

12

Ященко



004607649

На правах рукописи

Ященко Алексей Кириллович

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ АТМОСФЕРНО-
ИОНОСФЕРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ**

25.00.29 - физика атмосферы и гидросферы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

- 2 СЕН 2010

Троицк – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН)

Научный консультант доктор физико-математических наук,
профессор
СОРОКИН Валерий Михайлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
ПОХОТЕЛОВ Олег Александрович

доктор физико-математических наук,
ЛЕВИТИН Анатолий Ефимович

доктор технических наук,
ЧУДНОВСКИЙ Леонид Семенович

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Институт динамики геосфер РАН

Защита диссертации состоится «28» сентября 2010 г. в 14³⁰ часов 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, Московской области, ИЗМИРАН.

(проезд автобусом № 398 от станции метро «Теплый стан» до остановки «ИЗМИРАН»).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЗМИРАН.

Автореферат разослан «9 июля» 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.237.01
д. ф.-м. н., профессор

Михайлов Ю.М.



Общая характеристика работы

Предметом диссертации является разработка электродинамической модели взаимодействия между атмосферой и ионосферой, а также интерпретация на ее основе плазменных и электромагнитных эффектов, сопровождающих интенсивные воздействия на ионосферу естественного и техногенного характера.

Актуальность проблемы

Многочисленные наблюдения аномальных плазменных и электромагнитных явлений в ионосфере над районами сейсмической и метеорологической активности свидетельствуют о том, что интенсивные процессы в этих районах воздействуют на состояние околоземной плазмы в течение времени от нескольких часов до десятков суток. Результаты спутниковых наблюдений свидетельствуют о появлении в ионосфере статических электрических полей с амплитудой порядка 10 мВ/м над районами подготовки землетрясения, в то время как на земной поверхности в сейсмическом регионе отсутствует заметное изменение поля в течение этого времени. Данные прямых измерений электрического поля противоречат существовавшим моделям проникновения электрического поля в ионосферу в сейсмическом регионе. Усиление электрического поля и появление мелкомасштабных неоднородностей плазмы в ионосфере наблюдается над областями тропических циклонов и тайфунов. Наряду с усилением электрического поля в ионосфере, в возмущенной магнитной трубке наблюдаются УНЧ колебания плотности плазмы и магнитного поля и электромагнитные эмиссии в КНЧ диапазоне. На земной поверхности регистрируются узкополосные спектры УНЧ колебаний геомагнитного поля в диапа-

зоне (1 – 20)Гц и ВЧ радиоизлучение в диапазоне (10 – 100)МГц, источники которого расположены за горизонтом на высоте (1 – 10) км в атмосфере. Существовавшие теории атмосферно – ионосферных связей были не в состоянии дать объяснение природы этих явлений.

Проработка практических возможностей создания методов мониторинга природных и техногенных катастроф, а также проведение практических работ, направленных на разработку спутниковой системы мониторинга, ставит ряд фундаментальных проблем, одной из которых является природа атмосферно – ионосферных связей. Решение практических задач непосредственно связано с развитием теоретических исследований электродинамических процессов, протекающих в системе атмосфера – ионосфера. Развитие этого направления обусловлено появлением новых экспериментальных данных об электродинамическом на нее воздействии и сопровождающих плазменных и электромагнитных эффектах. Потребности прикладных разработок, а также логика фундаментальных исследований приводят к необходимости дальнейшего изучения электродинамики атмосферно – ионосферных связей. В этом разделе физики околоземного пространства накоплено значительное количество данных, не нашедших своего объяснения на базе существовавших теоретических представлений. Наблюдающийся в последнее время разрыв между состоянием исследований этих процессов и требованиями к развитию теории атмосферно – ионосферного взаимодействия и решению практических задач, определяет актуальность диссертационной работы.

Значительная часть работ выполнена в рамках международного проекта STAC NASA / RSA, проектов РФФИ (контракты №97-05-64359-а; 99-05-

65650-а; 01-02-97044-р; 01-05-64770-а; 03-05-64553-а), государственной программы РАН № 01.2.00603791.

Цели и задачи работы

Целью работы является создание электродинамической модели атмосферно-ионосферного взаимодействия на основе теоретических исследований механизмов воздействия на ионосферу крупномасштабных источников как естественной, так и техногенной природы, сопоставления результатов теоретических исследований с экспериментом, а также поиск плазменных и электромагнитных эффектов, сопровождающих эти воздействия. Решались следующие задачи:

1. Анализ результатов наблюдения возмущений статического электрического поля в ионосфере и на поверхности Земли, связанного с крупномасштабными воздействиями сейсмической и метеорологической природы на ионосферу.

2. Развитие теории формирования электрических токов в системе атмосфера – ионосфера.

3. Построение модели стороннего тока в нижней атмосфере и вывод условий ограничения электрического поля на земной поверхности.

4. Проведение расчетов пространственного распределения электрического поля в атмосфере и ионосфере.

5. Развитие теории формирования ионосферных возмущений и электромагнитных полей при протекании электрического тока в системе атмосфера – ионосфера.

6. Интерпретация с помощью полученной теории геофизических эффектов, сопровождающих крупномасштабное воздействие на ионосферу.

Научная новизна

Теоретически и экспериментально обоснована электродинамическая модель атмосферно – ионосферных связей. Она сводит многочисленные наблюдаемые плазменные и электромагнитные эффекты к одной причине – появлению стороннего электрического тока на границе литосфера-атмосфера и в нижней атмосфере. Электродвижущей силой является конвективный перенос вверх и гравитационное оседание в нижней атмосфере заряженных водяных и почвенных аэрозолей, инжектируемых в атмосферу вместе с почвенными газами. Наличие потенциального барьера при переносе заряженных аэрозолей через границу литосфера – атмосфера определяет обратную связь между сторонним током и электрическим полем, что ведет к ограничению поля на поверхности земли до величин порядка фоновых значений. Атмосферная радиоактивность (радон, радий, торий, актиний и продукты их распада) оказывает влияние на характеристики стороннего электрического тока. В качестве входного параметра модели выбрано пространственное распределение амплитуды стороннего тока, которое определяется концентрацией аэрозолей у поверхности Земли на стадии сейсмической активности. В рамках модели обосновано экспериментально наблюдаемое усиление электрического поля в ионосфере до амплитуд порядка 10 мВ/м. Развита теория проникновения в ионосферу квазистатического электрического поля, генерируемого сторонним током в нижней атмосфере. Получено высотное распределение величины стороннего тока, возникающего в результате инъекции заряженных аэрозолей в атмосферу при различных уровнях ее радиоактивности. Обнаружен механизм ограничения величины возмущения электрического поля на поверхности Земли электродвижущей силой на ее поверхности в результате нелинейной связи между током и полем. Разработана модель возмущения D- и E- слоев ионосферы в ре-

зультате протекания электрического тока в атмосферно – ионосферной цепи. Получен новый физический механизм генерации в ионосфере колебаний геомагнитного поля в УНЧ диапазоне. Развита модель генерации радиоизлучения в ВЧ диапазоне в атмосфере над очагом готовящегося землетрясения. Получена и проанализирована физическая модель генерации геомагнитных пульсаций в плоском слое Земля-ионосфера с нестационарной ионосферной проводимостью.

Научная и практическая ценность

Расчеты пространственного распределения квазистатических электрических полей в ионосфере, генерируемых сторонним током в нижней атмосфере, могут быть использованы для интерпретации результатов спутниковых наблюдений над сейсмоактивными областями, а также зонами интенсивных метеорологических процессов.

Физический механизм ограничения электрического поля на поверхности Земли свидетельствует о преимуществе метода измерения поля в ионосфере, по сравнению с его измерениями на поверхности Земли. Значительные по величине кратковременные всплески электрического поля имеют локальный характер.

Модель формирования возмущений концентрации плазмы в D- и E-слоях ионосферы протекающим электрическим током позволяет интерпретировать наблюдаемые вариации амплитуды и фазы радиоволн при их волноводном распространении вблизи эпицентра готовящихся землетрясений. Она позволяет рассчитывать изменение характеристик шумановских резонансов.

Новый физический механизм формирования ВЧ радиоизлучения нижней атмосферы в результате электрических разрядов над очагом готовящегося

землетрясения позволил объяснить данные наблюдений излучения на частотах 10-100 МГц, генерируемых за горизонтом на высотах (1 – 10)км над очагами готовящихся землетрясений.

Полученные результаты могут быть использованы:

- при разработке новых методов спутникового и авиационного мониторинга крупномасштабных природных и техногенных катастроф на основе регистрации плазменных и электромагнитных возмущений, сопровождающих эти процессы,
- при разработке новых направлений и планировании комплексных экспериментальных исследований электродинамических процессов, протекающих в системе атмосфера – ионосфера,
- при построении физической модели атмосферно - ионосферных связей,
- в новых направлениях теоретических исследований по электродинамике ионосферной плазмы, а также в разработке новых образовательных программ и курсов лекций по электродинамике околоземного космического пространства.

Степень достоверности полученных результатов

Полученные в диссертации результаты согласуются с данными наблюдения статических электрических полей в ионосфере в сейсмических областях, над районами образования тайфунов. Выводы теории подтверждаются экспериментальными данными регистрации плазменных и электромагнитных

возмущений, сопровождающих усиление электрического тока в системе атмосфера – ионосфера. Модели, основанные на аналитических решениях, проверялись с помощью численных расчетов. Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых журналах, обсуждались на Российских и Международных конференциях и Научных семинарах в институтах РАН.

На защиту выносятся следующие положения

1. Электродвижущая сила, возникающая при переносе заряженных аэрозолей из литосферы в атмосферу, приводит к возмущению квазистатического электрического поля в ионосфере величиной порядка 10 мВ/м. Поле в ионосфере концентрируется в сопряженных областях с горизонтальным размером порядка сотен километров.
2. Потенциальный барьер для заряженных аэрозолей на поверхности Земли приводит к обратной связи стороннего тока и электрического поля, что ограничивает его величину на поверхности Земли фоновыми значениями.
3. Усиление электрического поля в ночной нижней ионосфере значительно увеличивает ее проводимость, в то время как проводимость дневной ионосферы меняется мало, что приводит к подобным результатам измерения поля в ионосфере в дневных и ночных условиях.
4. Над зонами формирования тайфунов образуются квазистатические электрические поля величиной порядка 10 мВ/м и неоднородности плотности ионосферной плазмы с пространственными масштабами 10-40 км.

5. Генерация тока проводимости в атмосферно – ионосферной электрической цепи приводит к:
- образованию неоднородностей проводимости, возмущению E и D слоев ионосферы,
 - достижению электрическим полем пробойных значений в нижней атмосфере и генерации ВЧ радиоизлучений,
 - формированию линейчатого спектра магнитных пульсаций в УНЧ диапазоне на поверхности Земли.

Представление результатов

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и семинарах:

1. International symposium "Monitoring and detection of the underground nuclear explosions and earthquakes". Moscow, Russia. 1997.
2. International Workshop on Seismo Electromagnetics of NASDA. Tokyo. Japan. 1997.
3. 32nd Scientific Assembly of COSPAR. Nagoya. Japan. 1998.
4. Workshop on the Micro-satellite DEMETER. Orleans. France. 1999.
5. International workshop on seismo - electromagnetics of NASDA. Tokyo. Japan. 2000.
6. 35th COSPAR Scientific Assembly. Paris. France. 2004.
7. XVI Всероссийский Симпозиум «Современная химическая физика». Сочи. Россия. 2004.
8. International workshop on seismo electromagnetics. IWSE-2005. Tokyo. Japan. 2005.
9. EGU - General Assembly, Vienna, Austria, 2005.

10. XXVIIIth General Assembly of URSI. New Delhi. India. 2005.
11. XVIII Всероссийский Симпозиум «Современная химическая физика». Сочи. Россия. 2006.
12. International conference "Atmosphere, Ionosphere, Safety" (AIS-2008). Kaliningrad. Russia. 2008.
13. Семинары: ИЗМИРАН, ИХФ РАН, ИДГ РАН, ИФЗ РАН.

Публикации

По теме диссертации автором опубликовано 30 научных работ, из них 26 статей в рецензируемых журналах в отечественной и зарубежной печати и 4 работы в сборниках и трудах конференций.

Личный вклад соискателя

Автор принимал непосредственное участие в постановке задач и выборе методов их решения, в получении аналитических решений, анализе результатов и их интерпретации. Автором проведены все численные расчеты в диссертации, выполненные с использованием самостоятельно разработанных программ.

Содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Она содержит 285 страниц, 70 рисунков. Библиография включает в себя 250 наименований.

Во введении изложены результаты анализа экспериментальных исследований электромагнитных и плазменных возмущений, проводимых на

поверхности Земли и в ионосфере, в процессе крупномасштабных воздействий на систему атмосфера – ионосфера. В качестве воздействующих факторов были выбраны процессы подготовки землетрясений, интенсивные метеорологические процессы, солнечные вспышки, полеты космических аппаратов. Результаты анализа свидетельствуют о следующем. Интенсивные сейсмические и метеорологические процессы, протекающие в литосфере и атмосфере, стимулируют ряд электромагнитных и плазменных эффектов, локализованных в магнитной силовой трубке. Ее основание опирается на область нижней ионосферы, находящуюся над очагом возмущения. Возмущения квазистатического электрического поля, КНЧ-УНЧ электромагнитных эмиссий, плотности плазмы концентрируются в сопряженных областях ионосферы с горизонтальным размером порядка сотен км. Их длительность достигает интервала времени от единиц часов до десятка дней. Анализ результатов теоретических исследований этих явлений позволил выявить проблемы в интерпретации экспериментальных данных и сформулировать задачу диссертационной работы. В конце введения сформулированы основные положения, выносимые на защиту, а также дана краткая характеристика содержания диссертации по главам.

Первая глава посвящена анализу результатов наблюдений электромагнитных и плазменных эффектов на Земле и в ионосфере, которые предшествуют мощным землетрясениям, а также сопровождают различные стадии интенсивных метеорологических явлений, таких как тайфуны. Многочисленные наблюдения аномальных плазменных и электромагнитных явлений в ионосфере над районами сейсмической и метеорологической активности свидетельствуют о том, что интенсивные процессы в этих районах воздействуют на состояние околоземной плазмы в течение времени от нескольких часов до десятков суток. Согласно опубликованным спутниковым данным, связанные с

сейсмической активностью возмущения стационарного электрического поля в ионосфере достигают величин порядка 10 мВ/м. Такие электрические поля были экспериментально обнаружены с помощью спутников в низких широтах над очагами готовящихся землетрясений и над тропическими тайфунами. Наряду с данными наблюдения квазистатических электрических полей, зарегистрированы всплески электромагнитного излучения в КНЧ/ОНЧ и в УНЧ/КНЧ диапазонах частот. Их амплитуды составляли 1-10 нТл, а пространственная протяженность до 6° по долготе и $2-4^\circ$ по широте относительно эпицентра землетрясения. Рост электрического поля в ионосфере сопровождается возникновением флуктуаций плотности плазмы. Внутри магнитной трубки, сопряженной с сейсмическим районом, наблюдаются мелкомасштабные (4-10 км вдоль орбиты) неоднородности плотности плазмы с относительной амплитудой $\Delta N/N \approx (3-8)\%$. Аналогичные возмущения электрического поля и плотности плазмы в ионосфере наблюдается при пролетах спутника над зонами формирования тайфунов.

Опубликованы данные регистрации изменения ионного состава, температуры плазмы в верхней ионосфере и возмущения высотного профиля F - области ионосферы. В качестве примера отметим, что за сутки до землетрясения возрастает высота максимума слоя F2 примерно с 280 км до 360 км и уменьшается максимальное значение концентрации электронов с $3 \cdot 10^5$ до 10^5 см^{-3} . В процессе подготовки землетрясения зарегистрирован рост концентрации ионов водорода примерно в 3 раза. Рост сейсмической активности вызывает аномальные свечения атмосферы в линиях 557.7 нм и 630 нм. Согласно данным, приведенным в ряде работ, в зонах вблизи эпицентров готовя-

щихся землетрясений может наблюдаться возрастание электромагнитных осцилляций шумового характера в УНЧ диапазоне ($f = 0.01-10$ Гц). Существуют данные, согласно которым рост УНЧ-шумов в диапазоне 0.01-5 Гц наблюдался приблизительно за 10 дней до землетрясения с магнитудой $M \sim 7$ на расстоянии около 50 км от его эпицентра. При этом амплитуда возмущения составляла 50 - 100 % от среднего невозмущенного уровня шумов. Для объяснения этого явления предложены механизмы образования источников этого излучения, которые расположены в литосфере и связаны с процессами подготовки землетрясений.

Вторая глава посвящена уравнениям, описывающим генерацию квазистатического электрического поля сторонним током в слое земля - ионосфера и проникновению этого поля в ионосферу. Обоснован приближенный метод расчета поля, применимый в случае крупномасштабного в горизонтальном направлении стороннего тока. Его применимость обоснована в результате сравнения приближенного решения с точным решением для модельного пространственного распределения амплитуды стороннего тока. Показано что, приближенный метод с достаточной степенью точности может быть использован для горизонтальных масштабов сторонних токов в десятки километров и более. Данный метод расчета использовался в последующих разделах диссертации. Во втором разделе главы 2 рассмотрено проникновение электрического поля, генерируемого аксиально-симметричным сторонним током, в ионосферу с наклонным геомагнитным полем. Получено аналитическое решение уравнений для модельного распределения стороннего тока. В третьем разделе главы 2 рассмотрено проникновение электрического поля, генерируемого сторонним током с произвольным горизонтальным распределением в ионосферу с наклонным геомагнитным полем. Получено общее решение задачи методом

функции Грина, а также аналитическое решение для модельного распределения тока. Получено уравнение, описывающее распределение потенциала электрического поля ионосферы с наклонным магнитным полем и горизонтально-неоднородным тензором проводимости. Поле генерируется втекающим в ионосферу атмосферным электрическим током с произвольным горизонтальным распределением его амплитуды. В четвертом разделе главы 2 обоснована физическая модель ограничения величины электрического поля, генерируемого на поверхности Земли в результате инъекции в атмосферу заряженных почвенных аэрозолей. Физический механизм ограничения связан с появлением потенциального барьера на поверхности Земли при инъекции заряженных аэрозолей в атмосферу, который приводит к обратной связи между сторонним электрическим током и электрическим полем. В результате такой обратной связи значения сторонних токов положительно и отрицательно заряженных аэрозолей на поверхности Земли будут зависеть от вертикальной компоненты электрического поля. Строго доказано утверждение об ограничении величины поля при достаточно общих предположениях о виде функциональной зависимости тока от поля. Произведена оценка величины критического электрического поля. Получены формулы, определяющие электрические поля и токи на поверхности Земли и в ионосфере с учетом ограничения поля для модельного пространственного распределения стороннего тока.

Третья глава посвящена рассмотрению теории формирования стороннего тока в атмосфере в результате инъекции заряженных аэрозолей. Одним из таких механизмов является процесс интенсификации выброса заряженных почвенных аэрозолей в атмосферу или изменения метеорологических условий при их стабильном высотном распределении. Квазистатическое высотное распределение аэрозолей может формироваться в результате их турбулентного пере-

носа вверх и гравитационного оседания. Турбулентный перенос осуществляется благодаря вертикальному градиенту горизонтального ветра при трансформации кинетической энергии ветра в энергию турбулентных пульсаций, а также термической неустойчивости атмосферы в случае, когда отрицательный градиент температуры превышает ее адиабатический градиент. Турбулентные вихри переносят аэрозоли из области высот, где их концентрация велика, на высоты с низкой их концентрацией. Равновесие достигается, когда вертикальный поток аэрозолей уравнивается их гравитационным оседанием.

В первом разделе главы 3 проведено качественное рассмотрение процесса формирования электрического тока заряженными аэрозолями в нижней атмосфере, опирающееся на эмпирические данные об их высотном распределении и качественную электродинамическую модель нейтрализации заряженных аэрозолей током проводимости.

Во втором разделе главы 3 получено кинетическое уравнение для функции распределения аэрозолей по зарядам в приближении их непрерывной перезарядки (т.е., если заряд аэрозоля много больше элементарного заряда) и с учетом диффузионного механизма прилипания малых ионов. Путем усреднения кинетического уравнения, в различных приближениях получены уравнения для плотностей стороннего заряда и тока.

В третьем разделе главы 3 рассмотрено влияние возмущения уровня атмосферной радиоактивности (например, в результате выброса радиоактивных аэрозолей) на высотное распределение скорости ионообразования и проводимости атмосферы. Учитывалась ионизация атмосферы источниками альфа частиц и гамма излучения. Произведены расчеты высотного распределения скорости ионообразования и проводимости.

В четвертом разделе главы 3 получены приближенные уравнения для плотностей стороннего заряда и тока, генерируемого выбросами положительно и отрицательно заряженных аэрозолей, с учетом влияния возмущения уровня атмосферной радиоактивности. Рассмотрена цепочка уравнений переноса аэрозолей и малых ионов. В уравнениях учитывалась турбулентная диффузия, гравитационное оседание, конвективный перенос аэрозолей, их перезарядка за счет диффузионного прилипания малых ионов, а также рекомбинация последних.

Четвертая глава содержит расчеты электрических полей в системе атмосфера-ионосфера сторонним током, формируемым в результате выбросов заряженных аэрозолей, а также токовыми системами, генерируемыми в областях тропических циклонов.

В первом разделе главы 4 проведены расчеты пространственного распределения электрического поля на земле и в ионосфере с вертикальным геомагнитным полем. Поле генерируется сторонним током, возникающим в результате инъекции в атмосферу положительно и отрицательно заряженных аэрозолей без учета их взаимодействия с атмосферными ионами. Горизонтальное распределение амплитуды стороннего тока полагается аксиально-симметричным. Из результатов расчетов следует, что горизонтальная компонента поля в ионосфере достигает величины порядка 10 мВ/м , в то время как величина вертикальной компоненты поля на поверхности Земли ограничена значением порядка 100 В/м . Поле в ионосфере достигает максимального значения на расстоянии порядка размера области, охваченной сторонним током. Горизонтальный размер области, в которой усиливается вертикальная компонента электрического поля на поверхности Земли, в три раза превышает гори-

горизонтальный масштаб распределения сторонних токов. Внутри этой области поле практически не меняется в зависимости от расстояния.

Во втором разделе главы 4 рассчитаны электрические поля, генерируемые аксиально-симметричным током в ионосфере с наклонным геомагнитным полем, без учета возмущения уровня атмосферной радиоактивности. Расчеты показывают, что пространственное распределение поля в ионосфере имеет два максимума. Величина компоненты поля в плоскости магнитного меридиана существенно зависит от угла наклона.

В третьем разделе главы 4 рассмотрена генерация электрических полей несимметричным в горизонтальной плоскости током в ионосфере с наклонным геомагнитным полем, без учета возмущения уровня атмосферной радиоактивности. Данный случай соответствует механизму формирования электрического поля над сейсмическими разломами произвольной формы в средних и низких широтах. Сейсмическая активность сопровождается выбросом в атмосферу заряженных аэрозолей почвенными газами, которые формируют сторонние электрические токи. Результаты расчетов показывают, что электрическое поле в ионосфере достигает величины ~ 10 мВ/м, в то время как вертикальная компонента электрического поля на поверхности Земли не превышает величины ~ 90 В/м на активном разломе. Другой важный результат заключается в том, что электрическое поле в ионосфере максимально по краям горизонтальной области генерации сторонних токов. Горизонтальный масштаб пространственного распределения электрического поля на поверхности Земли превышает горизонтальный масштаб распределения сторонних токов. Внутри этой области электрическое поле практически не зависит от расстояния. Структура поля в ионосфере имеет вид двух ячеек. Компонента поля в плоскости меридиана сильно зависит от угла наклона магнитного поля.

В четвертом разделе главы 4 рассмотрена генерация электрического поля аксиально-симметричными в горизонтальной плоскости сторонним током, возникающим в результате инъекции в атмосферу положительно и отрицательно заряженных аэрозолей совместно с радиоактивными веществами. При формировании сторонних токов и электрических полей учитывалось возмущение проводимости атмосферы в результате ее ионизации и изменение заряда аэрозолей, обусловленное прилипанием к ним атмосферных ионов. Амплитуда электрического поля на поверхности Земли уменьшается с ростом уровня атмосферной радиоактивности внутри возмущенной области, несмотря на рост проводимости атмосферы. Это связано с изменениями стороннего тока. Поле слабо зависит от этого уровня на границе возмущенной области. Поле в ионосфере убывает в зависимости от уровня атмосферной радиоактивности, в отличие от поведения поля на поверхности Земли.

В пятом разделе главы 4 рассчитаны пространственные распределения электрического поля в атмосфере, генерируемого источником стороннего тока сейсмического происхождения. Из расчетов следует, что электрическое поле сравнивается по величине с его пробойным значением в одной или двух областях, расположенных на разных высотах. Это свидетельствует о возможности возникновения в этих областях электрических разрядов.

Пятая глава посвящена плазменным и электромагнитным эффектам, связанным с ростом электрического поля в ионосфере.

В первом разделе главы 5 рассмотрена модель образования неоднородностей E-слоя ионосферы, основанная на эффекте атмосферного электрического тока, втекающего в ионосферу. Этот ток стимулирует возникновение продольного тока, который протекает из ионосферы в магнитосферу, и поперечного тока, протекающего вдоль проводящего слоя ионосферы. Атмосфер-

ный ток переносит в ионосферу ионы, а компенсирующий электрический заряд продольный ток переносит в ионосферу электроны. В результате происходит рост концентрации плазмы в нижней ионосфере. В модели получена самосогласованная система уравнений, определяющая распределение электронной концентрации и электрического поля в ионосфере с вертикальным геомагнитным полем и аксиально-симметричным втекающим атмосферным током. Результаты расчетов показывают, что атмосферный электрический ток, втекающий в нижнюю ионосферу, приводит к появлению в ней слоя с повышенной концентрацией электронов. Максимальное возмущение электронной концентрации наблюдается на высотах порядка 140 км и достигает одного порядка величины.

Во втором разделе главы 5 рассмотрена генерация спорадических слоев в ионосфере с наклонным геомагнитным полем и аксиально-симметричным в горизонтальной плоскости втекающим током в результате переноса полем этого тока долгоживущих ионов металлов, присутствующих в E-слое, и их диффузии. Из результатов расчетов следует, что наличие металлических ионов в нижней ионосфере приводит к появлению тонкого (порядка 3 км) слоя повышенной электронной концентрации при втекании в ионосферу электрического тока. Этот слой регистрируется как спорадический E-слой.

В третьем разделе главы 5 исследован механизм возмущения концентрации электронов и ионов в D области ионосферы, возникающего в результате протекания электрического тока в атмосферно – ионосферной электрической цепи. Возмущение возникает в результате смены типа носителей тока в слое Земля – ионосфера. В верхней части D слоя носителями тока являются электроны, а в нижней его части отрицательные ионы. В рамках модели рассмотрено влияние на формирование возмущения в D слое переноса электронов

и ионов под действием электрического поля, а также нагрев полем электронной компоненты плазмы. Результаты расчетов показывают, что при увеличении плотности тока до $\sim (10^{-9} - 10^{-8}) \text{ A} / \text{m}^2$ концентрации электронов и ионов существенно меняются в диапазоне высот 40-70 км. Величина возмущения достигает почти порядка величины, причем знак возмущения зависит от направления тока.

В четвертом разделе главы 5 рассмотрен механизм формирования УНЧ колебаний геомагнитного поля на поверхности Земли, генерируемых горизонтальными неоднородностями ионосферной проводимости. Этот механизм основан на генерации когерентных гиротропных волн в нижней ионосфере шумовым электромагнитным полем в присутствии горизонтальных неоднородностей ее проводимости, которые имеют характерные горизонтальные масштабы порядка 10 км. Эти неоднородности связаны с неустойчивостью акустико-гравитационных волн (АГВ) в ионосфере, возникающей в результате роста электрического поля. Расчеты показывают, что возмущение магнитного поля на поверхности Земли имеет узкополосный спектр с максимумом на частотах порядка нескольких Гц, его величина в эпицентре достигает около 40 % от невозмущенного значения. При удалении от эпицентра амплитуда возмущения в максимуме убывает.

В пятом разделе главы 5 рассмотрена модель генерации электромагнитного излучения ВЧ диапазона электрическими разрядами в нижней атмосфере. Разряды возникают в результате роста амплитуды электрического поля до пробойных его значений в атмосфере над очагом готовящегося землетрясения. Такой рост поля, как показано в главе 5, может быть объяснен в рамках модели электродинамических атмосферно-ионосферных связей. Проведенные

расчеты амплитудных и частотных характеристик излучения показали их согласие с данными наблюдения.

В шестом разделе главы 5 получена и проанализирована физическая модель генерации геомагнитных пульсаций в плоском слое Земля-ионосфера с нестационарной ионосферной проводимостью. Показано, что при крупномасштабном в горизонтальном направлении импульсном возмущении проводимости в присутствии внешнего электрического поля происходит генерация геомагнитных возмущений. Временная зависимость компонент возмущения магнитного поля носит характер затухающих колебаний. Диапазон периодов колебаний составляет единицы-десятки секунд. Амплитудно-временные характеристики сигнала определяются возмущением интегральных проводимостей ионосферы. В зависимости от соотношения между холловской и педерсеновской интегральными проводимостями возмущенной ионосферы может наблюдаться осциллирующий и апериодический режимы магнитных возмущений. Для сильных возмущений проводимости ионосферы амплитуда пульсаций может достигать 100 нТл.

В седьмом разделе главы 5 рассмотрена возможность электродинамического моделирования крупномасштабных эффектов растекания токов в ионосфере высоких широт. Проведен анализ уравнений, описывающих токи и поля в системе магнитосфера-ионосфера - проводящая Земля. Получены безразмерные параметры на основе которых выведены критерии подобия. С помощью масштабных преобразований показана возможность исследования методами аналогового моделирования эффектов распространения ионосферных токов в лабораторных условиях. На лабораторных установках смоделированы вариации магнитного поля, сопровождающие растекание токов. Проведены

расчеты импульсных функций электрического и магнитного поля, которые сопоставлены с измерениями на моделирующих установках.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы проведенного исследования.

1. В диссертации обоснована физическая модель электродинамического воздействия на ионосферу крупномасштабных природных и техногенных процессов, протекающих в приземных слоях атмосферы, которые сопровождаются переносом в ней заряженных аэрозолей. К таким процессам можно отнести подготовку землетрясений и тайфунов, пылевые бури и аварии на атомных станциях. Экспериментальной основой модели служат спутниковые и наземные данные регистрации статических электрических полей, плазменных и электромагнитных возмущений, результаты измерений инъекции почвенных газов в атмосферу и уровня ее радиоактивности. Воздействие на ионосферу осуществляется электрическим током проводимости, протекающим в атмосферно – ионосферной цепи. Его источником служит сторонний ток, формируемый в результате вертикального турбулентного переноса заряженных аэрозолей, их взаимодействия с атмосферными ионами в процессе инъекции радиоактивных веществ и модификации атмосферной проводимости. Изменение электрического тока в системе атмосфера - ионосфера сопровождается развитием в ней плазменных и электромагнитных явлений. Представленная модель связывает ионосферные и электромагнитные возмущения с динамикой заряженных аэрозолей в нижней атмосфере.

2. Развита модель усиления квазистатического электрического поля в ионосфере, источником которого служит электродвижущая сила, возникающая в результате усиления выброса в атмосферу почвенными газами заряженных аэрозолей, их конвективного переноса вверх, гравитационного оседания и ре-

лаксации заряда. Расчеты электрического поля в ионосфере средних и низких широт, проведенные на основе данной модели, дают значение его величины порядка 10 мВ/м, согласующееся с результатами спутниковых наблюдений. Поле в ионосфере достигает максимального значения на расстоянии порядка размера области, охваченной сторонним током. Наклон геомагнитного поля приводит к уменьшению амплитуды электрического поля в ионосфере вдоль геомагнитного меридиана.

3. Проведены расчеты горизонтального распределения амплитуды электрического поля в ионосфере с наклонным магнитным полем, генерируемого сторонним током с пространственным распределением его амплитуды, вытянутым под произвольным углом к геомагнитному меридиану. Расчеты показывают, что структура поля имеет вид двух ячеек. Компонента поля в плоскости меридиана сильно зависит от угла наклона магнитного поля.

4. Получен механизм обратной связи между электрическим током заряженных аэрозолей и полем на поверхности Земли. Показано, что он приводит к ограничению электрического поля на поверхности Земли величинами порядка его фоновых значений.

5. Рассмотрено влияние возмущения уровня атмосферной радиоактивности на проводимость атмосферы и сторонний ток в слое земля-ионосфера. Найдено высотное распределение источника ионизации. Показано, что рост уровня атмосферной радиоактивности приводит к уменьшению величины стороннего тока и электрического поля в ионосфере, а также к изменению горизонтального распределения электрического поля на поверхности Земли.

6. Показано, что протекающий в атмосферно – ионосферной цепи электрический ток приводит к возмущению концентрации плазмы в D- и E- слоях ионосферы. Возмущения обусловлены переносом электронов и ионов в элек-

трическом поле тока, а также нагревом электронов и связанным с ним сдвигом фотохимического баланса. Рост концентрации электронов и ионов в диапазонах высот 50-70 км и 100-150 км достигает одного порядка величины. Полученные результаты позволяют интерпретировать аномалии в распространении ОНЧ/УНЧ электромагнитных возмущений вблизи очагов готовящихся землетрясений.

7. Предложен механизм формирования УНЧ излучения на поверхности Земли в сейсмически активных областях. Он связан с образованием горизонтальных неоднородностей проводимости ионосферы в результате неустойчивости акустико-гравитационных волн, связанной с ростом электрического поля. Различные естественные источники электромагнитного излучения генерируют электромагнитный шум в диапазоне УНЧ и геомагнитных пульсаций. Под действием этого шума на горизонтальных неоднородностях ионосферной проводимости с пространственным масштабом порядка 10 км наводятся поляризационные токи, которые являются источниками гиротропных волн. Генерация и распространение этих волн приводит к формированию узкополосного электромагнитного излучения на поверхности Земли с частотами максимумов спектра в интервале порядка (1 – 20) Гц.

8. Проведен расчет высотного распределения амплитуды электрического поля в слое земля-ионосфера. Показано, что абсолютная величина поля может достигать пробойных значений в области толщиной порядка 1 км и шириной порядка десятков км, расположенной на высотах 5-10 км. Развита теория генерации электрическими разрядами в этой области электромагнитного излучения. Результаты расчета его спектра подтверждаются данными регистрации радиоизлучения в ВЧ диапазоне, генерируемого над очагами подготовки землетрясений.

Список работ по теме диссертации

1. Васильев В. В., Кутиков А. А., Сорокин В. М., Яценко А. К. О возможности моделирования эффектов растекания токов в полярной ионосфере. // Геомагнетизм и аэрономия. 1987. Т. 27. № 2. С.230-236.
2. Сорокин В. М., Яценко А. К. О влиянии поглощения на распространение гиротропных волн в нижней ионосфере, генерируемых квазигармоническим источником // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. М.: Наука, 1987. Вып. 81. С.72-79.
3. Сорокин В. М., Яценко А. К. Распространение пульсаций $Pi2$ в нижней ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 1988. Т. 28. № 4. С.655-660.
4. Сорокин В. М., Яценко А. К. Генерация короткопериодных колебаний геомагнитного поля в результате крупномасштабных возмущений проводимости ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30. № 3. С.425-428.
5. Сорокин В. М., Яценко А. К. Распространение импульсов низкочастотных электромагнитных волн в ионосферной плазме // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1992. Т. 35. № 5. С.375-380.
6. Гугоп Ю. В., Сорокин В. М., Яценко А. К. Генерация геомагнитных пульсаций в системе Земля-ионосфера при импульсном воздействии на нее солнечных вспышек // Геомагнетизм и аэрономия. 1993. Т. 33. № 4. С.79-85.
7. Сорокин В.М., Яценко А.К. Возмущение проводимости и электрического поля в слое Земля-ионосфера над очагом готовящегося землетрясения. // Геомагнетизм и аэрономия. 1999. Т.39. №2. С.100-106.

8. Sorokin V., Yaschenko A. *Electrical Field Disturbance in the Earth - Ionosphere Layer*. // *Advances in Space Research*. 2000. V. 26. N.8. P. 1219-1223.
9. Сорокин В.М., Яценко А.К. Возмущение электрического поля над очагом готовящегося землетрясения. // *Труды 9-й международной (летней) школы - симпозиума "Современная химическая физика"*. М.: МГУ. 1998. С.55-59.
10. Сорокин В. М., Яценко А. К. Возмущение квазистационарного электрического поля в атмосфере над сейсмоактивными районами // *Химическая физика*. 2000. Т.19. № 6. С.71-80.
11. Sorokin V.M., Chmyrev V.M., and Yaschenko A.K. *Electrodynamic model of the lower atmosphere and the ionosphere coupling* // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2001. V.63. N.16. P.1681-1691.
12. Сорокин В.М., Чмырев В.М., Яценко А.К. Ультранизкочастотные колебания магнитного поля на поверхности Земли, генерируемые горизонтальными неоднородностями ионосферной проводимости // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2001. Т.41. №3. С.327-331.
13. Сорокин В.М., Чмырев В.М., Яценко А.К. Возмущение электрического поля в слое Земля - ионосфера при инъекции заряженных аэрозолей // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2001. Т.41. №2. С.187-194.
14. Исаев Н.В., Сорокин В.М., Чмырев В.М., Серебрякова О.Н., Яценко А.К., 2002. Возмущение электрического поля в ионосфере морскими штормами и тайфунами. // *Космические исследования*. Т.40. №6. С.591-597.
15. Sorokin V.M., Chmyrev V.M., Yaschenko A.K. *Ionospheric generation mechanism of seismic related ULF magnetic pulsations observed on the*

- earth surface. // In: Seismo Electromagnetics. Lithosphere - Atmosphere - Ionosphere Coupling. Eds. M. Hayakawa and O.A. Molchanov. TERRAPUB. Tokyo. 2002. P.209-214.
16. Sorokin V.M., Chmyrev V.M., and Yaschenko A.K. Ionospheric generation mechanism of geomagnetic pulsations observed on the Earth's surface before earthquake // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2003. V.65. N.1. P.21-29.
 17. Sorokin V.M., Isaev N.V., Yaschenko A.K., Chmyrev V.M., and Hayakawa M. Strong DC electric field formation in the low latitude ionosphere over typhoons. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2005. V.67. N.14. P.1269-1279.
 18. Sorokin V.M., Chmyrev V.M., Yaschenko A.K. Theoretical model of DC electric field formation in the ionosphere stimulated by seismic activity. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2005. V.67. N.14. P.1259-1268.
 19. Sorokin V.M., Chmyrev V.M., and Yaschenko A.K. Possible DC electric field in the ionosphere related to seismicity. // Advances in Space Research. 2006. V.37. N.4. P.666-670.
 20. Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Chmyrev V.M., and Hayakawa M. DC electric field amplification in the mid-latitude ionosphere over seismically active faults. // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2005. V.5. N.5. P.661-666.
 21. Sergeev I.Yu., Sorokin V.M., Yaschenko A.K. Electromagnetic Pulse Generation in the Lower Ionosphere. // Proceedings of XXVIIIth General Assembly of URSI, New Delhi, India, October 23-29, 2005. P.248-252.

22. Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Chmyrev V.M., Hayakawa M. DC electric field formation in the mid-latitude ionosphere over typhoon and earthquake regions. // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2006. V.31. P.454-461.
23. Sorokin V.M., Yaschenko A.K., and Hayakawa M. Formation mechanism of the lower ionosphere disturbances by the atmosphere electric current over a seismic region. // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2006. V.68. N.11. P.1260-1268.
24. Sorokin V.M., Sergeev I.Yu., Yaschenko A.K. Electromagnetic field generation by explosion in the ionosphere. // *Advances in Space Research*. 2006. V.38. N.11. P.2511-2515.
25. Sorokin V.M., Chmyrev V.M., and Yaschenko A.K. Possible DC electric field in the ionosphere related to seismicity. // *Advances in Space Research*. 2006. V.37. N.4. P.666-670.
26. Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Chmyrev V.M., Hayakawa M. DC electric field amplification in the mid-latitude ionosphere over seismically active faults. // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2006. V.31. P.447-453.
27. Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Hayakawa M. A perturbation of DC electric field caused by light ion adhesion to aerosols during the growth in seismic-related atmospheric radioactivity // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2007. V.7. N.1. P.155-163.
28. Сорокин В.М., Ященко А.К., Накаява М. Возмущение электрического поля, обусловленное увеличением проводимости в результате роста уровня атмосферной радиоактивности, связанного с сейсмичностью // *Химическая физика*. 2007. Т.26. №4. С.39-44.

29. Сергеев И.Ю., Сорокин В.М., Яценко А.К. Электромагнитные и плазменные эффекты полета ракеты носителя // Геомагнетизм и аэрoномия. 2008. Т.48. №1. С.49-59.
30. Лаптухов А.И., Сорокин В.М., Яценко А.К. Возмущение D-области ионосферы электрическим током атмосферно - ионосферной электрической цепи. // Геомагнетизм и аэрoномия. 2009. Т.49. №6. С.805-811.

Подписано в печать 14.05.2009 г.
Формат 60x84/16. Печ. л. 1,75
Тираж 100 экз. Заказ 4596.

Издательство «Тривант»
ЛР 071961 от 01.09.1999 г.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии издательства «Тривант».
142191, г. Троицк Московской обл., м-н «В», д. 52.
Тел. (495) 775-43-35, (4967) 50-21-81
E-mail: trovant@trtk.ru, <http://www.trovant.ru/>