

0 778622

На правах рукописи



Князева Мария Александровна

**НОЧНАЯ F2-ОБЛАСТЬ ИОНОСФЕРЫ И ПЛАЗМОСФЕРА ЗЕМЛИ:
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной 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
МИХАЙЛОВ Андрей Валерьевич

кандидат физико-математических наук, доцент
СУРОТКИН Владимир Андреевич

Ведущая организация:

Учреждение Российской академии наук Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН (ПГИ КНЦ РАН, г. Мурманск)

Защита диссертации состоится 29 сентября 2009 г. в 11 часов 00 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

Ю.М. Михайлов

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000549199

Михайлов Ю.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одним из приоритетных направлений в современной геофизике является прогнозирование космической погоды, позволяющее на основе фундаментальных знаний о процессах, протекающих в верхней атмосфере Земли, предсказывать количественные и качественные изменения в ней в зависимости от гелио-геофизических условий. Для адекватного прогнозирования состояния верхней атмосферы Земли необходимо исследовать особенности термосферно-ионосферно-магнитосферного взаимодействия.

Важным методом исследования и интерпретации экспериментальных данных в последнее время стал метод математического моделирования с использованием численных моделей, позволяющий описывать это взаимодействие, в той или иной степени полноты и адекватности (в зависимости от модели).

Несмотря на многолетние экспериментальные и теоретические исследования явлений и процессов, описываемых в терминах термосферно-ионосферно-магнитосферного взаимодействия, многие стороны этого взаимодействия остаются до конца не выясненными. Одной из таких сторон является проблема *ночных областей повышенной электронной концентрации (ОПЭК)* в F2-области среднеширотной ионосферы и в плазмосфере Земли, не имевшая до сих пор однозначного физического толкования.

Ночные ОПЭК в F2-области среднеширотной ионосферы проявляются в виде максимумов в суточных и широтных вариациях критической частоты F2-слоя (f_oF2), максимальной электронной концентрации ($NmF2$) F2-области ионосферы и полного электронного содержания в столбе единичного сечения (TEC – Total Electron Content). Наблюдались эти повышения во все сезоны (чаще зимой) преимущественно при спокойных геомагнитных условиях и обнаруживались практически всеми основными методами ионосферных измерений.

Наряду с явлением ОПЭК в F2-области среднеширотной ионосферы аналогичные повышения концентрации плазмы имеют место и в ночной плазмосфере Земли. Во все сезоны при различных уровнях солнечной активности профили зависимости ионных концентрации от L -параметра (L – параметр Мак-Илвейна, геоцентрическое расстояние до вершины геомагнитной силовой линии, выраженное в земных радиусах) имеют вблизи плазмопаузы слабо изученные особенности, которые можно охарактеризовать как «структурированную» плазмопаузу. Обнаруживались они с помощью наземных наблюдений свистящих атмосфериков и спутниковых измерений.

До настоящего момента времени измерения, охватывающие одновременно ОПЭК в F2-области ионосферы и в плазмосфере Земли не проводились, а эти два вида повышений не сопоставлялись между собой.

Предлагавшиеся объяснения формирования ОПЭК в основном связывают с переносом замагниченной плазмы посредством нейтрального ветра и электрического поля. Эти интерпретации имели преимущественно качественный характер, либо основывались на результатах, полученных с использованием одномерных математических моделей. Но процессы переноса плазмы в совокупности являются существенно трехмерными, и с развитием компьютерных технологий актуальным стал переход к трехмерному моделированию взаимосвязанных процессов, ответственных за формирование ОПЭК.

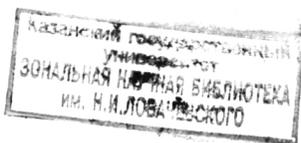
Целью диссертационной работы является трехмерное математическое моделирование областей ОПЭК и изучение на его основе:

- пространственной структуры (широтных, долготных и высотных вариаций этих областей) и механизма формирования ночных областей повышенной электронной концентрации в F2-области среднеширотной ионосферы и в плазмосфере Земли;

- вариаций этих областей в зависимости от сезона, моментов мирового и местного времени, солнечной и геомагнитной активности.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- 1) провести модельные расчеты глобальных трехмерных распределений электронной концентрации при различных гео- и гелиофизических условиях с использованием теоретической модели UAM и эмпирической модели ионосферы IRI-2001 и изучить на их основе пространственную структуру ОПЭК;
- 2) выявить вариации пространственных характеристик ОПЭК в зависимости от местного и мирового времени, сезонов, солнечной и геомагнитной активности;
- 3) провести модельные расчеты глобального распределения электронной концентрации с учетом и без учета ветрового увлечения и электромагнитного дрейфа плазмы;
- 4) определить на основе этих расчетов механизм формирования ночных ОПЭК в F2-области среднеширотной ионосферы и в плазмосфере Земли;
- 5) объяснить вариации ОПЭК на основе установленного механизма их формирования.



Метод исследования. Для исследования проблемы ночных ОПЭК в F2-области среднеширотной ионосферы и в плазмосфере Земли применялся метод математического моделирования с использованием глобальной, трехмерной, нестационарной численной модели верхней атмосферы Земли (UAM – Upper Atmosphere Model), описывающей термосферу, ионосферу, плазмосферу и внутреннюю магнитосферу Земли как единую систему. Модель охватывает диапазон высот от 60 км до $15R_E$ (R_E – радиус Земли) геоцентрического расстояния и учитывает несовпадение геомагнитного и географического полюсов Земли. В модели UAM рассчитываются концентрации основных нейтральных и заряженных компонент атмосферы, температуры и скорости движения нейтрального, ионного и электронного газов, а также электрическое поле магнитосферного и термосферного происхождения путем численного интегрирования системы квазигидродинамических уравнений, описывающих законы сохранения частиц, импульса и энергии (уравнения непрерывности, движения и теплового баланса) и уравнения для потенциала электрического поля.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов диссертационной работы определяются корректностью постановки задач, метода их решения и согласием результатов численного моделирования с аналогичными результатами, полученными по эмпирической модели ионосферы IRI-2001.

Научная новизна настоящей диссертационной работы заключается в следующем.

1. Впервые описана пространственная структура ночных областей повышенной электронной концентрации (ОПЭК) с использованием как теоретической (UAM), так и эмпирической модели ионосферы (IRI-2001) в различных гелиогеофизических условиях (разные сезоны и уровни солнечной активности).
2. Установлен механизм формирования ночных ОПЭК и впервые выявлены особенности влияния процессов переноса ионосферно-плазмосферной плазмы, обусловленные их трехмерностью.
3. Впервые объяснены вариации ночных ОПЭК в зависимости от сезонов, моментов местного и мирового времени, солнечной и геомагнитной активности.

Научная и практическая значимость работы.

Результаты проведенных исследований важны для понимания сложных

взаимосвязанных процессов в системе термосфера-ионосфера-плазмосфера и представляют интерес с точки зрения изучения структуры и динамики ионосферы и плазмосферы Земли. Установление пространственной структуры и механизма формирования ночных ОПЭК в F2-области среднеширотной ионосферы и в плазмосфере Земли позволяет корректировать характеристики распространения радиоволн через ночную ионосферу и правильно интерпретировать спутниковые данные.

Практическую ценность имеют полученные результаты и для развития самого метода математического моделирования, а именно их можно использовать для тестирования других теоретических моделей в части адекватного воспроизведения поведения ночной F2-области ионосферы и плазмосферы Земли.

Результаты исследования могут найти применение в задачах космической навигации, радиолокации и связи, в учебных курсах и пособиях к ним по физике плазмы и космической геофизике.

На защиту выносятся:

- 1) Описание пространственной структуры ночных областей повышенной электронной концентрации (ОПЭК) в F2-области среднеширотной ионосферы и плазмосфере Земли, полученное на основе анализа результатов наблюдений и численного моделирования. Выявлено существование двух типов ОПЭК в широтно-долготном распределении максимальной электронной концентрации в F2-области ионосферы ($NmF2$): *зимнего* с максимумами в широтной и суточной вариациях $NmF2$ и *летнего* с максимумом только в широтной вариации. ОПЭК обоих типов простираются вдоль силовых линий геомагнитного поля в плазмосферу Земли.
- 2) Механизм формирования ОПЭК, основанный на влиянии широтно-неоднородных потоков плазмы из плазмосферы и ветровом увлечении ионосферной плазмы термосферным ветром.
- 3) Объяснения наблюдаемых сезонных и в цикле солнечной активности вариаций ОПЭК на высотах F2-области ионосферы.

Личный вклад автора. Автор участвовала в постановке задач, провела теоретические расчеты с использованием модели UAM (во всех ее версиях), разработала методику расчета глобальных распределений максимальной концентрации электронов в F2-области ионосферы по данным IRI-2001. Ею были проведены обработка, анализ и сопоставление результатов модельных расчетов ме-

жду собой. Автор диссертации принимала участие в обсуждении и подготовке публикаций полученных результатов, вошедших в диссертационную работу.

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

Материалы диссертации были доложены и обсуждены на рабочем семинаре в КНЦ ПГИ РАН (г. Апатиты, Мурманская обл.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 28 работы, из них 1 статья в журнале из перечня ВАК, 15 работ в трудах научных конференций и 12 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения. Работа содержит 105 страницы текста, в том числе 23 рисунка и 1 таблица. Список цитируемой литературы содержит 139 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность темы исследования, сформулирована цель работы, приводятся сведения о научной новизне и практической значимости полученных результатов, кратко изложены структура и содержание диссертации.

В **первой главе** представлен обзор опубликованных работ по экспериментальным и теоретическим исследованиям ночных повышений концентрации плазмы в F2-области среднеширотной ионосферы и в плазмосфере Земли.

На основе обобщения и систематизации экспериментальных данных по этим повышениям сделаны выводы, что: 1) ночные повышения $NmF2$ и TEC (в

1,2+8 раз) и концентрации плазмы в плазмосфере (в 1,3+5 раз) обнаруживались практически всеми основными методами ионосферных и плазмосферных измерений; 2) наиболее часто и с большей амплитудой эти повышения наблюдались в зимних невозмущенных условиях при низкой солнечной активности.

Наиболее часто привлекаемыми механизмами формирования ночных повышений $NmF2$ и TEC являются а) подъем нейтральным ветром плазмы вверх, в область более низких скоростей ее химических потерь, и б) перенос плазмы западным электрическим полем в силовые трубки геомагнитного поля меньшего объема. Однако в последнем механизме не учитывается, что: 1) при переносе западным полем на более низкие широты, плазма переносится вниз, в область более высоких скоростей ее химических потерь; 2) усиления такого поля не имеют четкого обоснования.

Использование одномерного математического моделирования для исследования процесса формирования ночных повышений $NmF2$ и TEC (т.е. система квазигидродинамических уравнений для заряженных компонент ионосферы интегрировались либо по вертикали, либо вдоль выбранной силовой линии геомагнитного поля) является некорректным. Процессы переноса ионосферной плазмы являются существенно трехмерными и необходимо решать трехмерную систему уравнений, описывающих поведение заряженных частиц на высотах F2-области ионосферы и плазмосферы Земли, вдоль всей совокупности замкнутых силовых линий геомагнитного поля.

Во **второй главе** дано описание глобальной нестационарной численной модели верхней атмосферы Земли (UAM – Upper Atmosphere Model), используемой для расчетов глобальных распределений электронной концентрации. Модель описывает термосферу, ионосферу и плазмосферу как единую систему, охватывая диапазон высот от 60–80 км до геоцентрического расстояния в $15R_E$ (R_E – радиус Земли), и учитывает несовпадение геомагнитного и географического полюсов Земли. В ней численно интегрируются методом конечных разностей уравнения вида:

$$\partial n_\alpha / \partial t + \nabla(n_\alpha V_\alpha) = Q_\alpha - L_\alpha, \quad (1)$$

$$\rho_\alpha [dV_\alpha / dt + \Omega \times (\Omega \times r) + 2 \cdot \Omega \times V_\alpha] = F_\alpha, \quad (2)$$

$$\rho_\alpha c_{va} dT_\alpha / dt + p_\alpha \nabla V_\alpha = \nabla(\lambda_\alpha \nabla T_\alpha) + P_{Q_\alpha} - P_{L_\alpha} + P_{T_\alpha}, \quad (3)$$

совместно с уравнением для потенциала электрического поля φ :

$$\nabla[\sigma(\nabla\varphi - V \times B) - j_m] = 0, \quad (4)$$

где нижние индексы $\alpha=n, i, e$ обозначают нейтральный, ионный и электронный газы, соответственно; n_α и ρ_α – концентрация частиц и массовая плотность α -

газа; V_α – направленная макроскопическая скорость α -газа относительно вращающейся Земли; Q_α и L_α – скорости образования и потерь частиц α -газа за счет фотохимических процессов, соответственно; Ω – вектор угловой скорости вращения Земли; r – радиус-вектор от центра Земли; F_α – результирующая сила, действующая на единицу объема α -газа; c_{va} , λ_α , T_α и p_α – удельная теплоемкость при постоянном объеме, теплопроводность, температура и давление α -газа, соответственно; $P_{Q\alpha}$ и $P_{L\alpha}$ – скорость нагрева и охлаждения α -газа, соответственно; $P_{T\alpha}$ – теплообмен между α -газом и другими газами; $\hat{\sigma}$ – тензор ионосферной проводимости; V – скорость среднемассового движения нейтрального газа; j_m – плотность магнитосферного тока.

Модель UAM состоит из 4-х блоков: 1) блок нейтральной атмосферы и нижней ионосферы (диапазон высот от 60–80 км до 520 км); 2) блок F2-области ионосферы и плазмосферы (от 175 км до геоцентрического расстояния в $15R_E$); 3) блок расчета электрического поля; 4) магнитосферный блок. В блоке 1 используется сферическая геомагнитная система координат, в блоке 2 – магнитная дипольная система координат.

В уравнениях (1)–(3) учитываются фотодиссоциация нейтральных кислородных компонент, фотоионизация прямым и рассеянным солнечным излучением, вторичная и корпускулярная ионизация нейтральных частиц, ионно-молекулярные реакции, диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов, зарядо-обменные реакции и процессы переноса (амбиполярная диффузия, ветровое увлечение, ион-ионное трение и электромагнитный дрейф) для атомарных ионов, молекулярная и турбулентная диффузии, нейтрал-ионное и вязкое трения, нагрев солнечным излучением и выпадающими из магнитосферы энергичными электронами, теплопроводность, Джоулев нагрев, нагрев нейтрального газа за счет химических реакций и охлаждение за счет излучения. Учет эффектов трехмерности переноса замагниченных атомарных ионов осуществляется путем использования лагранжевого подхода применительно к движениям плазмы вдоль траектории электромагнитного дрейфа.

Для вычисления части параметров нейтральной атмосферы могут быть использованы эмпирические модели термосферы NRLMSISE-00, горизонтальных термосферных ветров HWM-93, для ионосферы и плазмосферы – модель ионосферы IRI-2001.

Входными параметрами являются: дата и момент времени UT начала расчета события; спектры солнечного ультрафиолетового (УФ) и крайнего ультра-

фиолетового (КУФ) излучения, зависящие от солнечной активности; потоки выпадающих из магнитосферы энергичных электронов; продольные токи, связывающие ионосферу с магнитосферой, или распределение потенциала электрического поля на границе полярной шапки; индексы геомагнитной активности.

В проводившихся численных экспериментах шаги интегрирования по высоте менялись от 3 км на высотах ниже 100 км до 30 км на высотах около 400 км и далее нарастали в геометрической прогрессии, по геомагнитной долготе – были постоянными и равными 15° , по геомагнитной широте – переменными: наибольшие шаги (5°) в окрестностях экватора, наименьшие (2°) в окрестностях авроральной зоны. Шаги интегрирования по времени были постоянными и равнялись 1 или 2 минутам.

Граничные условия формулируются из физических предположений или экспериментальных данных.

В качестве начальных условий для спокойных периодов используются квазистационарные решения уравнений (1)–(4), полученные в ходе многократных расчетов параметров верхней атмосферы для одних и тех же суток; для возмущенных – результаты расчетов для предыдущих спокойных суток. Альтернативный способ – использование соответствующих эмпирических моделей (MSISE, HWM и IRI).

В **третьей главе** представлены результаты исследований пространственной структуры ночных ОПЭК и их вариаций в зависимости от различных гелиогеофизических условий по данным наблюдений (по эмпирической модели ионосферы IRI) и теоретического моделирования (по самосогласованной версии модели UAM, далее UAM-ТТ) для восьми дат, характеризующих различные сезоны при разных уровнях солнечной активности.

На основе анализа полученных широтно-долготных распределений $NmF2$ установлено, что существуют два типа ОПЭК (рис. 1). В летнем полушарии изолинии ОПЭК представляют собой «хребет с понижающейся вершиной» (значения $NmF2$ монотонно убывают при переходе от вечерних часов к утренним), в зимнем – изолинии ОПЭК представляют собой «холмы» (имеются максимумы значений $NmF2$, вокруг которых замыкаются изолинии электронной концентрации). Зимний ОПЭК проявляется в виде максимумов в широтной и в суточной вариациях $NmF2$, летний – в виде максимума только в широтной вариации. В широтных вариациях амплитуды повышений $NmF2$ в ОПЭК зимой выше. В суточных вариациях амплитуды повышений меньше, чем в широтных.

Анализ аналогичных карт для других дат и моментов UT показывает, что в

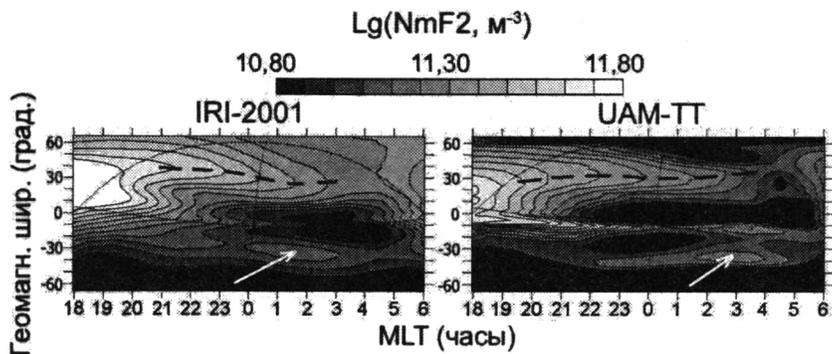


Рис. 1. Рассчитанные по IRI-2001 и UAM-TT глобальные карты $Lg(NmF2)$ в ночном секторе MLT для условия солнцестояния (23.06.1986, 18:00 UT) при низкой солнечной активности. Пунктиром нанесены полуночный меридиан, линия терминатора и географический экватор. Стрелки указывают на зимние ОПЭК по типу «холма», штриховые линии – на летние ОПЭК по типу «хребта с понижающейся высотой».

в южном геомагнитном полушарии IRI-2001 воспроизводит ОПЭК значительно хуже, чем в северном. Это, по-видимому, объясняется гораздо меньшим числом пунктов регулярных ионосферных наблюдений в южном полушарии по сравнению с северным.

В широтно-высотных распределениях электронной концентрации ОПЭК обоих типов протягиваются вверх по силовым линиям геомагнитного поля до высот плазмосферы, проникая в нее (рис. 2). Анализ численных результатов показывает, что эти области простираются в плазмосферу вплоть до 8000 км.

Сезонная вариация ОПЭК проявляется в типе формируемого ОПЭК (летнего – по типу «хребта», зимнего – по типу «холма») и асимметрии широтного положения этих областей и значений $NmF2$ в них.

Найдено наличие LT-вариации ОПЭК, смешанной с UT-эффектом (из-за несовпадения геомагнитной и географической осей Земли) и сезонной вариаций, проявляющейся в смещении этих областей по геомагнитной широте при переходе от вечерних часов к утренним (возможны смещения как на более низкие широты, так и на более высокие).

Влияние солнечной активности на ОПЭК проявляется в том, что: 1) при высокой солнечной активности значения $NmF2$ в ОПЭК выше, чем при низкой; 2) в зимних условиях при низкой солнечной активности ОПЭК выражены отчетливее,

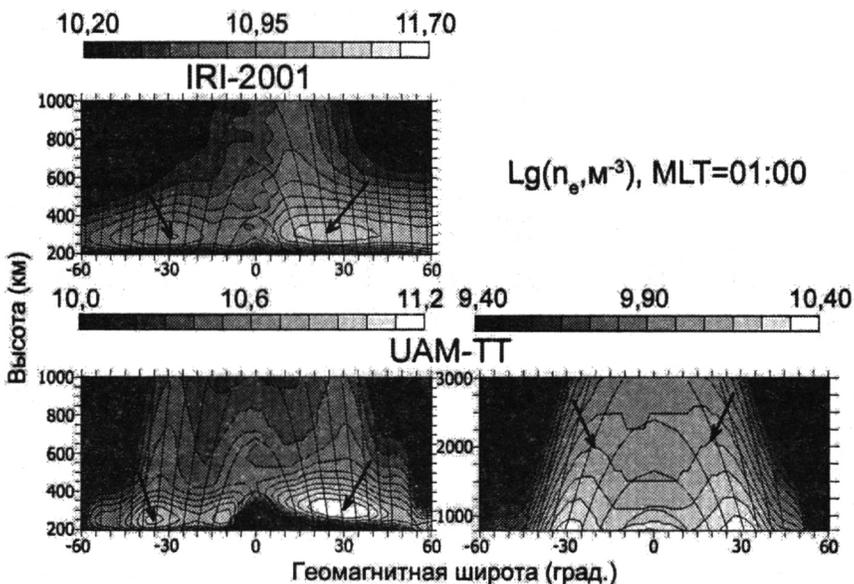


Рис. 2. Рассчитанные по IRI и UAM-TT широтно-высотные распределения $Lg(n_e)$ вдоль ночного меридиана $MLT=01:00$ для высот $h=200+800$ км (левый столбец) и высот $h=800+3000$ км (правый столбец) для условия солнцестояния (23.06.1986, 18:00 UT). Помимо изолиний $Lg(n_e)$ нанесены силовые линии геомагнитного поля. Стрелки указывают на ОПЭК.

чем при аналогичных условиях при высокой.

Зависимость ОПЭК от геомагнитной активности исследовалась на примере геомагнитных бурь 17-20 апреля 2002 года. Модельные расчеты проводились в двух вариантах: 1) UAM совместно с эмпирической моделью термосферы NRLMSISE-00 (UAM-MSIS) и 2) полностью самосогласованный вариант UAM-TT.

На основе анализа, полученных ночных меридиональных разрезов электронной концентрации установлено, что влияние геомагнитной активности на ОПЭК проявляется в уменьшении значений n_e в ОПЭК и высоты, до которой эти области простираются вдоль силовых линий геомагнитного поля, сопровождающееся сжатием их с полюсов во время отрицательных ионосферных бурь.

В четвертой главе представлены результаты исследования механизма формирования ночных ОПЭК в среднеширотной F2-области ионосферы и в плазмосфере Земли.

Для исследования влияния ветрового увлечения ионов и электромагнитного дрейфа плазмы на процесс формирования ОПЭК были проведены расчеты глобальных распределений электронной концентрации (n_e) по модели UAM-MSIS, в которых: 1) последовательно отключались нейтральный ветер и электромагнитный дрейф; 2) меридиональный ветер в ночном секторе MLT полагался направленным к экватору и постоянным (расчеты проводились для значений 0, 10, 50 и 100 м/с); 3) разность потенциалов поперек полярной шапки полагалась постоянной (20 и 60 кВ).

Для исследования влияния начальных условий на результаты моделирования процесса формирования ОПЭК были проведены расчеты глобальных распределений n_e по модели UAM-TT, стартовавшие от симметризованных широтно-однородных начальных условий, в которых полагались: 1) состав и температура нейтрального газа были рассчитаны по MSIS и симметризованы относительно геомагнитного экватора; 2) ионосфера и плазмосфера были опустошены. В ходе расчета глобальные распределения параметров термосферы не менялись, географическая и геомагнитная оси Земли были совмещены, термосферный ветер и электромагнитный дрейф отключены, интенсивности потоков выпадающих из магнитосферы энергичных электронов были равны нулю.

На основе анализа полученных глобальных карт распределений f_oF2 , $NmF2$, TEC , меридионального ветра на высоте 300 км, зонального электрического поля на высоте 175 км, продольных (вдоль силовых линий геомагнитного поля) потоков ионов H^+ на высоте 1000 км и меридиональных разрезов n_e было установлено следующее.

1) Среднеширотные ОПЭК формируются только в вариантах расчетов с термосферным ветром (рис. 3, сплошные стрелки на двух верхних меридиональных разрезах n_e), без ветров эти области отсутствуют. На разрезах, полученных в расчетах без дрейфа, на субавроральных широтах формируются на субавроральных широтах $\sim 55^\circ$ области, подобные среднеширотным ОПЭК (рис. 3, пунктирные стрелки на двух правых разрезах). Аналогичный результат получен после первых суток интегрирования без учета дрейфа и ветра, стартовавших от широтно-неоднородных начальных условий (рис. 4, сплошные стрелки). То есть, в случае, когда плазмосфера в начальном состоянии опустошена, ее эффективность как источника поддержания ночной F2-области ионосферы максимальна на субавроральных широтах за счет особенностей геометрии силовых линий геомагнитного поля. Дальнейший процесс заполнения плазмосферы приводит к

16.04.2002

$Lg(n_e, \text{м}^{-3}), \text{MLT}=01:00$

UT=24:00

10,2 11,2 12,2

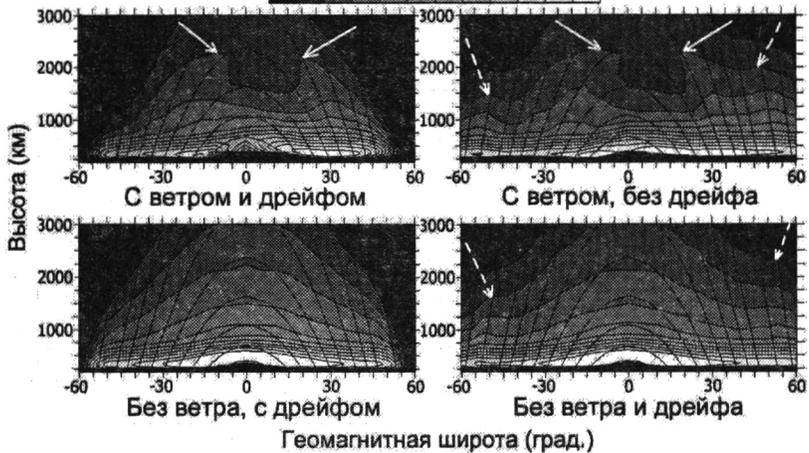


Рис. 3. Рассчитанные по UAM-MSIS широтно-высотные распределения $Lg(n_e)$ вдоль ночного меридиана $\text{MLT}=01:00$ для высот $h=200+3000$ км для 24:00 UT 16.04.2002. Помимо изолиний $Lg(n_e)$ нанесены силовые линии геомагнитного поля.

развитию среднеширотных ОПЭК на геомагнитных широтах $\sim 40^\circ$ (рис. 4, пунктирные стрелки на правом разрезе). То есть, по мере заполнения плазмосферы максимум ее эффективности смещается на средние широты. Учет ветрового увлечения ионов вдоль в ночные часы усиливает степень выраженности среднеширотных ОПЭК в широтном ходе n_e и определяет их долготную и LT- вариации.

2) Горизонтальная составляющая ветрового увлечения ионов совместно с потоками плазмы из плазмосферы перераспределяет ОПЭК, смещая их по широте относительно максимума вертикальной составляющей ветрового увлечения ионов.

3) Электромагнитный дрейф определяет положение и крутизну высокоширотной и приэкваториальной «стенок» ОПЭК. Высокоширотную стенку он смещает к экватору пропорционально величине электрического поля магнитосферного происхождения, за счет смещения на более низкие широты главного ионосферного провала, приводя к исчезновению субавроральных ОПЭК. На низких широтах в ночное время электрическое поле динамо-происхождения разрушает экваториальную аномалию, заполняя провал над геомагнитным экватором и оказы-

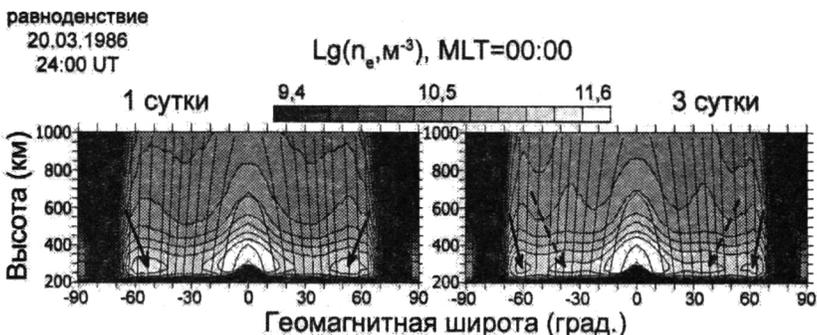


Рис. 4. Рассчитанные по UAM-ТТ широтно-высотные распределения $Lg(n_e)$ вдоль ночного меридиана $\text{MLT}=00:00$ для высот $h=200+1000$ км для 24:00 UT 20.03.1986. Помимо изолиний $Lg(n_e)$ нанесены силовые линии геомагнитного поля.

вая тем самым влияние на приэкваториальные «стенки» ОПЭК.

Для исследования вариаций ОПЭК в зависимости от гелио-геофизических условий были проведены расчеты для отобранных восьми дат, относящихся к спокойным геомагнитным условиям и представляющих четыре сезона при высокой и низкой солнечной активности по различным версиям модели UAM: 1) самосогласованной версии UAM; 2) UAM с MSIS; 3) UAM с MSIS и HWM. Для исследования влияния геомагнитной активности на ОПЭК рассматривались модельные расчеты для периода геомагнитных бурь 17-20 апреля 2002 года, описанные в главе 3. Все варианты модельных расчетов отличаются способом вычисления скорости термосферного ветра и состава нейтрального газа.

Установлено, что вариации ОПЭК в зависимости от сезона и солнечной активности обусловлены соответствующими вариациями меридиональной составляющей термосферного ветра. Влияние геомагнитной активности на ОПЭК обусловлено изменением состава нейтральной атмосферы во время возмущений, а влияние усиления меридионального ветра в эти периоды не значительно.

В **Заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертации.

- 1) В широтно-долготном распределении максимальной электронной концентрации в F2-области ионосферы различаются два типа ночных областей повышенной электронной концентрации (ОПЭК): с максимумами в суточной и широтной вариациях в зимних условиях и с максимумом только в широтной вариации в летних условиях. В широтно-высотном распределении электронной кон-

центрации эти области протягиваются по силовым линиям геомагнитного поля в плазмосферу.

- 2) Механизм формирования ОПЭК основан на влиянии неоднородных по широте потоков плазмы из плазмосферы и ветрового увлечения ионосферной плазмы термосферным ветром вдоль силовых линий геомагнитного поля. Вертикальная составляющая ветрового увлечения ионов в случае ветра, направленного к экватору, приводит к переносу плазмы на большие высоты, где медленнее протекают процессы ее химических потерь. Горизонтальная составляющая совместно с потоками плазмы из плазмосферы перераспределяет ОПЭК, смещая их по широте относительно максимума вертикальной составляющей ветрового увлечения ионов.
- 3) Электромагнитный дрейф влияет только на положение и крутизну высокоширотной, примыкающей к главному ионосферному провалу, и приэкваториальной, примыкающей к остаткам экваториальной аномалии на ночной стороне, «стенок» ОПЭК.
- 4) Вариации ОПЭК (сезонные и в цикле солнечной активности) объясняются соответствующими вариациями термосферных ветров на высотах F2-области ионосферы. Влияние геомагнитной активности на ОПЭК обусловлено изменениями термосферного состава.
- 5) ОПЭК воспроизводятся всеми версиями теоретической модели UAM и эмпирической моделью ионосферы IRI-2001 для всех сезонов и при различной солнечной активности. Наилучшее согласие между всеми вариантами расчетов наблюдается для условий летнего солнцестояния в северном полушарии при низкой солнечной активности.

Исследования были поддержаны грантами РФФИ: 02-05-64141-а, 05-05-97511-р_север_a.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Князева М.А., Намгаладзе А.А. Математическое моделирование формирования ночных повышений электронной концентрации в F2-области спокойной среднеширотной ионосферы и в плазмосфере Земли // Вестник МГТУ. 2005. Т. 8. No. 1. С.144–155.
2. 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". 2003. Ч. V. МГТУ. Мурманск. С. 74.
3. Князева М.А. Плазмосферные эффекты геомагнитных бурь 17–20 апреля 2002 года // Материалы Всероссийской научно-технической конференции "Наука и образование-2003". 2003. Ч. V. МГТУ. Мурманск. С. 78.
 4. 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 // Physics of Auroral Phenomena, Proceedings of the XXVI Annual Apatity Seminar. 2003. Preprint PGI. P. 74–78.
 5. Князева М.А., Намгаладзе А.А. Анализ роли термосферных ветров и электромагнитных дрейфов в формировании ночных среднеширотных максимумов электронной концентрации в спокойной F2-области ионосферы // Материалы Международной научно-технической конференции "Наука и образование-2004". 2004. Ч.5. МГТУ. Мурманск. С. 22–24.
 6. Князева М.А., Намгаладзе А.А. Математическое моделирование влияния электромагнитного дрейфа на форму ночных повышений электронной концентрации в F2-области спокойной среднеширотной ионосферы и в плазмосфере Земли // Материалы Международной научно-технической конференции "Наука и образование-2005". 2005. МГТУ. Мурманск. Ч. 5. С. 67–70.
 7. Князева М.А., Намгаладзе А.А. О зависимости областей повышенной электронной концентрации в спокойной области F2 ионосферы от сезона и уровня солнечной активности // Материалы Международной научно-технической конференции "Наука и образование-2006". 2006. МГТУ. Мурманск. С. 360–363. [НТЦ «Информрегистр» № 0320501517, св. 7081 от 28.11.05г. Электронный ресурс. 6,5. 1 опт. компакт-диск (CD-ROM)].
 8. Knyazeva M.A., Namgaladze A.A. An influence of the thermospheric wind variations on the enhanced electron density regions in the night-time ionospheric F2-layer and in the plasmasphere // Proc. 6th International Conference "Problems of Geocosmos". 2006. Saint-Petersburg State University. P. 91–94.
 9. Мартыненко О.В., Князева М.А. Развитие модели UAM посредством подключения к ней ряда эмпирических моделей по технологии метамодели // Материалы Международной научно-технической конференции "Наука и образование-2007". 2007. МГТУ. Мурманск. С. 351–353. [НТЦ «Информрегистр» № 0320700491, от 05.03.07 г. Электронный ресурс. 1 опт. компакт-диск (CD-ROM)].

10. Knyazeva M.A., Namgaladze A.A. A model study of the seasonal and solar activity variations of the enhanced electron density regions in the night-time ionospheric F2-layer and plasmasphere // *Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXIX Annual Seminar. 2007. Apatity. Kola Science Centre. Russian Academy of Science. P. 225–228.*
11. Князева М.А., Намгаладзе А.А. Влияние меридионального ветра на широтное положение областей повышенной электронной концентрации в ночной F2-области ионосферы // *Материалы Международной научно-технической конференции "Наука и образование-2008". 2008. МГТУ. Мурманск. С. 223–226. [НТЦ «Информрегистр» № 0320800238 от 21.01.08г. Электронный ресурс. 1 опт. компакт-диск (CD-ROM)].*
12. Martynenko O.V., Knyazeva M.A. Model integration in the Framework Atmosphere Model (FrAM) // *Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXXI Annual Seminar. 2008. Apatity. Kola Science Centre. Russian Academy of Science. P. 157–159.*
13. Knyazeva M.A., Namgaladze A.A. An investigation of the night-time increases of the plasma density in the middle-latitude ionospheric F2-layer by the mathematical modeling method // *Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXXI Annual Seminar. 2008. Apatity. Kola Science Centre. Russian Academy of Science. P. 145–148.*
14. Knyazeva M.A., Namgaladze A.A. An influence of the meridional wind on the latitudinal location of the enhanced electron density regions in the night-time ionospheric F2-layer and plasmasphere of the Earth // *Proc. of the 7th International Conference "Problems of Geocosmos". 2008. Saint-Petersburg State University. P. 129–133.*
15. Князева М.А., Намгаладзе А.А. Математическое моделирование трехмерной топологии областей повышенной электронной концентрации в ночной среднеширотной F2-области ионосферы // *Материалы Международной научно-технической конференции "Наука и образование-2009". 2009. МГТУ. Мурманск. С. 222–226. [НТЦ «Информрегистр» № 0320900170. Электронный ресурс. 1 опт. компакт-диск (CD-ROM)].*
16. Князева М.А., Намгаладзе А.А., Мартыненко О.В. Эффективность плазмосферы как источника поддержания ночной F2-области ионосферы // *Материалы Международной научно-технической конференции "Наука и образование-2009". 2009. МГТУ. Мурманск. С. 227–230. [НТЦ «Информрегистр» № 0320900170. Электронный ресурс. 1 опт. компакт-диск (CD-ROM)].*

10²

Подписано в печать 03.07.2009. Формат 60x84/16. Печ. л. 0,5.
Заказ 3202. 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