

На правах рукописи

Новиков Алексей Васильевич

**ОЦЕНКА ВЕРТИКАЛЬНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО
СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО
РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ**

**Специальность:
01.04.03 – Радиофизика**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва
2010

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» на кафедре «Системы, устройства и методы геокосмической физики».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор, зам. директора ОАО «Российские космические системы»

Романов Алексей Александрович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедры «Физики атмосферы» Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

Куницын Вячеслав Евгеньевич

кандидат физико-математических наук, заведующий отделом института ГУ «ИПГ»

Алпатов Виктор Владимирович

Ведущая организация:

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

Защита состоится « 27 » октября 2010 г. в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.156.06 при Московском Физико-Техническом Институте (государственном университете) по адресу: 117393 г.Москва, ул. Профсоюзная д. 84/32, корп. В-2.

Отзывы отправлять по адресу: 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, МФТИ, Диссертационный совет Д212.156.06. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МФТИ (ГУ).

Автореферат разослан « ___ » _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Н. П. Чубинский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

За более чем полувековую историю исследований ионосферы, было предложено большое количество различных методов, позволяющих измерить такие параметры ионосферы как критическую частоту и высоту слоя максимума[1]. Как правило, этих параметров достаточно для определения частот, на которых возможна дальняя радиосвязь и связь со спутниками, а так же расчета радиотрасс для больших длин волн, однако, значений этих параметров не всегда достаточно для полноценной оценки искажений, вносимых ионосферой, таких как замирания сигнала или изменение фазовых и групповых скоростей.

В ряде прикладных задач, таких как определение координат в ГНСС, важна информация именно об абсолютном значении ТЕС [5,6]. В этих приложениях, как правило, пользуются однослойным приближением ионосферы. Использование такого приближения для описания воздействия ионосферы на радиосигнал позволяет перейти от трехмерного распределения коэффициента преломления к двумерному широтно-долготному распределению вертикального ТЕС (VTEC) и соответствующих групповых задержек сигнала на интересующей частоте. Для обеспечения высокой точности позиционирования одночастотных потребителей в ГНСС, осуществления дальней и космической связи, а так же загоризонтной радиолокации, необходимо иметь возможность оценить VTEC в любом интересующем месте над поверхностью суши или моря. Однако, как для непосредственных измерений текущего состояния ионосферы, так и для томографического восстановления распределения электронной концентрации, необходима достаточно плотная сеть наземных измерительных станций [4].

Для измерения ТЕС могут использоваться фазовые данные радиопросвечивания ионосферы двухчастотным когерентным сигналом,

позволяющие измерить с высокой точностью зависимость интеграла электронной концентрации вдоль луча визирования (ТЕС) от угла между лучом визирования и горизонтом[4]. Однако эти данные обладают одним существенным недостатком – измеренные значения ТЕС определены с точностью до произвольной константы, что приводит к невозможности однозначной интерпретации измерений. Разработка способа измерения абсолютного значения ТЕС при радиопросвечивании позволит упростить обработку данных и повысить достоверность полученного результата. В частности, отпадет необходимость разрешения фазовой неоднозначности.

В настоящее время, для оценки среднего значения V_{TEC} , а так же измерений ТЕС широко используются высокоточные двухчастотные приемники ГЛОНАСС/GPS[12]. Этот метод обладает существенно худшей точностью (единицы TECU), по сравнению с описанным в работе[4] фазовым методом, однако позволяет получить абсолютное значение средней величины V_{TEC} в регионе. Для задач, таких как спутниковая радиотомография ионосферы, интерпретация этих данных сложна, однако, в ряде прикладных задач, эта точность является достаточной, или даже избыточной. Для проведения двухчастотных измерений V_{TEC} требуется сложная процедура калибровки измерительной аппаратуры и стабильный температурный режим, для неизменности калибровочных коэффициентов.

Точный расчет калибровочных коэффициентов является трудоемкой задачей, но без использования этих коэффициентов, невозможно получить величины ТЕС, имеющие физический смысл (при использовании неверной калибровки, как правило, получаемые значения ТЕС либо отрицательны, либо превышают физически возможные максимальные значения). Расчет калибровочных коэффициентов требует анализа длинных временных рядов данных (непрерывных наблюдений за несколько дней, эта процедура подробно описана, например, в [13]). Для сети станций IGS калибровочные коэффициенты регулярно публикуются в сети Интернет. В случае использования приемника, не входящего в сеть IGS, возникает

необходимость проводить для него калибровку. Расчет калибровочных коэффициентов необходим так же и для каждого бортового передатчика навигационного спутника. Значения калибровочных коэффициентов спутников системы GPS, измеренные перед запуском космических аппаратов, содержатся в навигационном сообщении, для спутников ГЛОНАСС такая информация отсутствует. Вследствие изменения во времени этих величин, расчет калибровки, для повышения точности измерений, все же необходимо производить не только для спутников ГЛОНАСС, но и GPS. Упрощение и повышение точности алгоритма калибровки позволит облегчить интерпретацию данных и уменьшить систематическую ошибку метода.

Для решения задач персональной навигации широкое распространение получили приемники ГНСС, производящие измерения только лишь псевдодальностей на единственной частоте. Разработка алгоритма обработки этих измерений позволит отказаться от необходимости использования дорогостоящих точных двухчастотных приемных станций ГНСС и проведения калибровки этих станций, в случаях, когда достаточно грубой оценки VTEC в регионе. Замена дорогостоящей высокоточной аппаратуры «бытовыми» приборами откроет возможности для быстрого развертывания плотных исследовательских сетей измерительных станций.

Задачу глобального мониторинга VTEC можно решить созданием сети наземных измерительных станций, равномерно распределенных по поверхности земного шара. Но нельзя забывать, что существует немалое количество территорий, где установка и обслуживание наземных станций предельно затруднены или невозможны (труднодоступные районы, открытый океан, и т.д.) В тоже время именно эти территории, зачастую, нуждаются в надежной и предсказуемой спутниковой связи, спутниковой навигации и дальней радиолокации, а, следовательно, и в системе мониторинга VTEC. Исходя из характерных для ионосферы пространственных масштабов, расстояние между наземными измерительными станциями не должно

превышать нескольких сотен километров. В случае осуществления непрерывного мониторинга, станции должны быть подключены к электрической сети и иметь постоянный канал связи. Принимая во внимание особенности географии России и отсутствие развитой инфраструктуры на большей части её территории, развертывание сети необходимой плотности является трудноосуществимой задачей.

Альтернативой непосредственных измерений текущего состояния ионосферы является использование эмпирических моделей ионосферы, однако, при наличии крупномасштабных неоднородностей и в условиях магнитных бурь эти модели теряют адекватность, так как они основаны на среднестатистических данных. Эмпирические модели не способны учитывать многие случайные воздействия как естественного, так и антропогенного характера. К существенным отклонениям распределения электронной концентрации от нормы могут привести выбросы солнечной плазмы, взрывы, воздействие мощного электромагнитного излучения, акустогравитационные волны и другие подобные явления.

Как показано в работах [7, 8, 9], многие модели могут быть доработаны для ассимиляции данных, получаемых в реальном масштабе времени от небольшого числа измерительных станций. Подобную модель можно использовать для экстраполяционной оценки VTEC, в регионах где непосредственные измерения не возможны.

Глобальный оперативный мониторинг состояния ионосферы, и в особенности распределения электронной концентрации, является актуальной задачей и необходим для целого спектра приложений. Существующие приборы позволяющие измерять TЕС имеют ряд недостатков. Данная работа направлена на решение задачи по разработке совокупности методов обработки данных просветного зондирования ионосферы, а так же алгоритмов и моделей, позволяющих производить расчет VTEC, в регионах, где развертывание высокоточной измерительной сети не представляется возможным.

Научная задача

Научная задача, решенная в ходе данной работы, заключается в разработке методики обработки данных просветного зондирования ионосферы сигналами спутниковых систем, позволяющей определить глобальное распределение среднего VTEC.

Цель работы

Целью данной работы является разработка метода и алгоритмов, в совокупности позволяющих оценить VTEC над любой точкой поверхности Земли при использовании, как общедоступных данных ГЛОНАСС/GPS, так и специальных спутниковых приемников.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Разработка алгоритма калибровки двухчастотных приемников ГЛОНАСС/GPS и реализация метода определения среднего абсолютного значения VTEC по двухчастотным измерениям псевдодальностей ГНСС с использованием разработанного алгоритма.
2. Разработка алгоритма определения среднего абсолютного значения VTEC по одночастотным измерениям псевдодальностей приемниками ГЛОНАСС/GPS.
3. Разработка метода определения абсолютного значения TEC по фазовым характеристикам когерентных зондирующих радиосигналов.
4. Разработка адаптивной модели ионосферы, для пространственной экстраполяции распределения значений VTEC.
5. Проведение натурных экспериментов для доказательства возможности использования одночастотных приемников ГЛОНАСС/GPS как источника данных для определения VTEC,
6. Оценка точности экстраполяции значений VTEC на данных измерений контрольно-корректирующих станций ГЛОНАСС с помощью адаптивной модели в различных геомагнитных условиях, а так же сравнение предложенной модели с аналогами.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод определения абсолютного значения ТЕС по фазовым характеристикам когерентных сигналов.
2. Алгоритм расчета калибровочных коэффициентов при использовании эмпирической модели ионосферы NeQuick в методе определения VTEC по двухчастотным измерениям псевдодальностей приемниками ГНСС.
3. Алгоритм оценки VTEC по одночастотным измерениям псевдодальностей приемниками ГНСС.
4. Адаптивная модель ионосферы на основе эмпирической модели ионосферы NeQuick.

Научная новизна полученных результатов

Впервые предложен метод определения абсолютного значения ТЕС по одномоментным измерениям набега фаз многочастотного когерентного зондирующего сигнала.

Впервые использована эмпирическая модель ионосферы для калибровки двухчастотного приемника ГНСС.

Впервые предложен алгоритм оценки среднего VTEC по одночастотным кодовым измерениям псевдодальностей, без использования фазовых измерений.

Впервые предложено использовать адаптивную модель ионосферы для пространственной экстраполяции значений VTEC.

Личный вклад

Личный вклад автора заключается в:

- разработке метода определения абсолютного значения ТЕС по фазовым характеристикам когерентных сигналов;
- разработке и реализации алгоритма определения VTEC по одночастотным измерениям псевдодальности;
- разработке алгоритма калибровки двухчастотного приемника ГНСС с помощью эмпирической модели ионосферы и

реализации алгоритма определения VTEC по двухчастотным измерениям псевдодальности;

- реализации адаптивной модели ионосферы на базе моделей NeQuick и IRI 2007 на языках программирования C и FORTRAN77;
- обработке данных контрольно-корректирующих станций ГЛОНАСС для проведения натурных экспериментов:
- разработке программного обеспечения томографической реконструкции.

Практическая ценность

Адаптивную модель ионосферы может быть использована для оценки значения VTEC в режиме реального времени в тех регионах, где такая оценка не может быть произведена иным способом.

Применение алгоритма оценки VTEC по одночастотным измерениям псевдодальностей позволяет оценивать вертикальное полное электронное содержание ионосферы с помощью любого одночастотного приемника ГНСС.

Двухчастотный алгоритм оценки VTEC с калибровкой по модели NeQuick может использоваться при обработке данных контрольно-измерительных станций ГНСС и расчета межчастотных калибровочных коэффициентов спутников системы ГЛОНАСС.

Метод определения абсолютного значения TEC по фазовым характеристикам когерентных сигналов может быть использован при разработке приборов, предназначенных не только для точного измерения VTEC, но и для высокоточных измерений TEC в ряде задач, таких как радиотомография ионосферы.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на IV, VI и VII всероссийских конференциях «Современные

проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва ИКИ РАН, 2006,2008,2009 годы), конференциях, проводимых ФГУП «РНИИ КП» в 2006, 2007 и 2008 годах, ежегодных конференциях МФТИ (Долгопрудный, 2006-2009), а также XI конференции молодых ученых «Гелио и геофизические исследования» (Иркутск, 2009).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 15 работ (в том числе в 3 изданиях, входящих в перечень ВАК).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. В ней содержится 97 страниц, 8 рисунков и 3 таблицы. Библиография включает 38 названий.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* сформулированы основные цели и задачи диссертации, представлены защищаемые положения и основные результаты, обоснована актуальность и научная новизна исследования, показана научная и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена обзору существующих принципов радиозондирования ионосферы и методов обработки данных радиозондирования, а также анализу применимости указанных методов в тех или иных условиях.

В *первом параграфе* описаны фундаментальные и современные принципы радиозондирования ионосферы.

Второй параграф посвящен анализу эффектов, возникающих при распространении радиосигнала в ионосфере и способов измерения ТЕС. На примере эффекта Фарадея и явления дисперсии показан физический смысл понятия величины неоднозначности метода измерения ТЕС.

В *третьем параграфе* дано краткое описание некоторых эмпирических моделей ионосферы (Чепмена, NeQuick, IRI-2007). Указаны основные недостатки, характерные для этих моделей.

Четвертый параграф содержит обзор работ, посвященных созданию адаптивных моделей.

Во **второй главе** диссертации описываются предлагаемые методы определения абсолютного значения TEC и VTEC.

В *первом параграфе* приведены выкладки, позволяющие рассчитать TEC по измеренным для четверки когерентных монохроматических сигналов разностям набегов фазы.

Частоты сигналов полагаются кратными частоте f_0 , при этом, соседние частоты отличаются в $\frac{n_2}{n_1}$ раз (n_2 и n_1 – натуральные числа). Выражение для TEC, в этом случае примет вид:

$$TEC = \frac{c f_0}{\varepsilon} \frac{n_1^3 n_2^6}{n_2^2 - n_1^2} \frac{1}{M_{ijkl}} [x_{ij} \Delta\varphi_{kl} - x_{kl} \Delta\varphi_{ij} + k] \quad (1)$$

$$x_{ij} N_{kl} - x_{kl} N_{ij} = 1 \quad (2)$$

где:

c – скорость света;

ε – коэффициент, зависящий от выбора системы единиц измерения;

M_{ijkl}, N_{kl}, N_{ij} – натуральные коэффициенты, зависящие от выбора пар сигналов, для которых измерялись разности набегов фаз ($\Delta\varphi_{ij}, \Delta\varphi_{kl}$);

$\Delta\varphi_{ij}, \Delta\varphi_{kl}$ – разности набегов фазы;

x_{ij}, x_{kl} – корни целочисленного уравнения (2);

k – произвольное натуральное число.

Из уравнения (1) видно, что ТЕС, вычисленное таким образом, определено с точностью до произвольной константы (величины неоднозначности):

$$\Delta_{ijkl} = \frac{c f_0 n_1^3 n_2^6}{\varepsilon n_2^2 - n_1^2} \frac{1}{M_{ijkl}}. \quad (3)$$

Точность измерения ТЕС можно оценить по формуле:

$$\delta_{ijkl} = \frac{c f_0 n_1^3 n_2^6}{\varepsilon n_2^2 - n_1^2} \frac{1}{M_{ijkl}} \sqrt{x_{ij}^2 + x_{kl}^2} \delta\varphi. \quad (4)$$

Рассмотрим случай $f_1 = 150 \text{ МГц}$, $n_1 = 3$ и $n_2 = 8$

Для рассматриваемого случая, наилучшая точность при максимальной величине неоднозначности достигается при использовании измерений набегов разностей фаз четвертого и второго канала, относительно первого (комбинация 1214). Величина неоднозначности составляет 532 TECU, что заведомо перекрывает диапазон физически возможных значений ТЕС, то есть, в формуле (1) k можно положить равным единице. В этом случае, можно говорить о возможности измерения абсолютного значения ТЕС, однако точность этой комбинации составляет 903 TECU/градус.

Грубые комбинации могут быть использованы для разрешения неоднозначностей более точных.

При использования комбинации 1214 и точности определения разности набег фаз не менее 5 угловых минут, возможно разрешение неоднозначности в 66,65 TECU комбинаций 1324 и 1224. Комбинация 1324 обладает высоким разрешением (0,58 TECU/градус), при этом точность определения ТЕС достигнет 10^{-4} TECU. Если воспользоваться комбинацией 1224 можно отказаться от использования канала номер 3, (точность измерения ТЕС составит в этом случае около 3 TECU).

С другой стороны, при более грубой точности определения разности фаз (но не хуже 38 градусов), можно построить цепочку комбинаций, позволяющую достичь точности около 10^{-2} TECU при неопределенности в 66,65 TECU.

Во *втором параграфе* описаны методы определения ТЕС по кодовым и фазовым измерениям двухчастотных приемников ГНСС. Произведена оценка точности рассматриваемых методов, указаны основные факторы, влияющие на погрешность измерения.

Отличительной особенностью предлагаемого алгоритма является использование эмпирической модели ионосферы NeQuick при калибровке прибора.

В *третьем параграфе* описан оригинальный метод определения VTEC по одночастотным измерениям псевдодальности.

Суть метода заключается в введении дополнительного неизвестного, соответствующего значению VTEC, при решении системы навигационных уравнений для одночастотного приёмника ГНСС.

В *четвертом параграфе* описана адаптивная модель пространственного распределения электронной концентрации ионосферы Земли.

В рамках модели, уровень ионизации полагается функцией двух переменных в пространстве геомагнитных солнечносинхронных координат. Описываемая модель строиться на основе аналитической модели ионосферы, которая, в текущей реализации, может выбираться произвольно. В качестве базовых моделей, в ходе работы, рассматривались модели IRI-2007[3] и NeQuick[2]. Модели могут применяться для экстраполяционной оценки значения VTEC при отсутствии данных непосредственных измерений в интересующем регионе.

В **третьей главе** приведено описание используемых источников данных и программного обеспечения, разработанного для проведения экспериментов.

В *первом параграфе* приведено описание приемных станций ГНСС, данные которых использовались в ходе эксперимента.

Для получения исходных данных использовалась сеть контрольно-корректирующих станций ФГУП РНИИ КП и станция “yssc”, входящая в сеть IGS.

Второй параграф содержит описание библиотеки GPSTk и модели ионосферы NeQuick, используемых при разработке программного обеспечения обработки данных приемников ГНСС.

В *третьем параграфе* описано программное обеспечение, использовавшееся в ходе эксперимента. Для проведения экспериментов были разработаны четыре программы на языке C++ и две на языке FORTRAN 77. Некоторые операции выполнялись при помощи математических пакетов Matlab и SciLab.

В *четвертом параграфе* приведены критерии, использовавшиеся для сравнения эффективности ионосферных моделей. В качестве критериев предложено использовать среднюю по модулю невязку решения навигационной задачи и истинной позиции и значение, которое не превышает 99% невязок из выборки решений навигационной задачи.

В *пятом параграфе* приведено описание программного обеспечения томографической реконструкции.

В **четвертой главе** приведены результаты экспериментов по обработке данных, получаемых от приёмных станций ГНСС с помощью описанных выше методов.

Первый параграф посвящен описанию результатов моделирования восстановления распределения электронной концентрации в плоскости

орбиты группы низкоорбитальных космических аппаратов методом радиотомографии при использовании четырехчастотного зондирующего сигнала. Моделирование проведено Трусовым С. В. для демонстрации возможностей четырехчастотной аппаратуры просветного зондирования. При моделировании использовалось программное обеспечение, разработанное автором.

Во втором параграфе приводятся результаты сравнения суточного хода значений критической частоты для станции IGS «yssk», находящейся в Южно-Сахалинске, с данными ионозонда, расположенного на севере Японии. Пересчет интегральной электронной концентрации в критические частоты осуществлялся с помощью модели IRI-2007. Показано общее соответствие суточного хода как в спокойных условиях, так и при возмущениях. Для времени суток, характеризующегося максимальным темпом ионизации в ионосфере, заметен резкий рост дисперсии данных, получаемых с помощью приемника ГНСС.

Третий параграф содержит результаты эксперимента по сравнению ионосферных моделей. Анализ результатов указывает на применимость адаптивной модели в условиях геомагнитных возмущений. При применении адаптивной модели на основе NeQuick, невязки были на 10-15% меньше, чем при применении иных рассматриваемых моделей.

В четвертом параграфе приведены результаты, доказывающие возможность применения алгоритма определения среднего VTEC по одночастотным измерениям псевдодальностей. Дана оценка ухудшения точности по сравнению с двухчастотными методами. В ходе эксперимента средние невязки не превышали 5 TECU.

Основные результаты и выводы

В результате проведенной работы были разработаны метод измерения абсолютного значения TEC, специальные алгоритмы обработки данных просветного зондирования ионосферы Земли, а так же адаптивная модель

ионосферы, в совокупности позволяющие определять глобальное широтно-долготное распределение VTEC.

В ходе проведенных исследований были получены следующие результаты:

1. Разработан алгоритм, позволяющий использовать измерения псевдодалейностей и фаз двухчастотных приемников ГНСС для определения средних значений VTEC. Алгоритм использует эмпирическую модель ионосферы для предварительной калибровки и позволяет оценивать среднее значение VTEC по данным контрольно-корректирующих станций ГЛОНАСС и GPS. При использовании высококачественной приемной аппаратуры и стабильном температурном режиме точность метода может быть доведена до 1 TECU. Достигнутая точность расчета калибровочного коэффициента соответствует точностям калибровки, характерным для станций сети IGS.
2. Разработан алгоритм, позволяющий использовать измерения псевдодалейностей одночастотных приемников ГНСС для определения средних значений VTEC. Алгоритм может позволить оценивать среднее значение VTEC с помощью бытовых приемников ГНСС.
3. Предложен метод определения абсолютного значения TEC по фазовым характеристикам когерентных сигналов, прошедших через ионосферу. Метод применим как при надирном, так и при затменном способе просветного зондирования ионосферы Земли, и решает проблему мгновенного разрешения фазовой неоднозначности. Погрешность метода зависит от выбора номиналов частот и пропорциональна погрешности измерения межканальной разности набега фаз, при этом гарантируется точность, не уступающая характерной для классического

фазового двухчастотного метода (до 10^{-4} TECU). При использовании четырех когерентных монохроматических зондирующих сигналов (например, номиналами 150, 400 1066 и 2844 ГГц) так же гарантировано мгновенное разрешение фазовой неоднозначности.

4. Разработаны две версии адаптивной модели ионосферы Земли, основанные на моделях NeQuick и IRI-2007. Невязки в величинах VTEC, выдаваемыми этими адаптивными моделями обуславливаются только различиями в эмпирических соотношениях исходных моделей, при этом, как правило, невелики. Поскольку модель NeQuick алгоритмически проще, чем IRI-2007, эту модель удобнее использовать в качестве основы экспериментальной адаптивной модели. Предлагаемая модель может служить для пространственной экстраполяции данных о VTEC, в регионах, где непосредственный приём сигнала на поверхности невозможен.
5. Показана принципиальная возможность использования одночастотных измерений псевдодальностей для определения VTEC, однако, предложенный алгоритм не позволяет достичь точностей, характерных для двухчастотных измерений. В ходе эксперимента средние невязки не превышали 5 TECU. Следовательно, возможно использование одночастотных («бытовых») приемников ГНСС, при применении предложенного алгоритма обработки измерений псевдодальностей, для грубой оценки VTEC.
6. По результатам проведённого эксперимента, при применении адаптивной модели на основе NeQuick, невязки были на 10-15% меньше, чем при применении иных рассматриваемых моделей. Сравнение данных из литературных источников с полученными

результатами позволяет сделать утверждение, что исследуемая адаптивная модель ионосферы, в условиях высокой геомагнитной активности, позволяет достоверно оценить ионосферную задержку широкополосного сигнала с частотой несущей около 1,5 ГГц (и соответствующий VTEC) в среднем для 75% радиотрасс. Следовательно, рассматриваемую модель можно использовать для оценки VTEC путем экстраполяции, в регионах, где проведение непосредственных измерений невозможно по тем или иным причинам.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих изданиях:

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Новиков А. В.**, Романов А. А., Романов А. А. Комбинированный алгоритм расчёта пространственного распределения ПЭС по данным радиопросвечивания атмосферы сигналами ГЛОНАСС/GPS и моделирования. – Мехатроника, автоматизация, управление, №5, 2007 – с. 24-27.
2. **Новиков А. В.**, Романов А. А., Романов А. А., Селин В. А. Метод определения абсолютного полного электронного содержания в ионосфере на основе анализа характеристик многочастотных немодулированных когерентных сигналов. – Радиотехника и электроника, т. 55, №2, 2010, – с. 179-183.
3. Романов А.А., **Новиков А.В.**, Романов А.А. Измерение ПЭС ионосферы Земли с помощью многочастотного зондирующего сигнала. – Вопросы электромеханики, Т.111, №4, 2009 – с.31-36

В прочих изданиях:

4. **Новиков А.В.**, Романов А.А., Романов А.А. Построение комбинированной системы мониторинга ПЭС ионосферы над

- территорией России при использовании данных радиопросвечивания сигналами навигационных систем и аналитической модели NeQuick. – Тезисы докладов Четвертой всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 13-17 ноября 2006, – с. 71
5. **Новиков А.В.**, Романов А.А., Романов А.А. Вычисление поля ионосферных поправок для сигналов ГЛОНАСС/GPS по данным сети контрольно-корректирующих станций. – Труды научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий», посвященной 50-летию Первого искусственного спутника Земли, 19-21 июня 2007 г.–М: ФИЗМАТЛИТ, 2008, с. 49-56.
 6. Трусов С.В., Романов А.А. ,Романов А.А., **Новиков А.В.** Современные подходы к созданию программного комплекса сбора и обработки данных спутникового мониторинга ионосферы и ионосферных предвестников землетрясений. – Труды научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий», посвященной 50-летию Первого искусственного спутника Земли, 19-21 июня 2007 г. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2008, с. 284-291.
 7. **Новиков А.В.**, Романов А.А., Романов А.А. Исследование пространственного распределения ПЭС над территорией России по данным радиопросвечивания атмосферы сигналами ГЛОНАСС/GPS. – Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сборник научных статей. Выпуск 5. Том I. – М.: ООО «Азбука-2000», 2008. – С.550-553.

8. Романов А.А., Трусов С.В., Романов А.А., **Новиков А.В.**, Крючков В.Г. Результаты томографической реконструкции вертикального распределения электронной концентрации ионосферы в дальневосточном регионе России по спутниковым данным. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сборник научных статей. Выпуск 5. Том I. – М.: ООО «Азбука-2000», 2008. С.554-560.
9. Романов А.А., Трусов С.В., **Новиков А.В.**, Романов А.А. Сравнение данных радиотомографии ионосферы на средних широтах с данными ионозонда, затменного зондирования и моделей ионосферы. – Шестая Открытая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 10-14 ноября 2008 г. Сборник тезисов конференции, – с. 291.
10. Трусов С.В., Романов А.А., **Новиков А.В.**, Романов А.А. Информационная технология автоматизированной обработки данных радиотомографии ионосферы. – Шестая Открытая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 10-14 ноября 2008 г. – Сборник тезисов конференции, – с. 296.
11. **Новиков А.В.**, Романов А.А., Трусов С.В., Романов А.А. Методика томографической реконструкции высотного распределения электронной концентрации в ионосфере по данным системы COSMIC. – Шестая Открытая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 10-14 ноября 2008 г. Сборник тезисов конференции, – с. 289.

12. **Новиков А.В.**, Романов А.А., Романов А.А. Глобальная модель ионосферных задержек радиосигнала на основе сети одночастотных приемников ГНСС. – Труды Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» / Под ред. Ю. М. Урличича, А. А. Романова – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009, с 75-80.
13. Романов А. А., Трусов С. В. **Новиков А. В.**, Аджалова А. В., Селин В. А.. Численное моделирование восстановления вертикального распределения электронной концентрации ионосферы с использованием сигналов, регистрируемы на борту космических аппаратов. \ \ Сборник тезисов конференции. Седьмая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 16-20 ноября 2009.
14. **Новиков А.В.** Решение томографической задачи с помощью разложения пространственного распределения по радиальным базисным функциям. \ \ Труды 52-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть III. Аэрофизика и космические исследования. Том 1. – М.: МФТИ, 2009. с. 139-141.
15. **Новиков А. В.**, Романов А. А., Трусов С. В. Исследование ионосферы с помощью приемников когерентных сигналов, устанавливаемых на борту низкоорбитальных космических аппаратов. \ \ Труды XI Конференции молодых ученых «Гелио и геофизические исследования», БШФФ-2009. Издательство ИСЗФ СО РАН, Иркутск 2009, с 159-162.

Список цитируемой литературы:

1. **Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А.** Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 526 с.

2. **Giovanni Di, Radicella G., Radicella S.M.** An analytical model of the electron density profile in the ionosphere. – *Advances in Space Research*, Volume 10 Issue 11, 1990, – pp. 27-30.
3. **Bilitza D., Reinisch B.W.** International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters – *Advances in Space Research* Volume 42, Issue 4, 2008, – pp. 599-609
4. **Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С.** Радиотомография ионосферы.– М.: Физматлит, 2007. – 336 с.
5. **Шебшаевич В. С., Дмитриев П.П., Иванцевич Н.В.** и др. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.
6. **Kersley L., Malan D., Pryse S. E., Cander L. R., Bamford R. A., Belehaki A., Leitinger R., Radicella S. M., Mitchell C. M., Spencer P. S.J.** Total electron content – A key parameter in propagation: measurement and use in ionospheric imaging. – *Annals of Geophysics* vol. 47 (2/3), 2005 –pp.1067-1091.
7. **Nava B., Coisson P., Amarante G., M., Azpilicueta F., Radicella S. M.** A model assisted ionospheric electron density reconstruction method based on vertical TEC data ingestion. *Annals of Geophysics*, vol. 48, n. 2, 2005 – pp. 313-320.
8. **Amarante G., Radicella S. M., Nava B., Coisson P.** Validation of a method for ionospheric electron density reconstruction by means of vertical incidence data during quiet and storm periods. *Annals of Geophysics*, vol. 48, n. 2, 2005 – pp. 321-326.
9. **Aragón-Ángel A., Orús R., Hernández-Pajares M., Juan J. M., Sanz J.** Preliminary NeQuick assessment for future single frequency users of GALILEO Proceedings of 6th Geomatic Week, Barcelona, 2005
10. **Bernhardt, P. A.; Siefring, C. L.** The CERTO and CITRIS Instruments for Radio Scintillation and Electron Density Tomography from the C/NOFS,

COSMIC, NPSAT1 and STPSAT1 Satellites. American Geophysical Union, Spring Meeting, abstract #SA51A-07 – 2004

11. **Bernhardt P.A., Selcher C.A., Basu S., Bust G., Reising S.C.**, Atmospheric Studies with the Tri-Band Beacon Instrument on the COSMIC Constellation. TAO, Vol. 11 No. 1, 2000 – pp.291-312
12. **Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П.** GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск: ИСЗФ, 2006 – 479с.
13. **Schaer S.** Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System. Inauguraldissertation der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, 1999