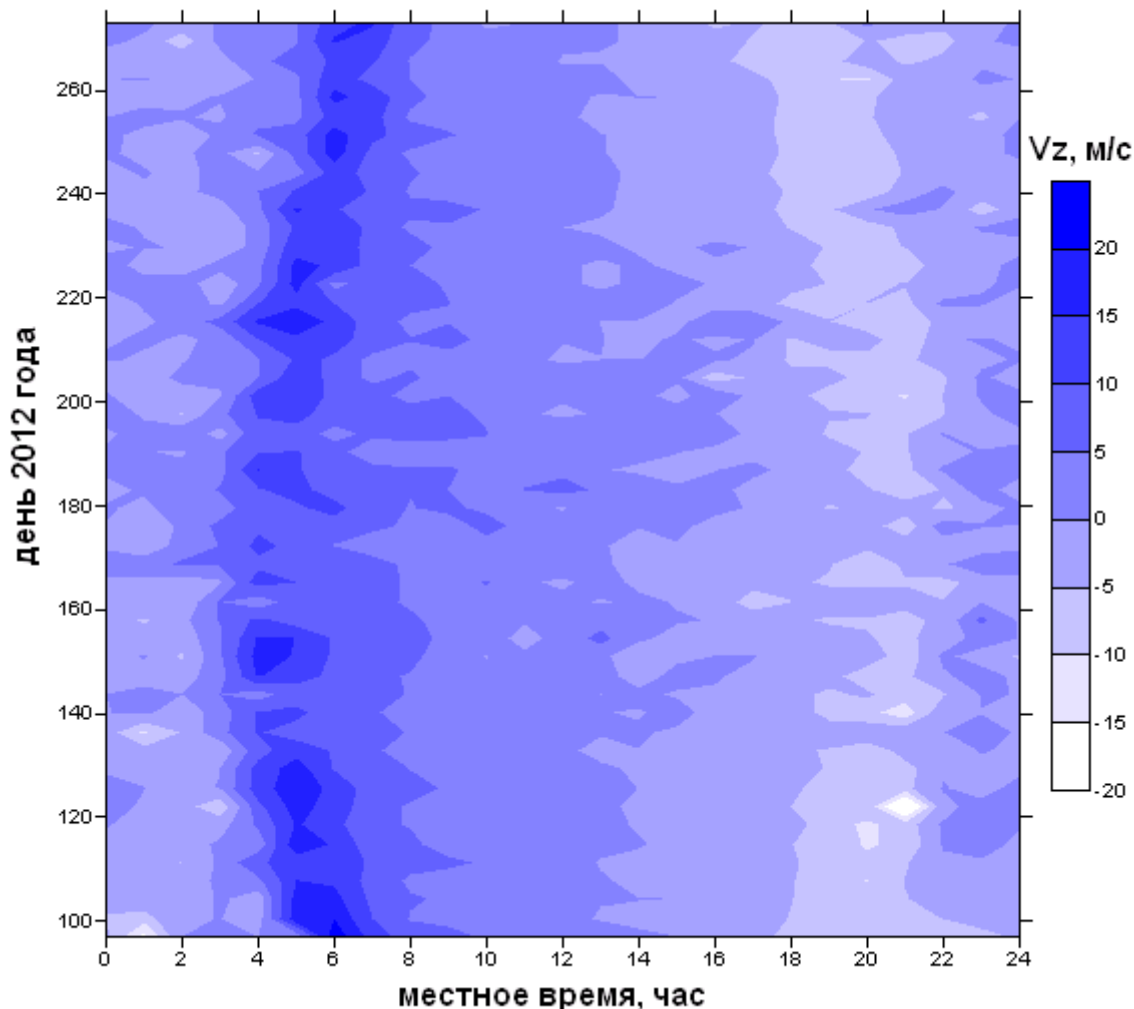


Рис. 8. Сезонно-суточные изменения распределение вертикальной компоненты скорости дрейфа ионосферной плазмы в F2 области ионосферы

На сайте <http://sosrff.tsu.ru> размещены данные ионосферных исследований. На web-сайте каждые 15 минут обновляются ионосферные данные, которые представляются в виде  $f$ - и  $h$ -графиков за последние трое суток. Представление более полной информации, аналогичной в этой работе и доступной пользователю является задачей ближайшей перспективы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описаны новые подходы к развитию и применению методов дистанционного радиозондирования ионосферы на основе мировых технологических достижений последних лет и наиболее передовых методов анализа данных, реализованных на базе Томской ионосферной станции с использованием разработанного отечественного сетевого ионозонда «ТОМИОН».

Использование современных методов радиозондирования ионосферы, основанных на методах Диназонда, которые были обозначены [8, 9] являются наиболее перспективными.

Представлено описание и технические характеристики сетевого ионозонда «ТОМИОН» и дано сравнение с самым лучшим в мире действующим ионозондом «Dynasonde-21». Показаны преимущества сетевого ионозонда «ТОМИОН» по сравнению с ионозондом «Dynasonde-21».

Показано, что на сетевом ионозонде «ТОМИОН» можно реализовать любой режим работы всех известных на сегодняшний день ионозондов мира: «Парус», CADI, «Циклон», Digisonde, а также «Dynasonde-21» и других. Для этого достаточно написать соответствующее математическое обеспечение. Сегодня написано программное обеспечение для ионозонда «Dynasonde-21». Амплитудный метод вертикального радиозондирования ионосферы с

разделение компонент, используемый на ионозондах типа «Парус» («Парус-А») и CADI, входит в состав этого программного обеспечения.

Сетевой ионозонд «ТОМИОН» является исследовательским, и предназначен как для непрерывного мониторинга состояния ионосферы, так и для разработок новых методов диагностики ионосферы.

В 2011 году, после годового периода использования в непрерывном режиме мониторинга ионозонда «ТОМИОН» был разработан новый метод вертикального радиозондирования ионосферы [7], который позволяет проводить пространственную диагностику ионосферной плазмы над пунктом исследований за 1с.

Ионозонд «ТОМИОН» прошел испытания в течении 2-х лет в режиме непрерывного мониторинга с тактом 15-минут на Томской ионосферной станции и может быть использован для системы Росгидромета. Результаты испытаний отражены в отчетах Госконтрактов Минобрнауки РФ № 02.740.11.5203 и № 14.740.11.1086.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Госконтракт № 14.515.11.0032.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Zobotin, N. A., J. W. Wright, and G. A. Zhabankov. // *Radio Sci.*, 41, RS6S32, 2006, doi:10.1029/2005RS003352.
2. Zobotin N.A., J.W. Wright. // Boulder, CO, 2005, 22 pp.
3. Zobotin N.A., J.W. Wright, E.S. Kovalenko. // *Radio Science*, Vol. 39, No. 3, 10.1029/2003RS002953, 2004.
4. N.A. Zobotin, and J. W. Wright. // *Radio Science*, 36, 2001, pp. 757-772.
5. J.W. Wright, and M.L.V. Pitteway. // *J. Atmos. Terr. Phys.*, 56, 1994, pp. 961–977.
6. N.C. Davies // *Proc 8th Int. Conf. on HF Systems and Techniques*, IEE Conf. Publ. 474 (IEE 2000), p. 249-256
7. Колесник А.Г., Колесник С.А., Ковалев А.А. / Секреты производства (ноу-хау). ТГУ, Россия // Приказ о коммерческой тайне на сведения о секретах производства, охраняемых в режиме Ноу-хау. – Приказ № 207 от 06.05.2011 г.
8. Колесник С.А., Колесник А.Г., Ковалев А.А. // Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции «Экологические проблемы. Взгляд в будущее», Ростов-на-Дону, 2010., С. 165-168.
9. Н.А. Заботин, Дж.В. Райт, Г.А. Жбанков, «Современные принципы ионосферного радиозондирования реализованные в Диназоне 21», Труды РРВ-22 (22-26 сентября 2008 г., Ростов-на-Дону - п. Лоо), т. 2, с. 41-44