

0-778620

На правах рукописи



Доронина Елена Николаевна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
СПОКОЙНОЙ И ВОЗМУЩЕННОЙ ВЕРХНЕЙ ТЕРМОСФЕРЫ**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Мурманск–2009

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Федерального агентства по рыболовству «Мурманский государственный технический университет» (ФГОУВПО «МГТУ»), г. Мурманск)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
НАМГАЛАДЗЕ Александр Андреевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
ДЁМИНОВ Марат Гарунович

кандидат физико-математических наук
КУЛИКОВ Юрий Николаевич

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный университет
(СПбГУ, г. Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится 29 сентября 2009 г. в 14 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.237.01 при Учреждении Российской академии наук институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН по адресу: 142190 г. Троицк, Московская обл., ИЗМИРАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЗМИРАН

Автореферат разослан "09" июля 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.237.01
доктор физ.-мат. наук

Михайлов

Михайлов Ю.М.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена исследованию физических процессов, протекающих в спокойной и магнитно-возмущенной термосфере Земли, методом математического моделирования с использованием глобальной численной модели верхней атмосферы Земли (термосферы, ионосферы и внутренней магнитосферы Земли как единой системы), и эмпирических моделей состава, теплового режима и горизонтальной циркуляции термосферы Земли.

Актуальность проблемы. Изучение процессов в термосфере Земли имеет большое практическое значение. В последние годы все большее количество спутников выводится на околоземную орбиту. Это и метеорологические, и военные, и научные спутники, а также, спутники глобальных коммуникационных систем и радионавигации. Как известно, любые изменения плотности и температуры нейтрального газа, а так же скорости и направления ветра, которые связаны с вариациями геомагнитной и солнечной активности определяют торможение и время жизни искусственных спутников Земли.

Нейтральная атмосфера, в частности фотоионизация нейтральных компонент солнечным ионизирующим излучением, является причиной существования ионосферы, то любые изменения, происходящие в ее химическом составе, тепловом или ветровом режиме, оказывают влияние на ионный состав и концентрацию электронов в ионосфере, и через это – на условия радиосвязи и радионавигации. В свою очередь, ионосфера передает нейтральному газу энергию солнечного ионизирующего излучения по цепочке фотоны – фотоэлектроны – тепловые электроны – ионы, и энергию солнечного ветра через нагрев токами и дрейфами плазмы, изменяя тепловой режим термосферы и термосферную циркуляцию.

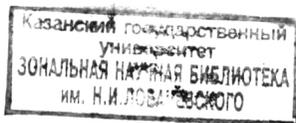
Одним из методов исследования атмосферы является математическое моделирование. С развитием компьютерной техники наиболее актуальным стало развитие глобальных самосогласованных численных моделей, в которых теми или иными численными методами решаются уравнения динамики атмосферы. Теоретические модели позволяют проводить численные эксперименты с учетом, или, наоборот, с исключением из модели различных физических процессов, что позволяет оценивать влияние этих процессов на те или иные атмосферные параметры и интерпретировать экспериментальные данные. Соответственно, для повышения адекватности теоретических моделей, необходимо проводить сопоставление результатов модельных расчетов с результатами наблюдений и данными эмпирических моделей.

Цель диссертационной работы – провести исследование и дать физическую интерпретацию выявленных в последние годы с помощью радарных и спутниковых наблюдений особенностей поведения термосферы Земли, связанных с термосферно-ионосферным взаимодействием, как в спокойных, так и в геомагнитно возмущенных условиях с помощью глобальной численной модели верхней атмосферы Земли UAM (Upper Atmosphere Model), сопоставить полученные результаты с эмпирическими моделями состава и теплового режима термосферы NRLMSISE-00 (Naval Research Laboratory Mass Spectrometer and Incoherent Scatter Extended), или сокращенно MSIS и термосферного ветра HWM93 (Horizontal Wind Model) и экспериментальными данными, и выяснить какие модели наиболее адекватно воспроизводят реальные геофизические условия.

Для достижения цели были поставлены задачи:

1. На основе численных экспериментов с помощью модели UAM определить чувствительность результатов расчетов глобальной динамики термосферы к изменению входных параметров модели, начальных и граничных условий и характеристик пространственно-временной сетки интегрирования.
2. Провести сопоставление основных термосферных параметров, рассчитанных по модели UAM с данными современных эмпирических моделей температуры, плотности, состава нейтральных частиц (MSIS) и скорости термосферного ветра (HWM) и данными измерений как для спокойных условий, так и для периодов конкретных геомагнитных бурь.
3. Для конкретных геомагнитных бурь с помощью модели UAM определить как общие закономерности, так и относительно локальные особенности глобального перераспределения основных параметров термосферы.
4. С помощью модели UAM определить относительный вклад основных причин нагрева и охлаждения термосферы в формирование приэкваториальных минимумов температуры и плотности верхней термосферы в дневные часы на высоте ~ 400 км.
5. Выявить механизм формирования приэкваториальных минимумов температуры и плотности верхней термосферы на дневной стороне.

Для изучения влияния геомагнитно-спокойных и возмущенных условий на динамику термосферы был выбран апрель 2002 года. В этот период произошли сильные магнитные бури, которые были предсказаны заранее из наблюдений за активностью Солнца, и для наблюдения за ними была организована целая международная кампания.



В этот же период времени (2002 год) акселерометром спутника CHAMP проводились измерения плотности нейтрального газа на высотах около 400 км. Измерения выявили ранее неизвестную особенность в глобальном распределении плотности – на дневной стороне в приэкваториальной области был обнаружен ее минимум. Эта и другие особенности поведения термосферы в указанный период времени и явились предметом исследования диссертационной работы.

Метод исследования. Исследование поведения термосферы Земли в геомагнитно-спокойных и возмущенных условиях проводилось методом математического моделирования с помощью глобальной численной физико-математической модели верхней атмосферы Земли UAM, в которой термосфера, ионосфера и внутренняя магнитосфера Земли рассматриваются как единая система. В модели UAM решаются уравнения непрерывности, движения и теплового баланса для нейтральных и заряженных частиц, а так же уравнение для потенциала электрического поля. В модели реализована возможность подключения в виде отдельных модулей эмпирических моделей теплового режима и состава термосферы NRLMSISE-00 и скорости горизонтального термосферного ветра HWM93, что позволяет не только рассчитывать основные термосферные параметры путем решения уравнений, но и получать напрямую из эмпирических моделей.

Научная новизна проведенных исследований определяется как использованием глобальной численной модели верхней атмосферы Земли (UAM) в качестве инструмента исследований глобальной динамики термосферы в комплексе с эмпирическими моделями термосферы и экспериментальными данными о параметрах термосферы, так и результатами, полученными впервые:

1. Для конкретных геомагнитных бурь с помощью модели UAM выделены как общие закономерности, так и относительно локальные особенности глобального перераспределения основных параметров термосферы, включая такие новые свойства термосферы, как формирование приэкваториальных минимумов в глобальном распределении температуры и плотности нейтрального газа на дневной стороне верхней термосферы (~400 км) и зависимость параметров этих минимумов от геомагнитной активности.
2. На основе численных экспериментов с помощью модели UAM впервые определен относительный вклад основных причин нагрева и охлаждения термо-

сферы в формировании приэкваториальных минимумов температуры и плотности верхней термосферы в дневные часы.

3. Впервые предложен механизм формирования приэкваториальных минимумов температуры и плотности верхней термосферы в дневные часы, в котором основную роль играют солнечное ионизирующее излучение, передающее свою энергию нейтральному газу по цепочке фотоны – фотоэлектроны – тепловые электроны – ионы, и суточное вращение Земли, создающие соответствующую приливную структуру.

Практическая значимость результатов работы состоит в том, что они могут быть использованы как для интерпретации данных наблюдений, так и для совершенствования эмпирических моделей верхней атмосферы как параметров, необходимых для вычисления торможения искусственных спутников Земли и других космических аппаратов. Последнее в значительной степени относится к результатам сопоставления модели UAM с моделью NRLMSISE-00.

Достоверность полученных результатов обусловлена физической обоснованностью известных исходных уравнений и принципов, на которых базируется глобальная численная модель верхней атмосферы UAM, согласием результатов расчетов как с данными измерений параметров термосферы, так и с эмпирическими моделями атмосферы, как обобщением экспериментальных данных.

На защиту выносятся:

1. Выявленная степень точности глобальной теоретической модели верхней атмосферы Земли UAM по параметрам верхней термосферы. Установлено, в частности, что погрешности модели UAM сопоставимы с погрешностями современных эмпирических моделей как для спокойных периодов, так и для периодов геомагнитных бурь. При этом UAM, в отличие от модели MSIS, воспроизводит приэкваториальный минимум плотности нейтральных частиц. Термосферная циркуляция по UAM, в отличие от модели HWM, правильно отражает вихревую структуру этой циркуляции в высоких широтах.
2. Установленный относительный вклад основных причин нагрева и охлаждения термосферы в формирование приэкваториальных минимумов температуры и плотности верхней термосферы в дневные часы; оценена относительная роль основных процессов в глобальной перестройке термосферы в период конкретных геомагнитных бурь.

3. Выявленный механизм формирования приэкваториальных минимумов температуры и плотности верхней термосферы на дневной стороне, в котором основную роль играют солнечное ионизирующее излучение, передающее свою энергию нейтральному газу по цепочке фотоны – фотоэлектроны – тепловые электроны – ионы, и суточное вращение Земли, создающие соответствующую приливную структуру.

Личный вклад автора. Автором с помощью модели UAM выполнены модельные расчеты и численные эксперименты по изучению поведения термосферы Земли в геомагнитно-спокойных и возмущенных условиях. По результатам расчетов построены карты глобального распределения и временные вариации основных термосферных параметров, проведен анализ и дана физическая интерпретация полученных результатов. Автор принимала участие в обсуждении, подготовке и написании тезисов, статей и докладов по теме диссертации.

Апробация работы и публикации. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Российских и международных конференциях: Всероссийских научно-технических конференциях "Наука и образование" (Мурманск 2002, 2003); Международных научно-технических конференциях "Наука и образование" (Мурманск 2004, 2005, 2006, 2008, 2009); XXV–XXXI семинарах «Physics of Auroral Phenomena» (Апатиты 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009); European Geosciences Union General Assembly 2006 (Vienna, Austria, 2006); 4th, 5th, 6th и 7th International Conference "Problems of Geocosmos" (Санкт-Петербург 2002, 2004, 2006, 2008); IUGG XXIV General Assembly (Perugia, Italy, 2007).

По теме диссертации опубликована 31 работа, из них 3 статьи в журналах из перечня ВАК, 12 работ в трудах научных конференций и 16 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав и заключения. Работа содержит 123 страницы текста, в том числе 25 рисунков и 18 страниц библиографии, содержащих 213 ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** дана характеристика работы, обоснована актуальность проблемы исследования, сформулированы цель и предмет исследования, кратко изложены полученные результаты, их научная новизна и практическая значимость.

Глава I. Термосфера и методы ее исследования

В **главе I** рассмотрены основные методы исследования термосферы Земли. Раскрыта практическая значимость исследования процессов, протекающих в термосфере. Дана общая характеристика методов исследования термосферы. Описаны: экспериментальные исследования, которые включают в себя непосредственные измерения термосферных параметров с помощью ракет, спутников и радарных установок, их обработку; построенные на базе аппроксимации результатов измерений эмпирические модели, представленные в виде таблиц и формул; теоретические исследования, включающие в себя как построение физических теорий, так и создание на их базе математических моделей верхней атмосферы Земли, основанных преимущественно на численном интегрировании физических уравнений. Проанализированы преимущества и недостатки каждого метода.

Кратко описана теория приливов и влияние приливных движений атмосферы на процессы в верхней атмосфере Земли. В настоящее время для изучения приливных вариаций применяются современные модели верхней атмосферы Земли, учитывающие нелинейные эффекты.

Глава II. Модель верхней атмосферы Земли (UAM)

В **главе II** описана глобальная численная модель верхней атмосферы Земли UAM (Upper Atmosphere Model), которая была разработана в Калининградской обсерватории ИЗМИРАН, ныне Западное Отделение ИЗМИРАН, и модифицирована в Полярном Геофизическом институте (г. Мурманск) и Мурманском государственном техническом университете – повышено пространственное разрешение в высоких широтах и внесен ряд других изменений.

В модели термосфера, ионосфера и внутренняя магнитосфера Земли рассматриваются как единая система. Модель является глобальной и охватывает диапазон высот от мезосферы (~60-90 км, положение нижней границы может

меняться) до геоцентрического расстояния в 15 радиусов Земли (R_E). В ней учитывается несовпадение геомагнитных и географических полюсов. В модели решаются уравнения непрерывности, движения и теплового баланса для нейтральных и заряженных частиц.

Модель состоит из 4 основных блоков:

1. Блок нейтральной атмосферы и нижней ионосферы, в котором рассчитываются температура нейтральной атмосферы, массовая плотность и состав нейтрального газа, ветры, а также температуры молекулярных ионов и электронов, концентрация молекулярных ионов и их скорости на высотах от 60-80 (высота нижней границы зависит от условий поставленной задачи) до 520 км. Нижние граничные условия выбираются исходя из постановки задачи. Через верхнюю границу отсутствуют потоки тепла и импульса. Для компонент основных газовых составляющих задается диффузионное равновесие, с учетом изотермичности.

2. Блок области F2 ионосферы и внешней ионосферы, в котором вычисляются концентрации замагниченных атомарных ионов O^+ и H^+ , их скорости и температуры, а также температура электронов на высотах от 175 км до геоцентрического расстояния $15 R_E$. Граничные условия задаются около оснований линий поля в Северном и Южном полушариях на высоте 175 км. Концентрацию атомарных ионов на границе получают из условия фотохимического равновесия. Предполагается, что линии геомагнитного поля с $L \geq 15$ (L – параметр Мак-Илвейна) разомкнуты и концентрации ионов и потоки тепла равны нулю на геоцентрическом расстоянии $15 R_E$.

3. Блок электрического поля, в котором рассчитывается потенциал электрического поля магнитосферного и термосферного (динамо поле) источников при условии, что силовые линии геомагнитного поля эквипотенциальны на высотах выше 175 км. Ионосферные проводимости, необходимые для решения уравнения для потенциала рассчитываются по стандартным формулам с использованием значений ионосферных и термосферных параметров из первых двух блоков модели.

4. Магнитосферный блок, в котором рассчитываются концентрация ионов магнитосферного плазменного слоя, их скорость, давление и продольные токи зоны 2. В магнитосферном блоке решаются уравнения для магнитосферного плазменного слоя. Магнитосферные электроны считаются холодными и их давление пренебрежимо малым по сравнению с давлением магнитосферных ионов.

Вместо указанных блоков, в модель могут подключаться в виде отдельных модулей эмпирические модели или параметры, рассчитываемые в этих блоках, могут задаваться в виде входных параметров.

Обмен информацией между блоками осуществляется на каждом временном шаге численного решения уравнений модели.

Начальные условия необходимо выбирать достаточно близко к предполагаемому решению исходя из поставленной задачи.

Входные параметры модели: дата, мировое время начала события, общее время события, шаги по времени в шаре и трубке; параметры солнечной активности (F10.7), планетарные индексы геомагнитной активности (A_p , K_p , D_{ST}), авроральные индексы геомагнитной активности (AE, AL, AU); потоки солнечного УФ и КУФ излучения; потоки высыпающихся из магнитосферы энергичных частиц; продольные токи, связывающие ионосферу с магнитосферой; распределение потенциала электрического поля на границе полярной шапки.

В модели UAM уравнения решаются численными методами конечных разностей. В блоке нейтральной атмосферы и нижней термосферы уравнения решаются в сферической геомагнитной системе координат, а в блоке F2-области ионосферы и внешней ионосферы – в магнитной дипольной системе координат. Имеется возможность задавать неравномерные шаги интегрирования по широте и высоте и произвольные постоянные шаги сетки по долготе.

Глава III. Модельные расчеты вариаций термосферных параметров во время геомагнитных бурь 15-20 апреля 2002 года

В главе III представлены описание и анализ численных экспериментов по исследованию термосферных эффектов геомагнитных бурь, произошедших в апреле 2002 года.

Определены цели, задачи и метод исследования, описанного в данной главе. Была поставлена задача – исследовать поведение основных термосферных параметров во время геомагнитных бурь, произошедших в период с 17 по 20 апреля 2002 года, и сопоставить между собой результаты расчетов этих параметров по теоретической модели UAM и по эмпирическим моделям NRLMSISE-00 (далее MSIS) и HWM93 (далее HWM). Для изучения процессов в термосфере в этот период использовался метод математического моделирования. Был проведен ряд численных экспериментов, когда параметры нейтральной атмосферы рассчитывались двумя способами: решением уравнений непрерывности и тепло-

вого баланса (модель UAM) и по эмпирической модели MSIS. В качестве входных параметров использовались индексы солнечной ($F_{10.7}$) и магнитной (A_p , K_p) активности, по данным спутников DMSP задавались значения разности потенциалов через полярную шапку, положение границ овала высыпаний и потоки и энергии высыпающихся частиц.

Расчеты показали, что в *спокойных условиях* абсолютные значения температуры нейтрального газа, рассчитанные по модели UAM и по модели MSIS, близки, но различаются по характеристикам суточных и широтных вариаций. В расчетах по MSIS максимум T_n находится на дневной стороне в приэкваториальной области. В расчетах по UAM максимум T_n находится в дневной высокоширотной области в Северном полушарии, а в низких широтах Южного полушария имеет место *минимум* температуры, отсутствующий во MSIS.

Во время геомагнитных бурь происходит глобальное увеличение температуры нейтрального газа с максимумами T_n в высоких широтах, где почти отсутствует суточная вариация температуры. И во MSIS, и в UAM T_n выше в Северном полушарии, где находится подсолнечная точка, чем в Южном. Буревый эффект, который заключается в увеличении температуры нейтрального газа по всему глобусу, в вариантах расчетов по UAM сильнее, чем по MSIS. Выявлено наличие *суточных вариаций возмущений T_n* (с абсолютными значениями возмущений, большими в ночные часы) в верхней термосфере наиболее заметных на средних широтах. Эти вариации представляют собой приливные волны, которые являются следствием усиления геомагнитной активности и генерируются высокоширотными источниками. В вариантах расчетов по UAM прослеживаются неоднородности возмущений с периодами внутренних гравитационных волн.

Глобальные распределения *концентрации O* во всех вариантах расчетов отличаются от соответствующих распределений температуры нейтрального газа для той же высоты из-за отклонений атомарного кислорода от диффузионного равновесия в нижней термосфере.

В спокойных условиях области повышенного содержания атомарного кислорода во всех вариантах расчетов расположены на дневной стороне в низких и средних широтах. Но в варианте по MSIS максимум концентрации находится вблизи экватора, а по UAM в приэкваториальной области на дневной стороне наблюдается *минимум* концентрации O и два максимума по обе стороны от него. В варианте по MSIS $n(O)$ выше, чем в вариантах по UAM.

С усилением магнитной активности $n(O)$ в средних широтах практически не уменьшается, а низкие широты обогащаются атомарным кислородом. В рас-

четах по UAM $n(O)$ выше в Южном полушарии, а по MSIS оба полушария практически симметричны относительно экватора, таким образом, сезонный эффект лучше заметен в расчетах по UAM. В целом концентрация атомарного кислорода больше в варианте расчетов по MSIS, чем по UAM, а формы изолиний становятся похожими по мере приближения второй бури.

Молекулярный азот хорошо подчиняется барометрическому закону, что подтверждается сходством карт глобального распределения $n(N_2)$ с картами распределения температуры нейтрального газа на этой же высоте и в расчетах по UAM, и по MSIS.

В глобальном распределении $n(N_2)$ в вариантах расчетов по UAM *в спокойных условиях*, как и в температуре нейтрального газа, и концентрации атомарного кислорода, на дневной стороне в низких широтах имеет место *минимум* концентрации. В варианте MSIS аналогичный *минимум* появляется только в период возмущений и смещен в средние широты Южного полушария.

С усилением геомагнитной активности во всех вариантах расчетов карты глобального распределения молекулярного азота становятся схожими между собой по форме изолиний.

Отношения $n(O)/n(N_2)$ в спокойных условиях в высоких и средних широтах Северного полушария и по UAM, и по MSIS примерно одинаковы, а в низких широтах Северного и во всем Южном полушарии оно выше в расчетах по UAM, чем по MSIS. *С усилением геомагнитной активности* отношение концентраций начинает уменьшаться во всех вариантах расчетов, но в расчетах по UAM в высоких и средних широтах Северного полушария $n(O)/n(N_2)$ достигает более низких значений, чем в расчетах по MSIS.

Глобальные распределения **вектора горизонтальной скорости термосферного ветра** в расчетах по UAM и MSIS выявляют в высоких широтах в возмущенных условиях два вихря, отражающие вихревую структуру магнитосферной конвекции и подтверждающие факт ион-нейтрального взаимодействия. В расчетах по HWM есть только один вихрь, что не соответствует действительной физической картине распределения скорости горизонтального термосферного ветра. За весь моделируемый период времени скорость горизонтального термосферного ветра в целом выше в вариантах расчетов по моделям UAM и MSIS и лучше согласуется с наблюдениями, чем в HWM. Модель HWM в возмущенных условиях показывает меньшую зависимость скорости термосферного ветра от геомагнитной активности, чем варианты UAM и MSIS. Во всех вариантах

расчетов в глобальном распределении вектора скорости термосферного ветра прослеживается UT-эффект.

Глава IV. Исследование механизмов формирования приэкваториальных минимумов температуры и плотности нейтрального газа

В главе IV представлен анализ численных экспериментов по исследованию физических механизмов формирования минимумов температуры и плотности нейтрального газа на дневной стороне.

Согласно экспериментальным данным, полученным из измерений плотности нейтральной атмосферы акселерометром спутника CHAMP, в её глобальном распределении на дневной стороне по обе стороны от геомагнитного экватора на высоте около 400 км обнаружены максимумы. В период с 15-24 апреля 2002 года, в течение которого происходили две сильные магнитные бури, в широтном интервале $\pm 87^\circ$ около 0430 и 1530 MLT в плотности нейтрального газа были обнаружены волноподобные структуры с длинами волн 100-1000 км. По данным спутников AE-E и DE 2 в глобальных распределениях температуры нейтрального газа и скорости нейтрального ветра на дневной стороне на экваторе наблюдаются минимумы с максимумами по обе стороны от него. Это явление было названо экваториальной температурной и ветровой аномалией. Авторы, проводившие анализ результатов измерений, отмечают, что широтное распределение плотности нейтрального газа и конфигурация экваториальной температурной аномалии похожи на экваториальную ионную аномалию, что, по их мнению, говорит о сильном влиянии ионосферно-термосферного взаимодействия.

Обнаруженные спутником CHAMP приэкваториальные дневные минимумы плотности нейтрального газа имеют место в расчетах по модели UAM (в полностью самосогласованном варианте) и в спокойных, и в возмущенных условиях, но отсутствуют в расчетах по MSIS (рис. 1). В распределении температуры нейтрального газа в варианте UAM присутствуют аналогичные минимумы и в спокойных, и в возмущенных условиях, а в варианте MSIS появляются только в период возмущений.

Была поставлена задача – определить, какую роль в формировании структуры с минимумом температуры и плотности нейтрального газа на дневной стороне вблизи экватора играют электрические поля, высыпаящиеся из магнитосферы энергичные частицы, ионное трение, а так же другие источники нагрева и охлаждения нейтрального газа.

Плотность нейтрального газа (10^{-12} кг/м³), $h = 400$ км

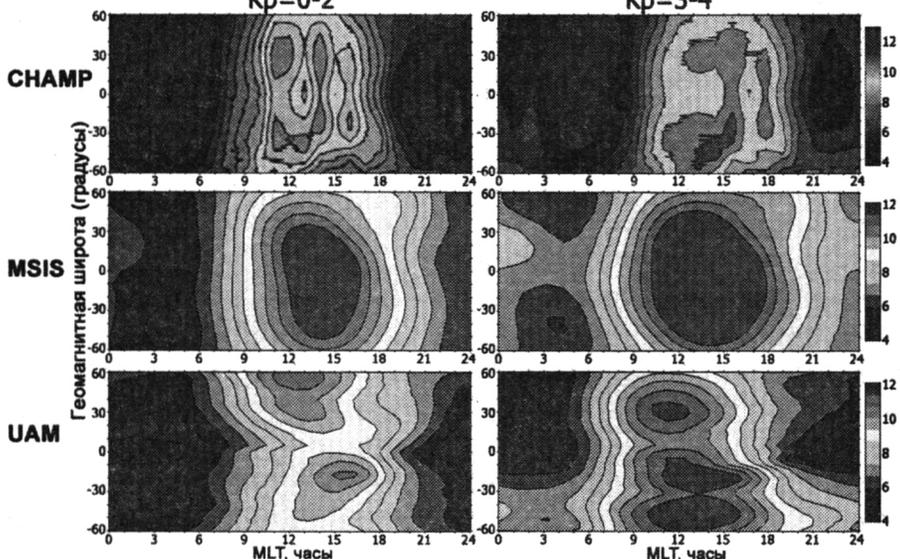


Рис. 1. Широтные вариации плотности нейтрального газа на высоте $h = 400$ км

Для решения поставленной задачи с помощью модели UAM был проведен ряд численных экспериментов. Результаты экспериментов позволили сделать выводы, которые просуммированы в заключительной части главы и состоят в следующем:

1. Установлено, что результаты расчетов по теоретической модели UAM находятся в лучшем согласии с экспериментальными данными, полученными из измерений спутника CHAMP, осредненными за 2002 год, чем результаты расчетов по эмпирической модели MSIS. А именно, в распределении плотности нейтрального газа на высоте 400 км, полученном из результатов расчетов по MSIS, в приэкваториальной области на дневной стороне наблюдается максимум, в то время как, и в экспериментальных данных, и в результатах расчетов по UAM – минимум плотности нейтрального газа.
2. Имеют место волнообразные структуры с периодом порядка суток. Наличие этих крупномасштабных волн не связано с геомагнитной активностью. От ее уровня зависят только амплитудные значения температуры и плотности нейтрального газа.
3. Установлено, что минимумы температуры и плотности нейтрального газа на дневной стороне не связаны с экваториальной аномалией, так как картины

распределения после отключения поля на широтах ниже 30° принципиально не изменились. Глобальное отключение электрического поля и высыпавшихся из магнитосферы энергичных частиц привело только к уменьшению абсолютных значений температуры и плотности, но не повлияло на характер их распределения. Следовательно, экваториальные минимумы не связаны и с высокоширотными (магнитосферными) источниками энергии и импульса – с электрическими полями и высыпавшимися из магнитосферы энергичными частицами.

4. Формирующую роль в образовании приэкваториальных минимумов температуры и плотности нейтрального газа на дневной стороне играют солнечное ионизирующее излучение (наиболее эффективно поглощаемое в термосфере на высотах выше 150-170км) которое по цепочке фотоны – фотоэлектроны – тепловые электроны – ионы нагревает нейтральный газ, и суточное вращение Земли, генерирующие приливную структуру с упомянутым минимумом.
5. Остальные источники нагрева (солнечное диссоциирующее излучение, токи и дрейфы плазмы и тепло химических реакций) и охлаждения (инфракрасное излучение молекул CO_2 , NO и атомов O) нейтрального газа влияют только на абсолютные значения температуры и плотности.
6. Изменение пространственного разрешения (шагов сетки по долготе и широте) и шагов по времени, а так же начальных и нижних граничных условий может оказывать влияние на абсолютные значения термосферных параметров, но не влияет существенно на широтную структуру и периодический характер вариаций температуры и плотности нейтрального газа на высотах 400-410 км.

Результаты основных этапов работы суммированы в выводах к соответствующим главам, поэтому в **заключении** приведены только наиболее важные из них.

Основные результаты работы:

1. На основе численных экспериментов с помощью глобальной модели верхней атмосферы Земли UAM определена чувствительность результатов расчетов глобальной динамики термосферы к изменению входных параметров модели, начальных условий и характеристик пространственно-временной сетки интегрирования, что позволило выделить наиболее устойчивые закономерности этой динамики, включая асимметрию день-ночь в амплитуде изменения параметров термосферы при переходе от спокойных условий к периодам гео-

магнитных бурь, существование двухвихревой структуры термосферных ветров в высоких широтах и экваториального минимума в плотности верхней термосферы.

2. На основе сравнения численной модели верхней атмосферы UAM с современными эмпирическими моделями температуры, плотности, состава нейтральных частиц (MSIS) и скорости термосферного ветра (HWM) и данными измерений как для спокойных условий, так и для конкретных геомагнитных бурь показано, что в целом погрешности модели UAM сопоставимы с погрешностями эмпирических моделей. При этом модель UAM, в отличие от модели MSIS, воспроизводит приэкваториальный минимум плотности нейтральных частиц в верхней термосфере. Термосферная циркуляция по модели UAM, в отличие от модели HWM, правильно отражает вихревую структуру этой циркуляции в высоких широтах.
3. Для конкретных геомагнитных бурь с помощью модели UAM выделены как общие закономерности, так и относительно локальные особенности глобального перераспределения основных параметров термосферы, включая такие новые свойства термосферы как формирование приэкваториальных минимумов в глобальном распределении температуры и плотности нейтрального газа на дневной стороне верхней термосферы (~400 км) и зависимость параметров этих минимумов от геомагнитной активности.
4. На основе численных экспериментов с помощью модели UAM определен относительный вклад основных причин нагрева и охлаждения термосферы в формировании приэкваториальных минимумов температуры и плотности верхней термосферы в дневные часы.
5. Предложен механизм формирования приэкваториальных минимумов температуры и плотности верхней термосферы в дневные часы, в котором основную роль играют солнечное ионизирующее излучение, передающее свою энергию нейтральному газу по цепочке фотоны – фотоэлектроны – тепловые электроны – ионы, и суточное вращение Земли, создающие соответствующую приливную структуру.

Таким образом, в результате проделанной работы были решены поставленные задачи изучения глобальной структуры и динамики термосферы Земли в спокойных и возмущенных условиях методами математического моделирования, выделения на этой основе новых свойств термосферы и интерпретации этих свойств.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Доронина Е.Н., Намгаладзе А.А. Вариации широтно-долготных распределенных термосферных параметров во время геомагнитных бурь 17-20 апреля 2002 года // Вестник МГТУ, т.8, №1, с.120-131, 2005.
2. Доронина Е.Н., Намгаладзе А.А., Гончаренко Л.П. Вариации термосферных параметров над станциями некогерентного рассеяния во время геомагнитных бурь 17-20 апреля 2002 года // Вестник МГТУ, т.8, №1, с.132-143, 2005.
3. Namgaladze A.A., Zubova Yu.V., Namgaladze A.N., Martynenko O.V., Doronina E.N., Goncharenko L.P., Van Eyken A., Howells V., Thayer J.P., Taran V.I., Shpynev B., Zhou Q. Modelling of the ionosphere/thermosphere behaviour during the April 2002 magnetic storms: A comparison of the UAM results with the ISR and NRLMSISE-00 data // Adv. in Space Research, V. 37, Is. 2, 380-391, 2006.
4. Намгаладзе А.А., Намгаладзе А.Н., Доронина Е.Н., Зубова Ю.В. Численное моделирование поведения горизонтальных термосферных ветров в Е-области ионосферы во время сильной геомагнитной бури 31 марта 2001 г. // Материалы Всероссийской научно-технической конференции "Наука и образование-2002", МГТУ, Мурманск, с.513-514, 2002.
5. Namgaladze A.A., Namgaladze A.N., Doronina E.N., Zubova Yu.V. Numerical modeling of the lower thermosphere and ionosphere behavior during the March 31, 2001 magnetic storm // Proceedings of the 4th International Conference "Problems of Geocosmos", Saint-Petersburg, p.172-175, 2002.
6. Namgaladze A.A., Namgaladze A.N., Martynenko O.V., Doronina E.N., Knyazeva M.A., Zubova Yu.V. Numerical modeling of the thermosphere, ionosphere and plasmasphere behaviour during the April 2002 magnetic storms // Proceedings of the 26th Annual Seminar "Physics of auroral phenomena", Apatity, Preprint PGI, pp.74-78, 2003.
7. Намгаладзе А.А., Мартыненко О.В., Зубова Ю.В., Доронина Е.Н., Князева М.А., Намгаладзе А.Н. Математическое моделирование эффектов геомагнитных бурь 17-20 апреля 2002 года в верхней атмосфере Земли // Материалы Всероссийской научно-технической конференции "Наука и образование-2003", часть V, МГТУ, Мурманск, с.74, 2003.
8. Доронина Е.Н., Намгаладзе А.А. Математическое моделирование вариаций температуры и газового состава термосферы в период 15-20 апреля 2002 года // Материалы Международной научно-технической конференции "Наука и образование-2004", ч.5, МГТУ, Мурманск, с.25-28, 2004.

9. Доронина Е.Н., Намгаладзе А.А. Исследование возмущений температуры термосферы во время магнитных бурь 17-20 апреля 2002 года методом математического моделирования // Материалы Международной научно-технической конференции “Наука и образование-2005”, МГТУ, Мурманск, часть 5, с.51-54, 2005.
10. Namgaladze A.A., Doronina E.N., Förster M. The role of electric fields and magnetospheric electron precipitations for the formation of the equatorial total mass density minimum // Proceedings of the 29th Annual Seminar “Physics of auroral phenomena”, Apatity, pp. 238-240, 2006.
11. Doronina E.N., Namgaladze A.A., Förster M. A Model Interpretation of the CHAMP Neutral Mass Density Measurements // Proceedings of the 6th International Conference “Problems of Geocosmos”, St. Petersburg, pp. 58-61, 2006.
12. Доронина Е.Н., Намгаладзе А.А., Фёрстер М. Исследование экваториального минимума плотности термосферы методом математического моделирования // Наука и образование – 2006 [Электронный ресурс]: материалы межд. науч.-техн. конф., Мурманск: МГТУ, с. 346-349, 2006. [НТЦ «Информрегистр» № 0320501517, св. 7081 от 28.11.05г.].
13. Зубова Ю.В., Доронина Е.Н., Намгаладзе А.А., Гончаренко Л.П. Влияние термосферных ветров на поведение F2-слоя ионосферы в период магнитных бурь апреля 2002 года // Наука и образование – 2007 [Электронный ресурс]: материалы межд. науч.-техн. конф., Мурманск: МГТУ, с. 338-345, 2007. [НТЦ «Информрегистр» № 0320700491 от 05.03.07г.].
14. Доронина Е.Н., Намгаладзе А.А. Исследование влияния различных механизмов нагрева и охлаждения на экваториальные минимумы температуры и плотности нейтрального газа в термосфере Земли // Наука и образование – 2008 [Электронный ресурс]: материалы межд. науч.-техн. конф., Мурманск: МГТУ, с. 214-217, 2008. [НТЦ «Информрегистр» №0320800238 от 21.01.08г.].
15. Doronina E.N., Namgaladze A.A. The influence of neutral gas heating and cooling on the day-time equatorial neutral density minimum formation // Proceedings of the 7th International Conference "Problems of Geocosmos", SPbSU, St. Petersburg, p. 70-74, 2008.
16. Доронина Е.Н., Намгаладзе А.А. Роль термосферно-ионосферного взаимодействия в формировании приэкваториальных минимумов температуры и плотности нейтрального газа // Наука и образование – 2009 [Электронный ресурс]: материалы межд. науч.-техн. конф., Мурманск: МГТУ, с. 218-221, 2009. [НТЦ "Информрегистр" № 0320900170].



102

Подписано в печать 03.07.2009. Формат 60x84/16. Печ. л. 0,5.
Заказ 3204. Печать офсетная. Тираж 100 экз.
Отпечатано с готового оригинал-макета
Типография ООО «ТРОВАНТ». ЛР № 071961 от 01.09.99.
142191, г. Троицк Московской обл., м-н «В», д.52.
Тел. (495) 775-43-35, (4967) 51-09-67, 50-21-81