ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫПУСК 2, 60–71, 2012 ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКАЯ СЛУЖБА

УДК 550.338.2 +550.388.1+550.34.06

ОПЫТ СОЗДАНИЯ РОСГИДРОМЕТОМ СЕТИ РАДИОТОМОГРАФИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРЫ

В.В. Алпатов, В.Е. Куницын, В.Б. Лапшин, А.А. Романов, С.В. Тасенко

Рассмотрен опыт создания сети радиотомографии для исследований и мониторинга ионосферы. Приводятся результаты моделирования сети радиотомографии, разработки опытных образцов сетевых программно-аппаратных комплексов радиотомографии, томографической реконструкции пространственно-временных распределений электронной концентрации ионосферы, полученные по данным первой очереди сети радиотомографии.

Ключевые слова: газовый Ионосфера, радиотомография, сеть радиотомографии, программно-аппратные комплексы

ВВЕДЕНИЕ

Одной из самых актуальных задач создающейся в настоящее время системы мониторинга геофизической обстановки над территорией РФ (СМГФО) является решение задачи выявления неоднородностей (неоднородных геофизических структур) различного происхождения в верхней атмосфере, ионосфере, околоземном космическом пространстве (ОКП).

Это связано с тем, что большинство естественных и техногенных факторов (в том числе и опасных), подлежащих мониторингу, проявляются в возмущениях регулярной структуры геофизических сред и, следовательно, могут быть обнаружены и идентифицированы в процессе мониторинга неоднородных геофизических структур.

Особенный интерес представляет мониторинг неоднородной структуры ионосферы, так как оперативный учет ионосферных возмущений различного происхождения позволил бы существенно повысить эффективность решения таких задач, как обеспечение высокоточной спутниковой навигации с помощью одночастотной аппаратуры в стандартном и дифференциальном режиме, расчет трасс распространения сигналов при коротковолновой связи, контроль качества спутниковых радиоканалов связи, действия учет факторов космического пространства на КА и т.д.

В настоящее время имеются большие возможности использования для мониторинга ионосферы данных, получаемых при помощи приемников сигналов глобальных навигационных систем ГЛОНАСС, GPS, а в дальнейшем и GALILEO.

Одними из самых перспективных методов достижения заданных целей являются методы радиотомографии, использующие сигналы глобальных навигационных систем.

В связи с этим в ФГБУ «ИПГ» в рамках выполнения одного из мероприятий ФЦП была поставлена задача по разработке концепции сети радиотомографии ионосферы в составе системы мониторинга геофизической обстановки над территорией РФ. На основе разработанной концепции были проведены работы по созданию методов, технических средств, алгоритмов, программного обеспечения, информационных технологий для такой сети. В данной статье кратко отражены некоторые результаты создания радиотомографии (радиотомографической сети -PTC).

ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СЕТИ РАДИОТОМОГРАФИИ

Существенными предпосылками постановки задачи по созданию сети радиотомографии для мониторинга ионосферы послужили следующие:

- большая территория РФ, существование значительных регионов с крайне низкой

плотностью населенных пунктов и неразвитостью технической инфраструктуры, что существенно затрудняет использование традиционных средств мониторинга ионосферы, например, ионозондов вертикального зондирования;

- технически труднореализуемо и экономически неэффективно решить все необходимые задачи мониторинга ионосферы путем количественного наращивания числа наблюдательных станций в сети ионозондов, даже при развертывании группировки космических ионозондов;
- существование группировок спутниковых навигационных систем GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, а также низкоорбитальных навигационных систем типа «Парус», «Цикада», «Транзит», сигналы которых могут использоваться в качестве зондирующих сигналов, несущих информацию о структуре удаленных от точки наблюдения объектов;
- конфигурация спутников этих навигационных систем и большое количество наземных приемников, которые могут быть размещены практически в любой точке поверхности Земли, позволяют контролировать состояние ионосферы в определенных регионах в одно и то же время суток, на территории, размером не менее 2000х2000 км², в труднодоступных районах, удаленных от пункта наблюдения на расстояния свыше 1000 км;
- в настоящее время мировой тенденцией является создание систем четырехмерного отображения ионосферы (4D-отображение), означающее возможность для потребителя получать информацию о трехмерной структуре ионосферы в реальном или квазиреальном времени. Это означает, что достаточно полной характеристикой состояния глобальной ионосферы мог бы служить некоторый функционал Ф, описывающий распределение концентрации заряженных частиц в четырехмерном пространстве: время t и координаты точки (х, у, z). Получение такого функционала Ф быть достигнуто может комплексным радиозондированием ионосферы аппаратурой наземного и космического базирования и математическим моделированием основных характеристик состояния ионосферы в реальном времени:
- радиотомографические методы без существенных финансовых затрат (не считая стоимости спутников, которые разрабатыва-

лись для других целей) позволяют решать целый ряд научных и прикладных задач;

- возможно эффективное комплексирование радиотомографических и других методов, использующих прием и обработку сигналов спутниковых навигационных систем, вследствие того, что аппаратура наблюдательных пунктов во всех случаях будет одинаковой и может быть параллельно использована в различных методах и алгоритмах;
- в мире действуют несколько цепочек низкоорбитальной радиотомографии, осуществляющих, в основном, исследовательские функции;
- в России имеются значительные научнометодические разработки на мировом уровне в области радиотомографии ионосферы. Они выполнены на Физическом факультете МГУ (В.Е. Куницын), в Полярном геофизическом институте РАН (Е.Д.Терещенко).

Таким образом, решение о разработке сети радиотомографии ионосферы принималось исходя из:

- практической необходимости в создании новых инструментов мониторинга ионосферы;
- принципиальной возможности создать новые средства мониторинга ионосферы на базе перспективных методов радиотомографии, использующих сигналы спутниковых глобальных навигационных систем;

успешных теоретических и экспериментальных результатов отечественных ученых в области радиотомографии ионосферы.

СЕТЬ РАДИОТОМОГРАФИИ ИОНОСФЕРЫ РОСГИДРОМЕТА

Основные понятия и определения

Под «радиотомографической сетью» понимается совокупность стационарных и подвижных пунктов наблюдений (приемных пунктов) сигналов спутниковых навигационных систем обоих (низко- и высокоорбитальных) видов, а также совокупность центров обработки поступающей с пунктов наблюдений информации, на которых используются методы и алгоритмы радиотомографии для получения требуемых характеристик ионосферы. Элементы сети, осуществляющие прием сигналов низкоорбитальных навигационных КА будем условно называть «радиотомографическими цепочками».

Сеть радиотомографии ионосферы, которая должна входить в наземно-спутниковую подсистем мониторинга ионосферы основана на

приеме и обработке информации двух типов спутниковых навигационных систем: низкоорбитальных навигационных космических аппаратов (ННКА) и высокоорбитальных навигационных космических аппаратов (ВНКА). Схемы приема сигналов низкоорбитальных и высокоорбитальных навигационных систем представлены на рис.1 и 2.

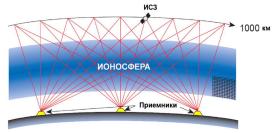


Рис.1. Схема низкоорбитальной радиотомографии (HOPT)

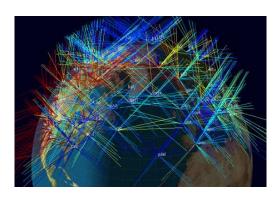


Рис.2. Схема высокоорбитальной радиотомографии (BOPT). Разноцветными линиями показаны лучи спутник-приемник.

Основным принципом радиотомографии ионосферы с помощью низкоорбитальных навигационных систем (ННС) является одновременный прием когерентных сигналов от одного ИСЗ сетью приемных установок. Для этих целей традиционно применяются аппараты типа «Транзит» (США) и их российский аналог «Космос».

Характерными чертами космических аппаратов этих систем является наличие радиомаяков когерентных сигналов с частотами 150 и 400 МГц и приполярные орбиты высотой около 1000 км. В классическом случае радиотомография ионосферы на основе сигналов ННС позволяет получать двумерные сечения или «разрезы» распределения электронной концентрации в ионосфере [1, 2]. Протяженность этих сечений составляет сотни и тысячи километров (зависит от длины цепочки приемных установок), а высота определяется высотой орбиты ННКА и составляет около 1000 км (рисунок 1).

Прием сигналов космических аппаратов осуществляется на сети приемных установок, располагаемых вдоль преимущественных направлений пролета спутника.

Показанные на рисунке 1 «приемники» являются пунктами наблюдений (элементами) радиотомографической сети. После получения информации от приемников (элементов сети) и обработки ее в центрах обработки с использованием радиотомографических методов и алгоритмов получается пространственное (в данном случае двумерное) распределение электронной концентрации в той области ионосферы, в которой имеется достаточное число лучей пересекающих ее зондирующими сигналами спутниковых навигационных систем (на рисунке обозначены красным цветом).

Основным принципом радиотомографии ионосферы с помощью высокоорбитальных навигационных систем является одновременный прием когерентных сигналов минимум на двух частотах от нескольких высокоорбитальных навигационных космических аппаратов (ВНКА) сетью приемных установок. Для этих целей могут применяться аппараты системы GPS (США), ГЛОНАСС (Россия), GALILEO (EC) и другие [1 - 7]. Характерными чертами космических аппаратов этих систем является наличие радиомаяков когерентных сигналов с частотами 1575,42, 1227,60, 1176,45 МГц для системы GPS и частотами 1602+k*9/16, 1246+k*7/16 МГц для системы ГЛОНАСС при высоте орбиты около 20000 км. В классическом случае радиотомография ионосферы на основе сигналов ВНКА позволяет получать трехмерные (3D) распределения электронной концентрации в ионосфере [1,2]. Прием сигналов космических аппаратов осуществляется на сети приемных установок, располагаемых в соответствии с выбранной стратегией получения трехмерной реконструкции электронной концентрации в ионосфере. Схема расположения приемных установок с лучами зондирующих сигналов от ВНКА показана на рисунке 2. Показанные на рисунке «приемники» являются пунктами наблюдений радиотомографической (элементами) После получения информации от приемников (элементов сети) и обработки ее в центрах обработки с использованием радиотомографических методов и алгоритмов получается пространственное (в данном случае трехмерное) распределение электронной концентрации в той

области ионосферы, в которой имеется достаточное число лучей пересекающих ее зондирующими сигналами спутниковых навигационных систем (достаточно «густое» пространственное покрытие).

Решаемые задачи при создании сети

В процессе создания сети радиотомографии был решен ряд задач.

Выполнена разработка системных решений:

- разработка требований к радиотомографической сети
- разработка концепции радиотомографической сети
- разработка технических предложений по созданию радиотомографической сети
- разработка технического задания на создание сети радиотомографических наблюдений ионосферы с использованием сигналов навигационных систем.

Разработаны опытные образцы

- -сетевого приемника бортовых радиопередатчиков для низкоорбитальной радиотомографии
- сетевого программно- аппаратного комплекса восстановления томографических разрезов (2D)
- сетевого программно-аппаратного комплекса восстановления трехмерного (3D) распределения электронной концентрации.

Разработаны информационные технологии для работы радиотомографического сегмента

Разработаны экспериментальные методики для работы радиотомографического сегмента

Проведены эксперименты по томографиической реконструкции ионосферы с использованием разработанных методов, аппаратуры, информационных технологий.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СЕТИ

Для оптимизации размещения приемных пунктов сети было проведено моделирование восстановления ионосферных неоднородностей различного масштаба с использованием разного количества пунктов и вариантов конфигураций сети. Моделировались схемы НОРТ и ВОРТ.

На рисунке 3 приведен пример модельной реконструкции НОРТ для различного числа приемников по трассе пролета низкоорбитального спутника.

Из рисунка 3 видно, что возможность реконструкции неоднородностей существенно

увеличивается при использовании семи приемников вместо четырех. Кроме того, были проведены расчеты, показывающие, как надо размещать приемники вдоль траектории пролета спутников, чтобы наилучшим образом реконструировать ионосферные неоднородности различного типа.

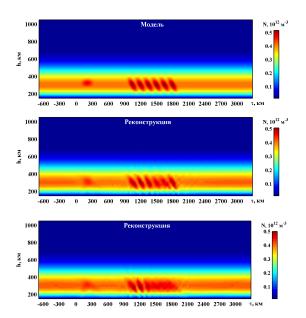


Рис. 3. Пример реконструкции ионосферы с помощью HOPTA) модель, содержащая 7 неоднородностей; Б) реконструкция по данным семи приемников; В) реконструкция по данным четырех приемников.

Такое же моделирование было проведено для ВОРТ. На рисунке 4 приведены несколько примеров результатов моделирования.

Из рис. 4 видно, что даже развертывание сети, состоящей из 100 приемников высокоорбитальных навигационных систем, позволяет реконструировать основные неоднородности модели. Использование 700 приемников позволяет улучшить реконструкцию их амплитуд и местоположения.

По результатам моделирования был сделан ряд практических выводов, например:

- оптимальным представляется построение цепочки из 3-х или более томографических приемников на расстоянии 250 300 км между ними;
- расположение цепочки приемников для НОРТ зависит от наклонения действующих низкоорбитальных навигационных спутников. Для проведения томографических реконструкций предпочтительно, чтобы цепочки

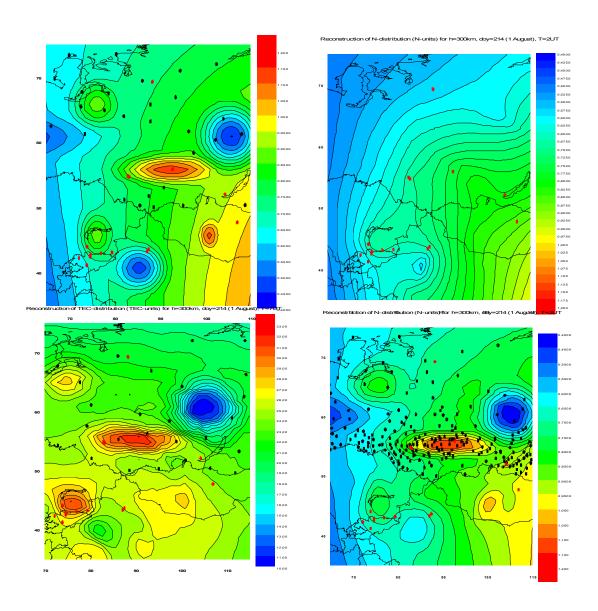


Рис. 4. Пример реконструкции ионосферы с помощью ВОРТ:

А) Модельное распределение электронной концентрации на высоте 300 км над Россией. Б) Реконструкция с использованием существующей сети приемников IGS (красные точки), В) Реконструкция с дополнительным использованием 100 приемников, которые могут быть расположены на постах WMO (черные точки), Г) Реконструкция с использованием существующей сети приемников IGS и дополнительным использованием 700 приемников.

приемников и траектория пролета спутника лежали практически в одной плоскости;

- целесообразно использование спутников с полярными орбитами;
- расстояния между цепочками приемников должны быть в пределах 1000-2000 км;
- наращивание линеек приемников НОРТ может проводиться поэтапно с учетом следующих факторов:

возможность наблюдения интересных с геофизической точки зрения ионосферных структур;

возможность сравнения полученных результатов с данными независимых наблююдений:

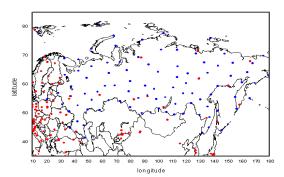
- оптимальной представляется установка приемников на существующих метеопостах Росгидромета и использование существующих и перспективных пунктов РАН, а также других организаций и ведомств на условиях аренды или договоров сотрудничества;
- развертывание сети пунктов BOPT может осуществляться поэтапно, при этом:

для обеспечения непрерывного мониторинга ионосферы и получения распределений электронной концентрации с временем получения реконструкции не более суток и с пространственным разрешением не хуже 40 на территории России необходимо разместить не менее 100 приемников;

для обеспечения непрерывного мониторинга ионосферы и получения распределений электронной концентрации с пространственным разрешением не хуже 30 на территории России необходимо разместить не менее 300 приемников, работающих с тремя высокоорбитальными навигационными системами (GPS, ГЛОНАСС и Galileo);

для обеспечения непрерывного мониторинга ионосферы и получения распределений электронной концентрации с пространственным разрешением не хуже 20 на территории России необходимо разместить не менее 700 приемников, работающих с тремя высокоорбитальными навигационными системами (GPS, ГЛОНАСС и Galileo).

На рисунке 5 приведена схема первоначально планируемого размещения цепочек HOPT (сверху) и BOPT (снизу).



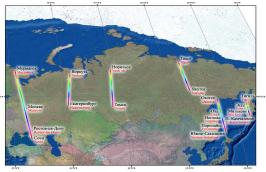


Рис. 5. Схема планируемого размещения цепочек HOPT (сверху) и сети BOPT (снизу).

АППАРАТУРНЫЕ, ПРОГРАММНЫЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Для практического развертывания сети созданы сетевые приемники, программно-аппаратные комплексы и информационные технологии радиотомографической реконструкции. На рисунках 6а-6г представлены некоторые из разработок.

Аппаратурно-программные разработки были дополнены комплексом методических разработок, без которых радиотомографическая сеть в составе Росгидромета функционировать не может.

Разработаны 3 первоочередных методики и 3 инструкции.

Развертывание первой очереди сети радиотомографии

Весь проведенный комплекс работ позволил в 2011 году провести мероприятия по развертыванию первой очереди сети радиотомографии.

Развертывание сети включало в себя предварительное обследование предполагаемых пунктах размещения ПАК радиотомографии на предмет соответствия требуемым техническим условиям, оснащение выбранных пунктов

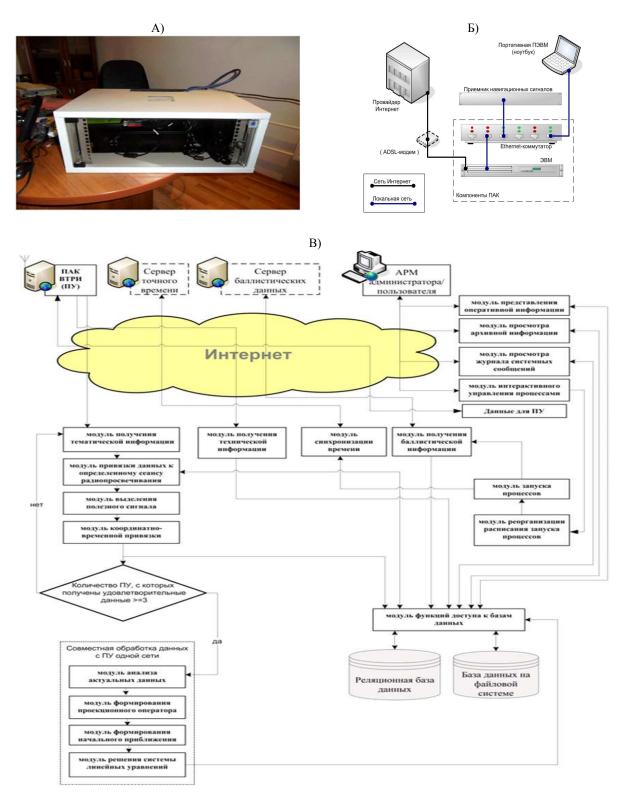


Рис. 6. А-В Примеры аппаратурно-программных разработок для сети радиотомографии. А) вид сетевого программно-аппаратного комплекса (ПАК) радиотомографии; Б) схема сетевых соединений ПАК НОРТ; В) функциональная схема информационной системы сбора, передачи, архивирования сигналов навигационных систем

 Γ)

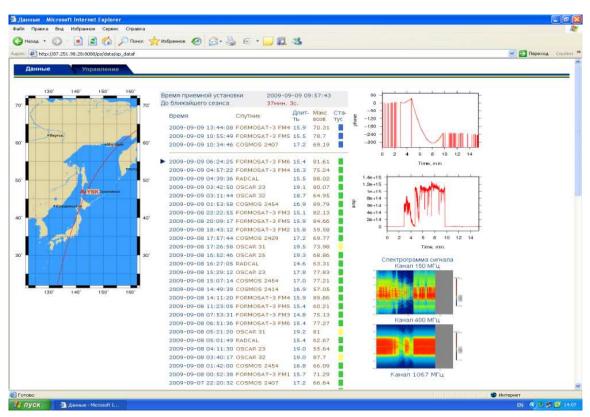


Рис. 6 Г. Главная страница Web-интерфейса сетевого ПАК НОРТ

комплексами, обучение персонала, пробную . эксплуатацию. На рисунке 7 показано размещение ПАК первой очереди.

Места расположения ПАК радиотомографии первой очереди выбирались исходя из научно-технических, организационных и финансовых критериев. Так, в частности, цепочка ПАК НОРТ близка к имеющейся в настоящее время исследовательской цепочке позволяет МГУ-ПГИ, что проводить сравнение результатов, полученных использованием приемников различающихся типов, разных алгоритмов, программ и информационных технологий. Группирование ПАК ВОРТ вокруг цепочки ПАК НОРТ позволяет проводить взаимную проверку и результатов, полученных калибровку использованием сигналов различных спутниковых навигационных систем, разнотипной аппаратуры и алгоритмов, разработанных для реконструкции как двумерных, так трехмерных распределений электронной концентрации ионосферы.

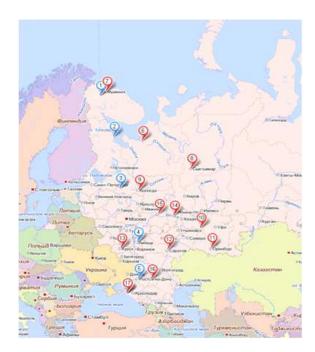


Рис. 7. Размещение ПАК первой очереди сети радиотомографии. Синими кружками обозначен места установки ПАК НОРТ, красными- места установки ПАК ВОРТ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЕРВОЙ ОЧЕРЕДИ СЕТИ РАДИОТОМОГРАФИИ

При помощи ПАК НОРТ и ВОРТ первой очереди сети радиотомографии был получен ряд результатов по томографической реконструкции двух- и трехмерных распределений электронной концентрации в ионосфере в различное время суток для зимнего периода.

На рис.8 приведен пример реконструкции двумерного распределения электронной концентрации для 30 ноября 2011 года, 9:39 UT. Реконструкция показана в составе интерфейса сервера НОРТ. Там же приведена карта, на которой обозначены пункты цепочки ПАК НОРТ, в которых принимались сигналы навигационного спутника для реконструкции и траектория навигационного спутника.

На рис.9 приведен пример трехмерной реконструкции электронной концентрации в

ионосфере с использованием данных сети ПАК ВОРТ — 12 станций первой очереди и 30 европейских станций IGS для «сшивки ионосферы» над территорией РФ и Европы. Сверху (9а) приведены результаты реконструкции в виде полного электронного содержания (ПЭС), снизу (9б) — один из широтных разрезов (зависимость электронной концентрации от высоты и широты) реконструированного трехмерного распределения электронной концентрации.

Для оценки точности получаемых с помощью радиотомографии (РТ) значений электронной концентрации были использованы измерения критической частоты слоя F2, полученных помощью c вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы в обсерваториях Лопарская ММ168 (цифровой ионосферный комплекс «Базис», 33.2 в.д., 68.6, с.ш.) и ИЗМИРАН MO155 (цифровой ионозонд «Парус» 55.5 с.ш., 37.3 в.д.)..

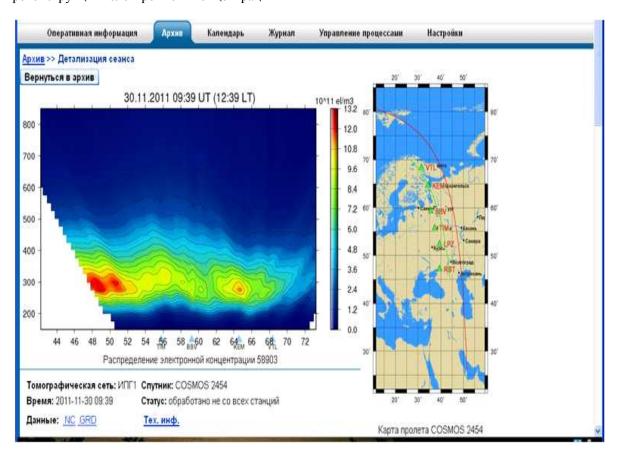


Рис. 8. Пример двумерной реконструкции развернутой цепочкой НОРТ

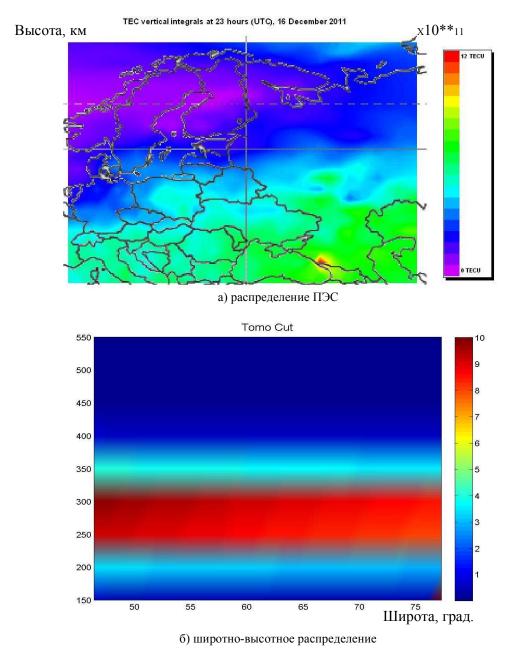


Рис. 9. Пример трехмерной реконструкции развернутой первой очередью сети радиотомографии

Для сопоставления из обработанных томограммы данных выбирались относительной ошибкой реконструкции 12 менее 0.3, зарегистрированные в пределах 5 минут от измерения ионозонда. Далее в распределении электронной концентрации выделялся столбец, максимально близко по широте расположенный к станции вертикального зондирования. Из этого столбца выбиралось максимальное значение, которое должно отражать электронную концентрацию слоя F2. Значение переводилось в термины критической частоты. Результаты сопоставления приведены на рис. 10.

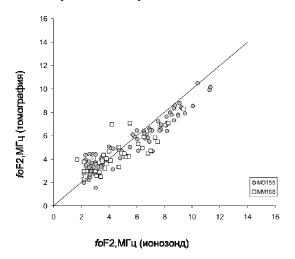


Рис. 10. Сопоставление foF2 ионосферы полученных с помощью томографии с данными вертикального зондирования на станциях MO155 и MM168

Из представленного рисунка онжом сделать следующие выводы. В целом соответствие наблюдается хорошее измерений с помощью сети радиотомографии и станций вертикального зондирования ионосферы. В области небольших частот характеризуются большими томограммы значениями, чем измерения ВЗ, а при значениях выше 5-6 МГц, значения, полученные из томограмм на 0.5-1.5 МГц ниже. Эта наблюдение справедливо как для станции МО155, расположенной в умеренных широтах, так и для ММ168, находящейся в зоне авроральной ионосферы.

Среднее от значений невязок по модулю для MO155 составляет 0.77, дисперсия: 0.3.

Для расположенной на Кольском полуострове станции ММ168 эти значение

несколько выше — среднее 0.94, дисперсия 0.49.

Опыт эксплуатации первой очереди сети радиотомографии позволяет сделать вывод о том, что все установленное оборудование и программное обеспечение работают надежно, без сбоев. При наличии в пунктах размещения ПАК НОРТ и ПАК ВОРТ надежного скоростного Интернета возможно получать: распределение двумерное электронной концентрации в ионосфере между Москвой и Ростовом от 4-х до 6-ти раз в сутки; трехмерное распределение электронной концентрации над европейской территорией РФ с разрешением на высоте 300 км порядка 4-50 можно получать примерно раз в 2 часа, определяется временем сбора, что предварительной обработки данных временем работы программ трехмерной реконструкции.

В тоже время выявились серьезные организационные проблемы при развертывании сети, касающиеся внутриведомственных вопросов принятия на баланс устанавливаемого оборудования и оплаты эксплуатационных расходов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что существуют серьезные предпосылки для создания в Росгидромете сети радиотомографии ионосферы, которые привели к организации работ в данном направлении. В результате работ создана концепция радиотомографии, на основе которой были поставлены задачи разработки аппаратуры, алгоритмов, программного и методического обеспечения, информационных технологий для создания сети. Эти задачи успешно решены. C использованием полученных аппаратурнонаучных, методических, программных решений развернута первая очередь сети радиотомографии. Выполнен анализ работы первой очереди сети. Выявлена устойчивая надежная работа как аппаратной части комплексов, так и программного Получены обеспечения. результаты томографической реконструкции электронной концентрации ионосферы при помощи ПАК первой очереди сети радиотомографии. организационно-технические Выявлены внутриведомственные проблемы, которые необходимо решить для развития и нормального функционирования сети радиотомографии.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. Томография ионосферы.- М.: Наука, 1991.
- Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D. //IEEE Antennas & Propagation Magazine.- 1992. -Vol.34. -P.22-32.
- Kunitsyn V.E. and Tereshchenko E.D. Ionospheric Tomography. -New York: Springer-Verlag. 2003.
- 4. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д, Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы.- М.:Наука, 2007.
- 5. Отчет об ОКР "Разработка технологии и создание аппаратно программного

- комплекса для радиотомографических наблюдений ионосферы с использованием сигналов космических навигационных систем в составе системы геофизического мониторинга", Москва, ГУ «ИПГ», 2010 г.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger J., Collins, J. Global Positioning System: Theory and Practice - Springer-Verlag Wien. New York.-1992.
- 7. Яценков, В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. М.: Горячая линия Телеком.- 2005.