



УТВЕРЖДАЮ  
Ректор БФУ им. И. Канта,  
Клемешев А.П.

«22» сентября 2017 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта на диссертацию Гололобова А.Ю. «Математическое моделирование тепловых эффектов в высокоширотной ионосфере», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 - математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Изучение особенностей теплового режима высокоширотной ионосферы представляет большой интерес, поскольку он во многом определяет движение заряженных частиц в ионосфере, а также влияет на их пространственное распределение. В свою очередь, крупномасштабная структура высокоширотной ионосферы играет важную роль в распространении радиоволн и навигации космических аппаратов. Интерес к исследованию тепловой структуры высокоширотной ионосферы обусловлен еще и тем, что в высоких широтах наиболее эффективно проявляются магнитосферно-ионосферные связи. Для решения этой проблемы автором разработана математическая модель высокоширотной ионосферы с учетом теплового режима, что являлась основной целью данной работы.

Основная трудность математического моделирования высокоширотной ионосферы связана с большим количеством физико-химических процессов, протекающих в данной области и связанных с магнитосферой Земли. Эти процессы приводят к необходимости учета трехмерной неоднородности ионосферы. Дополнительной сложностью является необходимость учета несовпадения географического и геомагнитного полюсов, имеющего существенное значение в высоких широтах. Использование экономичного в плане вычислительных затрат подхода Лагранжа, основанного на расщеплении многомерной задачи на процессы переноса плазмы вдоль геомагнитной силовой трубки и её дрейфу по траекториям конвекции, обладает рядом ограничений, связанных с возможным нарушением принципа вмороженности ионосферной плазмы в геомагнитное поле, упрощенным дипольным представлением геомагнитного поля и проблемами расчета траекторий конвекции при учете несовпадения полюсов, особенно при возмущенных условиях. Используемый автором в разрабатываемой модели



подход Эйлера является менее экономичным, однако лишен недостатков присущих подходу Лагранжа и является перспективным в этом плане в моделировании ионосферы высоких широт. В связи с развитием ЭВМ в последние десятилетия разработка подобных моделей стало возможным. Для построения подобной модели автором предложена система уравнений, состоящая из трех нестационарных трехмерных дифференциальных уравнений в эйлеровых переменных. Разрабатываемая модель является продолжением работ, посвященных моделированию ионосферы на основе подхода Эйлера с целью более корректного учета теплового режима.

Все вышеперечисленное говорит о несомненной *актуальности* представленной работы.

*Структура и оформление работы.* Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованных источников из 179 наименований, содержит 140 страниц основного текста, 31 рисунков и приложения. Во *введении* определены цель, научная новизна, научная и практическая значимость и представлены основные защищаемые положения.

*Первая глава* носит обзорный характер и состоит из трех частей. В первой части представлены основные особенности крупномасштабной структуры высокоширотной ионосферы. Во второй части автором проведен обзор современного состояния моделирования высокоширотной ионосферы. Третья часть посвящена рассмотрению проведенных ранее другими авторами теоретических и экспериментальных исследований тепловой структуры ионосферы высоких широт.

Во *второй главе* приведено детальное описание разработанной автором математической модели высокоширотной ионосферы в подходе Эйлера с учетом теплового режима, позволяющей описывать пространственно-временное распределение концентрации и температуры электронов и ионов в F2 области ионосферы. Представлена система дифференциальных уравнений, состоящая из уравнений непрерывности для ионов  $O^+$ , теплопроводности для электронов и ионов. Определены внешние параметры и начальные и граничные условия. Представлен алгоритм решения системы нестационарных трехмерных дифференциальных уравнений на основе метода суммарной аппроксимации в сочетании с методом расщепления. Основное внимание уделено решению уравнений теплопроводности для электронов и ионов. Разработанный алгоритм реализован в виде комплекса программ. На модели рассмотрено влияние учета трехмерности на пространственно-временное распределение температуры электронов и ионов.

В *третьей главе* представлены результаты исследования особенностей теплового режима высокоширотной ионосферы. В первой части определены роли основных процессов нагрева и охлаждения электронов и ионов. Во второй части автором показано, что конвективный перенос тепла приводит к формированию «языка» в распределении температуры электронов и ионов.



Автор уделяет большое внимание эффектам, связанным с несовпадением географического и геомагнитного полюсов. Так, в третьей части показано, что учет несовпадения полюсов приводит к долготным особенностям в тепловом режиме. В 05 UT в восточном полушарии формируется область с повышенной температурой электронов вблизи терминатора, а в 17 UT в западном полушарии - в утреннем и вечернем секторах. По мнению автора, механизм формирования этих областей связан с областями низких значений электронной концентрации в провалах, сформированных в освещенной ионосфере, причины образования которых на разных долготах отличаются. Показано, что провалы в утреннем и вечернем секторах в западном полушарии формируются в результате воздействия магнитосферной конвекции, а провал в восточном полушарии - ослаблением солнечного ионизирующего излучения при зенитных углах Солнца более  $90^\circ$ . В пятой части автором предложена гипотеза о возможности формирования «горячей» кольцевой зоны в субавроральной ионосфере за счет передачи тепла из области кольцевого тока. По результатам численных расчетов на разработанной модели и данным спутниковых измерений, полученных на DE-2 и CHAMP, показана возможность формирования подобной зоны в интервале 04-07 UT, когда субавроральная ионосфера оказывается на неосвещенной стороне.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

*Научная новизна* диссертационной работы А.Ю. Гололобова заключается в том, что автор разработал математическую модель высокоширотной ионосферы с учетом теплового режима в подходе Эйлера и на её основе последовательно исследовал основные пространственно-временные особенности распределения температуры электронов и ионов.

Основные результаты, определяющие новизну и научную значимость работы, сформулированы автором в следующих трех положениях:

1. Получена система уравнений математической модели высокоширотной ионосферы в переменных Эйлера, позволяющая описывать концентрацию ионов  $O^+$ , температуру электронов и ионов с учетом несовпадения географического и геомагнитного полюсов в области высот 120 - 500 км,  $40^\circ \div 90^\circ$  северной широты,  $0^\circ \div 360^\circ$  долготы;
2. Разработан алгоритм для численного решения системы уравнений, состоящей из трех нестационарных трехмерных параболических уравнений гидродинамики;
3. С помощью численной модели ионосферы изучены причины, особенности и области формирования повышенных значений температуры электронов и ионов в высокоширотной ионосфере.

*Достоверность полученных в работе результатов* обеспечивается



обоснованной постановкой задачи, правомерностью принятых допущений при разработке математической модели, применением апробированных методов решения дифференциальных уравнений и качественным согласием полученных результатов при сравнении с результатами теоретических исследований и экспериментальными данными, выполненными и полученными ранее другими авторами.

**Практическая значимость работы** состоит в том, что результаты исследования и в первую очередь разработанную модель рекомендуется применять в работах по исследованию ионосферных процессов, протекающих в высоких широтах.

Материалы диссертационной работы могут быть применены в учебных курсах по физике верхней атмосферы, математическому моделированию ионосферы, физике ионосферы и распространению радиоволн.

Список цитируемых источников приведен с достаточной полнотой и вполне корректно.

Автореферат диссертации верно и полно отражает содержание диссертации. Результаты диссертации прошли апробацию на представительных всероссийских и международных конференциях и симпозиумах. Основные выводы и результаты, составившие положения, вынесенные на защиту, изложены в научных публикациях, включая 7 публикаций в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

#### **Замечания по работе**

1. В работе автор использует несколько упрощений, связанных с исключением второстепенных членов и смешанных производных, при выводе уравнений непрерывности и теплопроводности для электронов и ионов. Следовало бы произвести оценку данных допущений.
2. В разрабатываемой модели параметры нейтральной атмосферы, термосферного ветра и электрического поля магнитосферной конвекции считаются заданными. Было бы целесообразно оценить ограничения разработанной модели связанные с данным приближением, т.к. в данном случае эти параметры не согласованы между собой.

**Заключение.** Перечисленные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Сформулированные в диссертации выводы и положения являются новыми и научно обоснованными. Работа хорошо оформлена и написана понятным языком.

Диссертационная работа «Математическое моделирование тепловых эффектов в высокоширотной ионосфере» является законченной научно-квалификационной работой и соответствует требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор А.Ю. Гололобов заслуживает присуждения ученой степени кандидата



физико-математических наук по специальности 05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв составлен профессором Института физико-математических наук и информационных технологий БФУ им. И. Канта д.ф.-м.н. Зининым Л.В.

Зинин Л.В.

236016, г. Калининград, ул. А. Невского, д. 14, БФУ им И. Канта.  
Телефон: 8(9062) 196-002, E-mail: LZinin@kantiana.ru.

Отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на заседании НТС Института физико-математических наук и информационных технологий БФУ им. И. Канта.

Председатель заседания:  
Директор ИФМНИИТ, д.ф.-м.н.

Юров А.В.

236016, г. Калининград, ул. А. Невского, д. 14, БФУ им И. Канта.  
Телефон: 8(4012) 33-82-17, E-mail: AIUrov@kantiana.ru

Подписи Л.В. Зинина заверяю.  
Ученый секретарь БФУ им. И. Канта  
к.г.н., доцент



Зверев Ю.М.