

УДК 550.338.2 +550.388.1+550.34.06

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СЕТИ РАДИОТОМОГРАФИИ РОСГИДРОМЕТА

В.В. Алпатов, В.Б. Лапшин, А.Ю. Репин, С.В. Тасенко

Рассмотрены перспективы развития сети радиотомографии Росгидромета для исследований и мониторинга ионосферы.

Ключевые слова: ИОНОСФЕРА, РАДИОТОМОГРАФИЯ, СЕТЬ РАДИОТОМОГРАФИИ, ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ.

ВВЕДЕНИЕ

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» была поставлена задача по разработке и созданию сети радиотомографии ионосферы в составе системы мониторинга геофизической обстановки над территорией РФ. В течение 2008-2010 годов проведены работы по созданию методов, технических средств, алгоритмов, программного обеспечения, информационных технологий для такой сети. В течение 2011 года осуществлялось оснащение оборудованием первой очереди этой сети. В данной статье отражены перспективы развития рассматриваемой сети радиотомографии (радиотомографической сети – РТС).

1. НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СЕТИ РАДИОТОМОГРАФИИ

Направления развития сети радиотомографии определяются задачами, стоящими перед этой сетью.

Для сети радиотомографии конечной задачей является обеспечение мониторинга ионосферы над всей территорией РФ с заданными пространственным и временным разрешением. Из проведенных предварительных исследований требований потребителей следует, что мо-

нитинг ионосферы требует как можно более высокого пространственного разрешения и максимально быстрого времени сбора, обработки, анализа и представления результатов мониторинга потребителям.

Проведенные в рамках проектов ФГБУ «ИПГ» исследования показали, что для удовлетворения требуемых характеристик в подсистеме мониторинга ионосферы требуется очень много приемников сигналов навигационных систем (порядка 500-700 приемников, распределенных по территории РФ).

Особенно важным для потребителей представляется обеспечение при помощи радиотомографической сети и подсистемы мониторинга ионосферы в целом возможности идентификации и прогнозирования ионосферных возмущений различного происхождения, как естественного, так и антропогенного характера. Так, например, в процессе исследований глобального отклика на геомагнитные возмущения и солнечные вспышки по данным международной сети GPS было обнаружено [1], что во время больших магнитных бурь относительная плотность сбоев фазовых измерений в навигационной системе GPS превышает соответствующий показатель для магнитоспокойных дней как минимум на один-два порядка, что может оказаться неприемлемым для решения некоторых важных навигационных задач. Одна из важнейших задач мониторинга ионосферы связана с необходимостью повышения точности и быстродействия систем обнаружения и локализации источников техногенных воздействий (запусков ракет, взрывов, подземных испытаний ядерного оружия). Современные глобальные и региональные системы обнаружения техногенных воздействий в основном используют

различные методы обработки сейсмических и инфразвуковых сигналов, а также радиосигналов КВ диапазона. Недостатком подобных систем является высокая стоимость их создания и обслуживания, недостаточное количество разнесенных систем, неравномерное глобальное распределение и, как следствие, невысокое пространственное разрешение.

Основная цель работ по созданию радиотомографической сети должна состоять в системной интеграции этой сети в эффективную межведомственную систему наблюдений, сбора, обработки и распространения данных о параметрах ионосферы широкому кругу потребителей в различных областях науки, экономики и обороны страны с требуемой достоверностью и пространственно-временным разрешением о реальном состоянии ионосферы.

Таким образом, основные направления развития сети должны быть связаны с решением следующих задач:

- обеспечение мониторинга ионосферы над всей территорией РФ с заданными пространственным и временным разрешением;
- обеспечение возможности идентификации и прогнозирования ионосферных возмущений различного происхождения, как естественного, так и антропогенного характера;
- эффективный сбор, обработка и распространения широкому кругу потребителей информации о реальном состоянии ионосферы;
- системная интеграция сети в эффективную межведомственную систему.

Опыт развертывания первого сегмента сети выявил ряд организационно-технических проблем при создании сети, которые должны быть решены при дальнейшем ее развитии.

Первое из указанных выше направлений развития предусматривает необходимость количественного наращивания сети при решении выявленных организационно-технических проблем. Поэтому в качестве ближайших перспектив должны быть рассмотрены перспективы количественного наращивания сети и решения возникающих при этом научных и организационно-технических проблем.

2. КОЛИЧЕСТВЕННОЕ НАРАЩИВАНИЕ СЕТИ

Ближайшие перспективы развития связаны со следующими основными направлениями:

- наращивание количества цепочек низкоорбитальной радиотомографии (НОРТ) и пунктов высокоорбитальной радиотомографии (ВОРТ);

- тщательная верификация результатов реконструкции пространственного распределения электронной концентрации ионосферы с использованием традиционных средств зондирования ионосферы;

- разработка новых методик верификации результатов реконструкции;

- модернизация программных средств для повышения скорости процесса трехмерной реконструкции;

- решение организационных проблем, связанных с эксплуатацией как установленного оборудования, так и вновь вводимого в эксплуатацию в 2012 г. и в последующие годы.

В 2012 году планировалось дополнить сеть 13-ю ПАК ВОРТ и 5-ю ПАК НОРТ. При этом установка двух ПАК НОРТ в созданную цепочку Мурманск-Ростов позволит получать двумерную реконструкцию электронной концентрации от высоких широт (Мурманск) до Черного моря (Майкоп). Учитывая, что 9 из 13 пунктов ВОРТ планировалось разместить в европейской части территории РФ, вместе с уже имеющимися ПАК ВОРТ, размещенными в 2011 году появится возможность повысить разрешающую способность радиотомографической реконструкции над этой частью территории РФ. Четыре ПАК ВОРТ планируется разместить на Дальнем Востоке, что позволит получать данные хотя бы по ПЭС в этом регионе. А с привлечением данных сети IGS и сети приемников Геофизической службы РАН можно было бы попытаться осуществлять томографическую реконструкцию в этом регионе.

На рисунке 1 приведена схема предполагаемого размещения ПАК НОРТ и ВОРТ в 2012 году.

3. СИСТЕМНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

Кроме ближайших перспектив развития сети, связанных с ее количественным наращиванием, разработчики радиотомографической сети предусматривают стратегические, долговременные перспективы, связанные с развитием сети как подсистемы, входящей в систему мониторинга геофизической обстановки над территорией РФ.

Системные направления развития сети определяются концепцией создания и развития сети радиотомографии, которая была разработана при начале работ по созданию сети.

Основными положениями этой концепции, определяющими перспективы развития сети радиотомографии, являются следующие:

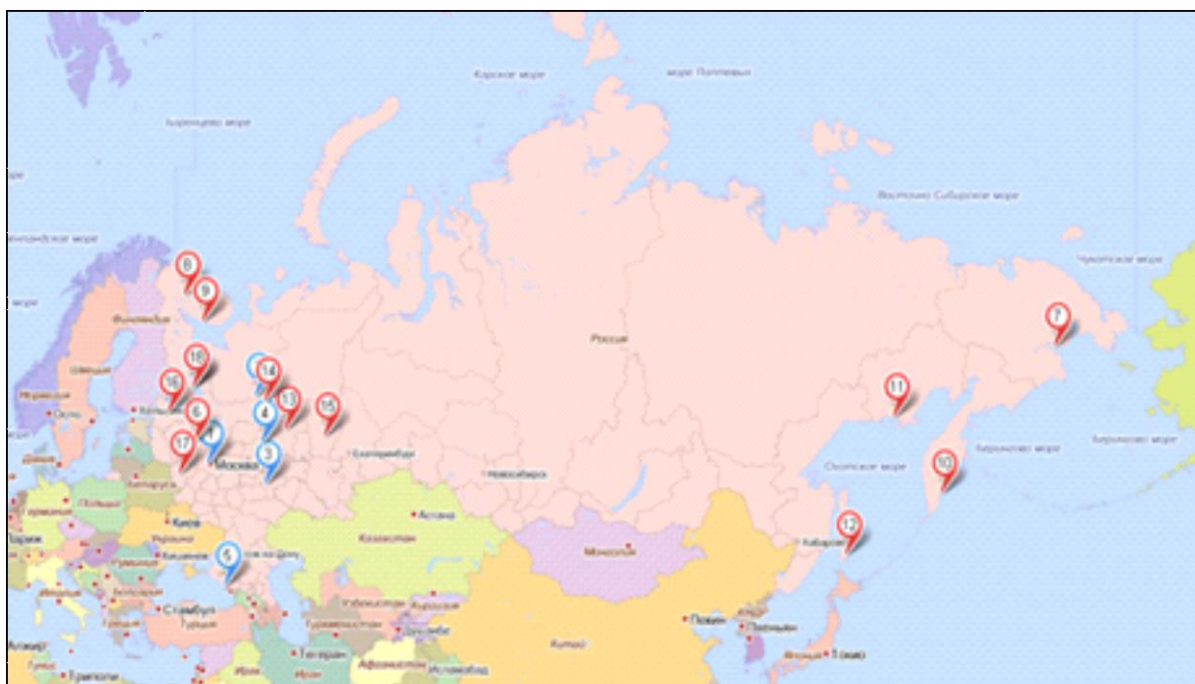


Рис.1. Планируемое размещение ПАК НОРТ (синие кружки) и ВОРТ (красные кружки) Росгидромета в 2012 году.

1. радиотомографическая сеть должна являться частью (подсистемой) подсистемы мониторинга ионосферы, входящей, в свою очередь, в систему мониторинга геофизической обстановки над территорией РФ;
2. необходимо эффективное комплексирование методов и средств, использующих прием и обработку сигналов спутниковых навигационных систем;
3. необходимо создать механизм масштабирования – количественного и качественного наращивания сети без существенной переработки системного программного обеспечения;
4. сеть должна в результате развития превратиться в эффективную межведомственную систему наблюдений, сбора, обработки и распространения данных о параметрах ионосферы.

Все перечисленные выше положения концепции направлены на развитие сети в направлении создания системы четырехмерного отображения ионосферы (4D-отображение). Это означает возможность для потребителя получать информацию о трехмерной структуре ионосферы в реальном или квазиреальном времени. Предполагается, что достаточно полной характеристикой состояния глобальной ионосферы мог бы служить некоторый функционал Φ , описывающий распределение концентрации

заряженных частиц в четырехмерном пространстве: время t и координаты точки (x, y, z) . Получение такого функционала Φ может быть достигнуто комплексным радиозондированием ионосферы аппаратурой наземного и космического базирования и математическим моделированием основных характеристик состояния ионосферы в реальном времени.

В следующих разделах кратко обозначены системные направления развития радиотомографической сети, которые предлагаются авторами статьи.

3.1. Интегрирование сети радиотомографии в подсистему мониторинга ионосферы

Интегрирование сети радиотомографии в подсистему мониторинга ионосферы, в которой должна быть использована разнообразная аппаратура наземного (иозонды вертикального и наклонного зондирования, ЛЧМ-зонды, радары некогерентного рассеяния и т.д.) и космического (трансионосферные иозонды) базирования позволит более успешно решить задачу четырехмерного отображения ионосферы в реальном (квазиреальном) времени. На рисунке 2 отображена схема подсистемы мониторинга ионосферы. По этому направлению развития сети можно выделить следующие блоки задач:

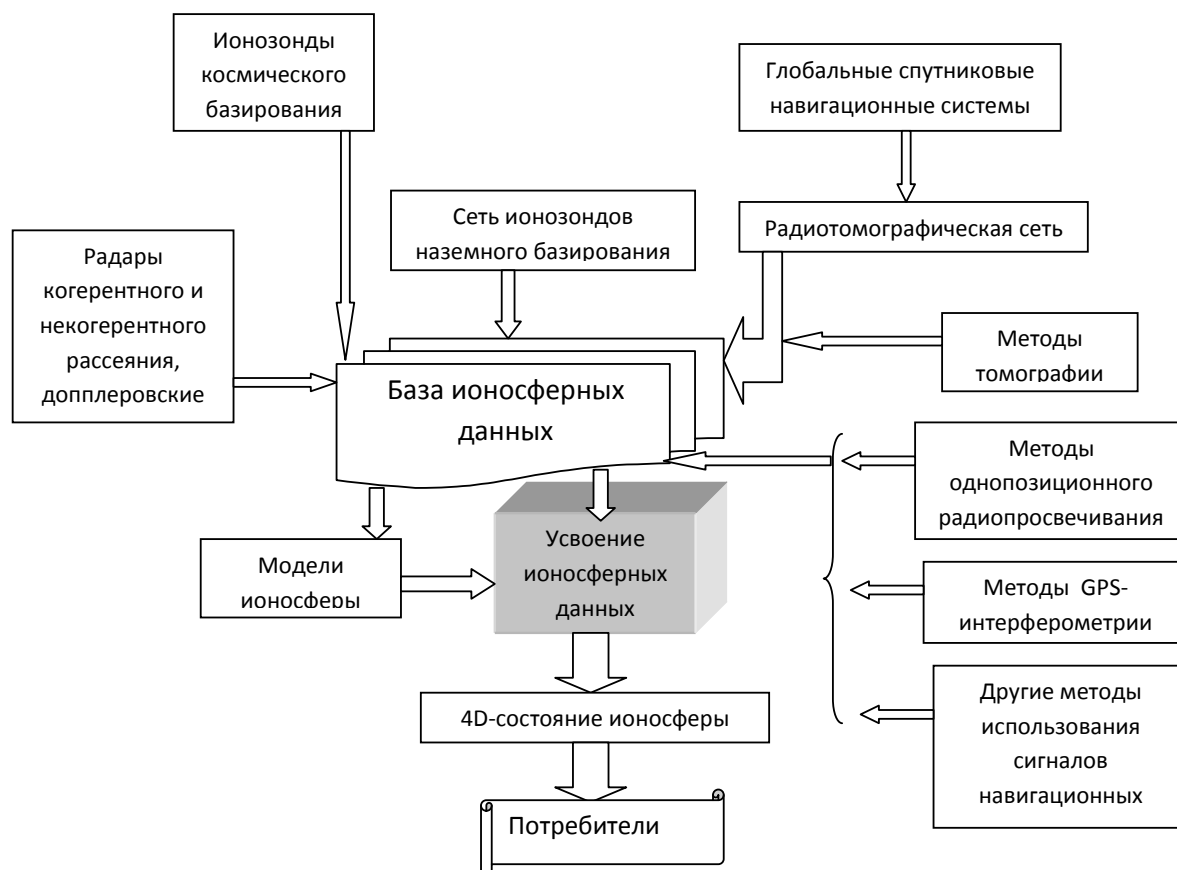


Рис. 2. Схема подсистемы мониторинга ионосферы.

- первый блок задач связан с созданием информационных технологий взаимного использования данных, получаемых при комплексном радиозондировании ионосферы аппаратурой наземного и космического базирования и радиотомографической сети (это может быть использовано, например, для верификации и валидации результатов);
- второй блок задач по развитию сети связан с созданием информационных технологий усвоения данных сети моделями ионосферы, входящими в подсистему мониторинга ионосферы. Это могут быть как теоретические модели, так и эмпирические. Особый интерес представляют специально разработанные ассимиляционные модели, в которых, как правило, уже предусмотрен механизм усвоения данных различного типа;
- третий блок задач связан с разработкой методов и алгоритмов взаимодополняющего использования получаемых данных об ионосфере на основе технологий «слияния данных» (data fusion). Применение этих технологий позволит существенно повысить точность оценок ионосферных параметров, получаемых в под-

системе мониторинга ионосферы разным типом измерительных средств.

3.2. Эффективное комплексирование методов и средств, использующих прием и обработку сигналов спутниковых навигационных систем

Вследствие того, что аппаратура наблюдательных пунктов сети во всех случаях будет одинаковой и может быть параллельно использована в различных методах и алгоритмах в подсистеме мониторинга ионосферы предполагается одновременно использовать различные методы и алгоритмы, использующие сигналы спутниковых навигационных систем.

Высокая эффективность одновременного использования различных методов для получения четырехмерного отображения ионосферы будет обеспечена за счет создания специального центра обработки и анализа информации, в котором предполагается накапливание широкой номенклатуры данных с измерительно-наблюдательных комплексов как наземного, так и космического базирования. Для реализации такого использования должны быть разработаны специальные методы.

В настоящее время имеется возможность томографической реконструкции трехмерного распределения электронной концентрации (ВОРТ-томография), двумерного распределения электронной концентрации (НОРТ-томография), вертикальных профилей электронной концентрации (однопозиционное радиопросвечивание). Метод радиопросвечивания при наличии двухчастотного навигационно-геодезического приемника позволяет определять распределение электронной концентрации ионосферы в квазиреальном режиме времени в любом месте земного шара [2] по наблюдениям в одном наземном пункте, что весьма важно для удаленных и труднодоступных регионов. Отличительной особенностью данного метода является то, что его реализация не требует оборудования специальных пунктов регистрации навигационных сигналов. При наличии персонального компьютера с установленной на нем программой обработки данных радиопросвечивания метод может быть реализован даже в полевых условиях, на борту летательных аппаратов и морских судов, что весьма важно для получения информации об ионосфере в квазиреальном масштабе времени и планетарном масштабе. Так, например, на рисунке 3 приведена схема траектории подионосферных

точек, полученные в суточном сеансе наблюдений в Дальневосточном регионе РФ для трех приемных пунктов. Видно, что при этом появляется возможность восстанавливать профили электронной концентрации в достаточно протяженном регионе Дальнего Востока, где практически нет ионозондов вертикального зондирования.

Так как имеются планы запусков отечественных малых космических аппаратов с приемниками сигналов спутниковых навигационных систем, то предполагается, что в создаваемой подсистеме мониторинга ионосферы будут использоваться методы радиотомографии по схеме «спутник-спутник» (радиозатменные методы), что позволит существенно расширить пространственные границы томографической реконструкции и повысить пространственное разрешение томографических методов. В отличие от наземной томографии, радиозатменные томографические измерения плазменных структур в ионосфере происходят с использованием пучка практически параллельных лучевых траекторий. При этом происходит эффект наблюдательной селекции достаточно протяженных плазменных слоев, для которых выполняется условие локальной сферической симметрии.

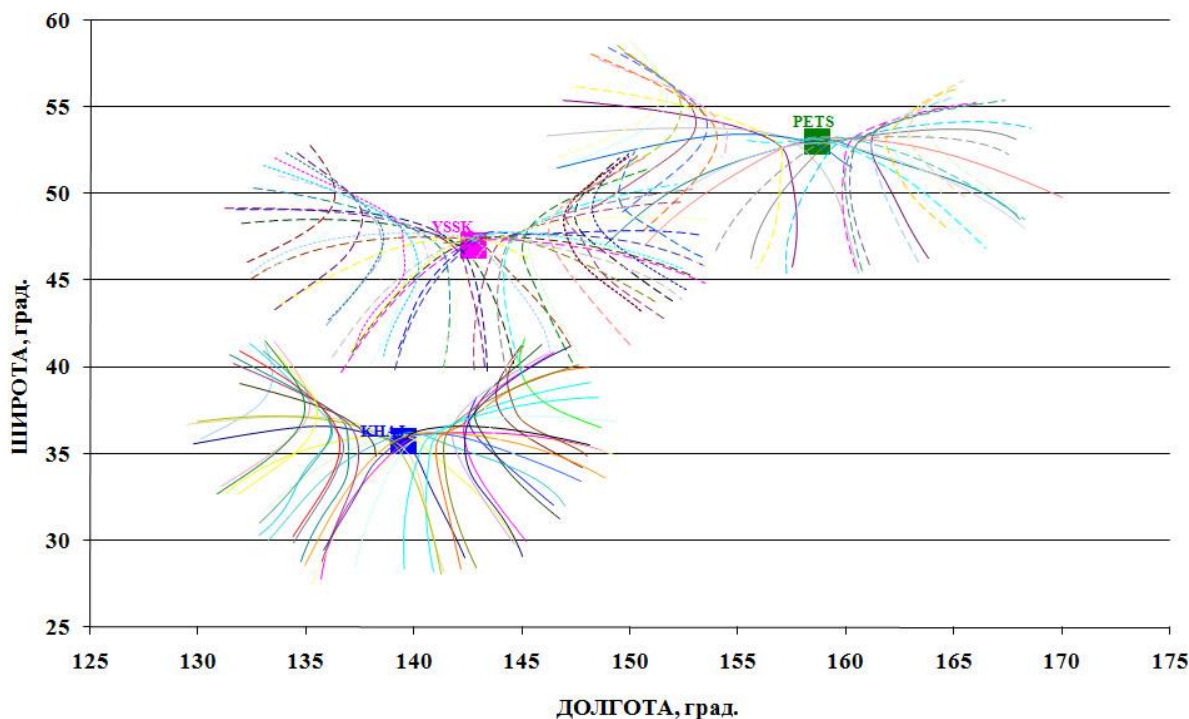


Рис. 3. Траектории подионосферных точек, полученные в суточном сеансе наблюдений в Дальневосточном регионе РФ.

Для повышения эффективности использования радиотомографической сети планируется

интегрировать в подсистему мониторинга ионосферы методы GPS/ГЛОНАСС интерфе-

рометрии, которые разрабатывались в свое время в расчете на перспективу развертывания сетей приемников глобальных навигационных систем [1]. Эти методы разрабатывались для возможности детектирования ионосферных возмущений различного происхождения. Пионерские работы в этом направлении были посвящены регистрации отклика ПЭС на солнечные затмения, землетрясения, наземные взрывы и запуски космических аппаратов [3-6]. Чувствительность фазовых измерений в системе GPS/ГЛОНАСС позволяет детектировать неоднородности с характерным временным масштабом до 5 мин и амплитудой до $\sim 10^{-4}$ - 10^{-5} от суточного изменения ПЭС. Регистрация сигналов спутников на разнесенных приемниках GPS/ГЛОНАСС дает возможность определять пространственные параметры неоднородностей и характеристики их движения. Проблема заключается в развитии методов обработки данных. Значительный вклад в решение данной проблемы был внесен исследовательской группой ИСЗФ СО РАН. Этой группой разработана идеология и создан программный комплекс глобального детектирования и мониторинга ионосферных возмущений естественного и техногенного происхождения на основе фазовых измерений вариаций ПЭС, выполненных с помощью сигналов навигационной системы GPS. При данном подходе глобальная (региональная) сеть GPS-приемников используется как единый объект — глобальный (региональный) GPS-детектор.

3.3. Использование радиотомографических методов и средств в методах ионосферного отображения

Как отмечалось выше, развитие сети происходит в направлении создания системы четырехмерного отображения ионосферы (4D-отображение).

Существует несколько методов использования радиотомографических методов в ионосферном отображении.

Электронная плотность является самым важным параметром в перспективных практических приложениях, потому что она влияет на радиосигналы. Это то, что делает ионосферное отображение такой полезной методикой для прикладных систем радиосвязи. Но важной возможностью радиотомографической сети является также возможность получения с ее помощью широко распространенных в настоящее время так называемых карт полного электронного содержания, технологии GIM (Global Ionospheric Maps).

Уже сейчас использование трехмерных томографических реконструкций позволяет использовать технологию GIM [7-9] – построение глобальных ионосферных карт абсолютного вертикального значения ПЭС. В совокупности с возможностью получения этих карт в стандартном формате IONEX по сетям Интернет технология GIM дает мощное средство для изучения крупномасштабных ионосферных процессов в спокойных и возмущенных условиях в глобальном масштабе.

Ионосферное отображение включает использование интегральных измерений электронной концентрации, известное как полное электронное содержание (ПЭС), для получения двух-, трех- и 4-х мерных карт электронной концентрации. Большинство основных измерений ПЭС получено от сетей приемников GPS. Эти измерения ПЭС могут использоваться непосредственно или организованы в двумерные (2D) карты ПЭС, чтобы получать из них информацию относительно горизонтального структурирования электронной концентрации. Однако, много информации, например, о том, как плазма может быть поднята на большие высоты и транспортироваться в другие регионы, полярный отток, и другие вертикальные динамические изменения, будет потеряно при использовании таких простых алгоритмов отображения. Чтобы получать информацию о вертикальной структуре электронной концентрации, ее временном изменении и переносе, необходимо 4-D отображение.

Известен такой подход к трехмерному отображению плазменной концентрации как ассимиляция данных, как это, например, осуществляется в океанографии и метеорологии. Подобие между метеорологией и космической погодой привело множество исследователей к тому, чтобы применить метеорологические методики прогнозирования к ионосферному прогнозу.

В то время как цель ассимиляции данных состоит в том, чтобы оперативно определить и предсказать состояние ионосферы, методы ассимиляции могут также использоваться, чтобы создать 4-D отображения ионосферной электронной концентрации.

При всей полезности ассимиляции данных необходимо отметить, что ассимиляция данных – существенно модельное определение и методика предсказания, которая использует данные, чтобы улучшить точность модели. Для ионосферы соотношение между необработанными входными данными и результирующими изображениями электронной концентрации сложное. Оно основано на основополагающих физи-

ческих моделях, которые обычно состоят из выражений для множественных разновидностей ионов и нейтралов, каждый со своим собственным значением импульса, уравнениями энергии, объединенных уравнениями Максвелла. Результирующая характеристика концентрации электронов сама зависит от числовой модели: то есть, 4-D поле электронной концентрации подвержено влиянию как основной числовой модели, так и входов, которые ею управляют.

При 4-D отображении связь между переменной состоянием, которая должна быть отображена (ионосферная электронная концентрация), и наблюдениями проста.

Например, в томографическом отображении прямая модель – интеграл по траекториям на множестве, которое будет отображено. Таким образом, в томографии может не быть никакой физической модели, хотя чтобы создать отображение регуляризация посредством математических методов часто используется, для обеспечения необходимой априорной информацией наряду с измерительными данными.

Объединение томографических изображений с моделями, позволит создать предпосылки для идентифицирования физических управляющих параметров системы – оценивать физические драйверы из 4-D отображения.

Идея объединять физические модели с томографическими изображениями – очень мощный инструмент для физических исследований. Цель состоит в том, чтобы извлечь так много информации о состоянии ионосферной системы из отображения, как только возможно. 4-D отображение показывает развивающуюся во времени электронную концентрацию. Следующий шаг заключается в том, чтобы получить количественную информацию относительно физических драйверов, которые производят, продуцируют развивающуюся во времени электронную концентрацию. Это отличается от оценки входов в сложных алгоритмах ассимиляции данных. Там существует крайне сложная, комплексная, прямая модель между требуемыми входами и измеренными данными, делающая точную оценку входов крайне проблемной.

В 4-D отображении отношение между трехмерными развивающимися во времени изображениями и желательным физическим драйвером сохраняется настолько простым, насколько возможно. Например, в высоких широтах, если изменение в электронной концентрации происходит прежде всего от горизонтального переноса, отображение может использоваться, чтобы получить оценки на плазменных дрейфах, вызванных изменяющи-

мия электрическими полями. Это могло бы быть сделано идентификацией плазменных структур в последовательных кадрах отображения и вычисления необходимых напряженностей электрического поля для конвекции плазмы, используя информацию относительно напряженности магнитного поля по модели.

3.4. Создание эффективной межведомственной системы наблюдений ионосферы

В настоящее время радиотомографическая сеть создается на ведомственном уровне в Росгидромете. Долговременными планами предусматривается создание на ее базе межведомственной системы наблюдений ионосферы. Для этого при разработке сети и развертывании ее первых сегментов предусматривалась возможность ее количественного и качественного масштабирования. Существует ряд особенностей создаваемой сети, которые позволяют рассматривать ее как ядро будущей межведомственной системы. Это следующие особенности:

- в отличие от существующих аналогов, удаленные программно-аппаратные комплексы (ПАК) в сети изначально разрабатывались как сетевые устройства; для оперативного управления процессами на сети установлено специальное программное обеспечение удаленного администрирования, которое позволяет управлять всеми процессами, запущенными на удаленной машине по каналам сети Интернет;

- настройка основных рабочих параметров ПО ПАК осуществляется с использованием веб-интерфейса. Дополнительная настройка может быть осуществлена с использованием подключения по протоколам, предоставляющим полный контроль над удаленной ЭВМ. В случае наличия соединения с сетью Интернет, работы по устранению неисправностей могут быть осуществлены с любой удаленной ЭВМ, подключенной к сети Интернет;

- предусмотрена защита информации от несанкционированного доступа из подсистем нижестоящего уровня и сторонних пользователей;

- предусмотрена надежная коммутация с подсистемами разного уровня (согласованные протоколы обмена);

- разработана такая структура хранилища данных в центре сбора и обработки информации, чтобы добавление к системе новых источников данных не приводило к изменениям структуры базы данных или имеющегося программно-математического комплекса. Разработана структура метаданных, описывающих

наличие связей между элементами. В структуре метаданных существует три необходимых и достаточных уровня для организации как региональной системы мониторинга ионосферы, так и глобальной.

Такой подход к организации данных позволяет вносить минимальные изменения в настройки программного комплекса при появлении дополнительных томографических цепочек и ПАК ВОРТ. Необходимые изменения заключаются в добавлении в базу данных информации об очередном регионе и относящихся к нему элементах более низкого уровня. Данная процедура может быть осуществлена через веб-интерфейс администратора системы.

Для оценки возможностей развития сети в данном направлении был проведен сбор и анализ данных о возможном использовании технических и программных средств различных ведомств и организаций в нескольких регионах РФ. Очень важно, чтобы развертывание наблюдательных пунктов радиотомографической сети происходило там, где есть соответствующая инфраструктура.

На рисунках 4а-4г приведены схемы расположения существующих сетей приемников геофизической службы РАН, фирмы Навгеоком, региональной сети Камчатского края, а также планируемой сети ИСЗФ СО РАН.

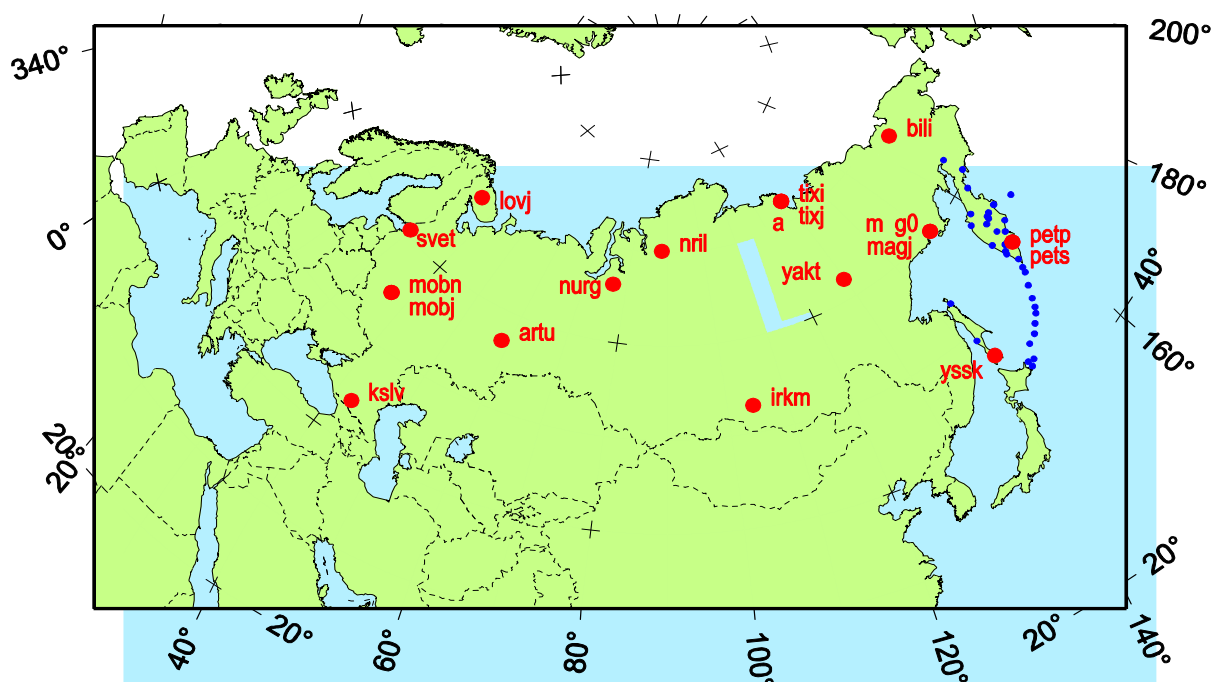


Рис. 4а. Сеть ГФС РАН.

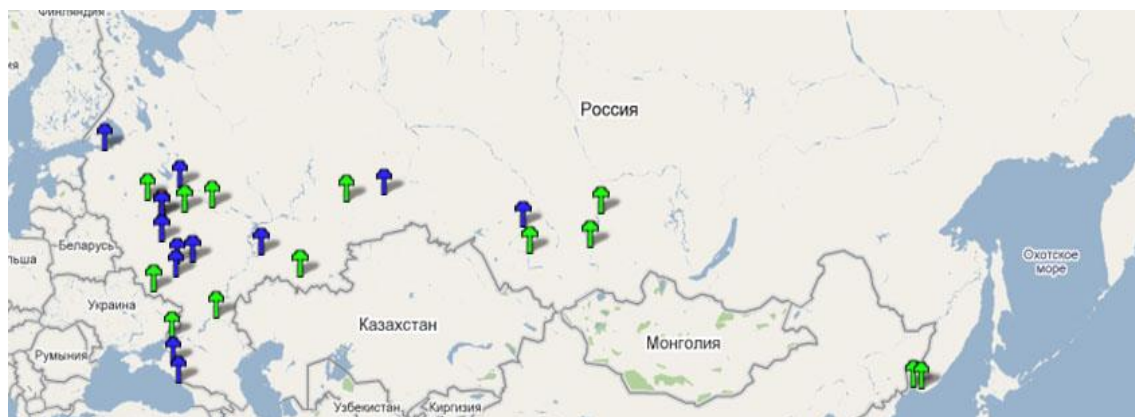


Рис. 4б. Сеть Навгеоком.

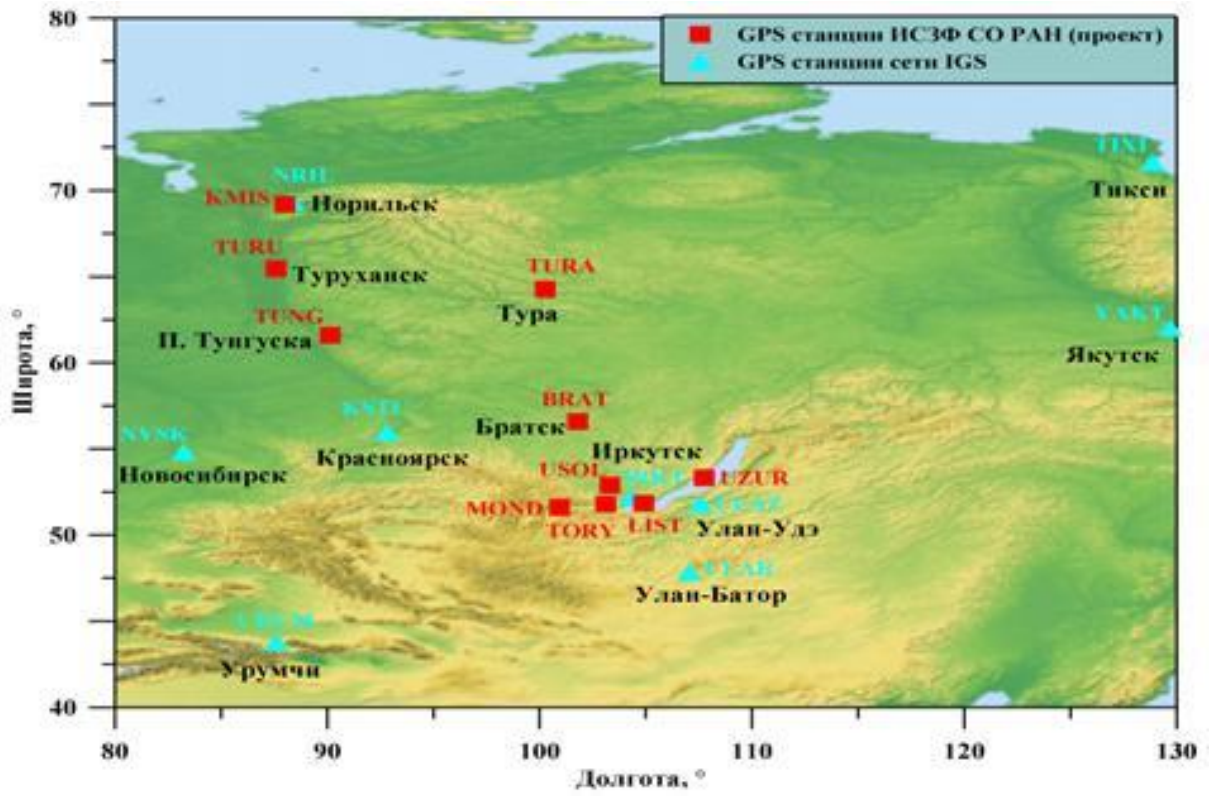


Рис. 4в. Сеть ИСЗФ СО РАН.

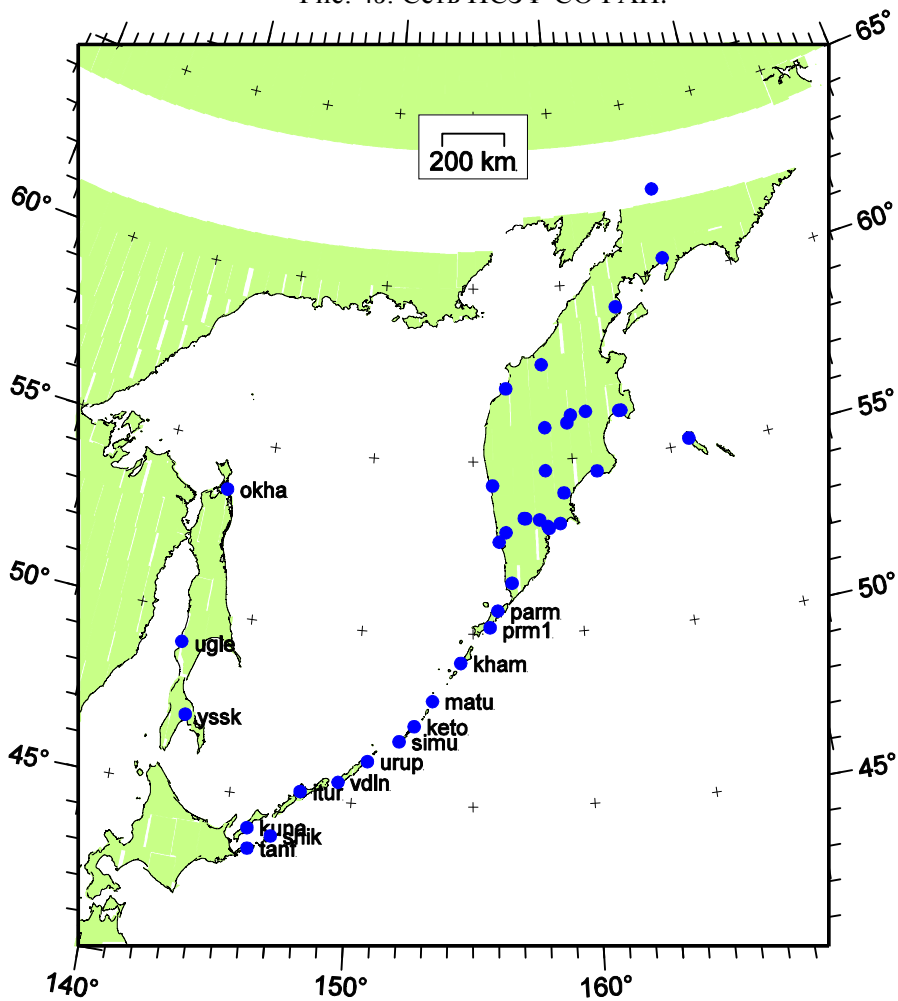


Рис. 4г. Региональная сеть Камчатского края.

Таким образом, если интегрировать в создаваемую радиотомографическую сеть только те станции, которые показаны на рисунках 4а–4г, это поможет к концу 2013 года объединить в общей межведомственной сети порядка 90-100 программно-аппаратных комплексов, оснащенных двухчастотными приемниками спутниковых навигационных систем. С учетом возможности интеграции в систему двух цепочек НОРТ, созданных ОАО РКС на Сахалине и на Камчатке, такая сеть позволит получать оперативную информацию о состоянии ионосферы практически над всей территорией РФ. При этом необходимо решить вопросы, связанные с интеграцией в создаваемую сеть приемников сигналов высокоорбитальных систем, принадлежащих другим ведомствам, государственным и частным организациям.

Вообще важным блоком задач при реализации данного направления развития сети является проработка организационно-управляющих схем организационных мероприятий для обеспечения межведомственной кооперации с целью технической и экономической оптимизации создания такой системы.

Одним из важных вопросов на этом этапе является разработка правовых, организационных и методических вопросов функционирования инфраструктуры, обеспечивающей процессы взаимодействия пунктов сбора, обработки и передачи данных между собой, и между другими подсистемами как производящими данные об ионосфере, так и использующими ее, прежде всего:

- координация решений вопросов использования стандартов и протоколов на федеральном, региональном, муниципальном и корпоративном уровнях;
- расширяемость, т.е. простоту и легкость добавления новых компонентов в существующую среду электронного взаимодействия;
- равенство прав разработчиков информационных систем при поставке новых компонентов в среду электронного взаимодействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены перспективы развития сети радиотомографии Росгидромета для исследований и мониторинга ионосферы.

Показаны следующие основные направления развития:

- количественное наращивание сети Росгидромета как ведомственной системы;
- системные направления развития, включающие в себя решение задач:
 - интегрирования сети радиотомографии в подсистему мониторинга ионосферы;
 - эффективного комплексирования методов и средств, использующих прием и обработку сигналов спутниковых навигационных систем;
 - использования радиотомографических методов и средств в методах ионосферного отображения;
 - создания эффективной межведомственной системы наблюдений ионосферы.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF HYDROMET RADIO TOMOGRAPHY NETWORK

Alpatov V.V., Lapshin V.B., Repin A.Y., Tsenko S.V.

The prospects of developing of the Hydromet radio tomography network for research and monitoring of the ionosphere.

KEYWORDS: IONOSPHERE, RADIO TOMOGRAPHY, RADIO TOMOGRAPHY NETWORK, HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEMS.

ЛИТЕРАТУРА

1. Afraimovich E.L., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P., Chernukhov V.V., Likhnev A.V., Zalutsky V.T. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from the GPS-radio interferometer at Irkutsk// Acta Geod. Geophys. Hung. – 1997. – V.32, N3. – P.309-319.
2. Смирнов В.М. Решение обратной задачи радиопросвечивания ионосферы Земли градиентными методами. // Радиотехника и электроника. 2001, №1, с.47-52.
3. Calais E., Minster J.B. GPS detection of ionospheric perturbations following the January 1994,

- Northridge earthquake // *Geophys. Res. Let.* – 1995. – V.22. – P.1045-1048.
4. Calais E., Minster J.B. GPS detection of ionospheric perturbations following a Space Shuttle ascent// *Geophys. Res. Let.* – 1996. – V.23. – P.1897-1900.
 5. Beach T.L., Kelley M.C., Kintner P.M. Total electron content variations due to nonclassical traveling ionospheric disturbances. Theory and Global Positioning System observations// *J. Geophys. Res.* – 1997. - V.102, – P.7279-7292.
 6. Fitzgerald T.J. Observations of total electron content perturbations in GPS signals caused by a ground level explosion// *J. Atm. Terr. Phys.* – 1997. – V.59, N7. – P.829-834.
 7. Wilson B.D., Mannucci A.J., Edwards C.D. Sub-daily northern hemisphere maps using the IGS GPS network// *Radio Sci.* – 1995. – V.30. – P.639-648.
 8. Mannucci A.J., Ho C.M., Lindqwister U.J. A global mapping technique for GPS-driven ionospheric TEC measurements// *Radio Sci.* – 1998. – V.33, N8. – P.565-582.
 9. Schaer S., Gurtner W., Feltens J. IONEX: The Ionosphere Map Exchange Format Version 1// *Proc. IGS AC Workshop. Darmstadt. Germany. February 9-11, 1998.* – P.233-247