

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ,  
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени М.В. ЛОМОНОСОВА

---

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

УДК 551.510.535:629.783

**Падохин Артем Михайлович**

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ ПО  
ДАНЫМ НАЗЕМНОГО И СПУТНИКОВОГО ПРИЕМА  
СИГНАЛОВ ВЫСОКООРБИТАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ  
СИСТЕМ.**

Специальность 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2008 г.

Работа выполнена на кафедре физики атмосферы физического факультета Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова

*Научный руководитель:*

Доктор физико-математических наук,  
профессор

Куницын Вячеслав Евгеньевич

*Официальные оппоненты:*

Доктор физико-математических наук  
профессор

Лукин Дмитрий Сергеевич

Кандидат физико-математических наук

Алпатов Виктор Владимирович

*Ведущая организация:*

Институт физики атмосферы РАН

Защита диссертации состоится «17» апреля 2008 г.

в \_\_\_\_ часов на заседании Диссертационного совета Д501.001.63

при МГУ им. М.В. Ломоносова по адресу 119991, Москва, Ленинские горы, дом 1, стр. 2, физический факультет, аудитория \_\_\_\_

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ

Автореферат разослан «    »                      2008 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д501.001.63

кандидат физико-математических наук

В.Б. Смирнов

## *Общая характеристика работы.*

**Актуальность проблемы.** В связи с использованием спутниковых навигационных систем во все большем числе прикладных исследований, задача изучения ионизированных слоев Земли (среды распространения спутниковых навигационных радиосигналов) особенно в период сильных гелиогеофизических возмущений приобретает все большее практическое значение.

Известно, что во время сильных гелиогеофизических возмущений ионосфера отличается чрезвычайно сложной структурой и высокой динамикой. Каждое такое возмущение обладает как рядом общих с другими свойств, так и своим уникальным набором специфических проявлений, поэтому исследованию особенностей структуры распределения электронной плотности ионосферной плазмы, вызванных воздействием солнечных вспышек на ионосферу Земли, уделяется особое внимание.

Существующие навигационные спутниковые системы второго поколения GPS/ГЛОНАСС и широкая сеть приемников их сигналов на Земле позволяют получать данные о пространственной и временной зависимости поля электронной концентрации в ионосфере и о его интегральной характеристике – поле вертикального полного электронного содержания TEC[1-4]. Уже сейчас сигналы достаточно большого количества спутников GPS и ГЛОНАСС доступны непрерывно в любой точке Земли, а с разворачиванием системы Galileo это число еще увеличится. Информация с сети приемных станций, принимающих сигналы GPS/ГЛОНАСС, предоставляется в специальном формате и находится в свободном доступе в сети Интернет. Плотность существующей сети станций достаточно велика и позволяет осуществлять глобальный мониторинг ионосферы Земли, при этом временное разрешение GPS данных, достаточно для исследований изменений электронной концентрации, вызванных быстрыми процессами, протекающими на Солнце во время вспышек [4-7].

Системы GPS/ГЛОНАСС также дают возможность получать дополнительную информацию о состоянии атмосферы по данным спутникового приема их навигационных сигналов. Такие методики активно развиваются в настоящее время. Одним из методов, основанных на спутниковом приеме сигналов этих систем, является радиозатменный или рефрактометрический метод [8-10], позволяющий получать данные о параметрах атмосферы в труднодоступных областях, в которых отсутствуют традиционные измерения. Получаемые при этом данные могут быть использованы для корректировки входных данных существующих региональных моделей атмосферы.

**Цели работы.** Моделирование восстановления глобальных распределений электронной концентрации в ионосфере по данным высокоорбитальных спутниковых навигационных систем. Оценка параметров распределений электронной концентрации в ионосфере по реальным данным высокоорбитальных спутниковых навигационных систем, а также изучение ионосферных эффектов солнечных вспышек по данным этих систем. Целью работы также является разработка и тестирование методов восстановления профилей метеопараметров из профилей показателя преломления, полученных рефрактометрическими методами.

**Новизна результатов.** Впервые создан комплекс программ для решения прямой задачи моделирования восстановления глобальных пространственно-временных распределений электронной концентрации в ионосфере по данным высокоорбитальных навигационных систем для реальной геометрии спутников и приемников для выбранного дня и заданного модельного распределения электронной концентрации.

Предложен метод восстановления и оценки параметров поля электронной концентрации в ионосфере по фазовым данным высокоорбитальных навигационных систем в приближении модели толстого слоя.

Проанализированы возможности восстановления параметров глобальных неоднородностей распределения электронной концентрации (экваториальной аномалии, главного ионосферного провала, суточного и широтного градиентов) в ионосфере, а также параметров ионосферы во время солнечных вспышек предложенным методом.

Предложен и реализован метод оценки интенсивности ионизирующего солнечного излучения во время вспышки по данным о скорости изменения ТЕС, полученным с помощью наземного приема сигналов высокоорбитальных навигационных систем.

Предложен новый алгоритм использования данных об интегральном содержании водяного пара в столбе атмосферы в качестве априорной информации при восстановлении параметров атмосферы по данным о профилях показателя преломления, полученных в радиозатменных экспериментах.

**Научная и практическая ценность работы.** Использование программного комплекса для решения прямой задачи моделирования восстановления распределения электронной концентрации в ионосфере, разработанного в данной работе, позволит тестировать различные методы мониторинга ионосферы по данным фазовых измерений высокоорбитальных навигационных систем. Предложенный метод получения параметров распределения электронной концентрации позволит

проводить непрерывное исследование и глобальный мониторинг параметров ионосферы, что важно для практических задач радионавигации и дальней радиосвязи. Предложенный метод получения информации об ионизирующем излучении Солнца во время вспышки по фазовым данным навигационных систем может давать дополнительную, независимую информацию для изучения солнечных вспышек. Предложенный алгоритм использования априорной информации об интегральном содержании водяного пара при восстановлении метеопараметров из профиля показателя преломления расширяет спектр и возможности подобного рода алгоритмов.

**Апробация работы и публикации.** Результаты работы докладывались на российских и международных конференциях: 2<sup>nd</sup> CHAMP Science meeting. Sep 1-4 2003. GFZ Potsdam, Special Symposium of the URSI Joint Working Group FG (Италия, Матера, 2003г.), «Физические проблемы экологии» (Москва 2004г.), Научная сессия, посвященная Дню радио (Москва 2005г.), Научная конференция «Ломоносовские чтения» (Москва 2005г.), XXI Всероссийская конференция по распространению радиоволн (Йошкар-Ола 2005г.), X и XI Всероссийские школы-семинары «Волновые явления в неоднородных средах» (Звенигород 2006, 2007 гг.), XIII International symposium Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics (Томск 2006г.), Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва 2007), Байкальская школа молодых ученых (Иркутск 2007), Asia Oceania Geophysical Society Meeting (Bangkok 2007), International Heliophysical Year 2007: New Insights in Solar-Terrestrial Physics (Звенигород, 2007) По теме диссертации опубликовано 15 работ в отечественных и зарубежных изданиях.

#### **Основные результаты и защищаемые положения:**

1. Создано программное обеспечение, позволяющее решать прямую задачу моделирования восстановления распределения электронной концентрации в ионосфере для реальной геометрии всех спутников системы GPS и наземных приемников для выбранного дня и предложенного аналитического модельного распределения, отражающего такие особенности исследуемой среды, как широтный и суточный градиенты, экваториальная аномалия, главный ионосферный провал, локальные неоднородности.
2. Предложен метод и создано программное обеспечение для восстановления глобальных распределений вертикального TEC в ионосфере по фазоразностным данным системы GPS. На предложенном модельном распределении показана возможность восстановления разработанным методом параметров глобальных неоднородностей распределения (экваториальной аномалии, главного ионосферного

провала), параметров локальных неоднородностей, внезапного увеличения ТЕС во время солнечных вспышек.

3. Проведены реконструкции параметров глобального распределения электронной концентрации в ионосфере (пространственных размеров экваториальной аномалии, значений ТЕС в гребнях экваториальной аномалии, критической частоты слоя F2) по реальным данным наземного приема сигналов GPS в различные временные периоды и их сравнение с ионозондовыми измерениями.

4. Предложен и реализован метод оценки интенсивности ионизирующего солнечного излучения во время вспышки по данным о скорости изменения ТЕС, полученным с помощью наземного приема сигналов высокоорбитальных навигационных систем. Проведены оценки для вспышек 28.10.2003 (X17) и 04.11.2003 (X28).

5. Реализован предложенный алгоритм использования данных об интегральном содержании водяного пара в столбе атмосферы в качестве априорной информации при восстановлении параметров атмосферы по данным о профилях показателя преломления, полученных в радиозатменных экспериментах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 113 страниц текста, 57 рисунков.

#### *Краткое содержание работы.*

Во **введении** обоснована актуальность, новизна, научная и практическая ценность решаемой задачи, сформулированы основные результаты и защищаемые положения, кратко изложено содержание диссертации.

**Первая глава** диссертации посвящена использованию высокоорбитальных навигационных систем для исследования атмосферы и ионосферы Земли.

**В первом параграфе** описаны высокоорбитальные навигационные системы второго поколения GPS и ГЛОНАСС. Приведены данные об орбитальных группировках систем, характеристиках сигналов и навигационных сообщений. Приведены уравнения наблюдений и основные линейные комбинации наблюдаемых величин, позволяющие компенсировать или выделить вклад той или иной высотной области атмосферы в наблюдаемые величины.

**Второй параграф** посвящен описанию методов двумерной томографии ионосферы на основе низко- и высокоорбитальных [12]

спутниковых систем и сети наземных приемников. Приведена постановка задачи фазоразностной томографии ионосферы [1,2,11].

В *третьем параграфе* описывается технология построения глобальных ионосферных карт полного электронного содержания по данным наземного приема сигналов GPS [4]. Эти карты, предоставляемые несколькими научными группами, имеют разрешение ( $5^{\circ}long, 2.5^{\circ}lat, 2 часа$ ), что зачастую оказывается не достаточным для исследования быстрых процессов перестройки ионосферы.

*Четвертый параграф* посвящен описанию радиозатменного метода исследования атмосферы, основанного на восстановлении профиля показателя преломления атмосферы из зависимости индекса рефракции от прицельного параметра, полученной при наблюдении радиовосхода или радиозахода спутника системы GPS с низкоорбитального спутника LEO в предположении квазисферической симметрии атмосферы [8-10].

В *пятом параграфе* описана возможность совместного использования радиозатменного и радиотомографического методов для улучшения пространственного разрешения получаемых реконструкций [10].

В *шестом параграфе* даются общие сведения об ионосфере Земли. Приводятся характерные высотные профили электронной концентрации в ионосфере для различных сезонов и широт. Описаны причины и механизмы формирования таких крупных неоднородностей распределения электронной концентрации как экваториальная аномалия и главный ионосферный провал. Кратко описаны процессы, протекающие в ионосфере в периоды солнечных вспышек.

Во *второй главе* диссертации описывается моделирование восстановления глобального распределения электронной концентрации в ионосфере по данным наземного приема сигналов высокоорбитальных навигационных систем GPS/ГЛОНАСС.

В *первом параграфе* ставится задача восстановления распределения электронной концентрации в ионосфере по данным высокоорбитальных навигационных систем. Приводятся формулы, позволяющие получать информацию об ионосфере из групповых ( $P_1, P_2$ ) и фазовых ( $L_1, L_2$ ) GPS-данных на частотах  $f_1$  и  $f_2$  соответственно:

$$TEC = \int_l N_e(\vec{r}) dl = \left( \frac{L_1}{f_1} - \frac{L_2}{f_2} \right) \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \frac{c}{K} + const \quad (1)$$

$$TEC = \int_l N_e(\vec{r}) dl = \frac{P_2 - P_1}{\left( \frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_1^2} \right)} \quad (2)$$

Во втором параграфе строится модельное распределение электронной концентрации в ионосфере, качественно отображающее такие особенности исследуемого поля, как широтный и суточный градиент распределения электронной концентрации, экваториальная аномалия, ориентация гребней экваториальной аномалии вдоль магнитного экватора, главный ионосферный провал, а также локальные неоднородности распределения электронной концентрации. Модель строится в приближении толстого слоя, то есть все временные зависимости и пространственные неоднородности задаются распределением электронной концентрации на высоте максимума слоя.

В третьем параграфе формулируется прямая задача моделирования восстановления распределения электронной концентрации в ионосфере по данным GPS, в которой для реальной геометрии спутников и приемников GPS для заданного дня вычисляются интегралы (1) от модельного распределения, описанного во втором параграфе, по всем лучам «спутник–приемник», для которых в этот день имеются экспериментальные данные. Приводится пример решения прямой задачи для 30 октября 2003 года.

В четвертом параграфе формулируется обратная задача моделирования. По значениям интегралов по набору лучей необходимо восстановить модельное распределение электронной концентрации. Задача переформулируется для использования разностей интегралов по соседним лучам  $L_i$  и  $L_i'$  для устранения неопределенности начальной фазы.

$$TEC_i - TEC_{i'} = \int_{L_i} N_e(\vec{r}) dl - \int_{L_{i'}} N_e(\vec{r}) dl \quad (3)$$

В пятом параграфе строятся линейные проекционные операторы для заданной конфигурации спутников и приемников. Используется сферическая система координат (long, lat, h). Для дискретизации задачи используется разложение восстанавливаемого поля в приближении толстого слоя:

$$N_e(long, lat, h, t) = N_e(long, lat, t) \cdot \begin{cases} \exp\left\{-\frac{(h-h_{\max})^2}{(h_{\max}-h_{\text{first}})^2}\right\}, & h \geq h_{\max} \\ 1 - \frac{(h-h_{\max})^2}{(h_{\max}-h_{\text{first}})^2}, & h_{\text{first}} < h < h_{\max} \\ 0, & h < h_{\text{first}} \end{cases} \quad (4)$$

Для представления  $N_e(long, lat, t)$  используется локальная интерполяция полиномами Лагранжа первой степени по  $t$  и первой или второй степени по  $long$  и  $lat$  на равномерной сетке. После чего задача переписывается в виде системы линейных уравнений, для нахождения



элементов матрицы которой, требуется вычислять интегралы от слагаемых интерполяционного полинома Лагранжа вдоль лучей спутник-приемник. Для вычисления этих интегралов с высокой скоростью и точностью используется квадратурная форма Гаусса-Кронрода с 61 узлом. Приводится построение проекционного оператора в случае использования локальной интерполяции полиномами Лагранжа первой степени по  $long$ ,  $lat$ ,  $t$ .

В шестом параграфе приведены алгоритмы решения полученной после дискретизации задачи системы линейных алгебраических уравнений. При типичном размере ячейки дискретизации (1 градус по долготе, 1 градус по широте, 1 час по времени) и типичном числе лучей для всех пар спутник-приемник за 1 день, используемых при восстановлении, порядка 400 000, матрица задачи содержит порядка  $10^{11}$  элементов, но является при этом достаточно разреженной. В данном случае имеет смысл использовать итерационные, а не прямые, методы решения системы линейных уравнений. Приводятся формулы используемых итерационных методов ART и SIRT.

Другой особенностью задачи является ее недоопределенность. Существуют конечные пространственно-временные элементы разбиения исследуемой области, которые не пересекает ни один луч спутник-приемник. В параграфе используется межитерационное сглаживание решения, основанное на методе неопределенных множителей Лагранжа, для получения гладкого решения недоопределенной задачи, минимизирующего некоторую Соболевскую норму [2], заданную матрицей  $L$ :

$$\begin{cases} A\bar{x} = \bar{y} \\ L^*L\bar{x} + A^*\bar{h} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

где  $A$  - матрица исходной задачи,  $y$  - столбец наблюдений,  $x$  – столбец неизвестных,  $h$  – неопределенные множители Лагранжа. Для решения этой системы можно использовать метод ART или SIRT. Добавление второй группы уравнений в систему (5) соответствует проведению межитерационного сглаживания. Характерный масштаб сглаживания, проведенного за  $N$  итераций, порядка  $\sqrt{N}$  ячеек, т.е. при измельчении сетки число итераций, необходимых для сглаживания, будет возрастать как квадрат числа ячеек (по одной координате).

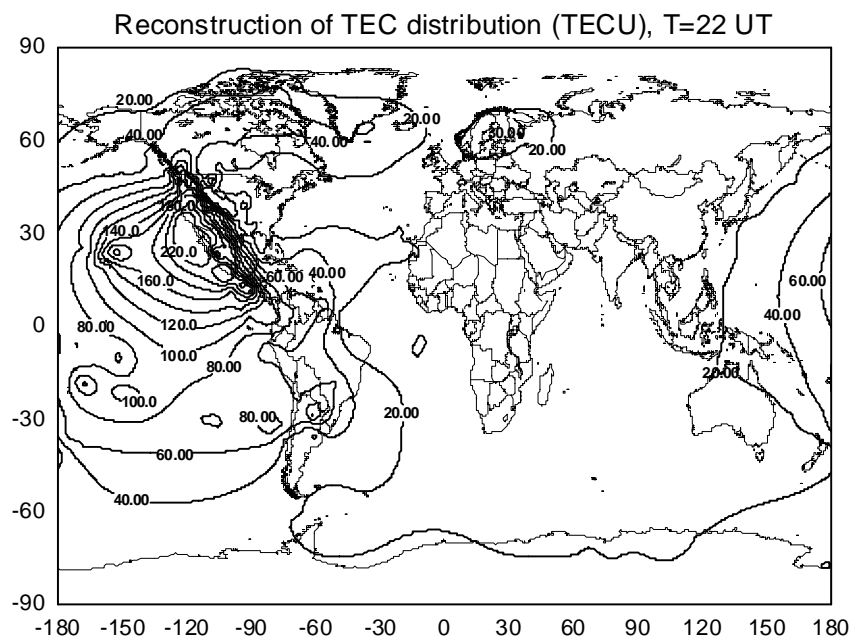
Седьмой параграф посвящен описанию результатов моделирования. Для дня 30 октября 2003 года решена прямая и обратная задачи. Использовалась реальная геометрия спутников и приемников для этого дня, а также такие лучи спутник-приемник, для которых в реальных экспериментальных данных не было сбоев. Только такое моделирование способно дать информацию о применимости алгоритма в данном

конкретном случае. Показано, что предлагаемый метод, позволяет восстанавливать в областях с достаточным числом приемников такие параметры распределения электронной концентрации, как максимальные значения, размер и ориентацию гребней экваториальной аномалии, положение и величину ионосферного провала, параметры локальных неоднородностей. Ошибка восстановления на исследуемых модельных распределениях как правило составляла 10-20% и не превышала 30%.

Проведено моделирование возможности восстановления внезапного увеличения электронной концентрации в ионосфере в момент солнечной вспышки предложенным методом. Показано, что предложенный метод позволяет восстанавливать увеличение среднего по всей Земле значения  $N$  на высоте максимума слоя, а следовательно и увеличение значения среднего ТЕС в момент вспышки.

*Третья глава* диссертации посвящена применению, описанного во второй главе метода к восстановлению распределения вертикального ТЕС в ионосфере по реальным данным наземного приема сигналов системы GPS.

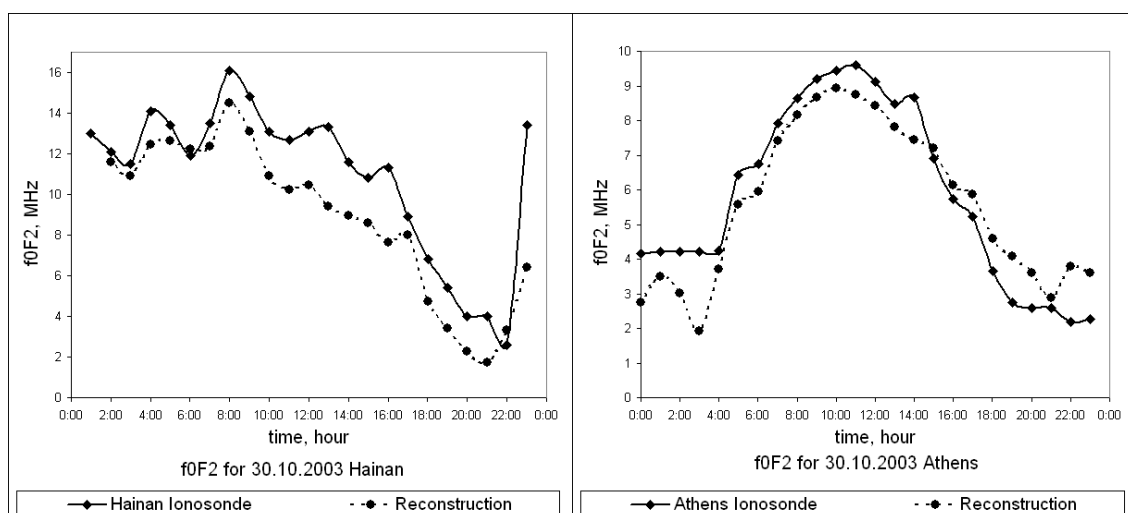
В *первом параграфе* приведены глобальные распределения ТЕС во время сильнейших гелиогеофизических возмущений 30 октября 2003 года, когда максимальные значения ТЕС достигали 220 TECU. Пример реконструкции глобального распределения ТЕС для 22 UT представлен на рис. 1.



**Рисунок 1. Восстановленное распределение ТЕС в ионосфере 22UT 30.10.2003**

На реконструкции также видно пятно ионизации над Европой в ночное время со значениями ТЕС достигавшими 35 TECU, такие значения характерны для дневной ионосферы.

Во *втором параграфе* проведена оценка критической частоты слоя F2 по данным реконструкции и ее сравнение с данными ионозондов. На рис. 2 для 30 октября 2003г оно показано на примере ионозондов Hainan (слева) и Athens (справа). Видно хорошее совпадение временного хода и даже значений  $f_0F2$  по данным ионозондов с результатами реконструкции по данным GPS. Разница в значениях  $f_0F2$  по данным ионозондов и по данным GPS вызвана различием между реальной высотой слоя F2 в ионосфере и значением высоты максимума слоя используемой в алгоритме восстановления.



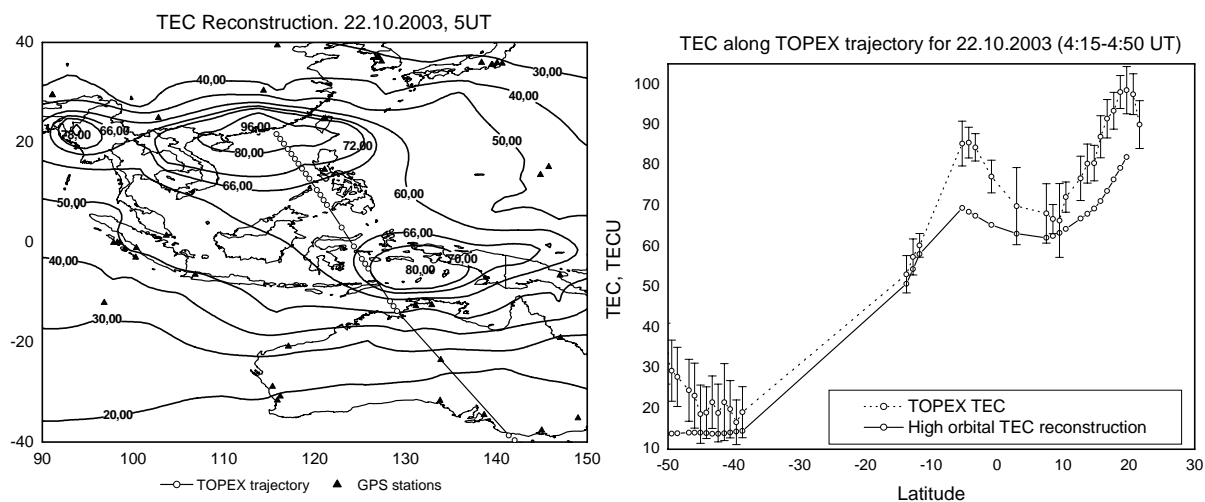
**Рисунок 2. Восстановление критической частоты слоя F2. Пример сравнения с данными ионозондов.**

*Третий параграф* посвящен сравнению результатов реконструкций вертикального TEC с данными глобальных ионосферных карт. Показано качественное совпадение структуры и величин восстанавливаемых полей.

В *четвертом параграфе* представлено сравнение распределений вертикального TEC, полученного по данным GPS, и TEC, полученного методом двумерной низкоорбитальной радиотомографии, вдоль цепочки на Аляске ( $145^{\circ}$  ЗД) для 30 октября 2003г. Наблюдались как случаи хорошего совпадения широтных зависимостей и даже значений TEC вдоль цепочки приемников по данным низкоорбитальной томографии и по высокоорбитальным данным, так и случаи значительного расхождения TEC, полученного этими двумя методами. Расхождение в данных может объясняться тем, что в возмущенный период, каким и является 30 октября 2003г., практически мгновенное распределение TEC по данным низкоорбитальной томографии в связи с быстрыми процессами перестройки ионосферы не будет совпадать с усредненным по достаточно большому временному интервалу (1 час) распределением TEC, построенным по высокоорбитальным данным.

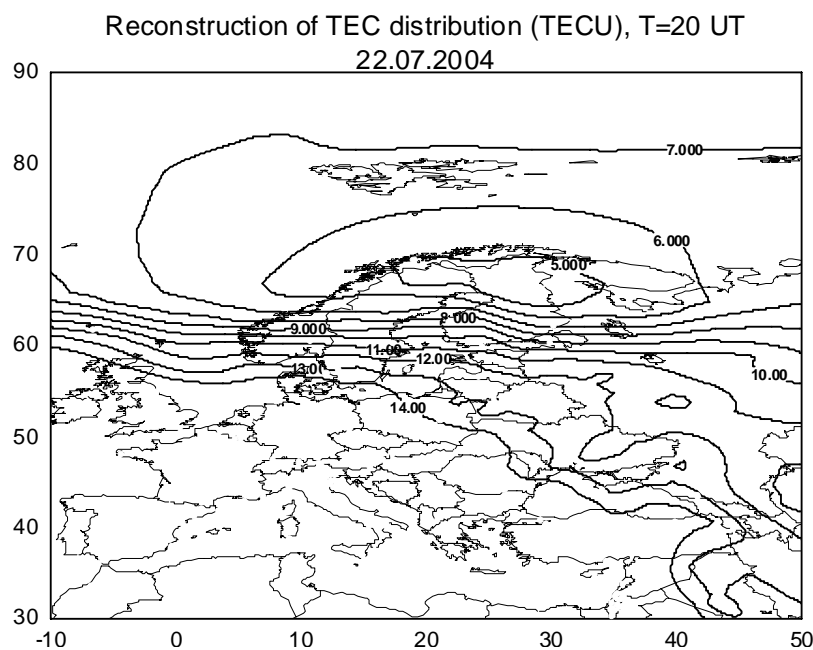
В *пятом параграфе* приведены примеры восстановления параметров экваториальной аномалии над Юго-Восточной Азией для 22 октября 2003 г

(см рис. 3 слева). На реконструкции хорошо видны северный и южный гребни экваториальной аномалии. Северный гребень имеет большую протяженность, порядка 4000км., и вытянут вдоль 20° СШ. Южный гребень менее выражен, имеет протяженность порядка 3500км. и вытянут вдоль 5° ЮШ. Значение ТЕС в максимуме экваториальной аномалии на 25-30ТЕСУ выше значений ТЕС на экваторе. Проведено сравнение с данными альтиметра спутника TOPEX (см рис. 3 справа), показавшее хорошее совпадение восстановленного ТЕС.



**Рисунок 3. Реконструкция вертикального ТЕС в области экваториальной аномалии. Сравнение с данными TOPEX-альтиметра.**

В шестом параграфе приведен пример восстановления параметров главного ионосферного провала над Европой для 20UT 22 июля 2004г. (см рис. 4)



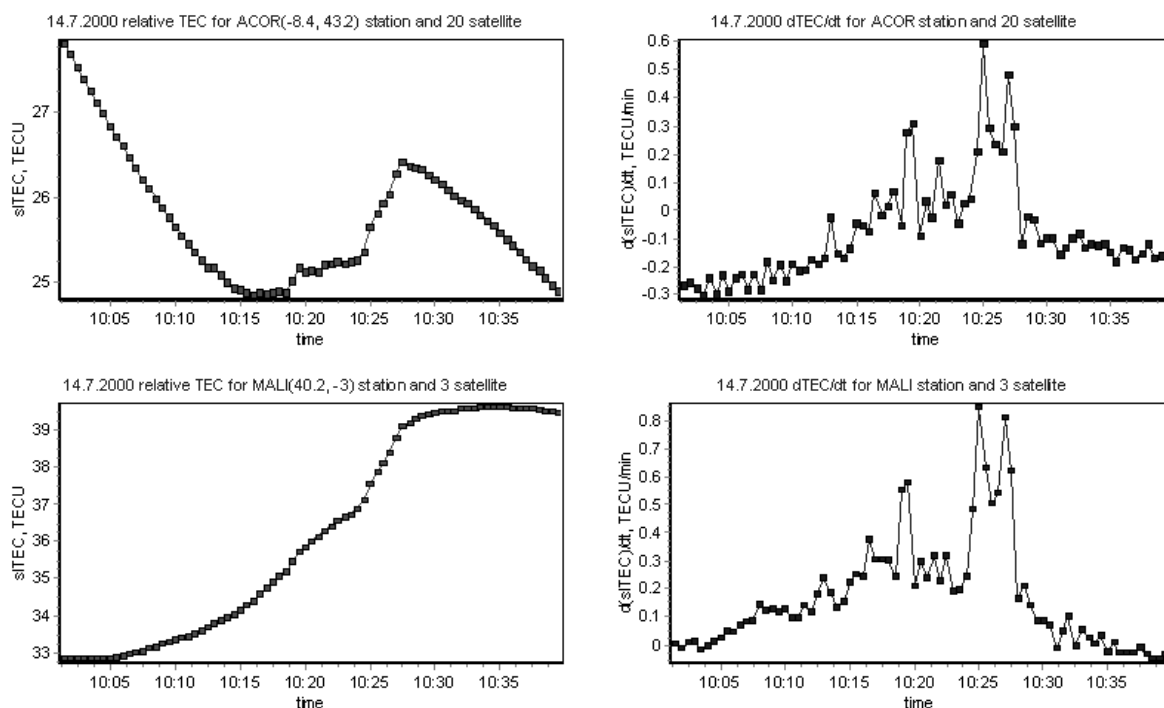
**Рисунок 4. Реконструкция вертикального ТЕС в области провала ионизации над Европой для 20 UT 22.07.2004.**

Отчетливо восстанавливается стенка провала, падение вертикального ТЕС более чем в два раза (с 12 TECU до 5 TECU). Ширина провала по данным реконструкции составляет  $\sim 15^\circ$ . Отметим, наличие станций IGS в Европе на широтах выше широты провала, что необходимо для восстановления параметров провала.

Таким образом, предложенный метод позволяет восстанавливать структуру крупных неоднородностей ионосферы, таких как экваториальная аномалия, главный ионосферный провал, пятна ионизации и т.д. Сопоставление результатов восстановления с независимыми измерениями ионозондов, низкоорбитальной томографии и глобальными ионосферными картами показало эффективность применяемого подхода.

**В четвертой главе** диссертации проведено исследование внезапного увеличения полного электронного содержания (SITEC) в ионосфере во время ряда интенсивных солнечных вспышек по данным наземного приема сигналов системы GPS.

В *первом параграфе* приведены временные зависимости  $TEC(t)$  и  $\frac{\partial TEC}{\partial t}(t)$  во время вспышки для различных пар приемник-спутник GPS для вспышек: X17 - 28.10.2003, X28 - 04.11.2003, X6 - 14.07.2000, X20 - 02.04.2001, X4.2 - 17.01.2005. Для вспышки X6 - 14.07.2000 эти зависимости показаны на рис. 5.



**Рисунок 5. ТЕС и скорость изменения ТЕС для двух пар «спутник-приемник» во время солнечной вспышки 14.07.2000**

Для каждой из проанализированных вспышек наблюдается подобие временных зависимостей  $\frac{\partial TEC}{\partial t}(t)$  для различных пар спутник-приемник, для восходящих (рис. 5 сверху) и нисходящих (рис. 5 снизу) траекторий спутников, что говорит о связи временной зависимости скорости изменения TEC с интенсивностью ионизирующего излучения Солнца в момент вспышки.

Во *втором параграфе* предложен новый параметр – эффективная ионизирующая интенсивность солнечного излучения во время вспышки и методы ее определения по данным высокоорбитальных навигационных систем. Показано, что скорость изменения TEC во время вспышки пропорциональна интенсивности дополнительного ионизирующего излучения, вызванного солнечной вспышкой:

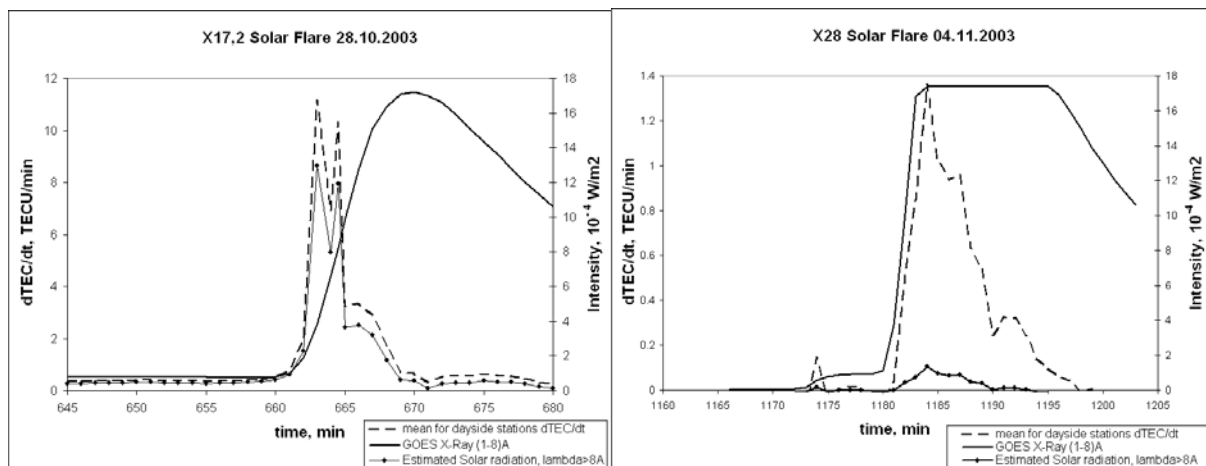
$$\frac{\partial TEC}{\partial t} \approx \sum_{\lambda} \sum_i \frac{\eta_i(\lambda) \Delta I_{\infty}(\lambda)}{\sec \chi} \quad (6)$$

где  $\eta_i(\lambda)$  - фотоионизационный выход  $i$ -й газовой составляющей атмосферы на длине волны  $\lambda$ ,  $\Delta I_{\infty}(\lambda)$  - дополнительная интенсивность солнечного излучения с длиной волны  $\lambda$  на верхней границе атмосферы, вызванная вспышкой. Таким образом, можно ввести эффективную ионизирующую интенсивность излучения при вспышке в интервале длин волн  $\Delta \lambda$ , как:

$$\bar{T} = \frac{\sum_{\lambda} \sum_i I_{\infty}(\lambda) \eta_i(\lambda)}{\sum_{\lambda} \sum_i \eta_i(\lambda)} = \frac{\left\langle \frac{\partial TEC}{\partial t} / \cos \chi \right\rangle}{\sum_{\lambda} \sum_i \eta_i(\lambda)} \quad (7)$$

где  $\left\langle \frac{\partial TEC}{\partial t} / \cos \chi \right\rangle$  [4] усредненное по всем станциям наблюдения, расположенным на дневной стороне Земли, значение скорости изменения электронной концентрации в ионосфере, приведенное к зенитному углу Солнца для каждой точки наблюдения.

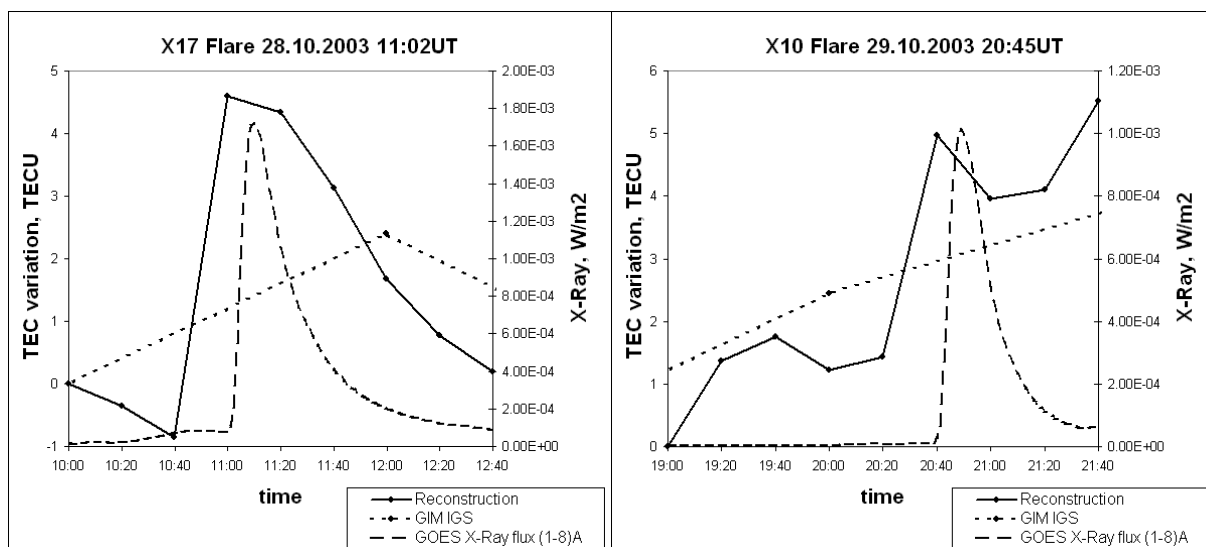
На основе (7) предложен алгоритм оценки интенсивности солнечного излучения вне диапазона (1-8)Å по данным о скорости изменения TEC со станций сети IGS и об интенсивности солнечного рентгеновского излучения в диапазоне (1-8)Å со спутников серии GOES. Приведем оценку этой интенсивности для вспышек 28.10.2003 и 04.11.2003 (см рис. 6).



**Рисунок 6. Совместный график среднего по всем станциям дневной стороны Земли dTEC/dt, интенсивности рентгеновского излучения по данным GOES, и оцененной по этим данным интенсивности солнечного излучения в диапазоне  $\lambda > 8\text{\AA}$  во время вспышек 28.10.2003 (слева) и 04.11.2003 (справа).**

Несмотря на то, что вспышка 04.11.2003 была самой интенсивной из наблюдаемых в рентгеновском диапазоне, SITEC вызванный ею в несколько раз меньше, чем SITEC вызванный менее интенсивной вспышкой 28.10.2003. Это можно объяснить тем, что больший вклад в ионизацию вносит более длинноволновое ультрафиолетовое излучение, что подтверждается приведенными на рис. 6 оценками.

*Третий параграф* посвящен исследованию параметров глобального распределения электронной концентрации в ионосфере в момент вспышки. Была исследована зависимость изменения TEC в ионосфере в момент вспышки от положения точки наблюдения, показана связь величины SITEC с зенитным углом Солнца точки наблюдения.



**Рисунок 7. Вариация полного электронного содержания для вспышек X17 28.10.2003 (слева) и X10 29.10.2003 (справа) по данным реконструкции и глобальных ионосферных карт IGS, совместно с солнечным рентгеновским излучением в диапазоне (1-8)Å.**

Проведена реконструкция глобального распределения электронной концентрации во время вспышки по данным GPS, методом, описанным во второй главе, с шагом по времени 20 мин для вспышек 28.10.2003 и 29.10.2003. По данным реконструкции определялась вариация среднего по всему земному шару значения TEC во время вспышки. Показано что среднее значение TEC, полученное этим методом (см. рис. 7), в момент вспышки возрастает, в то время как посчитанное для сравнения среднее значение TEC по данным глобальных ионосферных карт IGS не обладает достаточным временным разрешением, чтобы описать быстрые процессы, происходящие в ионосфере во время солнечной вспышки.

*Пятая глава* диссертации посвящена возможности использования данных спутникового приема сигналов GPS/ГЛОНАСС для оценки параметров атмосферы Земли. Одним из методов использующих спутниковый прием сигналов высокоорбитальных навигационных систем является радиозатменный или рефрактометрический метод. Он позволяет в приближении локальной сферической симметрии атмосферы получить информацию о высотном профиле показателя преломления, который, в свою очередь, содержит информацию об основных метеорологических полях.

В *первом параграфе* приведена зависимость показателя преломления от основных параметров атмосферы, таких как давление, температура, влажность, электронная концентрация в ионосфере. Описано, на каких высотах соответствующие параметры вносят максимальный вклад в показатель преломления. Указано на возможность выделения вклада отдельных областей атмосферы в показатель преломления с использованием двух частот системы GPS.

Во *втором параграфе* приведена система уравнений для восстановления профилей плотности  $\rho$ , температуры  $T$ , давления  $p$  и влажности  $p_w$  из профиля показателя преломления  $N$ , состоящая из уравнения гидростатики, уравнения состояния и уравнения для показателя преломления.

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho = \frac{1}{k_1 R_\mu} \left( N - \frac{k_2 p_w}{T^2} \right) \\ p(h) = g \int_h^\infty \rho(r) dr \\ T(h) = \frac{g}{R_\mu} \frac{\int_h^\infty \rho(r) dr}{\rho(h)} \end{array} \right. \quad (8)$$



Данная система является незамкнутой и для замыкания требует дополнительной, априорной информации о состоянии атмосферы. Рассмотрены различные подходы замыкания этой системы, а именно: приближение «сухой» атмосферы, применимое в областях, где влиянием водяного пара можно пренебречь (например в Арктике); использование в качестве априорной информации профиля или приземного значения температуры. Предложен метод использования независимо измеренного полного содержания водяного пара в столбе атмосферы, как априорной информации для восстановления метеопараметров. Он заключается в следующем.

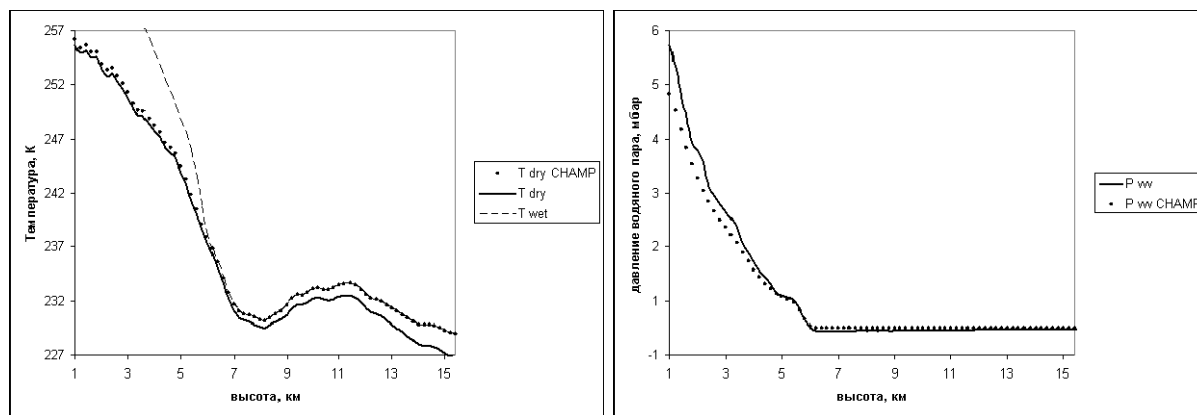
1. Выше некоторой высоты  $H$  влиянием водяного пара можно пренебречь и восстанавливать профили давления и температуры в приближении сухой атмосферы.
2. Для высот меньших  $H$  априорная информация об интегральном содержании водяного пара позволяет определить градиент профиля температуры в предположении, что температура меняется по линейному закону.
3. Зная профиль температуры, можно восстанавливать профиль давления и влажности из профиля показателя преломления известными алгоритмами.

В *третьем параграфе* дается краткое описание модели NIRNAM4, на основе которой строились модельные профили показателя преломления.

*Четвертый параграф* посвящен моделированию восстановления профилей метеопараметров из профилей показателя преломления, полученных при трассировке модели NIRNAM4 Арктического региона. Была оценена возможная точность каждого из описанных в параграфе третьем алгоритмов. Полученные результаты показывают, что в ряде случаев источником ошибок может служить поле влажности, не учет которого приводит к относительным ошибкам порядка 10% для приземных значений температуры и порядка 5% для приземных значений давления. Наличие априорной информации о поле температуры позволяет уменьшить максимальные относительные ошибки восстановления давления до 1%, а также восстанавливать поле влажности с точностью порядка 10% для приземных значений. Использование априорной информации об интегральном содержании водяного пара приводит к ошибкам восстановления, сравнимым с ошибками, получаемыми при восстановлении профилей влажности и давления при наличии априорной информации о профиле температуры, причем восстановление профиля температуры происходит тем лучше, чем ближе поведение реального профиля температуры к линейному. Полученные результаты могут быть использованы для прогноза возможных ошибок в реальных экспериментальных данных и для создания процедур коррекции этих

данных, причем прогноз вероятных ошибок будет тем точнее, чем точнее модель NIRHAM4 описывает состояние атмосферы.

*Пятый параграф* посвящен восстановлению профилей метеопараметров из профилей показателя преломления, полученных в реальных радиозатменных экспериментах на спутнике CHAMP (GFZ-Potsdam). Было обработано несколько сотен профилей показателя преломления. Пример профилей метеопараметров, полученных в результате обработки приведен на рис. 8. Восстановленные профили метеопараметров хорошо согласуются с данными, представляемыми GFZ-Potsdam, но, не смотря на это, исходя из результатов моделирования, можно сделать вывод, что полученные профили метеопараметров могут нести в себе относительные ошибки порядка 3% для температуры и 1% для давления, что для приземных значений может составлять 3-4К и 10 мбар соответственно. Ошибки в определении влажности вообще могут быть ненормированны, вплоть до восстановления отрицательных значений влажности. Таким образом использовать профили метеопараметров, полученных в радиозатменных экспериментах следует с большой осторожностью. Разумным представляется использовать эти сильно усредненные, в силу предположения о локальной сферической симметрии атмосферы, профили в качестве начального приближения для других методов восстановления.



**Рисунок 8. Восстановленный в приближении «сухой» атмосферы из профиля показателя преломления, полученного со спутника CHAMP, профиль температуры (T dry); профиль температуры (T dry CHAMP), независимо определенный GFZ-Potsdam по данным CHAMP; априорный профиль температуры (T wet). Профиль парциального давления водяного пара, восстановленного по данным CHAMP (P ww) и профиль давления водяного пара, независимо определенный GFZ-Potsdam по данным CHAMP (P ww CHAMP)**

**В заключении** приведены основные результаты, полученные в ходе работы над диссертацией, а именно:

1. Создано программное обеспечение, позволяющее решать прямую задачу моделирования восстановления распределения электронной концентрации в ионосфере для реальной геометрии всех спутников и приемников GPS

для выбранного дня и предложенного модельного распределения. Это распределение построено в приближении толстого слоя постоянной толщины и качественно отражает широтный и суточный градиенты распределения электронной концентрации, такие глобальные неоднородности как экваториальная аномалия и главный ионосферный провал. Возможно введение локальных неоднородностей, волновых структур, а также задание внезапного увеличения электронной концентрации во время солнечных вспышек.

2. Предложен метод построения приближенных дискретных проекционных операторов задачи восстановления распределения электронной концентрации в ионосфере по данным GPS, использующий приближение толстого слоя постоянной толщины для вертикальной составляющей разлагаемого поля и локальную интерполяцию полиномами Лагранжа первой или второй степени для представления пространственно-временной структуры разлагаемого поля на высоте максимума слоя. Предложен метод межитерационного сглаживания решения для получения гладкого решения задачи. На основе предложенных методов реализован алгоритм восстановления глобального пространственно-временного распределения электронной концентрации в ионосфере по фазоразностным данным высокоорбитальных навигационных систем.

3. На предложенном модельном распределении электронной концентрации в ионосфере проведено компьютерное моделирование и показана возможность восстановления разработанным методом характерных особенностей распределения электронной концентрации в ионосфере: широтных и суточных градиентов, параметров экваториальной аномалии и ионосферного провала, локальных неоднородностей. Показана возможность восстановления разработанным методом внезапного увеличения среднего или суммарного по всей Земле значения TЕС во время солнечных вспышек.

4. Проведены реконструкции глобального распределения электронной концентрации в ионосфере по реальным данным наземного приема сигналов GPS в различные временные периоды. Приведены реконструкции ионосферы для дня сильнейшей геомагнитной бури 30 октября 2003 года. Получены аномально высокие значения TЕС порядка 220TЕСU в дневное время над Калифорнией. В тоже время, значения TЕС в верхних широтах над Аляской достигают значений, характерных для дневной приэкваториальной ионосферы в невозмущенные периоды. Также приведены реконструкции области экваториальной аномалии для 20 октября 2003 года и главного ионосферного провала для 22 июля 2004 года. Проведенные сравнения данных реконструкций с данными ионозондов и TOPEX-альтиметра показали хорошее качество реконструкций.

5. Предложен метод оценки интенсивности ионизирующего солнечного излучения во время вспышки по данным о скорости изменения среднего ТЕС, полученным с помощью наземного приема сигналов высокоорбитальных навигационных систем. Исследована связь между внезапным увеличением ТЕС во время солнечной вспышки, зенитным углом Солнца данной точки наблюдения и потоками солнечного ультрафиолетового и рентгеновского излучения во время вспышки.
6. Реализован предложенный алгоритм использования данных об интегральном содержании водяного пара в столбе атмосферы в качестве априорной информации при восстановлении параметров атмосферы по данным о профилях показателя преломления, полученных в радиозатменных экспериментах.

*Публикации по теме диссертации.*

1. V. Kunitsyn, V. Zakharov, A. Padokhin, K. Dethloff, A. Weisheimer, M. Gerding, R. Neuber, A. Rinke, I. Hesbestadt. The use of regional models for the correction of reconstruction data in radio occultation experiments. Book of abstracts 2<sup>nd</sup> CHAMP Science meeting. Atmosphere/Ionosphere p. 15, Sep 1-4 2003. GFZ Potsdam.
2. Захаров В.И., Куницын В.Е., Падохин А.М., Методики использования априорной метеорологической информации для рефрактометрии атмосферы. Труды 4-й Всероссийской научной конференции «Физические проблемы экологии (Экологическая физика)», стр. 15, 2004 г.
3. Захаров В.И., Куницын В.Е., Падохин А.М., Возможности рефрактометрии атмосферы при наличии априорной метеорологической информации. Сборник докладов конференции «Ломоносовские чтения. Секция физики», стр. 114 апрель 2005 г.
4. Куницын В.Е., Захаров В.И., Падохин А.М., Использование априорной метеорологической информации в методах восстановления метеопараметров. Сборник докладов XXI Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн», т. 1, стр. 248-252, Йошкар-Ола, 2005 г.
5. Куницын В.Е., Захаров В.И., Падохин А.М., Влияние априорной информации об атмосфере на точность восстановления метеопараметров в радиозатменных экспериментах. Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи, Серия: Научная сессия, посвященная Дню радио, выпуск LX-2, стр. 155, Москва 2005 г.
6. V.I. Zakharov, A.M. Padokhin and E.A. Leont'eva, Reconstruction of refractivity index and meteoroparameters in radio occultation experiments and its comparison with the data of radio sondes. Book of abstracts XIII

- International symposium Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics, D-69, p. 200, Tomsk, 2006.
7. В.И. Захаров, А.М. Падохин, Е.А. Леонтьева, Восстановление показателя преломления и метеопараметров в радиозатменных экспериментах, сравнение с данными радиозондов. Труды X Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах, секция 7», стр. 37 Звенигород, май 2006.
  8. Куницын В.Е., Захаров В.И., Зиенко А.С., Падохин А.М., Леонтьева Е.А. Сравнение погрешностей контактного и радиозатменного методов определения метеопараметров. Электромагнитные волны и электронные системы №8 т. 12, стр. 41-46, 2007
  9. Куницын В.Е., Падохин А.М., Определение интенсивности ионизирующего излучения солнечных вспышек по данным навигационных систем GPS/ГЛОНАСС, Вестник МГУ Физика и Астрономия, №5 стр. 68-71, 2007
  10. Куницын В.Е., Падохин А.М., Ионосферные эффекты солнечных вспышек по данным навигационных систем GPS/ГЛОНАСС, Труды XI Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах, секция 6», стр.22-24, Звенигород, май 2007.
  11. Падохин А.М., Куницын В.Е., Нестеров И.А. Определение интенсивности ионизирующего излучения солнечных вспышек по данным навигационных систем GPS/ГЛОНАСС, стр.171-173, Труды X Конференции молодых ученых "Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы", БШФФ-2007. Изд-во ИСЗФ СО РАН, Иркутск, 2007.
  12. Падохин А.М., Моделирование возможности восстановления глобального распределения ТЕС томографическими методами по данным высокоорбитальных GNSS, .Сборник тезисов конференции «Ломоносов 2007. Секция физики», стр. 51-53, 2007.
  13. V.E. Kunitsyn, E.S. Andreeva, I.A. Nesterov and A.M. Padokhin. Study of Solar Radiation Impact on the Ionosphere by Radiotomography Technique, paper ST09-A0006, Book of Abstracts Asia Oceania Geophysical Society Meeting, Bangkok, 2007
  14. V.E. Kunitsyn, E.D. Tereshenko, E.S. Andreeva, M.O. Nazarenko, I.A. Nesterov, A.M. Padokhin. Tomographic imaging of ionospheric disturbances and wavelike structures, paper ST15-A0003, Book of Abstracts Asia Oceania Geophysical Society Meeting, Bangkok, 2007
  15. Kunitsyn V., Tereshenko E., Andreeva E., Nesterov I., Padokhin A. Radiotomographic studies of ionospheric response to solar activity. p. 65, Book of Abstracts International Heliophysical year 2007: New insights to Solar-Terrestrial Physics, Zvenigorod 2007

### *Список цитируемой литературы*

1. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы, М. Наука, 2007
2. Куницын В.Е., Андреева Е.С., Кожарин М.А., Нестеров И.А., Радиотомография ионосферы с применением высокоорбитальных навигационных систем, Вестник МГУ. Физика и Астрономия, № 1, стр. 74, 2005
3. G. S. Bust, G. Crowley, T. W. Garner, T. L. Gaussiran II, R. W. Meggs, C. N. Mitchell, P. S. J. Spencer, P. Yin, and B. Zapfe Four-dimensional GPS imaging of space weather storms SPACE WEATHER, VOL. 5, S02003
4. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П., GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Институт солнечно-земной физики, Иркутск, Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006.
5. E. L. Afraimovich, E. A. Kosogorov, and L. A. Leonovich, The use of the international GPS network as the global detector (GLOBDET) simultaneously observing sudden ionospheric disturbances // Earth Planets Space, 52, 1077–1082, 2000
6. Tsurutani, B. T., et al., The October 28, 2003 extreme EUV solar flare and resultant extreme ionospheric effects: Comparison to other Halloween events and the Bastille Day event // Geophys. Res. Lett., 32, L03S09, 2005
7. J. Y. Liu, C. H. Lin et al, Ionospheric solar flare effects monitored by the ground-based GPS receivers: Theory and observation // Journal of Geophys. Res, 109, A01307, 2004
8. M.E. Gorbunov and A.S. Gurvich. Remote sensing of the atmosphere using a system of synchronously orbiting satellites. Radio Science Vol 28 Num 4 Pages 595-602 July-August 1993.
9. E.R. Kursinski, G.A Hajj, J.T Schofield, R.P Linfield, and K.R. Hardy. Observing Earth's atmosphere with radio occultation using the Global Positioning System // Journal of Geophysical Research, Vol 102, No D19, Pages 23,429-23,465, october 20,1997.
10. Андреева Е.С., Бербенева Н.А., Захаров В.И., Куницын В.Е., Радиотомографический и радиозатменный методы исследования ионосферы. Радиотехника и электроника, Т.1 №1, стр. 74-80, 2000
11. Andreeva E. S., Franke J.S., Yeh K.C., Kunitsyn V.E. Some features of the equatorial anomaly revealed by ionospheric tomography // Geophys. Res., Lett. 2000.V.27, P. 2465-2468.
12. E. Yizengaw, M.B. Moldwin, P.L. Dyson, E.A. Essex, Using tomography of GPS TEC to routinely determine ionospheric average electron density profiles Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 69, 314–321, 2007