



"УТВЕРЖДАЮ"

Директор ИЗМИРАН

доктор физ.-мат наук

В.Д. Кузнецов

11 апреля 2014 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН на диссертацию 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

Знание свойств крупномасштабной структуры ионосферы как части верхней атмосферы Земли имеет важное значение для решения широкого круга задач радиосвязи и радионавигации, поскольку, например, именно с такой крупномасштабной структурой ионосферы, как главный ионосферный провал, связаны частые нарушения радиосвязи на трассах, проходящих через субавроральные широты. В свою очередь, формирование крупномасштабной структуры ионосферы и динамика изменения этой структуры в различных гелиогеофизических условиях являются одной из ключевых проблем физики ионосферы, поскольку далеко не все закономерности и механизмы формирования такой структуры надежно установлены. Для решения этой проблемы А.В. Тащилиным была сформулирована концепция формирования крупномасштабной структуры ионосферы, основанная на положении о том, что теоретическое описание этой структуры должно учитывать процессы ионосферно-плазматического взаимодействия наряду с классическими процессами ионообразования, химических потерь и вертикального переноса. Обоснование и реализация этой концепции были основной целью данной работы. Актуальность этой темы исследования не вызывает сомнения по отмеченным выше причинам.

Более конкретно цель работы заключалась в исследовании влияния процессов взаимодействия ионосферы с плазматической и магнитосферой на формирование крупномасштабной структуры ионосферы (КМСИ) при различных геофизических условиях, включая магнитные бури. Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Разработка и реализация численной физико-математической модели формирования КМСИ с учетом основных процессов для ионосферной

плазмы, включая процессы ионосферно-плазмосферного взаимодействия и эффекты крупномасштабных электрических полей магнитосферной конвекции.

2. Создание теории диффузионного заполнения силовых трубок геомагнитного поля тепловой ионосферной плазмой и приложение этой теории к интерпретации наблюдаемой крупномасштабной структуры ионосферы.

3. Исследование особенностей формирования суточных, сезонных и циклических вариаций параметров среднеширотной ионосферы на основе созданной модели ионосферно-плазмосферных связей.

4. Исследование механизмов образования крупномасштабной структуры ионосферы на авроральных и полярных широтах в спокойных и геомагнитно-возмущенных условиях.

5. Исследование реакции ионосферы и плазмосферы на относительно быстрые (длительностью  $\sim 1-3$  ч) воздействия естественного характера, обусловленные спорадическими возмущениями параметров термосферы и солнечного излучения.

Результаты решения этих задач составляют основное содержание диссертации, которая состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитируемой литературы и четырех приложений. Во введении сформулирована актуальность проблемы ионосферно-плазмосферного взаимодействия, решение которой позволяет построить единый подход к описанию пространственно-временных вариаций тепловой околоземной плазмы при различных гелиогеофизических условиях. Приведены цель, научная новизна, практическая значимость работы, защищаемые положения, личный вклад автора и сведения об апробации работы. Первая глава носит обзорный характер. В первой части главы представлены свойства структуры ионосферы средних и высоких широт и плазмосферы по экспериментальным данным. Во второй части главы изложены основы предложенного А.В. Тащилиным подхода к теоретическому моделированию ионосферы и плазмосферы Земли. С этой целью кратко описаны основные положения общепринятой теории формирования ионосферы и более детально изложены результаты исследования процесса заполнения силовых трубок геомагнитного поля ионосферной плазмой на основе аналитического решения этой задачи. Показано, что этот процесс является одним из основных механизмов формирования горизонтальной крупномасштабной неоднородности в виде уменьшения концентрации электронов с широтой на геомагнитных широтах выше 40 градусов. Этот пример служит основой предложенного подхода, согласно которому для корректного описания крупномасштабных свойств ионосферы средних и высоких широт на основе теоретического моделирования необходим учет процессов ионосферно-плазмосферного взаимодействия. Результатам реализации такого подхода посвящены все остальные главы диссертации. Во второй главе приведено описание разработанной численной физико-математической модели пространственно-временных вариаций параметров тепловой плазмы ионосферного

происхождения в ионосфере и плазмосфере выше примерно 140 км. Представлены система исходных дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими граничными условиями и специальные численные методы, разработанные для решения этой системы. Эти методы представляют особый интерес, поскольку обеспечивают высокую эффективность разработанной модели. Не менее важной является и методика согласованного расчета скорости нагрева тепловой плазмы фотоэлектронами в ионосфере и плазмосфере Земли как элемент данной модели. Третья глава содержит описание пространственно-временной структуры среднеширотной ионосферы для спокойных условий, выполненное на основе разработанной численной модели ионосферы и плазмосферы. В поведении среднеширотной ионосферы значительную роль играет связь между магнитосопреженными областями ионосферы из-за переноса низкоэнергичной плазмы, тепла и фотоэлектронов через плазмосферу. Корректный учет этой связи и интерпретация на этой основе особенностей суточных изменений температуры и концентрации электронов зимней ионосферы – один из важных результатов этих исследований. В четвертой главе представлены результаты анализа особенностей взаимодействия ионосферы с вышележащими областями околоземного пространства на авроральных и полярных широтах на основе разработанной модели, в которой учтены дрейф плазмы из-за электрического поля магнитосферной конвекции и высыпания энергичных электронов в авроральную область. Основное внимание уделено моделированию и анализу формирования наиболее характерных крупномасштабных структур на этих широтах: главного ионосферного провала (ГИП), провала легких ионов и полярной полости. Показано, в частности, что магнитосферная конвекция и высыпания энергичных электронов являются основными факторами образования полярной полости. Усиление геомагнитной активности способствует образованию этой полости, т.к. сопровождается увеличением направленной вниз скорости дрейфа. Это является одним из важных предсказаний теории, которое еще предстоит проверить. В пятой главе представлены результаты исследования процессов формирования и динамики крупномасштабных структур ионосферы средних и высоких широт в периоды умеренных и сильных геомагнитных возмущений типа магнитных бурь на основе разработанной численной модели ионосферы и плазмосферы. Они включают анализ эффективности задания реальных магнитосферных источников, рассчитанных по технике инверсии магнитограмм, анализ возможности существования ГИП в дневные часы независимо от сезона, интерпретацию возрастания концентрации электронов в субавроральной и авроральной ионосфере в вечерние часы, которое называют «сумеречным эффектом». Впервые получено, в частности, что «сумеречный эффект» на субавроральных широтах возникает после внезапного начала магнитной бури при условии, что это начало происходит в утренние часы местного времени. Он обусловлен совместной перестройкой магнитосферной конвекции и высыпаний энергичных электронов на главной фазе магнитной бури. Шестая глава посвящена изучению крупномасштабных

неоднородностей ионосферы, возникающих в результате относительно быстрых, длящихся 1-3 ч, воздействий на ионосферу естественного характера. Рассмотрены три вида таких воздействий: крупномасштабные внутренние гравитационные волны (ВГВ) в атмосфере, распространяющиеся от аврорального овала к низким широтам во время магнитосферных бурь и суббурь, резкие локальные ослабления солнечного излучения в периоды затмений и быстрые усиления ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучений во время солнечных вспышек. Впервые показано, в частности, что при распространении крупномасштабных ВГВ с усиленным меридиональным ветром в интервале геомагнитных широт 55-60 градусов возможно образование плазмосферных дактов, т.е. областей вдоль силовых линий геомагнитного поля, плотность плазмы в которых на 10-20% выше фона. Также впервые показано, что солнечная вспышка может привести к заметному изменению концентрации электронов во внешней ионосфере, включая уменьшение этой концентрации в определенном интервале высот. В заключении суммированы основные результаты работы.

Эти результаты в обобщенном виде, определяя новизну и значимость работы, сводятся к следующему:

1. Сформулирована и реализована концепция формирования крупномасштабной структуры ионосферы средних и высоких широт, согласно которой теоретическое описание этой структуры должно учитывать процессы ионосферно-плазмосферного взаимодействия наряду с классическими процессами ионообразования, химических потерь и вертикального переноса, что является крупным научным достижением в решении актуальной проблемы верхней атмосферы – формирования крупномасштабной структуры ионосферы при различных гелиогеофизических условиях.

2. Реализацией этой концепции являются: а) разработанная численная модель ионосферно-плазмосферного взаимодействия, позволяющая воспроизводить пространственно-временное распределение параметров тепловой ионосферной плазмы и сверхтепловых электронов при различных гелиогеофизических условиях; б) результаты исследований с помощью этой модели, которые показали, что широкий круг явлений, наблюдаемых в ионосфере средних и высоких широт, непосредственно обусловлен или косвенно отражает взаимодействие плазмосферного резервуара с нижележащей ионосферой. Кроме того, эти исследования позволили установить механизмы или дать новую интерпретацию таких крупномасштабных структур, как:

- экваториальная стенка главного ионосферного провала;
- полярная полость;
- резкое увеличение концентрации электронов в субавроральной ионосфере в вечерние часы в главную фазу магнитной бури, которое называют «сумеречным эффектом»;
- плазмосферные дакты, т.е. области вдоль геомагнитного поля, плотность плазмы в которых на 10-20% больше, чем в соседних областях.

Важными являются и результаты предсказания теории на основе численного моделирования, в том числе:

- увеличение эффективности образования полости при усилении геомагнитной активности;
- возможность образования во внешней ионосфере области пониженной концентрации электронов как реакция ионосферы и плазмосферы на солнечную вспышку.

Замечания по работе:

1. Разработанная модель ионосферно-плазмосферного взаимодействия является достаточно полной, тем не менее, было бы целесообразно провести оценку возможного вклада неучтенных в этой модели процессов:

- химия между ионами кислорода  $O^+$  в основном и электронно-возбужденном состояниях;

- теплопроводность электронов вдоль геомагнитного поля с учетом так называемых нелокальных процессов, когда коэффициент этой теплопроводности дополнительно зависит от характерного масштаба изменения температуры электронов вдоль геомагнитного поля.

2. В работе в качестве модели геомагнитного поля использовано приближение центрального наклонного диполя. Было бы целесообразно оценить эффективность учета приближения этого поля эксцентричным диполем. Это может быть важным при анализе так называемого UT эффекта в ионосфере субавроральных и высоких широт.

3. В разработанной модели такие параметры, как температура, плотность и состав термосферы, а также электрическое поле магнитосферной конвекции и высыпания энергичных электронов считаются заданными, и такой подход, по-видимому, оптимален для решения поставленных задач. Тем не менее, было бы целесообразно оценить ограничения разработанной модели, связанные с таким приближением, особенно для нестационарных случаев, когда задаваемые изменения этих параметров могут быть не согласованы между собой.

4. В восстановительную фазу интенсивной магнитной бури структура субавроральной ионосферы может быть достаточно сложной, включая формирование двух провалов, что отмечено в главе 2 диссертации, которая является обзорной. Целесообразно было бы попытаться воспроизвести эту особенность субавроральной ионосферы на основе разработанной модели с возможным дополнительным учетом процессов взаимодействия энергичных ионов кольцевого тока магнитосферы с тепловой плазмой.

Эти замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации, которая выполнена на высоком научном уровне. Выносимые на защиту положения, выводы и рекомендации являются новыми и научно обоснованными. Достоверность научных выводов и положений обеспечена физическим обоснованием исходных уравнений модели ионосферно-плазмосферного взаимодействия; детальным анализом методов численного решения этих уравнений; сравнением результатов расчетов по модели с данными измерений со спутников и наземными радиофизическими методами.

Значимость для науки результатов диссертации определяется прежде всего тем, что они могут быть использованы при планировании и интерпретации космических экспериментов, для решения прикладных задач радиосвязи и космической навигации, в целях диагностики и прогноза состояния ионосферы и плазмосферы, в учебных курсах по физике ионосферы и верхней атмосферы. Отдельные элементы разработанной модели ионосферно-плазмосферного взаимодействия, включая численные методы решения уравнений модели, могут быть использованы и уже использовались в других численных моделях ионосферы и плазмосферы для совершенствования этих моделей. Например, представленная в диссертации методика согласованного расчета скорости нагрева тепловой плазмы фотоэлектронами в ионосфере и плазмосфере Земли использовалась в соответствующих моделях, разработанных в ИЗМИРАН и в Балтийском федеральном университете им. И. Канта.

Результаты диссертации и в первую очередь разработанную модель ионосферно-плазмосферного взаимодействия рекомендуется использовать в работах по исследованию и прогнозу ионосферы в Институте динамики геосфер РАН, Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Институте прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, Институте солнечно-земной физики СО РАН, Полярном геофизическом институте РАН, Балтийском федеральном университете им. И. Канта и других организациях соответствующего профиля.

Основные результаты и выводы, приведенные в диссертации, изложены в научных публикациях, включая 25 публикаций в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Диссертация соответствует специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Автореферат верно отражает содержание диссертации.

**ВЫВОДЫ.** Диссертация А.В. Тащилина удовлетворяет требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям: она является законченной научной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение, имеющее важное значение в физике верхней атмосферы – сформулирована и реализована концепция формирования крупномасштабной структуры ионосферы средних и высоких широт. Следовательно, Анатолий Васильевич Тащилин заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Отзыв составлен зав. лабораторией динамики ионосферы ИЗМИРАН доктором физ.-мат. наук М.Г. Деминовым.

