

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Тащилина Анатолия Васильевича «Формирование крупномасштабной структуры ионосферы в спокойных и возмущенных условиях», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Диссертация Тащилина А.В. посвящена решению проблемы формирования крупномасштабной структуры ионосферы (КМСИ) на средних и высоких широтах при различных гелио- и геофизических условиях. Это одна из ключевых проблем в солнечно-земной физике, определяющая прогресс в развитии космической связи и навигации, а также разработке более точных методов диагностики и прогноза космической погоды.

Основная трудность решения данной проблемы связана с большим количеством различных физико-химических процессов, контролирующих состояние изучаемой системы, включающей в свой состав среднюю и верхнюю атмосферу, ионосферу, плазмосферу и магнитосферу Земли. Вследствие многочисленных нелинейных связей между этими областями их математическое описание требует построения численных математических моделей этих областей и согласования их между собой. Основной целью исследований, изложенных в рецензируемой диссертации, явилось изучение физических механизмов взаимодействия ионосферы с вышележащими областями околоземного пространства, главным образом с плазмосферой Земли, и оценке их роли в формировании крупномасштабной структуры ионосферы.

А.В. Тащиным была предложена концепция формирования крупномасштабной структуры ионосферы, основанная на необходимости корректного учета процесса заполнения плазмосферы ионосферной плазмой и разработана соответствующая численная модель ионосферно-плазмосферного взаимодействия, на основе которой решен ряд задач глобальной динамики ионосферы. Следует отметить значимость и важность подобных исследований для понимания физических механизмов формирования не только регулярных пространственно-временных вариаций ионосферных параметров, но также их возмущений внезапного характера, которые связаны с магнитосферными бурями, суббурями, солнечными затмениями и вспышками.

Все вышеизложенное говорит о несомненной **актуальности** темы исследований, представленных в диссертации А.В. Тащилина.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и четырех приложений. Во введении определены цель, научная новизна, практическая значимость работы и представлены основные защищаемые положения.

Первая глава носит обзорный характер и структурно состоит из двух частей. В первой части представлено описание вариаций ионного состава и тепловой структуры ионосферы средних и высоких широт, а также плазмосферы, полученных в результате наземных и спутниковых наблюдений в за-

висимости от времени суток, сезона, солнечной активности и уровня геомагнитной возмущенности. Во второй части главы дано изложение развитого автором подхода к теоретическому моделированию различных явлений, наблюдаемых в ионосфере и плазмосфере Земли. Детально рассмотрен процесс заполнения ионосферной плазмой геомагнитных силовых трубок, опустошенных в период действия магнитосферного возмущения, и сделан вывод о том, что процесс заполнения плазмосферы является одним из основных механизмов формирования горизонтальной крупномасштабной неоднородности в F2-слое в виде резкого широтного спада плотности заряженных частиц.

Во второй главе приведено описание разработанной автором численной модели поведения ионосферной плазмы в дипольном магнитном поле с учетом поперечного дрейфа, высыпаний энергичных электронов и динамического взаимодействия с термосферой. Следует отметить разработанную автором методику согласованного расчета скорости нагрева тепловых электронов фотоэлектронами в ионосфере и плазмосфере. Исследована устойчивость специальных численных методов, разработанных для решения базовой системы дифференциальных уравнений в частных производных, и оценена их точность.

Третья глава содержит описание пространственно-временной структуры среднеширотной ионосферы при невозмущенной геомагнитной обстановке, выполненное на основе разработанной модели ионосферы и плазмосферы. Несмотря на длительную историю изучения среднеширотной ионосферы, автору удалось дать новую интерпретацию возникновения ночного максимума в зимнем F2-слое как проявление связи между магнитосопреженными областями ионосферы.

Важные результаты, полученные автором, приведены в четвертой главе, посвященной изучению механизмов образования крупномасштабных структур в авроральной и полярной ионосферах, таких как главный ионосферный провал (ГИП), провал легких ионов и полярная полость. ГИП является наиболее заметной крупномасштабной структурой F2-слоя ионосферы в области перехода от средних широт к полярным. Впервые показано, что экваториальная стенка ГИП формируется в результате заполнения плазмосферы ионосферной плазмой, тогда как основным механизмом формирования полярной стенки ГИП является высыпание магнитосферных электронов, которое приводит к сглаживанию широтного распределения электронной концентрации над полярной шапкой. Во внешней ионосфере начинают преобладать легкие ионы водорода H^+ и экваториальная стенка ГИП трансформируется в провал легких ионов. Разработан новый механизм образования полярной полости в результате совместного действия магнитосферной конвекции и высыпания энергичных электронов.

В пятой главе исследована динамика глобальной крупномасштабной структуры ионосферы во время магнитосферных возмущений. На наш взгляд, наиболее интересный результат состоит в объяснении явления «сумеречного эффекта», т.е. резкого повышения концентрации электронов в максимуме F2-слоя и полного электронного содержания (ПЭС) в вечерние часы в субавроральной ионосфере. Показано, что «сумеречный эффект» является

результатом совместной перестройки структуры магнитосферной конвекции и высыпаний энергичных электронов на главной фазе бури. При этом конвекция играет основную роль, вызывая подъем F2-слоя на 40–80 км – в область с более низкой скоростью рекомбинации.

Шестая глава посвящена изучению крупномасштабных неоднородностей ионосферы, возникающих в результате относительно быстрых, длящихся $\sim 1-3$ ч, воздействий, связанных с прохождением крупномасштабного атмосферного возмущения (гравитационные волны) со стороны аврорального овала во время магнитных бурь, с солнечным затмением и солнечными вспышками. Установлено, что усиление меридионального ветра в атмосферном возмущении может приводить в интервале геомагнитных широт $\Lambda \approx 55-60^\circ$ к образованию плазмосферных дактов, т.е. вытянутых вдоль силовых линий неоднородностей, плотность плазмы в которых на 10–20 % выше, чем в соседних (фоновых) областях. На основе теоретического моделирования показано, что во внешней ионосфере во время солнечных вспышек могут образовываться отрицательные возмущения электронной концентрации за счет возрастания интенсивности УФ-излучения в интервале длин волн от 15 до 20 нм. В то же время увеличение вспышечной интенсивности в спектральных интервалах 55–65 и 85–95 нм приводит к заметному возрастанию содержания электронов во внешней ионосфере.

Следует отметить, что отмеченные выше научные результаты, полученные в диссертации А.В. Тацилина, являются новыми и вносят важный вклад в понимание физических процессов, контролирующих образование и динамику КМСИ. В качестве основных диссертант сформулировал 11 новых научных результатов, на основании которых были сформулированы 6 следующих положений, вынесенных на защиту:

1. Концепция формирования крупномасштабной структуры ионосферы, состоящая в том, что адекватное описание ионосферных неоднородностей должно базироваться на теории, которая, наряду с классическими процессами ионообразования, химических потерь и переноса, учитывает эффекты заполнения и опустошения геомагнитных силовых трубок тепловой ионосферной плазмой.

2. Трехмерная нестационарная модель ионосферы средних, авроральных и полярных широт, в которой учтены процессы взаимодействия с плазмосферой, между сопряженными областями, с нейтральной атмосферой и включено действие магнитосферных источников посредством высыпающихся энергичных электронов и электрического поля магнитосферной конвекции.

3. Теория заполнения геомагнитных силовых трубок тепловой плазмой и ее приложение к интерпретации наблюдаемых широтных изменений ионного состава и температур ионов и электронов в спокойных и возмущенных условиях.

4. Результаты физического анализа суточных, сезонных и циклических вариаций электронной концентрации и температур заряженных частиц в среднеширотной ионосфере в геомагнитно-спокойный период. Теория процесса взаимодействия сопряженных ионосфер через плазмосферу.

5. Новые механизмы формирования крупномасштабных структур средне- и высокоширотной ионосферы, включая главный ионосферный провал, провал легких ионов, полярную дыру и плазмосферные волноводы.

6. Основанная на модельных расчетах физическая интерпретация наблюдаемых вариаций параметров ионосферы во время магнитных бурь и кратковременных возмущений солнечного излучения в периоды затмений и солнечных вспышек.

Научная новизна работы заключается в разработке нового подхода к решению проблемы формирования КМСИ, основанного на положении о необходимости учета процесса заполнения геомагнитных силовых трубок в качестве одного из важнейших механизмов формирования КМСИ. На основе данного подхода, построена глобальная нестационарная модель динамики тепловой плазмы в геомагнитных силовых трубках с оптимальным набором физических процессов, среди которых впервые корректно учтен процесс заполнения плазмосферы. Последовательное применение единого подхода к интерпретации широкого круга явлений, наблюдаемых в ионосфере средних, авроральных и полярных широт, позволило получить новые и более надежные оценки эффективности различных физических механизмов, контролирующей особенности образования КМСИ практически при всех реально возможных геофизических условиях.

Достоверность полученных результатов определяется, во-первых, физическим обоснованием исходных принципов построения теории образования крупномасштабной структуры ионосферы и детальным анализом математических методов решения поставленных задач; во-вторых, качественным и количественным согласием результатов расчетов с данными измерений со спутников и наземными радиофизическими методами в широком диапазоне геофизических условий.

Научная и практическая значимость работы определяется необходимостью более глубокого изучения фундаментальных физических закономерностей солнечно-земных связей и потребностями решения задач, связанных с практической деятельностью человека в околоземной среде. Результаты исследований, полученные в диссертации А.В. Тащилина, имеют непосредственное применение при разработке математических моделей распределения тепловой плазмы в атмосферах планет Солнечной системы; при планировании и интерпретации космических экспериментов; при решении прикладных задач радиосвязи и космической навигации, а также в целях диагностики и прогноза состояния ионосферы и плазмосферы. Материалы диссертационной работы были использованы в учебных курсах по физике ионосферы и верхней атмосферы.

Результаты и выводы диссертации, а также разработанную численную модель ионосферно-плазмосферного взаимодействия целесообразно использовать в деятельности институтов РАН, исследующих солнечно-земные связи (ИЗМИРАН, ИКИ, ИСЗФ, ИКФИА, ПГИ), институтов Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды России (Росгидромет), а также подразделений Федерального космического агентства

(прежде всего, ФГУП ЦНИИМАШ и Координационный научно-технический совет (КНТС)).

Замечания по диссертационной работе:

1. Во Введении и Автореферате автор перечисляет 5 задач, которые были сформулированы и решены в диссертационной работе. Формулировка задачи 4 настолько глобальна, что она далека от решения даже в настоящее время. По-видимому, диссертант имел в виду задачу «Исследования механизмов образования **некоторых основных** крупномасштабных структур ионосферы на авроральных и полярных широтах...».

2. Разработанная в диссертации модель ионосферы представлена как глобальная, но нет достаточно подробного обсуждения ограничений в ее применении, например, в низких широтах для описания экваториальной аномалии или на высоких широтах для моделирования течений типа полярного ветра.

3. При анализе процесса заполнения тепловой плазмой магнитных силовых трубок автор использует диффузионное гидродинамическое приближение и классические представления для частот столкновений и коэффициентов переноса. Вместе с тем, даже на средних широтах функция распределения электронов имеет неравновесную составляющую (фотоэлектроны), а на высоких широтах к ней добавляются энергичные частицы магнитосферного происхождения, что приводит к развитию плазменных неустойчивостей, взаимодействие с которыми эквивалентно появлению дополнительных столкновений для заряженных частиц и изменению их коэффициентов переноса. Поэтому желательно получить обоснование пренебрежения в модельных расчетах коллективными процессами с участием плазменных волн.

4. В главе 3 при изучении эффектов взаимодействия магнитосопреженных ионосфер не учитывается электродинамическая связь сопряженных динамо-областей, имеющих различную структуру токовых систем Sq – вариаций.

5. В модели и расчетах использовано дипольное приближение для геомагнитного поля. Не может ли это привести к изменению результатов и выводов применительно к высоким широтам?

Однако отмеченные замечания не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации.

Стиль и язык изложения, а также оформление диссертации нареканий не вызывают. Автореферат верно и полно отражает содержание диссертации. Все результаты диссертации опубликованы в научной печати, прошли апробацию на представительных национальных и международных конференциях и симпозиумах. Основные результаты и выводы, приведенные в диссертации, изложены в научных публикациях, включая 25 публикаций в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Заключение. Диссертационная работа А.В. Тащилина «Формирование крупномасштабной структуры ионосферы в спокойных и возмущенных условиях» удовлетворяет требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям. Она является законченным научным трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне, в котором разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, имеющее важное значение для физики верхней атмосферы и ионосферы, заключающееся в разработке и реализации концепции формирования крупномасштабной структуры ионосферы средних и высоких широт. Следовательно, ее автор Анатолий Васильевич Тащилин заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Официальный оппонент,
профессор кафедры «Телекоммуникационные Системы»
Иркутского Государственного университета путей сообщения
доктор физ.-мат. наук,
профессор

Г.В. Попов

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, ФГБОУ ВПО ИРГУПС
Телефон: 638399, добавочн.0323, E-mail: popov_gv@irgups.ru

Подпись *Попов Г.В.*

ЗАВЕРЯЮ:

Начальник *104* отдела ИРГУПС

Подпись *Попов Г.В.*

« *30* » *10* 20*14* г.