

На правах рукописи

Соломенцев Дмитрий Валентинович

АНСАМБЛЕВАЯ АССИМИЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ИОНОСФЕРЫ

Специальность 25.00.29 –

«Физика атмосферы и гидросферы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико- математических наук

Москва - 2013

Работа выполнена в Федеральном Государственном Бюджетном Учреждении
«Центральная Аэрологическая Обсерватория», г. Долгопрудный

Научный руководитель: Хаттатов Вячеслав Усеинович
Заведующий отделом исследования состава атмосферы ФГБУ «ЦАО», кандидат физико-
математических наук

Официальные оппоненты: Куницын Вячеслав Евгеньевич
Профессор физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, доктор физико-
математических наук

Ляхов Андрей Николаевич
Заведующий лабораторией электродинамических процессов в геофизике Института
Динамики Геосфер РАН, кандидат технических наук

Ведущая организация: Федеральное Государственное Бюджетное
Учреждение «Институт Прикладной Геофизики»

Защита состоится «06» июня 2013 г. в « 11:00» часов на заседании совета Д 002.096.01 по
защите докторских и кандидатских диссертаций Федерального Государственного
Бюджетного Учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М.Обухова
Российской академии наук

Автореферат разослан « 01 » мая 2013 года

Учёный секретарь диссертационного совета Д 002.096.01

кандидат географических наук

Краснокутская Л.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы исследования

Ионосфера Земли, представляющая собой плазму с большим количеством ионизированных и нейтральных компонент, является объектом научных исследований с середины XX века. На данный момент известны общие принципы формирования ионосферной динамики, морфологии и химического состава. Несмотря на это, многие важные параметры ионосферных процессов плохо поддаются изучению в силу отсутствия соответствующих измерений. Этот факт существенно ограничивает области возможного применения существующих физически- обоснованных моделей ионосферы, так как точность полученных с их помощью результатов непосредственно зависит от этих параметров. Однако, помимо численных моделей, основанных на решении гидродинамических уравнений, существуют также модели, построенные на основе статистической обработки большого количества данных наблюдений. Такого рода модели, как правило, с высокой точностью описывают климатологические изменения основных ионосферных параметров, однако, применительно к задачам реального времени, их точность ограничена.

В последние годы существенно возрос практический интерес к исследованиям ионосферы в связи с бурным развитием глобальной системы телекоммуникации, а также широким использованием спутниковых навигационных систем. Точность оценки ионосферных параметров, необходимая для реализации приложений, связанных со спутниковой навигацией, существенно превосходит уровень точности существующих на данный момент моделей (как физически- обоснованных, так и эмпирических). Таким образом, существует научная и практическая необходимость в высокоточной глобальной оценке текущего состояния ионосферы и построению краткосрочного прогноза его изменения.

К настоящему времени российскими и зарубежными учеными был разработан ряд приборов и методов, позволяющих проводить как локальную оценку характеристик ионосферной плазмы, так и распределение этих характеристик над достаточно

обширными регионами. К таким приборам, в первую очередь относятся ионозонды, реперные сети спутниковых навигационных приемников, а так же радары некогерентного рассеяния. Среди методов обработки следует выделить интерполяцию полученных результатов, а так же томографические методы. Результаты разработок и исследований по направлению данной работы (в том числе разработка экспериментальных установок и методик усвоения данных в численных моделях) были отражены в большом количестве статей следующим авторами:

Акасофу С., Чепмен С., Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А.А., Иванов- Холодный Г.С., Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Лившиц М.А., Ришбет Г., Романов А.А., Афраймович Е.Л., Андерсон Д., Бэйли Г., Бэлан Н., Билитца Д., Бюргерс Г., Ивенсен Г., Кодреску М., Фуллер- Роуэлл Т., Фейер Б., Ширлесс Л., Хедин А., Эрнандез- Пахарез М., Хоффман-Велленхофф Б., Хуба Д., Калман Р., Ляхов А.Н., Лоренц Э., Хаттатов Б., Клобучар Д., Шанк Р., Митчелл Г., Пулинец С.А., Куган С.

Ссылки на работы указанных авторов приведены в полном тексте диссертации.

Объект исследования: ассимиляция данных в трехмерную физически-обоснованную модель ионосферы.

Физическая модель ионосферы, взятая за основу в данном исследовании, была разработана Б.В. Хаттатовым и Т. Фуллер- Роуэллом и передана автору диссертации для научных исследований и прикладных разработок, результаты которых приведены в тексте данной диссертации.

Целью данного исследования была разработка ансамблевой ассимиляционной модели ионосферы на базе имеющейся физической модели и оценка возможностей ее использования для исследования состояния ионосферы, а так же проведение расчетов состояния ионосферы с помощью разработанной модели.

Для достижения этой цели, в диссертации были решены следующие **задачи**:

1. Разработана и реализована система сбора и анализа данных о состоянии ионосферы с доступных по каналам интернет серверов наземного сегмента системы навигационной

системы GPS. Система выполняет также сбор и обработку технической информации (орбиты спутников, дифференциальные задержки сигнала), без которой ассимиляция собранных данных была бы невозможна.

2. Разработана и реализована в аппаратно-программном комплексе система ансамблевой ассимиляции экспериментальных данных о полном содержании электронов по трассам распространения радиосигналов, принимаемых наземными станциями навигационной системы GPS, в физическую модель ионосферы.

3. Разработан и реализован метод вычисления параметров ионосферы с помощью ансамблевой ассимиляционной модели в отсутствие прямых наблюдений для этих параметров на примере **ExB**- дрейфа и скорости нейтральных компонент атмосферы. Проведена оптимизация этих программ с применением методов параллельного программирования с целью увеличения оперативность работы системы.

4. Проведено тестирование разработанных алгоритмов и программ в созданном аппаратно-программном комплексе.

5. Проведена валидация расчетов параметров ионосферы с помощью созданной ансамблевой ассимиляционной модели ионосферы с независимых экспериментальными данными.

6. Проведено моделирование состояния ионосферы в выбранные периоды 2011 и 2012 годов. В качестве продукта разработанной системы построены карты распределения полного электронного содержания, а так же рассчитан суточный ход критической частоты в слое F2 для некоторых точек на территории Российской Федерации. Проведено моделирование ионосферы во время геомагнитной бури над территорией Скандинавии. На основе данных моделирования построена картина интегрального электронного содержания в ионосфере вблизи осеннего равноденствия для выявления влияния атмосферных приливов на состояние ионосферы.

7. Оценены точности восстановления **ExB**- дрейфа и скоростей нейтральных компонент атмосферы с помощью ансамблевой системы ассимиляции.

Методы исследования: Для достижения цели работы были использованы методы математического моделирования ионосферы; методы обработки данных, такие как

кластерный анализ; методы Монте-Карло в приложении к задачам фильтрации сигнала; математический аппарат теории вероятностей, математической статистики, гидрогазодинамики и численных методов. Система ассимиляции данных была запрограммирована в среде MatLab.

На защиту выносятся:

1. Ансамблевая ассимиляционная модель ионосферы, позволяющая определять основные параметры ионосферы в области высот 200-800км, а так же значения **ExB**-дрейфа и скоростей нейтральных компонент ионосферы. 2.

Экспериментальный образец аппаратно-программного комплекса, позволяющего оперативно проводить оценку основных параметров ионосферы. 3. Метод оценки ненаблюдаемых параметров ионосферы с помощью ансамблевой ассимиляционной модели. Оценка точности восстановления ненаблюдаемых параметров ионосферы. Результаты оценки полей компонент скорости нейтрального ветра в термосфере. Результаты оценки скоростей переноса заряженных частиц в магнитном поле Земли в приэкваториальной зоне.

4. Результаты расчетов глобальных трехмерных распределений полей электронной концентрации и сравнение этих расчетов с независимыми экспериментальными данными: показаниями ионозондов, данными системы GPS и спутниковой миссии COSMIC/FORMOSAT-3.

5. Результаты моделирования состояния ионосферы в высоких широтах во время геомагнитной бури 26 сентября 2011 года с помощью разработанной ансамблевой ассимиляционной модели.

6. Результаты расчетов интегрального электронного содержания в ионосфере в области осеннего равноденствия 2012 года для мониторинга влияния атмосферных приливов на состояние ионосферы.

Научная новизна работы описывается следующими положениями:

1. Впервые создана ансамблевая ассимиляционная модель ионосферы, позволяющая рассчитывать текущие значения основных параметров ионосферы (трехмерные пространственно временные распределения концентраций электронов и основных ионов

в области высот 200 - 800км), а так же значения **E_xB**- дрейфа и скоростей нейтральных ветров.

2. Впервые для оценки параметров физической модели ионосферы в отсутствии прямых наблюдений применяется техника разложения больших полей на набор Эмпирических Ортогональных Функций, приводящая к существенному сжатию информации. Впервые показано, что эта методика позволяет уменьшить погрешности при восстановлении параметров модели.

3. Впервые с помощью ансамблевой ассимиляционной модели воспроизведена долготная структура поля общего содержания электронов в ионосфере в слое 100-500 км в экваториальной области, позволяющая осуществлять мониторинг влияния атмосферных приливов на ионосферу.

4. Впервые проведена оценка точности ансамблевой ассимиляционной модели при расчете не наблюдаемых параметров ионосферы.

5. Впервые проведены сравнения данных суточного хода критической частоты в ионосфере, рассчитанных по ансамблевой ассимиляционной модели с данными сетевых измерений этого параметра с помощью ионозондов на территории Российской Федерации.

6. Впервые проведены сравнения данных о пространственно-временных распределениях концентрации электронов в ионосфере, рассчитанных по ансамблевой ассимиляционной модели, с данными измерений системой COSMIC/FORMOSAT-3.

Достоверность и обоснованность результатов исследования подтверждается корректностью постановки задачи и апробацией используемых методов. Результаты исследования также подтверждаются статистикой сравнения расчетов разработанной системы с независимыми экспериментальными данными, а так же разработками других авторов.

Практическая ценность разработанной системы ассимиляции состоит в первую очередь, в возможности получения точной оценки состояния ионосферы. Такого рода информация может быть использована в приложениях, связанных со спутниковой навигацией. Задержка радиосигнала, обусловленная прохождением сигнала через

ионосферу и приводящая к появлению погрешности в определении координат, напрямую зависит от количества заряженных частиц вдоль трассы распространения сигнала. Трехмерная ассимиляционная модель ионосферы позволяет с достаточно большой точностью определить эту величину, что может позволить существенно снизить навигационную погрешность одночастотных и двухчастотных навигационных приемников.

Была проведена также **апробация** результатов работы: сделаны доклады на следующих конференциях: Современные Проблемы Дистанционного Зондирования Земли из Космоса (Москва, 2009), Atmosphere Ionosphere Safety (Калининград, 2010), International Summer School on Satellite Navigation (Дания, 2010), Всероссийская Конференция Распространение Радиоволн (Йошкар- Ола, 2011), European Space Weather Week (Бельгия, 2011), 4 ЦНИИ Минобороны (Юбилейный, 2012).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 151 страницы текста, в том числе 76 рисунков. Список используемой в работе литературы содержит 96 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во **введении** к данной работе обозначаются цели и задачи исследования, а так же обосновывается их актуальность. Также приводятся сведения о научной новизне и практической ценности полученных результатов.

В **первой главе** приводится обзор наиболее интересных с точки зрения ассимиляции экспериментальных данных о состоянии ионосферы, а так же нескольких типов ее моделей.

В качестве первого примера экспериментальных данных о текущем состоянии ионосферы рассмотрена сеть реперных станций наземного сегмента системы GPS, как основного источника данных для описываемой в данной работе ассимиляционной схемы. Рассматриваются методы вычисления полного электронного содержания (ПЭС) по данным навигационного сигнала, публикуемым в открытых архивах в формате RINEX. В

этой же главе приведены обоснования выбора этого источника данных для ассимиляции, а именно: заранее известная погрешность измерений, высокая стабильность и оперативность обновления данных и широкая зона покрытия с плотными сетями станций в развитых странах и регионах.

Кроме данных наземного сегмента спутниковой системы GPS, в разделе 1.1 первой главы рассмотрена система наблюдения за состоянием верхней атмосферы COSMIC/FORMOSAT-3, как один из источников данных о пространственном распределении электронной концентрации. Также рассмотрены эмпирические модели ионосферы и решение задачи томографии.

Далее в главе 1 приведено подробное описание физически- обоснованной модели ионосферы, используемой в данной работе. Описываются уравнения, лежащие в основе модели, а так же обсуждаются физические предположения, использованные при выводе этих уравнений из уравнений гидродинамики. В результате преобразований система уравнений модели выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial N_i}{\partial t} - b_s^2 \frac{\partial \left(\frac{N_i V_i}{b_s} \right)}{\partial s} + N_i \nabla_p V_i + V_i \nabla_p N_i = P_i - L_i N_i \\ V_i = \frac{1}{\left(\sum_{\text{нейтр}} v_{in} + \sum_{\text{ионы}} v_{ij} \right)} \left(-g \sin I + \frac{b_s k}{m_i} \left(\frac{T_i}{N_i} \frac{\partial N_i}{\partial s} + \frac{T_e}{N_e} \frac{\partial N_e}{\partial s} + \frac{\partial (T_i + T_e)}{\partial s} \right) + \right. \\ \left. + \sum_{\text{нейтр}} v_{in} (V_n \cos D - U_n \sin D) \cos I + \sum_{\text{ион}} v_{ij} V_j \right) \\ \frac{3}{2} k N_i \left(\frac{\partial T_i}{\partial t} + V_{\perp} \nabla T_i \right) = k N_i T_i b_s^2 \frac{\partial \left(\frac{V_i}{b_s} \right)}{\partial s} - k N_i T_i \nabla V_{\perp} + b_s^2 \frac{\partial}{\partial s} \left(\kappa \frac{\partial T_i}{\partial s} \right) + \frac{3}{2} k N_i V_i b_s \frac{\partial T_i}{\partial s} + Q + F \end{array} \right.$$

Уравнение непрерывности (первое уравнение в системе) представляет собой уравнение непрерывности, где i – номер иона, N_i - концентрация, V_i - скорость ионов, P_i – слагаемое, определяющее источники ионов данного типа, $L_i N_i$ – член, описывающий потери за счет рекомбинации и обмена зарядом, $b_s = \sqrt{1 + 3 \cos^2(\varphi_{\text{dun}})} \left(\frac{R_E}{R_{\text{dun}}} \right)^3$ – результат аналитического перехода к новой системе координат. Координата s , применяемая в этом уравнении, сонаправлена с q . Градиент ∇_p обозначает изменение величины с изменением силовой трубки при постоянных значениях магнитной долготы и

отсчета вдоль силовой линии. Во втором уравнении ν_{ij} и ν_{in} - частоты столкновений ионов с ионами другого типа и частицами нейтральной атмосферы соответственно, I - угол магнитного наклонения, D - угол магнитного склонения, V_n и U_n – соответственно меридиональная и зональная компоненты горизонтальной скорости нейтральных компонент атмосферы, g - ускорение свободного падения, зависящее от высоты. В уравнении баланса энергии слагаемые Q представляет собой эффект изменения температуры за счет столкновения ионов данного типа с нейтральными частицами и ионов других типов, F отвечает за фрикционный нагрев от взаимодействия с нейтральными частицами.

Дальнейшее содержание главы посвящено описанию методик вычисления различных коэффициентов в основных уравнениях, а так же разностных схем, применяемых для их численной аппроксимации. В конце первой главы приведены примеры расчетов численной физически- обоснованной модели, взятой за основу в данной работе. Примером может служить график на рис.1.

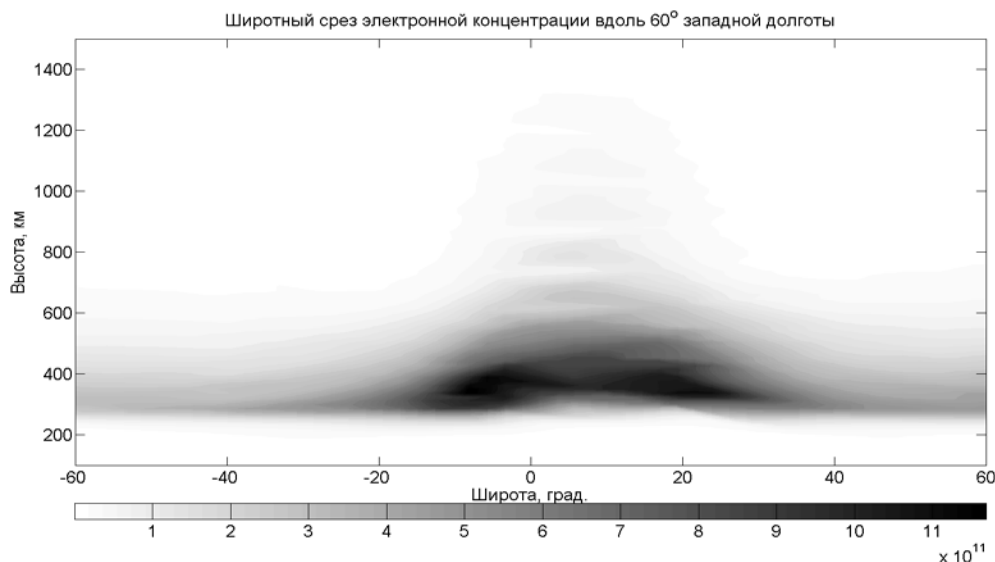


Рис.1. Срез распределения электронных концентраций в ионосфере в проекции широта-высота. Время моделирования 14:30 UTC, 25 сентября 2010.

В главе 2 диссертационной работы обсуждаются теоретические основы ассимиляции экспериментальных данных в физически- обоснованные модели.

Приводится обоснование метода фильтра Калмана применительно к задаче ассимиляции данных в численную модель ионосферы. В силу того, что данная работа затрагивает, в основном ансамблевые методы, приводится также аппроксимация классических уравнений фильтра Калмана с помощью методов Монте-Карло, частично представленная в системе уравнений ниже.

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{M}(\mathbf{x}_k) \\ \mathbf{x}_0^a = \mathbf{x}_0^b + \widehat{\mathbf{K}}(\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}_0^b) \\ \widehat{\mathbf{K}} = \mathbf{P}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \\ \mathbf{P}\mathbf{H}^T \approx \overline{(\mathbf{x}_f - \overline{\mathbf{x}_f})(\mathbf{H}(\mathbf{x}_f) - \overline{\mathbf{H}(\mathbf{x}_f)})^T} \\ \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}^T = \overline{(\mathbf{H}(\mathbf{x}_f) - \overline{\mathbf{H}(\mathbf{x}_f)})(\mathbf{H}(\mathbf{x}_f) - \overline{\mathbf{H}(\mathbf{x}_f)})^T} \end{array} \right.$$

Здесь \mathbf{M} - нелинейный оператор модели, переводящий вектор состояния \mathbf{x} со временного шага k на шаг $k+1$. \mathbf{K} - матрица усиления. Матрица \mathbf{P} - ковариационная матрица вектора состояния, \mathbf{H} - оператор наблюдений. Верхний индекс b представляет результаты расчеты модели, индекс a - результат ассимиляции. Два нижних уравнения представляют собой реализацию аппроксимации уравнений фильтр Калмана методом Монте-Карло.

Обсуждаются технические детали реализации ансамблевого фильтра Калмана применительно к данной системе. Приводится принципиальная схема формирования ковариационной матрицы с помощью ансамбля моделей. В главе 2 также, помимо описания устройства разработанной автором системы ассимиляции, приводится сравнение метода, применяемого автором, с подходом других представителей данного направления, а так же приводятся ссылки на соответствующие источники.

В **третьей главе** диссертационной работы представлены результаты разработанной ассимиляционной модели ионосферы и их сравнение с независимыми экспериментальными данными. В начале главы приводится принципиальная схема всего аппаратно- программного комплекса, включающего в себя систему сбора и обработки

экспериментальных данных, систему ассимиляции и физическую модель ионосферы. Схема приведена на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема потоков данных в разработанной модели ионосферы.

Далее в главе 3 приведены сравнения результатов разработанной модели с независимыми экспериментальными данными. В качестве первого источника данных были взяты станции наземного сегмента системы GPS, случайным образом исключаемые из схемы ассимиляции. Данные, поступающие с этих станций, обрабатывались для вычисления полного электронного содержания вдоль трасс радиовизирования, однако, в схему ассимиляции эти данные не входили. Вместо этого каждый час проводился статистический анализ отклонения результатов моделирования от рассчитанных экспериментальных величин. Результат подобного сравнения приведен на рис. 3.

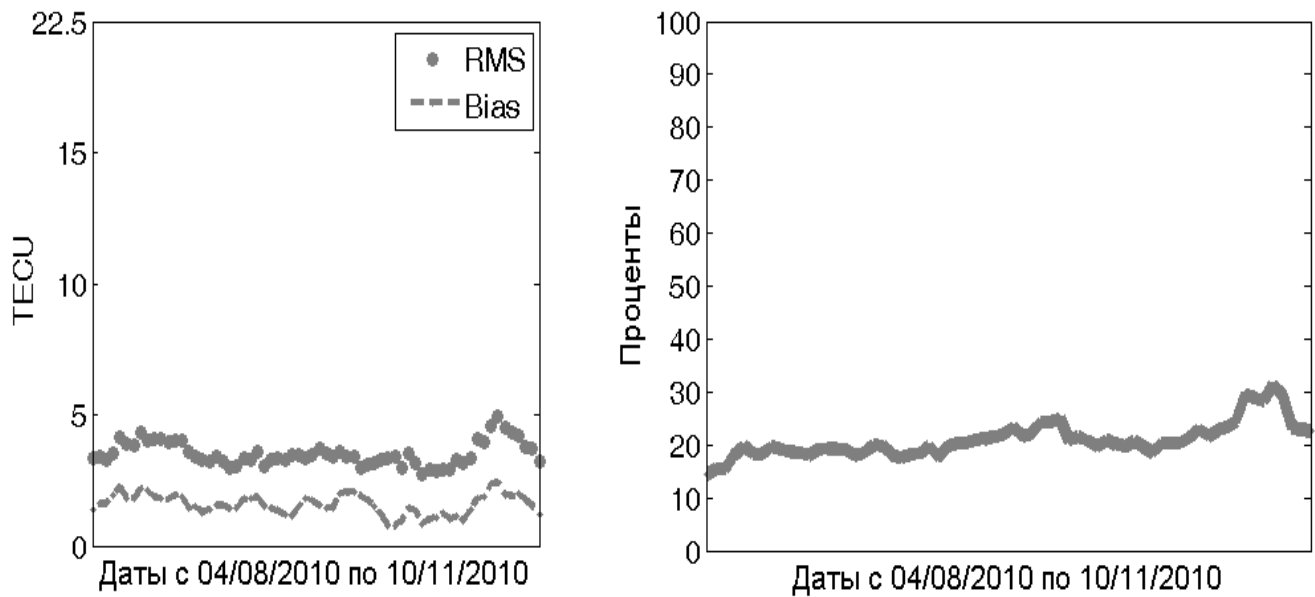


Рис.3. Валидация расчетов модели по данным, не вошедшим в алгоритм ассимиляции. На левом графике изображена абсолютная погрешность, на правом — относительная.

Также в главе 3 приведены результаты сравнения расчетов модели с измерениями сети ионозондов. Ионозонды в городах Москва, Ростов, Салехард, Подкаменная Тунгуска и Магадан принадлежат Институту Прикладной Геофизики Росгидромета. Ионозонды в городах Иркутск и Норильск принадлежат Институту Солнечно- Земной Физики Сибирского Отделения Российской Академии Наук. Сравнения были проведены по параметру критической частоты в слое максимума электронной концентрации. Примером результатов сравнений может служить рис. 4, отражающий отклонение модели от эксперимента для февраля 2012 года для станции Москва.

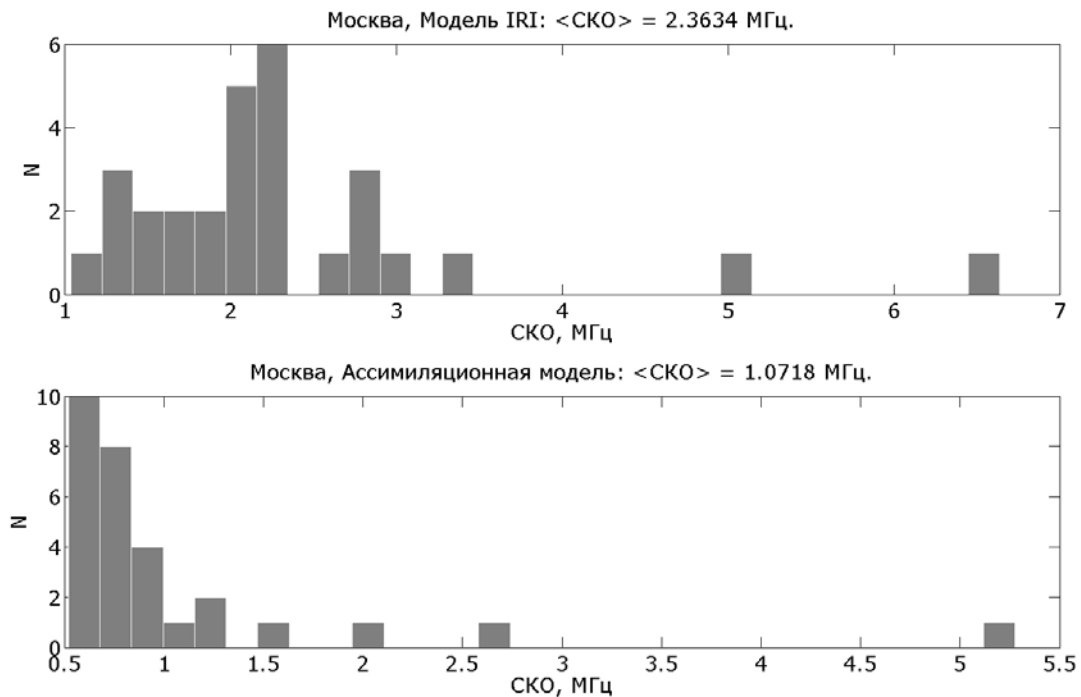


Рис.4. Распределение значений среднеквадратичного отклонения моделей от экспериментального значения foF2 для февраля 2012, Москва. Верхний график- СКО модели IRI, нижний график- СКО ассимиляционной модели от наблюдений.

В диссертационной работе также были приведены сравнения экспериментальных результатов спутниковой миссии COSMIC/FORMOSAT-3 с расчетами ассимиляционной модели. Сравнились наклонные профили электронной концентрации, полученные вдоль траектории движения точки преломления навигационного сигнала, принятого спутником на низкой орбите. Пример подобных сравнений представлен на рис. 5. Помимо непосредственно сравнений моделирования с экспериментом, был проведен разбор основных причин, влияющих на отклонение результатов модели от данных спутниковой миссии.

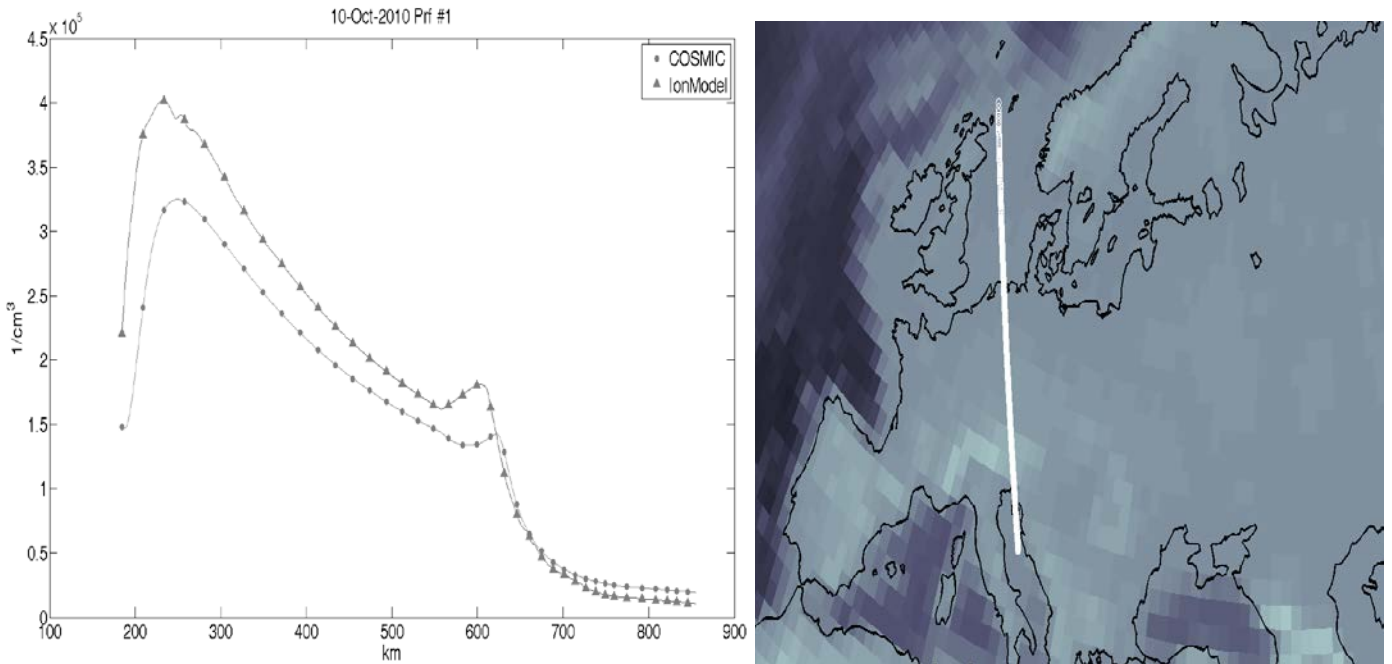
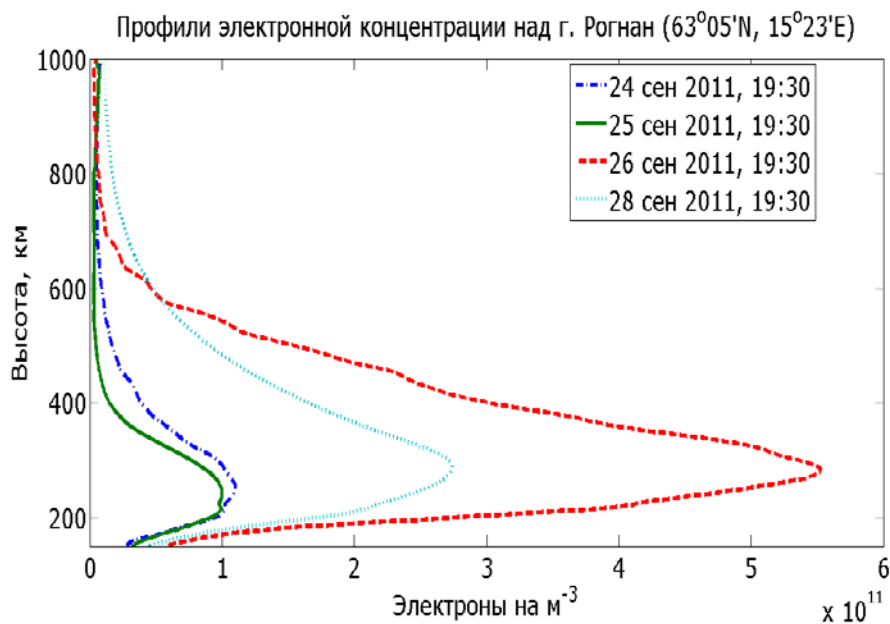


Рис.5. Пример профиля электронной концентрации на 10 октября 2010 года над регионом Западной Европы. Слева- зависимость концентрации электронов от высоты над поверхностью Земли в км. Треугольники- модельные расчеты, зачерченные кружки- экспериментальные данные. Справа- траектория точки измерений над поверхностью Земли.

Помимо воспроизведения ионосферных характеристик в спокойной геомагнитной обстановке, в главе 3 продемонстрировано, что модель также применялась для оценки влияния геомагнитной бури на состояние высокоширотной ионосферы. В частности, были ассимилированы данные с плотной сети навигационных приемников, предоставленные сотрудниками Норвежского Картографического Института. Результаты моделирования оказались в согласии с экспериментальными данными, а так же пятикратное увеличение максимальной электронной концентрации над г. Рогнан во время бури (рис. 6).

Рис.6. Профили электронной концентрации над г. Рогнан в 19:30 для разных дней периода моделирования.



Также в данной главе представлен анализ долготной структуры ночной ионосферы с помощью разработанной ассимиляционной модели (рис. 7). Результаты, полученные с помощью модели для осеннего равноденствия 2012 года, качественно совпадают с результатами других авторов, полученными с помощью обработки данных спутниковых наблюдений COSMIC/FORMOSAT-3.

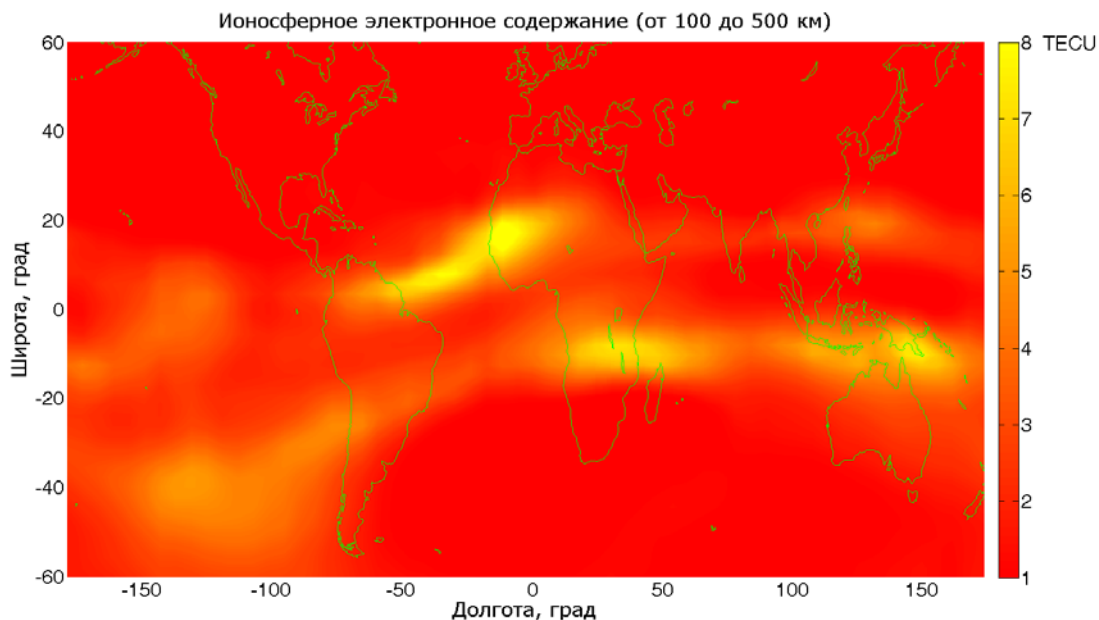


Рис. 7. Распределение ионосферного электронного содержания (вертикальный интеграл электронной концентрации со 100 до 500 км по высоте), полученное по результатам физической модели ионосферы с ассимиляцией данных.

Кроме того, проведен анализ работы физической модели без ассимиляционного блока, в ходе которого выяснено, что, несмотря на учет приливных движений в подключаемой модели нейтральных ветров, численная модель не способна воспроизвести долготную структуру ночной ионосферы.

В **четвертой главе** диссертационной работы приводится подробное описание численного эксперимента по восстановлению параметров ионосферы в отсутствие прямых измерений и моделированию системы наблюдений.

Возможность оценивать параметры системы, ассимилируя только наклонные значения ПЭС, добавляя параметры в контрольный вектор модели, является одним из преимуществ ансамблевой ассимиляции данных. В качестве параметров, влияющих на распределение ионосферных характеристик, были выбраны значения **ExB**- дрейфа на магнитном экваторе и скорости нейтральных компонент атмосферы в точках сетки. В начале главы описана технология расчета скоростей **ExB**- дрейфа и приведена оценка его влияния на распределение результатов моделирования.

Далее в четвертой главе обсуждается возможность дополнения вектора состояния модели параметрами, не являющимися ее прогностическими переменными. В случае с **ExB**- дрейфом значения параметров были добавлены в вектор состояния напрямую. Для сжатия информации о полях нейтрального ветра, представляющей собой большой объем данных, было предложено использование Эмпирических Ортогональных Функций. Суть метода состоит в выделении ортогонального базиса для исходного набора данных и последующей сортировки базисных векторов по убыванию их собственных значений. Использование техники Эмпирических Ортогональных Функций позволило сократить большой объем информации до семи коэффициентов разложения исходных данных по выделенным базисным векторам.

В продолжении главы 4 обсуждается методика моделирования системы наблюдений. Для создания данных, аналогичных реальным, были взяты координаты реальных станций системы IGS (International GNSS Service), а так же орбиты спутников системы GPS. С учетом этой информации были смоделированы траектории распространения

радиосигналов от спутников к приемникам. За реальное состояние ионосферы были приняты расчеты физической модели с определенными значениями подлежащих восстановлению параметров. К результатам расчетов был добавлен шум на уровне 20%, представляющий собой ошибку измерений. Цель этой серии численных экспериментов состояла в оценке погрешностей восстановления значений **ExB**- дрейфа и скорости нейтральных компонент атмосферы с помощью разработанной системы.

На рис. 8 представлены результаты восстановления скоростей **ExB**- дрейфа с помощью различных конфигураций ансамблевой системы ассимиляции данных.

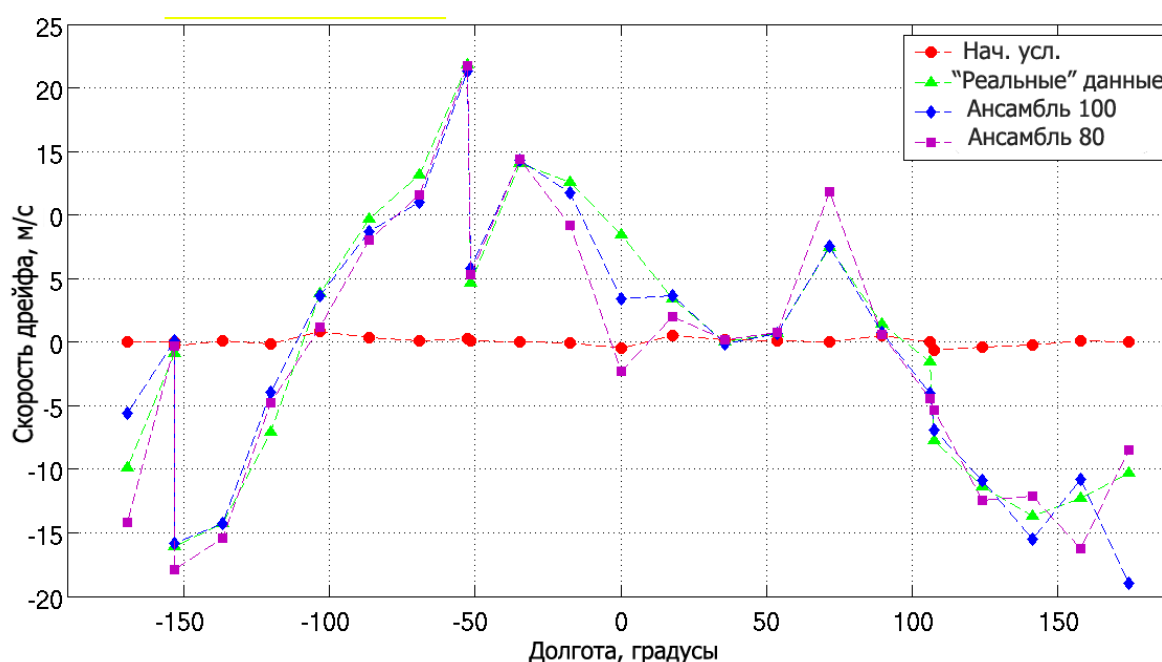


Рис.8. Сравнения результатов численного эксперимента с данными о **ExB**- дрейфе, заложенными в «истинное» состояние ионосферы. Круги- априорно заданное значение дрейфа на первой итерации с добавлением шумовой составляющей. Треугольники- значения дрейфа, заложенные в наблюдения, квадраты- результаты восстановления дрейфа с помощью ансамбля, состоящего из 80 членов. Ромбы- результаты ансамбля со 100 членами.

В диссертации также приведены результаты исследования скорости сходимости ансамблевой ассимиляционной схемы к заложенным в «истинное» состояние ионосферы значениям. Полученные оценки являются важными параметрами при работе с реальными данными.

Помимо оценки точности восстановления скоростей **ExB**- дрейфа, в диссертации представлены оценки точности определения скоростей нейтральных составляющих ионосферы. На рис.9 приведены гистограммы отклонений рассчитанных с помощью ассимиляции значений зональной и меридиональной компонент скорости от заложенных в истинное состояние ионосферы данных.

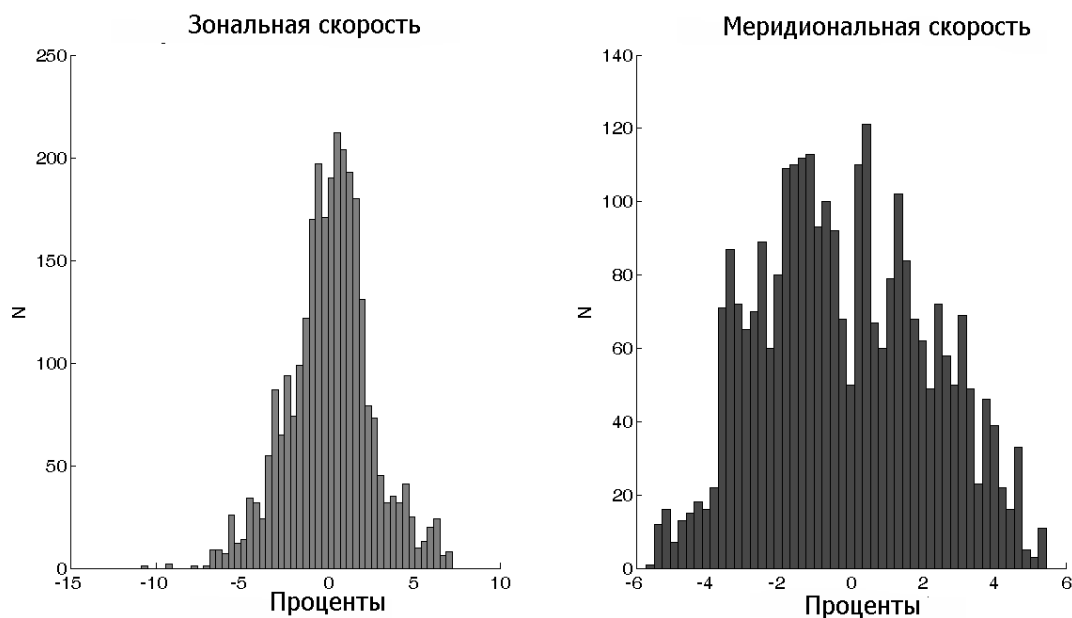


Рис.9. Распределение относительных ошибок восстановления обеих компонент горизонтального ветра с помощью ассимиляционной модели.

В четвертой главе также приведены примеры восстановления значений **ExB**- дрейфа по реальным данным и сравнение этих результатов с климатологической моделью, взятой за начальное приближение. Примером расчетов может служить рис. 10.

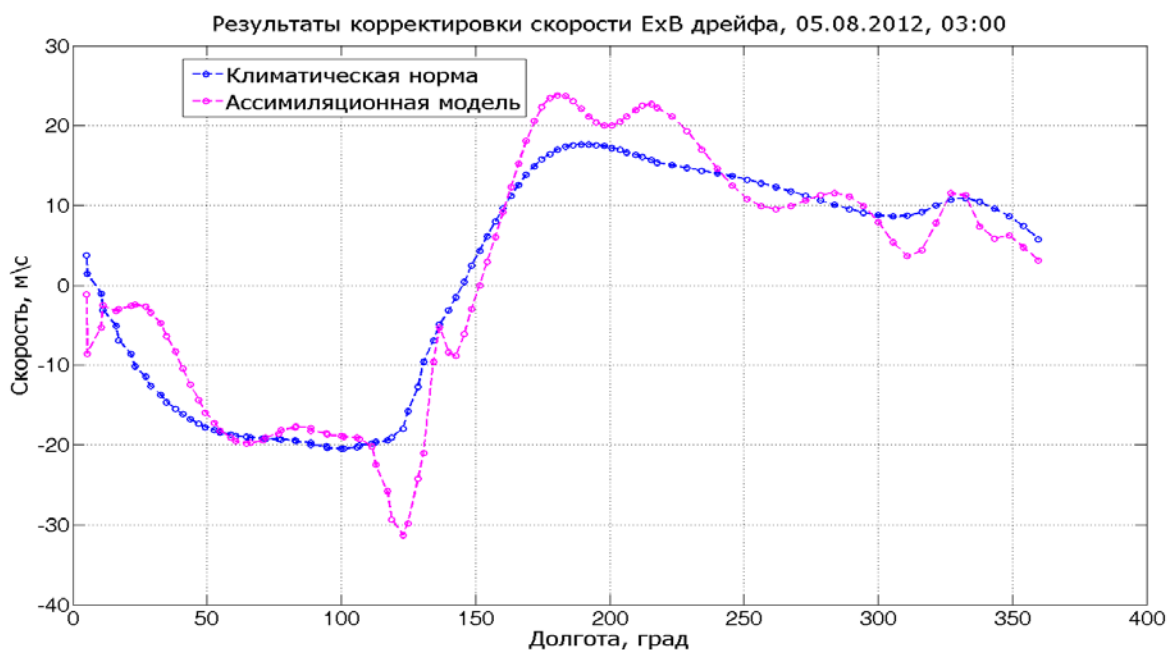


Рис. 10. Значения скоростей **EхВ** – дрейфа, Полученного с помощью ансамблевой модели при ассимиляции реальных данных наблюдений. Линия маркированная квадратами- климатическая норма, кругами- результат корректировки.

В **заклучении** сделаны выводы о решении поставленных задач и достижении целей исследования. В ходе выполнения диссертационной работы были получены следующие результаты:

1. Разработана ансамблевая ассимиляционная модель ионосферы, способная корректировать результаты расчетов физической модели с учетом поступающих экспериментальных данных. Реализован метод ассимиляции данных в ансамбль модельных расчетов, а именно ансамблевый фильтр Калмана и его модификация-ансамблевый фильтр квадратного корня. Оба алгоритма применяются в данной работе в качестве инструментов оценки оптимального состояния системы с учетом расчетов модели и данных наблюдений. Реализован комплекс программ, позволяющих использовать систему ассимиляции в сочетании с моделью ионосферы, взятой за основу в данном исследовании. Разработан комплекс программ для сбора и обработки экспериментальных данных с системы реперных станций спутниковых навигационных систем.

2. Проведено сравнение результатов работы представленной системы с независимыми экспериментальными данными. Проведено сравнение с данными приемников навигационного сигнала, не участвовавшими в системе ассимиляции. Проведены регулярные сравнения результатов расчетов модели с данными спутниковой системы COSMIC/FORMOSAT-3. Проведено сравнение результатов моделирования с показаниями ионозондов на территории Российской Федерации. Сравнение показало, что результаты разработанной модели в среднем ближе к показанию ионозондов, чем результаты эмпирической модели International Reference Ionosphere.
3. С помощью разработанной ансамблевой ассимиляционной модели ионосферы проведены эксперименты по моделированию ионосферы в ряде различных сценариев. В частности, получены результаты моделирования ионосферы в спокойных геомагнитных условиях, отражающие основные характерные черты распределения Полного Электронного Содержания в глобальном масштабе. Также с помощью разработанной модели проведен расчет параметров ионосферы для условий геомагнитной бури в высоких широтах. Проведен анализ долготной структуры ночной ионосферы, полученной с помощью разработанной модели.
4. Построена система моделирования экспериментальных данных о наклонных значениях ПЭС. С ее помощью была проведена проверка разработанной системы на точность восстановления параметров ионосферы в отсутствие прямых наблюдений. Полученные оценки являются показателем надежности работы модели при использовании реальных наблюдений ПЭС для восстановления параметров, для которых регулярные прямые наблюдения отсутствуют: **ExB**- дрейф и скорости нейтрального ветра. В основу методики был положен метод Монте-Карло применительно к решению обратной задачи о восстановлении параметров системы по интегральным наблюдениям.
5. Проведено восстановление параметров ионосферы по реальным данным наблюдений на примере **ExB**- дрейфа. Основываясь на оценке погрешности модели, рассчитанной в численном эксперименте по моделированию системы наблюдений, были выявлены значимые отклонения климатических норм от данных, полученных из реальных наблюдений.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Соломенцев Д.В., Скрипачев В.О., Тертышников А.В., Хаттатов Б.В., Хаттатов В.У., Полушковский Ю.А., Определение ионосферных задержек распространения радиосигналов с помощью трехмерной ассимиляционной модели ионосферы, // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 209-214.

Solomentsev D., Khattatov B., Codrescu M., Titov A., Yudin V., Khattatov V., Ionosphere state and parameter estimation using the Ensemble Square Root Filter and the global three-dimensional first-principle model, SPACE WEATHER, VOL. 10, S07004, doi:10.1029/2012SW000777, 2012.

Соломенцев Д., Хаттатов Б., Титов А., Трехмерная Ассимиляционная Модель Ионосферы Для Европейского Региона, ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ, 2013, том 53, № 1, с. 78–90.

Д.В. Соломенцев, Б.В. Хаттатов, В.У. Хаттатов, Т.В. Банкова, А.А. Титов, Трехмерная ассимиляционная модель ионосферы и возможности ее применения, Труды XXIII Всероссийской Конференции Распространение Радиоволн, Т.1 С.406-411.

Solomentsev, D. V., Khattatov, B.V., Khattatov, V.U., Titov, A.A., “Ionospheric Ensemble-based Data Assimilation System for State and Parameter Estimation”, Abstract Presented at European Space Weather Week, Namur, Belgium, 28 Nov- 02 Dec 2011.

D. V. Solomentsev, B. V. Khattatov, V. U. Khattatov, “Regional Assimilative Ionospheric Model For European Sector”, Atmosphere, Ionosphere, Safety: Book of Abstracts. Ed. I. V. Karpov. P. 102- 104. 2010.