

На правах рукописи

Беккер Сусанна Зейтуллаевна

**ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
НИЖНЕЙ НЕВОЗМУЩЕННОЙ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ,
ВЕРИФИЦИРОВАННЫЕ ПО ДАННЫМ
НАЗЕМНЫХ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Специальность 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва

2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте динамики геосфер Российской академии наук (ИДГ РАН)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Козлов Станислав Иванович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института земного
магнетизма, ионосферы и распространения
радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской
академии наук (ИЗМИРАН)

Деминов Марат Гарунович

доктор физико-математических наук,
профессор, ведущий научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института мониторинга
климатических и экологических систем
Сибирского отделения Российской академии
наук (ИМКЭС СО РАН)

Нагорский Петр Михайлович

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН)

Защита состоится «11» декабря 2018 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета Д002.050.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер Российской академии наук по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 38, к. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИДГ РАН и на сайте idg.chph.ras.ru.

Автореферат разослан

«__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д002.050.01
кандидат физико-математических наук

Е.А. Виноградов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

К настоящему моменту накоплен большой объем теоретических оценок и экспериментальных данных о протекающих в ионосферной плазме процессах и о пространственном распределении концентраций ее составляющих, однако точность предсказания поведения параметров ионосферы, в том числе невозмущенной, в подавляющем большинстве гелиогеофизических условий мала.

Наименее изученной до сих пор остается нижняя часть ионосферы. Трудности исследования области D обусловлены как сложностью определения на этих высотах параметров ионосферы (в первую очередь, концентрации электронов), так и большим количеством протекающих в ней фотохимических процессов. При этом именно D -область ионосферы определяет устойчивость радиосвязи в СДВ (3–30 кГц) и ДВ (30–300 кГц) диапазонах.

Результаты многолетнего непрерывного мониторинга радиофизических характеристик сигналов СДВ диапазона свидетельствуют о существовании значительных вариаций амплитуды и фазы радиоволны даже в спокойных гелиогеофизических условиях. Исходя из современного понимания физики распространения радиоволн, можно сделать вывод, что наблюдаемые вариации амплитудно-фазовых характеристик связаны с непрерывным изменением ионосферных параметров. Анализ существующих методов описания среды распространения СДВ радиосигналов показывает, что она может быть корректно описана только вероятностными моделями.

Диссертация посвящена разработке вероятностных моделей среднеширотной невозмущенной D -области ионосферы, позволяющих описывать изменчивый характер нейтральных и заряженных составляющих ионосферы. Обсуждаемый метод моделирования базируется на общепринятых фундаментальных принципах, при этом из анализа отечественной и зарубежной литературы можно сделать вывод, что он до сих пор не был использован ни в одной модели D -области ионосферы.

Вероятностно-статистические модели позволяют получать плотности вероятности ионосферных параметров (в том числе, электронной концентрации) в различных гелиогеофизических условиях. Полученные плотности вероятности используются при расчете плотностей вероятности амплитуды и фазы волны на выбранных трассах и частотах в различных условиях солнечной и магнитной активности, на разных широтах, в различные сезоны и времена суток. В рамках диссертации разработаны два типа вероятностных моделей: эмпирически-статистические, создаваемые на основании статистического анализа

экспериментальных данных электронной концентрации, и вероятностные плазмохимические, в основу которых положены уравнения плазмохимии, в которых варьируются входные параметры.

В настоящем исследовании критерием адекватности разрабатываемых моделей является верификация по радиофизическим данным. В отличие от общепринятых метрик верификации, основанных на сравнении моделей с точно измеренными профилями электронной концентрации, данный подход обеспечивает достоверность модели во всем выбранном диапазоне высот и широт. Объем радиофизических данных на много порядков превышает объем измерений концентрации электронов в D -области, что также улучшает качество верификации. Построенные модели были верифицированы на 6 среднеширотных СДВ трассах по данным наземных радиофизических измерений, выполненных в геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево».

Цель настоящей работы – построение вероятностно-статистических моделей невозмущенной среднеширотной D -области ионосферы и оценка их возможностей для прогноза распространения СДВ радиоволн на средних широтах.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проведена статистическая обработка экспериментальных спутниковых данных нейтральных составляющих мезосферы и трех экспериментальных банков данных электронной концентрации на высотах D -области в различных гелиогеофизических условиях.
2. Разработана вероятностная модель среднеширотной D -области ионосферы, основанная на эмпирических законах распределения электронной концентрации, полученных на основании упомянутых банков данных.
3. Разработана вероятностная плазмохимическая модель D -области ионосферы с использованием эмпирических функций распределения свободных параметров.
4. В численном эксперименте исследована и показана сходимость ряда функций плотности вероятности заряженных компонент D -области ионосферы и функций плотности вероятности амплитуды СДВ радиоволны на выбранных среднеширотных трассах.
5. Проведена статистическая обработка экспериментальных данных наземных радиофизических измерений, полученных в ГФО Михнево в различных гелиогеофизических условиях. По ним проведена верификация полученных результатов вероятностно-статистических моделей на 6 среднеширотных СДВ трассах.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан принципиально новый вероятностно-статистический подход к моделированию такой нерегулярной, непрерывно изменяющейся среды как ионосфера. Вероятностный подход позволяет описывать изменчивое поведение исследуемой среды функциями плотности вероятности ионосферных параметров, по которым рассчитываются плотности вероятности амплитуды радиоволны на заданных трассах в различных гелиогеофизических условиях.
2. Разработанные вероятностно-статистические модели позволяют получить наиболее вероятную картину геофизической и радиофизической обстановки на трассе и дают практическую информацию разработчикам радиотехнических систем указанного диапазона о наиболее и наименее благоприятных условиях для передачи сигнала. Эти сведения не могут быть получены из детерминированных моделей, независимо от того, на каких принципах и на основании какого объема данных они строятся и как часто корректируются.
3. Разработаны принципы ассимиляции функций плотности вероятности спутниковых измерений (а не асиноптических значений) для получения актуальных функций распределения концентрации электронов.
4. Впервые проведен комплексный анализ функций распределения ионосферных параметров на основании многолетних спутниковых измерений нейтральной атмосферы. Показано, что в общем случае функции распределения параметров ионосферы не подчиняются нормальному закону распределения, а их наиболее вероятные величины отличны от медианных значений.

Основное **фундаментальное значение работы** заключается в отказе от детерминированного описания непрерывно изменяющейся среды. Вероятностно-статистический подход позволяет исследовать среду с точки зрения наиболее вероятных значений ее параметров, а не медианных величин. Кроме того, с помощью вероятностно-статистических моделей можно исследовать и уточнять механизмы, влияющие на концентрацию электронов, и оптимизировать используемые схемы ионизационно-рекомбинационного цикла.

Практическая значимость работы заключается:

- в повышении точности прогноза распространения радиоволн СДВ-ДВ диапазона, так как разработанный подход позволяет вычислять наиболее вероятные величины радиофизических параметров, а не их медианные значения;
- в получении из функций плотности вероятности радиофизических параметров информации о наиболее и наименее благоприятных условиях для передачи сигнала,

которая может быть использована для оптимизации режимов работы радиотехнических систем.

Методы исследования

В рамках работы использованы методы статистической обработки экспериментальных банков данных электронной концентрации, спутниковых данных нейтральных компонент нижней ионосферы и экспериментальных данных радиофизических измерений в СДВ диапазоне. Для получения значений концентрации заряженных компонент D -области ионосферы использованы численные методы решения систем дифференциальных уравнений. Расчет распространения СДВ-ДВ волн производится методом параболического уравнения. При генерации значений в соответствии с эмпирическими законами распределения ионосферных параметров применяется метод Монте-Карло. При оценке сходимости рядов функций плотности вероятности электронной концентрации и амплитуды волны, а также при сопоставлении теоретически полученных плотностей вероятности амплитуды радиоволны с экспериментальными данными, полученными в ГФО Михнево, использованы методы теории вероятности и математической статистики.

Защищаемые положения

- Разработаны эмпирически-статистическая и вероятностная плазмохимическая модели среднеширотной D -области ионосферы, описывающие ее нерегулярность и непрерывную изменчивость.
- Разработаны принципы ассимиляции данных спутниковых измерений на высотах D -области в рамках вероятностной плазмохимической модели.
- Показано, что ионосферные параметры D -области в общем случае не подчиняются нормальному закону распределения.
- Проведена верификация построенных вероятностно-статистических моделей D -области ионосферы по независимым данным наземных радиофизических измерений.
- Верификация моделей подтвердила их работоспособность в расчетах вероятностных радиофизических характеристик на среднеширотных СДВ-трассах.

Важнейшие результаты

- Разработана методика вероятностно-статистического моделирования D -области ионосферы для расчета вероятностных полей ионосферных параметров на среднеширотных трассах в спокойных условиях. Учет естественных и искусственных возмущений может быть осуществлен соответствующей модификацией уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла.

- Анализ функций плотности вероятности радиофизических параметров позволяет получить информацию о влиянии геофизических параметров на условия передачи информации по СДВ радиоканалам.
- Вероятностно-статистический подход позволяет восстановить состояние ионосферных параметров по радиофизическим измерениям распространения СДВ.
- На основании разработанных методик вероятностно-статистического моделирования возможно создание глобальной ассимиляционной вероятностной ионосферной модели, которая может быть использована, в частности, для оперативной коррекции радиолокационных данных.

Достоверность полученных результатов обеспечивается большим объемом используемых экспериментальных спутниковых данных, полученных с использованием современных апробированных методик измерений и обработки данных, тщательным анализом имеющихся опубликованных материалов и верификацией результатов по независимо полученным данным экспериментальных радиофизических измерений.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в постановке конкретных задач исследования, поиске и статистической обработке экспериментальных банков данных ионосферных параметров, разработке алгоритмов вероятностного моделирования, статистической обработке экспериментальных данных наземных радиофизических измерений в ГФО Михнево, проведении расчетов и анализе получаемых результатов, обзоре литературы по тематике исследования.

Апробация работы

Основные результаты диссертационного исследования были доложены лично автором на 2 семинарах, 3 международных и 12 всероссийских конференциях: семинаре ИПГ Росгидромета "Моделирование ионосферы Земли" (г. Москва, 2014 г.), семинаре ИДГ РАН "Динамические процессы в геосферах" (г. Москва, 2017 г.), Международной научной ассамблее "COSPAR 2014" (г. Москва, 2014 г.), Международном симпозиуме COSPAR "Small Satellites for Space Research" (Республика Корея, 2017 г.), Международной Байкальской школе по фундаментальной физике "Физические процессы в космосе и околоземной среде" (г. Иркутск, 2017 г.), конференциях ИКИ "Физика плазмы в солнечной системе" (г. Москва, 2016 г., 2018 г.), Всероссийской научной конференции Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского "Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды" (г. Санкт-Петербург, 2016 г.), Всероссийских научно-технических конференциях РТИ "Минцевские чтения" (г. Москва, 2016, 2017 гг.), Всероссийской научной конференции ИДГ РАН "Триггерные эффекты в геосистемах" (г. Москва, 2017 г.), Всероссийских научно-

практических конференциях "Актуальные проблемы защиты и безопасности" (г. Санкт-Петербург, 2014, 2016 гг.), Всероссийских научных конференциях МФТИ "Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики" (г. Москва, 2013, 2014, 2015, 2016 гг.).

По теме диссертации автором опубликовано 32 научные работы, в том числе 6 статей в рецензируемых журналах (входящих в перечень ВАК), 26 статей и тезисов работ в научных сборниках и трудах конференций.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 119 наименований. Общий объем диссертации – 129 страниц, включая 59 рисунков и 32 таблицы.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н. С.И. Козлову за основную идею и постоянное внимание к работе; к.т.н. Ляхову А.Н. за помощь в работе и ценные указания при проведении исследований; к.ф.-м.н. Покладу Ю.В. и к.ф.-м.н. Ряховскому И.А. за предоставленные экспериментальные данные и помощь в их обработке; д.ф.-м.н. Зецеру Ю.И., д.ф.-м.н. Гаврилову Б.Г. и к.ф.-м.н. Корсунской Ю.А. за внимание к работе, обсуждение результатов, ценные рекомендации и замечания.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, изложены цель и задачи исследования, сформулированы основные защищаемые положения, отражена научная новизна и описаны практическая и теоретическая значимость работы.

В первой главе описаны этапы развития моделирования *D*-области ионосферы и приведен краткий обзор наиболее известных моделей нижней ионосферы. Рассматриваются две группы моделей *D*-области: эмпирические, которые основаны на больших рядах экспериментальных данных, и теоретические, которые моделируют процессы возникновения, потери, переноса заряженных частиц в ионосфере для получения концентрации электронов *N_e*. Эмпирические модели представлены международной справочной моделью IRI, двухпараметрической моделью Уайта-Фергюсона и моделью SIMP, теоретические – программным комплексом моделирования ионосферы и распространения радиоволн KB и СДВ-ДВ диапазонов, глобальной трехмерной моделью общей циркуляции тропосферы-стратосферы-мезосферы, моделями CHARM, SIC и WACCM-D. Явным преимуществом почти всех теоретических моделей является учет большого количества фотохимических реакций и возможность моделирования ионосферы в условиях естественных и искусственных возмущений, эмпирические же являются более простыми в использовании, обладают быстрым действием и чаще предназначены для решения прикладных задач. Основными недостатками всех описанных моделей являются отсутствие верификации по экспериментальным радиофизическим данным и их детерминированный характер, который не позволяет учитывать непрерывную изменчивость параметров среды.

Вторая глава посвящена разработке эмпирически-статистических моделей невозмущенной среднеширотной *D*-области ионосферы.

Для построения эмпирически-статистических моделей были использованы банки данных электронной концентрации: «Каталог профилей электронной концентрации области *D* ионосферы» (далее «Каталог») и «Модель глобального распределения концентрации и эффективной частоты соударения электронов для прогнозирования низкочастотных радиополей» (далее «ГОСТ»). Была проведена статистическая обработка банков данных *N_e* в различных гелиогеофизических условиях. Для работы выбирались профили, соответствующие исключительно спокойным магнитным условиям и средним широтам ($30^\circ \leq |\varphi| \leq 60^\circ$). Весь объем профилей был разбит на 12 блоков, каждый из которых соответствовал некоторому набору гелиогеофизических признаков (сезон, время суток, солнечная активность). Для каждого гелиогеофизического условия были отобраны подходящие профили, далее по ним в

диапазоне высот $55 \text{ км} \leq h \leq 95 \text{ км}$ с шагом в 5 км определялись законы распределения N_e , математическое ожидание μ (N_e) и среднеквадратическое отклонение σ (N_e).

Основная трудность при разработке эмпирически-статистических моделей – отсутствие экспериментальных данных, перекрывающих весь диапазон вариаций гелиогеофизических условий. В связи с малым объемом данных и, как следствие, высоким разбросом значений N_e , среднеквадратические отклонения из Каталога существенно превышают соответствующие значения из ГОСТ. Показано, что в дневные часы ниже 90 км области значений $\mu \pm \sigma$ из ГОСТ целиком лежат в соответствующих областях из Каталога. В ночные часы из-за малого количества данных в обоих банках нет смысла делать обобщенный анализ.

Распределения электронной концентрации из двух банков данных в различных гелиогеофизических условиях были проверены на соответствие нормальному и логнормальному законам распределения по двум критериям математической статистики. Оказалось, что электронные концентрации из обоих банков лучше описываются логнормальным законом распределения, при этом всего 39% данных Каталога и 86% данных ГОСТ подчиняются этому закону по одному из критериев (по другому критерию соответственно – 21% и 42%). Поскольку полученные массивы значений электронной концентрации в общем случае не описываются нормальным и логнормальным законами распределения, генерацию профилей N_e необходимо проводить напрямую согласно полученным функциям плотности вероятности $P(N_e)$.

По умолчанию ГСЧ (генератор случайных чисел) позволяет создать массив случайных величин, описываемых равномерным законом распределения. Для получения значений N_e с заданным произвольным законом распределения был использован метод Монте Карло. Дискретизация функций плотности вероятности N_e была проведена с различной частотой для разных высот D -области ионосферы. Так, например, частота дискретизации распределений на высоте $h = 60 \text{ км}$ составила 0.1 см^{-3} , а на высоте $h = 80 \text{ км}$ – 8 см^{-3} .

В численном эксперименте была исследована сходимости ряда функций плотности вероятности электронной концентрации по двум банкам данных при увеличении количества N сгенерированных профилей N_e . Оказалось, что, начиная с $N = 1000$, изменения функции плотности вероятности лежат в пределах 2%. Этого количества достаточно для корректного построения кривых плотности вероятности $P(N_e)$.

Третья глава посвящена разработке вероятностной плазмохимической модели невозмущенной среднеширотной D -области ионосферы.

В основу вероятностной плазмохимической модели положена 5-компонентная система дифференциальных уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла D -области

ионосферы, в которой варьируются входные параметры: скорость ионизации q , температура нейтралов T , концентрации $[O_2]$, $[N_2]$, $[H_2O]$, $[O_3]$ и $[CO_2]$.

Анализ чувствительности решений уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла на изменение входных параметров показал, что концентрация электронов наиболее чувствительна к варьированию q , T и $[O_2]$. Следовательно, к заданию этих параметров необходимо отнестись особенно аккуратно.

Для определения законов распределения варьируемых параметров была проведена статистическая обработка экспериментальных банков данных T , $[O_2]$, $[N_2]$, $[H_2O]$, $[O_3]$ со спутника AURA и данных $[CO_2]$ со спутника TIMED за несколько лет. Рассматривались 4 сезона: зима (ноябрь, декабрь, январь, февраль), весна (март, апрель), лето (май, июнь, июль, август), осень (сентябрь, октябрь), в качестве дневного и ночного времени приняты соответственно часы освещенной и неосвещенной ионосферы (зависящие от трассы и сезона). Для всех комбинаций гелиогеофизических условий в диапазоне высот $50 \text{ км} \leq h \leq 85 \text{ км}$ были получены функции плотности вероятности T , $[O_2]$, $[N_2]$, $[H_2O]$, $[O_3]$ и $[CO_2]$. Далее согласно полученным распределениям генерировалось N высотных профилей параметров (N определяется сходимостью ряда функций плотности вероятности каждого из параметров). На рис. 1 в качестве примера приведены кривые плотности вероятности температуры T на разных высотах в дневные часы осенних месяцев 2009 года. Как видно из рисунков, полученные кривые в общем случае не соответствуют нормальному закону распределения, и на разных высотах их поведение существенно отличается. Полученные эмпирические функции плотности вероятности напрямую использовались для генерации высотных профилей T аналогично тому, как это описано выше.

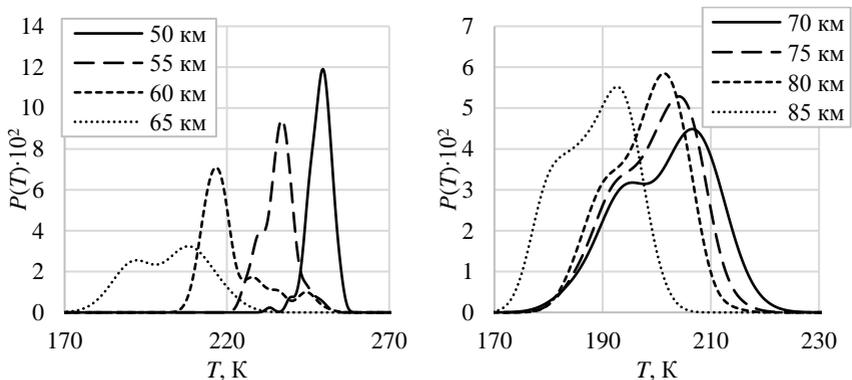


Рис. 1. Плотность вероятности температуры $P(T)$ для высот $h = 50\text{--}85 \text{ км}$ (день, осень 2009 г., средние широты)

На рис. 2 цветом обозначено значение функции плотности вероятности температуры нейтралов T , нормированное на максимальное значение, для двух уровней солнечной активности и на разных высотах. Как и следовало ожидать, разброс данных T при высокой солнечной активности выше, чем при низкой солнечной активности, причем наибольшим образом это наблюдается при $h \geq 65$ км. Помимо этого, обнаружена сезонная зависимость функций $P(T)$: в месяцы равноденствия дисперсия значений меньше, чем в летние и зимние месяцы. Вероятно, это связано с объединением при обработке меньшего количества дней.

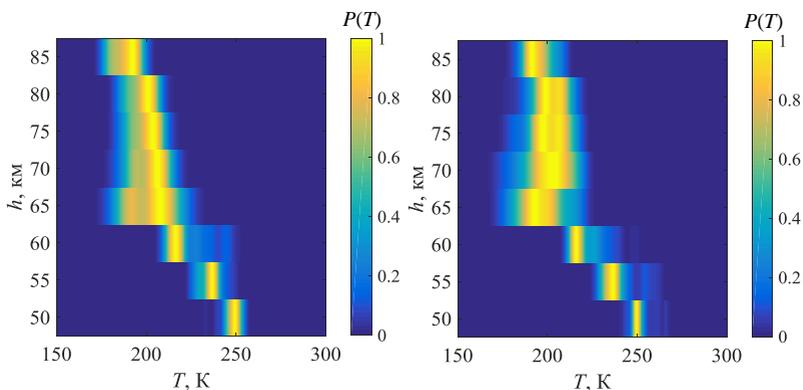


Рис. 2. Плотность вероятности температуры $P(T)$ на высотах $h = 50\text{--}85$ км во время низкой (слева) и высокой солнечной активности (справа) (осень, день, средние широты)

На рис. 3 представлен высотный профиль $\lg[\text{O}_2]$ на двух разных широтах в условиях низкой солнечной активности. Можно заметить, что с приближением к полярной области дисперсия концентрации увеличивается.

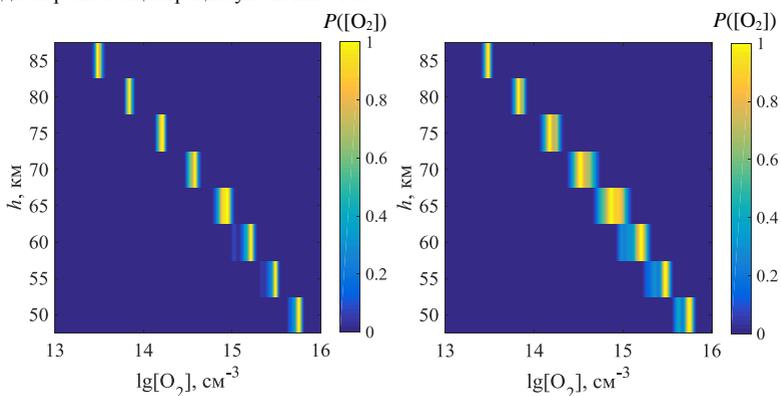


Рис. 3. Плотность вероятности концентрации кислорода $P([\text{O}_2])$ на высотах $h = 50\text{--}85$ км на 45° с.ш. (слева) и на 60° с.ш. (справа) (день, осень, низкая солнечная активность)

Отметим, что обработанные спутниковые данные имелись в большом объеме во всех рассматриваемых условиях. Значит, можно утверждать, что столь важные распределения T и $[O_2]$ заданы с максимально возможной точностью.

Наиболее важной и до конца нерешенной проблемой моделирования является отсутствие достоверной и полной информации о поведении одного из наиболее значимых параметров ионизационного-рекомбинационного цикла – скорости ионизации. Для оценки q была рассмотрена ионизация космическими лучами, ионизация NO линией L_{α} ($\lambda = 121.6$ нм), ионизация $O_2(^1\Delta_g)$ в диапазоне $\lambda = 102.7-111.8$ нм и ионизация потоком высокоэнергичных частиц.

Скорость ионизации нижней ионосферы космическими лучами $q_{кл}$ в зависимости от высоты, солнечной активности и широты оценивалась по параметризованным уравнениям, полученным Хипсом.

Вопрос ионизации атмосферы в диапазоне высот $h \approx 65-85$ км всегда вызывал наибольшую трудность. Дело в том, что излучение с длинами волн $\lambda < 100$ нм не проникает на высоты D -области ионосферы, а кванты с длинами волн выше 100 нм имеют недостаточную энергию, чтобы ионизовать молекулы O_2 и N_2 , из которых в основном состоит среда на этих высотах. Однако в этом высотном диапазоне есть малая нейтральная составляющая, которая поддается воздействию более мягкого излучения — окись азота NO (потенциал ионизации ~ 9.27 эВ). Скорость фотоионизации NO в дневные часы рассчитывалась по стандартной формуле ионизации компоненты нейтрального газа:

$$q_{L_{\alpha}}(h) = \sigma_{NO}^{ион.} \cdot [NO](h) \cdot F_{L_{\alpha}} \cdot \exp\left(-\sigma_{O_2}^{погл.} \cdot \sec \chi \cdot \int_h^{+\infty} [O_2](h) dh\right), \quad (1)$$

где $\sigma_{NO}^{ион.}$ — сечение фотоионизации NO на длине волны $\lambda = 121.6$ нм, $F_{L_{\alpha}}$ — поток фотонов на длине волны $\lambda = 121.6$ нм за пределами атмосферы, χ — зенитный угол Солнца, $\sigma_{O_2}^{погл.}$ — сечение поглощения фотона с длиной волны $\lambda = 121.6$ нм.

Для оценки ионизации рассеянным излучением Солнца была использована аппроксимация ночного потока, предложенная Томасом и Боуменом:

$$q_{L_{\alpha}}^{ночная}(h) = \sigma_{NO}^{ион.} \cdot [NO](h) \cdot \frac{4.9 \cdot 10^8}{\cos^2 \chi + 0.1} \cdot \exp[-0.48 \cdot \exp(0.15(85-h)-1)]. \quad (2)$$

Определение концентрации $[NO]$ — наиболее сложный и важный этап расчета скорости ионизации. Существует метод оценки концентрации атмосферной компоненты по мере ее оптической эмиссии, например, $Q_{5.3} = k \cdot [NO]$, где $Q_{5.3}$ — мера эмиссии NO на длине волны 5.3 мкм, а k — коэффициент пропорциональности, который является сложной функцией концентраций нейтральных, заряженных, возбужденных составляющих ионосферы и констант

скоростей реакций, часть которых просто неизвестна. Тем не менее обнаруженная пропорциональность позволяет утверждать, что поведение функции плотности вероятности $[NO]$ будет абсолютно идентично поведению функции плотности вероятности величины $Q_{5.3}$, которая с начала 2002 года измеряется радиометром SABER, установленным на спутнике TIMED. В качестве опорных средних профилей $[NO]$, к которым привязываются полученные функции плотности вероятности $P(Q_{5.3})$, были выбраны профили Стандарта США 1986 года.

Излучение в интервале длин волн 102.7–111.8 нм проникает на высоты D -области ионосферы, однако энергии этих фотонов не хватает для ионизации молекул O_2 и N_2 . Разница между энергией кванта и порогом ионизации O_2 составляет меньше 1 эВ, поэтому энергии, запасенной возбужденной молекулой $O_2(^1\Delta_g)$, достаточно для компенсации этой разницы. Для оценки скорости ионизации $O_2(^1\Delta_g)$ в УФ диапазоне использовалась аппроксимация Паулсена.

Ночная среднеширотная область D изучена очень плохо, в первую очередь это связано с трудностью измерений концентраций ее малых составляющих. Тем не менее уже стало понятно, что высыпавшиеся электроны с энергиями в несколько десятков кэВ вносят значительный вклад в ионизацию ночной области D даже на средних широтах. Для учета скорости ионообразования, обусловленной воздействием энергичных электронов, использованы оценки, предложенные Кошелевым.

Средние значения суммарной скорости ионизации, полученные в результате учета перечисленных выше источников ионизации, представлены на рис. 4.

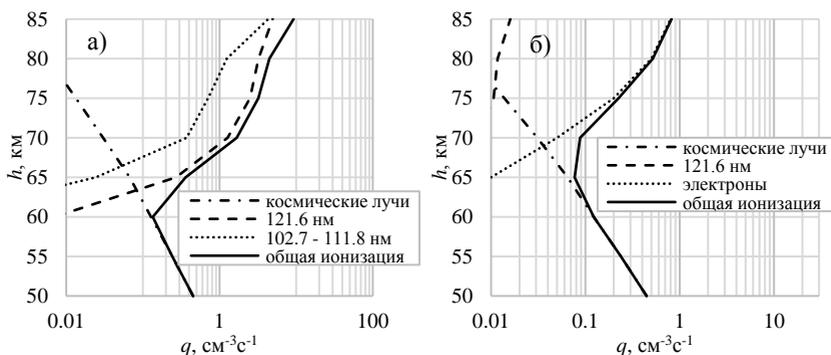


Рис. 4. Средние значения скорости ионизации различными источниками в дневные часы (а) и ночные часы (б) (осень 2009 г., средние широты)

Как видно из графиков, ионизация космическими лучами практически не имеет суточной и сезонной зависимости. В дневные часы уже на 65 км становится существенной ионизация NO линией Лайман- α , еще выше появляется ионизация $O_2(^1\Delta_g)$ в УФ диапазоне, и примерно на 85 км последняя начинает преобладать над ионизацией NO. В ночные часы,

начиная примерно с 65 км, D -область ионизируется за счет потока высокоэнергичных электронов, выпадающих из радиационных поясов. Как оказалось, ночная ионизация NO здесь практически не ощутима.

В качестве примера на рис. 5 изображены полученные дневные высотные профили $P(q)$ в осенние месяцы в условиях различной солнечной активности. Данные распределения, как и распределения остальных входных параметров модели, используются для генерации высотных профилей, которые подставляются в систему дифференциальных уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла.

Наибольшие вариации скорости ионизации в дневные часы (рис. 5) наблюдаются на высотах $h > 65$ км, где ионизируется молекула NO. В ночные часы основные вариации скорости ионизации наблюдаются на высотах 60–70 км. Из рис. 4б следует, что они также вызваны колебанием концентрации [NO].

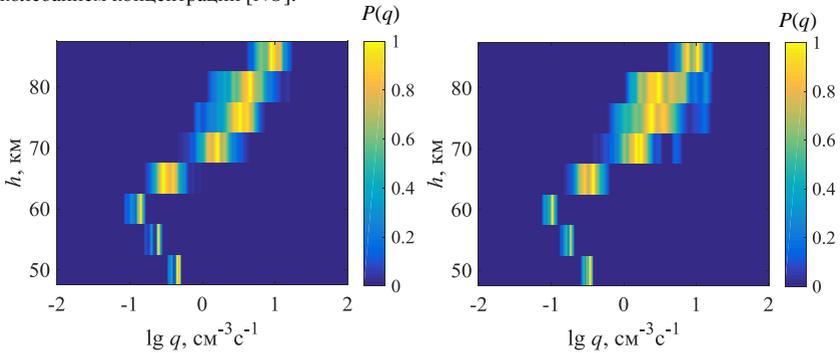


Рис. 5. Плотность вероятности скорости ионизации $P(q)$ на высотах $h = 50\text{--}85$ км во время низкой (слева) и высокой солнечной активности (справа) (день, осень, средние широты)

Обратим внимание, что распределения не описываются нормальным законом распределения, у функций $P(q)$ имеется множество максимумов.

Как было сказано выше, расчет электронной концентрации осуществлялся по пятикомпонентной системе дифференциальных уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла. С шагом в 5 км по высоте с каждым набором сгенерированных профилей решалась система уравнений, и на выходе было получено N профилей концентрации N_e .

Анализ функций плотности вероятности N_e , полученных по двум эмпирически-статистическим моделям и вероятностной плазмохимической, показал, что в зависимости от высоты, сезона и уровня солнечной активности, согласие между функциями может существенно меняться. Так, например, на рис. 6 изображены функции $P(N_e)$, соответствующие летним месяцам и низкой солнечной активности на двух высотах — 70 и 80 км. Несмотря на

одни и те же условия и близость высот, на 70 км имеется явное количественное расхождение между точками максимума функций, а на 80 км наиболее вероятные величины практически совпадают. В ночное время наблюдается существенное расхождение профилей, вероятно, связанное с неучетом важного источника ионизации неосвещенной ионосферы в вероятностной плазмохимической (В-П) модели.

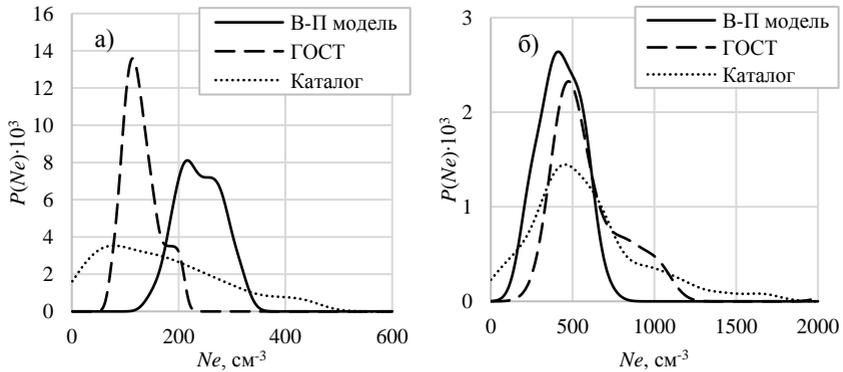


Рис. 6. Плотность вероятности концентрации электронов $P(Ne)$ для $h = 70$ км (а) и $h = 80$ км (б) (день, лето, низкая солнечная активность, средние широты)

И из рис. 6, и из рис. 7, где значения функций плотности вероятности изображены цветом, видно, что три построенные модели демонстрируют принципиально разный характер результатов. Наибольшие дисперсии концентрации Ne наблюдаются у данных Каталога в любой сезон и при любом уровне солнечной активности. Данные из ГОСТ наименее устойчивы в нижней части D -области, данные вероятностной плазмохимической модели – в верхней. От солнечной активности полученные плотности вероятности Ne зависят незначительно.

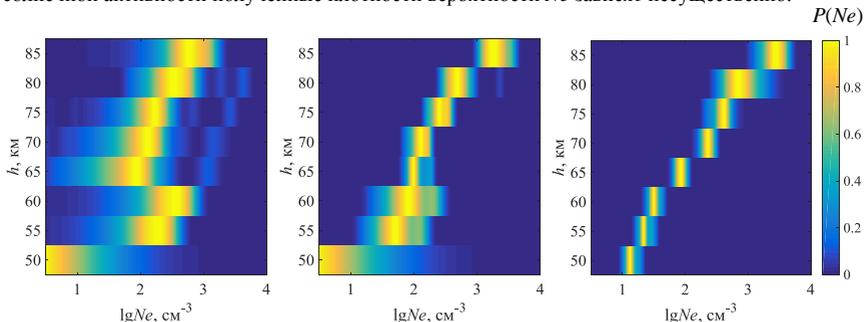


Рис. 7. Плотность вероятности концентрации электронов $P(Ne)$ на высотах $h = 50-85$ км по данным Каталога (слева), по данным ГОСТ (по центру), по В-П модели (справа) (день, осень, низкая солнечная активность, средние широты)

Сравнительный анализ медианных и наиболее вероятных значений N_e показал, что на некоторых высотах они могут существенно отличаться друг от друга в зависимости от выбранных гелиогеофизических условий. То есть функции плотности вероятности N_e (как и остальных нейтральных и заряженных составляющих D -области ионосферы) в общем случае не подчиняются нормальному закону распределения. Отсюда сделан вывод, что медианными значениями (и тем более средними) невозможно корректно описать среду, и поэтому необходим переход к функциям плотности вероятности.

На основании описанной методологии построения вероятностной плазмохимической модели возможно создание вероятностной ассимиляционной модели, которая будет уточняться за счет усвоения актуальных функций плотности вероятности спутниковых измерений концентраций нейтральных составляющих ионосферы и температуры. Знание корректных законов распределения входных параметров ионизационно-рекомбинационного цикла позволит свести ошибку расчета плотности вероятности N_e к минимуму.

Четвертая глава посвящена верификации построенных вероятностно-статистических моделей нижней ионосферы по экспериментальным данным радиофизических измерений, полученных в ГФО Михнево.

Расчет амплитуды радиоволны для профилей электронной концентрации, полученных по вероятностно-статистическим моделям, проводился с использованием созданного в Санкт-Петербургском государственном университете программного комплекса расчета распространения СДВ-ДВ радиоволн ParabEq.

Для сопоставления результатов расчетов с экспериментальными данными использовались амплитуды СДВ сигналов, принятых в подмосковной геофизической обсерватории «Михнево» (55° с.ш., 38° в.д.) от шести передатчиков, перечисленных в табл. 1. Изменение магнитного поля измеряется в ГФО Михнево в частотном диапазоне 0.8–65 кГц.

Передатчики RJN-77, RJN-63 и RJN-90 работают по расписанию: на каждой из трех указанных в табл. 1 частот они излучают сигнал в течение нескольких минут в дневное время. Передатчики DHO38, TBB и NRK работают на фиксированных частотах непрерывно в течение суток.

Принципиальной проблемой при сопоставлении абсолютных значений амплитуд оказалось незнание истинных мощностей передатчиков. Более того, из анализа многолетних данных, собранных в обсерватории Михнево, можно сделать вывод, что мощность передатчиков в течение года хаотично меняется. Из-за этого верификация абсолютных величин невозможна. Поэтому для верификации теоретических результатов необходимо использовать разницу амплитуд в [дБ], которая, очевидно, не зависит от мощности передатчика.

Таблица 1. Основные характеристики СДВ передатчиков

Станция	Местоположение	Частота (кГц)	Координаты	Длина трассы (км)
DHO38	Германия	23.4	53° с.ш., 8° в.д.	1950
TBB	Турция	26.7	37° с.ш., 27° в.д.	2270
NRK	Исландия	37.5	64° с.ш., -22° в.д.	3310
RJH-63	Россия (Краснодар)	20.5 23.0 25.0	45° с.ш., 40° в.д.	1230
RJH-90	Россия (Нижний Новгород)	20.5 23.0 25.0	56° с.ш., 44° в.д.	370
RJH-77	Россия (Архангельск)	20.5 23.0 25.0	64° с.ш., 42° в.д.	910

Передатчики RJH-77, RJH-63, RJH-90 излучают сигнал постоянной мощности на нескольких частотах, поэтому для верификации на соответствующих трассах была выбрана величина ΔA – разница амплитуд, принятых на разных частотах от одного передатчика. Далее разность амплитуд сигналов на частотах 23 кГц и 25 кГц будет обозначаться как ΔA_{23-25} , на частотах 20.5 кГц и 25 кГц – ΔA_{20-25} , на частотах 20.5 кГц и 23 кГц – ΔA_{20-23} .

Расчет амплитуды радиоволны, прошедшей через теоретически смоделированную среду, осуществлялся при мощности передатчика в 1 кВт.

Для оценки работоспособности вероятностно-статистических моделей были сопоставлены наиболее вероятные величины (точки абсолютного максимума) теоретических и экспериментальных функций плотности вероятности $P(\Delta A)$. Хорошим согласием результатов построенных моделей с экспериментальными данными является попадание теоретических величин в пределы экспериментальных вариаций. Поэтому были рассмотрены среднеквадратические отклонения $\sigma(\Delta A_{20-23})$, $\sigma(\Delta A_{20-25})$ и $\sigma(\Delta A_{23-25})$.

В табл. 2 в качестве примера представлены $\sigma(\Delta A_{20-23})$, $\sigma(\Delta A_{20-25})$ и $\sigma(\Delta A_{23-25})$, полученные на трассе RJH-77 – Михнево при низкой солнечной активности. Отклонения наиболее вероятных модельных величин ΔA_{23-25} от экспериментальных в условиях низкой солнечной активности на этой же трассе представлены в табл. 3. Те значения, которые укладываются в пределы σ из табл. 2, окрашены в зеленый цвет, а те, которые укладываются в пределы 2σ , окрашены в желтый. Здесь же указаны отклонения в %. Зеленым цветом обозначены результаты, попадающие в диапазон $\pm 20\%$, желтым – $\pm 40\%$.

Параллельное рассмотрение отклонений в [дБ] и в [%] позволяет избежать с одной стороны завышенных требований к моделям в условиях сильной изменчивости среды (и, как

следствие, высоких вариаций экспериментальных данных), с другой стороны – получения минимого согласия теории с экспериментом при неадекватно высоких значениях σ . Стоит отметить, что в данной ситуации значения в [дБ] и в [%] между собой хорошо коррелируют.

Таблица 2. Среднеквадратические отклонения экспериментальных величин ΔA_{20-23} , ΔA_{20-25} и ΔA_{23-25} при низкой солнечной активности на трассе RJH-77 – Михнево

	осень	весна	лето
$\sigma(\Delta A_{23-25})$	1.85	1.60	0.92
$\sigma(\Delta A_{20-25})$	2.98	3.53	2.43
$\sigma(\Delta A_{20-23})$	2.72	2.44	1.90

Таблица 3. Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{23-25} на трассе RJH-77 – Михнево при низкой солнечной активности

	$\Delta A_{\text{теор}} - \Delta A_{\text{эсп}}$, [дБ]			$\Delta A_{\text{теор}} - \Delta A_{\text{эсп}}$, [%]		
	осень	весна	лето	осень	весна	лето
В-П модель	2.50	1.75	-0.50	133	122	94
ГОСТ	0.05	-0.60	-1.05	101	93	89
Каталог	0.20	-0.45	-0.90	102	95	90

Как видно из таблиц, на данной трассе в условиях низкой солнечной активности лучшее согласие с экспериментом наблюдается у данных Каталога.

На рис. 8 в качестве примера представлены функции $P(\Delta A_{23-25})$ в условиях высокой солнечной активности. Как правило, экспериментальные кривые плотности вероятности шире и ниже теоретических распределений. В большинстве случаев разброс экспериментальных значений сравним лишь с разбросом данных из Каталога.

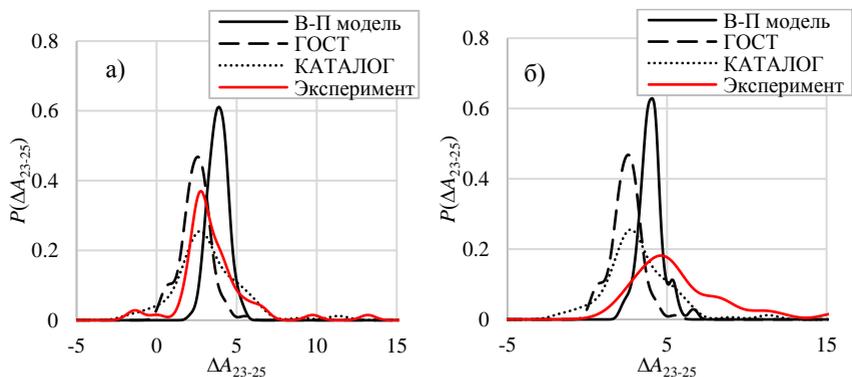


Рис. 8. Плотность вероятности $P(\Delta A_{23-25})$ в осенние (а) и весенние месяцы (б) (высокая солнечная активность, трасса RJH-77 – Михнево)

В условиях высокой солнечной активности величина ΔA_{23-25} (табл. 4) почти во всех условиях лежит в пределах допустимой погрешности. А там, где выходит за ее пределы, отклонение от среднего не превышает 20 %, что можно считать хорошим согласием.

Таблица 4. Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{23-25} на трассе RJH-77 – Михнево при высокой солнечной активности

	$\Delta A_{\text{теор}} - \Delta A_{\text{эксп}}$, [дБ]			$\Delta A_{\text{теор}} - \Delta A_{\text{эксп}}$, [%]		
	осень	весна	лето	осень	весна	лето
В-П модель	1.15	-0.60	-1.85	114	93	81
ГОСТ	-0.20	-2.05	-1.20	98	79	87
Каталог	0.00	-1.85	-1.30	100	81	86

В целом, на трассе RJH-77 – Михнево наблюдается хорошее согласие эмпирически-статистических моделей с экспериментальными данными распространения СДВ волн. Вероятностная плазмохимическая модель незначительно уступает данным ГОСТ и Каталога.

Далее будет анализироваться только величина ΔA_{23-25} , так как ΔA_{20-23} и ΔA_{20-25} ведут себя примерно аналогичным образом.

На более южной трассе (RJH-63 – Михнево) наиболее вероятные значения, полученные по вероятностной плазмохимической модели, практически совпадают с экспериментальными значениями в условиях и низкой, и высокой солнечной активностей (табл. 5, табл. 6). Исключение составили только зимние месяцы, когда экспериментальных данных оказалось недостаточно для получения корректных функций плотности вероятности ΔA_{23-25} . Эмпирически-статистические модели уступают в точности вероятностной плазмохимической модели при любой солнечной активности, при этом в большинстве случаев и у них согласие с экспериментом достаточно хорошее.

«Привычного» влияния солнечной активности здесь не наблюдается (в табл. 6 результаты значительно лучше, чем в табл. 5), что, вероятно, связано с более низкими широтами рассматриваемой трассы.

Таблица 5. Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{23-25} на трассе RJH-63 – Михнево при низкой солнечной активности

	$\Delta A_{\text{теор}} - \Delta A_{\text{эксп}}$, [дБ]				$\Delta A_{\text{теор}} - \Delta A_{\text{эксп}}$, [%]			
	осень	весна	лето	зима	осень	весна	лето	зима
В-П модель	0.85	0.20	-0.05	2.65	110	102	99	136
ГОСТ	-1.05	-1.70	-2.15	1.70	89	82	78	122
Каталог	-2.45	-3.10	-1.95	1.00	75	70	80	112

Таблица 6. Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{23-25} на трассе RJH-63 – Михнево при высокой солнечной активности

	$\Delta A_{\text{теор}} - \Delta A_{\text{экср.}}$, [дБ]				$\Delta A_{\text{теор}} - \Delta A_{\text{экср.}}$, [%]			
	осень	весна	лето	зима	осень	весна	лето	зима
В-П модель	0.25	0.00	-0.10	2.10	103	100	99	127
ГОСТ	-1.20	-1.50	-2.10	1.10	87	84	79	114
Каталог	-0.95	-1.25	-0.40	0.55	90	87	95	107

Две предыдущие трассы являлись меридиональными, а трасса RJH-90 – Михнево является широтной и имеет значительно меньшую длину. В табл. 7 представлена разница между наиболее вероятными модельными и экспериментальными величинами ΔA_{23-25} в условиях низкой солнечной активности на трассе RJH-90 – Михнево.

Таблица 7. Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{23-25} на трассе RJH-90 – Михнево при низкой солнечной активности

	$\Delta A_{\text{теор}} - \Delta A_{\text{экср.}}$, [дБ]				$\Delta A_{\text{теор}} - \Delta A_{\text{экср.}}$, [%]			
	осень	весна	лето	зима	осень	весна	лето	зима
В-П модель	0.20	-1.10	-0.75	-2.75	102	88	92	73
ГОСТ	0.25	-0.60	-2.30	1.55	103	93	77	120
Каталог	-0.50	-1.35	-1.70	0.80	94	86	82	110

Из табл. 7 видно, что практически в любой сезон наиболее вероятные величины по всем трем моделям лежат в пределах $\pm 20\%$ от экспериментальных значений, что говорит о высоких прогностических возможностях вероятностно-статистических моделей на схожих (по длине и направлению) трассах. Во время высокой солнечной активности на данной трассе на частоте 23 кГц обнаружены существенные скачки амплитуды сигнала, не связанные с ионосферными возмущениями, из-за чего значения $\sigma(\Delta A_{23-25})$ в разные сезоны составляют $\sim 6-7$ дБ, поэтому эти условия мы рассматривать не будем.

В отличие от передатчиков RJH-77, RJH-63, RJH-90, передатчики DHO38, TBB и NRK излучают сигнал на фиксированных частотах, поэтому на этих трассах использовать для верификации введенную выше величину ΔA невозможно. Однако передатчики DHO38, TBB и NRK работают круглосуточно, что позволяет использовать для верификации суточный перепад амплитуды – $\Delta A_{\text{сут}}$ (разность между ночным и дневным значениями амплитуды в [дБ]). Этот способ верификации также не зависит от мощности передатчика, но, к сожалению, при этом он не позволяет оценить прогностические возможности моделей в дневные и ночные часы независимо. Поскольку вероятностная плазмохимическая модель на данный момент не

пригодна для корректной оценки N_e в ночные часы, для расчета соответствующей ей величины $\Delta A_{\text{сут}}$ в качестве ночных профилей были использованы ночные профили ГОСТ.

В табл. 8 и табл. 9 приведена разница между наиболее вероятными значениями $\Delta A_{\text{сут}}$ на трассе ДНО38 – Михнево при разных уровнях солнечной активности. Несмотря на малые значения σ , большинство теоретических значений укладываются в пределы допустимой погрешности, и почти все результаты попали в диапазон $\pm 20\%$. При высокой солнечной активности наблюдается явное преимущество вероятностной плазмохимической модели.

Таблица 8. Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{23-25} на трассе ДНО38 – Михнево при низкой солнечной активности

	$\Delta A_{\text{теор}} - \Delta A_{\text{эксп}}$, [дБ]				$\Delta A_{\text{теор}} - \Delta A_{\text{эксп}}$, [%]			
	осень	весна	лето	зима	осень	весна	лето	зима
В-П модель	0.14	1.05	-1.61	0.28	102	113	83	103
ГОСТ	1.47	2.31	0.00	1.33	118	130	100	117
Каталог	0.28	1.12	1.40	1.26	103	114	117	116

Таблица 9. Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{23-25} на трассе ДНО38 – Михнево при высокой солнечной активности

	$\Delta A_{\text{теор}} - \Delta A_{\text{эксп}}$, [дБ]				$\Delta A_{\text{теор}} - \Delta A_{\text{эксп}}$, [%]			
	осень	весна	лето	зима	осень	весна	лето	зима
В-П модель	-0.77	1.19	-0.14	0.14	92	115	98	102
ГОСТ	1.40	3.36	1.96	0.70	117	147	125	108
Каталог	0.70	2.66	-1.05	2.73	108	136	89	137

На меридиональной трассе ТВВ – Михнево почти в любой сезон и при любом уровне солнечной активности наиболее близко к экспериментальной кривой расположена кривая $P(\Delta A_{\text{сут}})$, построенная по результатам вероятностной плазмохимической модели. Значения $\Delta A_{\text{сут}}$, полученные по ГОСТ и Каталогу, в большинстве случаев лежат в пределах среднеквадратических отклонений от экспериментальных значений $\Delta A_{\text{сут}}$, однако отношение теоретических и экспериментальных величин оказалось достаточно большим.

Трасса NRK – Михнево расположена на более высоких широтах, чем две предыдущие. И здесь, как и на трассе RJH-77 – Михнево, лучший результат показали эмпирически-статистические модели. Стоит отметить, что для надежности результатов необходимо провести верификацию на более полном объеме данных.

В результате верификации моделей на 6 трассах можно сделать несколько выводов:

1. На широтных трассах RJH-90 – Михнево и ДНО38 – Михнево в условиях низкой солнечной активности в 92 % случаев теоретические значения ΔA лежат в пределах 20 %

от экспериментальных величин. При высокой солнечной активности с экспериментом лучше согласуются результаты вероятностной плазмохимической модели.

2. На высокоширотных меридиональных трассах RJH-77 – Михнево и NRK – Михнево явное преимущество оказалось у эмпирически-статистических моделей. Отклонения наиболее вероятных величин ΔA , полученных по данным Каталога, от экспериментальных во всех рассматриваемых условиях не превышают 20 % и укладываются в пределы экспериментальных вариаций величины.
3. На низкоширотных меридиональных трассах RJH-63 – Михнево и ТВВ – Михнево наиболее вероятные величины ΔA , полученные по вероятностной плазмохимической модели, наиболее близки к экспериментальным данным при любой солнечной активности. При этом по ΔA на разных частотах (трасса RJH-63 – Михнево) ГОСТ и Каталог показали очень хорошие результаты согласия с экспериментом, а по суточному ΔA (трасса ТВВ – Михнево) теоретические результаты смогли уложиться только в 2 σ экспериментального разброса.
4. Вероятностно-статистические модели подтвердили свою работоспособность при расчете распространения радиоволн СДВ диапазона. Причем вероятностная плазмохимическая модель дает лучший прогноз в той части средних широт, где отсутствует влияние полярной ионосферы, в то время как эмпирически-статистические модели показали надежный прогноз на трассах, передатчики которых находятся выше 60° с.ш.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы сформулированы в конце каждой главы диссертации. Ниже кратко представлены полученные результаты и сделанные на их основании выводы по диссертации в целом.

1. Основой вероятностно-статистических моделей являются функции плотности вероятности ионосферных параметров, которые позволяют описывать изменчивый характер нейтральных и заряженных составляющих ионосферы. Разработанные в диссертации модели являются первыми вероятностными моделями D -области.
2. Показано, что медианные значения параметров ионосферы в общем случае не совпадают с наиболее вероятными величинами, поэтому более корректно описывать ионосферу именно вероятностными моделями.
3. Любая ионосферная модель, включая рассмотренные здесь вероятностно-статистические, может быть использована для решения прикладных задач только при тщательной верификации по радиофизическим экспериментальным данным, поскольку это единственный способ оценить ее точность и границы применимости.

4. Проведенная в диссертации верификация на 6 среднеширотных СДВ трассах подтвердила правомерность основных положений вероятностно-статистического моделирования и возможность использования построенных моделей для прогноза состояния параметров среды. В большинстве гелиогеофизических условий отклонения модельных значений от измеренных в обсерватории Михнево лежат в пределах экспериментальных вариаций величины и не превышают 20 %.
5. На основании разработанной методологии вероятностного плазмохимического моделирования возможно создание глобальной ассимиляционной ионосферной модели, которая будет претендовать на еще более высокое качество получаемых результатов. При этом моделирование может быть осуществлено и в более широком диапазоне высот (вплоть до магнитосферных) для расчета распространения радиоволн практически всех диапазонов частот – СДВ, ДВ, СВ, КВ, ВЧ, СВЧ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. **Беккер С.З., Козлов С.И., Ляхов А.Н.** Вопросы моделирования ионосферы для расчета распространения радиоволн при решении прикладных задач // Вопросы оборонной техники. г. Санкт-Петербург. 2013. С. 85–88.
2. **Козлов С.И., Ляхов А.Н., Беккер С.З.** Основные принципы построения вероятностно-статистических моделей ионосферы для решения задач распространения радиоволн // Геомагнетизм и аэрномия. г. Москва. 2014. Т. 54. № 6. С. 767–779.
3. **Беккер С.З., Козлов С.И., Тасенко С.В.** Оценка возможности понижения концентрации озона в нижней части D-области под воздействием мощной радиоволны // Геомагнетизм и аэрномия. г. Москва. 2016. Т. 56. № 6. С. 796–799.
4. **Беккер С.З., Доронин А.П., Козлов С.И.** Критический анализ активных методов восстановления озонового слоя Земли // Геомагнетизм и аэрномия. г. Москва. 2017. Т. 57. № 5. С. 676–682.
5. **Беккер С.З.** Анализ результатов расчетов концентрации электронов по детерминированно-вероятностной модели среднеширотной невозмущенной D-области ионосферы // Солнечно-земная физика. г. Иркутск. 2018. Т. 4. № 3. С. 84–94.
6. **Ляхов А.Н., Козлов С.И., Беккер С.З.** Оценка точности расчетов по международной справочной модели ионосферы IRI–2016. I. Концентрации электронов // Геомагнетизм и аэрномия. г. Москва. 2019. Т. 59. № 1. (принято к печати)

Публикации в других научных изданиях

1. **Беккер С.З., Козлов С.И., Ляхов А.Н.** Вопросы моделирования ионосферы для расчета распространения КВ, ДВ, СДВ на протяженных трассах при решении прикладных задач // Труды XVI Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». Санкт-Петербург. 2013. Т.1. С. 172–176.
2. **A. Lyakhov, S. Kozlov, S. Bekker.** The concept of the probabilistic-statistical model of the lower ionosphere // International living with a star workshop. Irkutsk. 2013. P. 41.

3. **Беккер С.З.** Статистическое моделирование *D*-области ионосферы для расчета распространения СДВ-ДВ // Труды 56 Всероссийской научной конференции МФТИ «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе» (Тезисы докладов). Москва. 2013. Т.1. С. 122–123.
4. **Беккер С.З.** Статистическая модель *D*-области ионосферы. Сопоставление радиофизических расчетов по распространению СДВ-ДВ с экспериментальными данными // Труды XVII Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». Санкт-Петербург. 2014. Т.1. С. 407–413.
5. **Bekker S., Kozlov S., Lyakhov A.** Probabilistic ionospheric models for radiowave propagation problems // Abstracts of 40th COSPAR Scientific Assembly. Moscow. 2014. P. 191.
6. **Беккер С.З.** Результаты расчетов распространения СДВ–ДВ на двух статистических моделях *D*-области ионосферы и их сравнение с экспериментальными данными, полученными в обсерватории ИДГ РАН Михнево // Труды 57 научной конференции МФТИ с международным участием «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики» (Тезисы докладов). Москва. 2014. Т.1. С. 250–251.
7. **Беккер С.З., Козлов С.И., Лисова С.С., Ляхов А.Н.** Статистическая модель среднеширотного спорадического слоя *E* ионосферы: этапы и принципы разработки // III-й Всероссийский семинар-совещание «Триггерные эффекты в геосистемах». Тезисы докладов. М: Изд. ФАНО, ИДГ РАН. 2015. С. 13–14.
8. **Беккер С.З., Козлов С.И.** Влияют ли мощные радиоволны на поведение озона в нижней ионосфере? (Предварительный анализ) // Труды 58 научной конференции МФТИ с международным участием «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики» (Тезисы докладов). 2015. Т.1. С. 243–244.
9. **Беккер С.З., Козлов С.И.** Воздействие мощной радиоволны на поведение мезосферного озона // Сборник тезисов Одиннадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе». Москва. 2016. С. 211–212.
10. **Ляхов А.Н., Козлов С.И., Беккер С.З., Пономарчук С.Н., Таццилин А.В., Романова Е.Б., Куркин В.И., Пезин М.** Вероятностные модели ионосферы для ЗГРЛС КВ диапазона // Сборник тезисов Одиннадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе». Москва. 2016. С. 154.
11. **Беккер С.З., Козлов С.И.** Активные методы восстановления озонового слоя в атмосфере Земли // Труды XIX Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». Санкт-Петербург. 2016. Т.1. С. 126–135.
12. **Беккер С.З., Козлов С.И., Ляхов А.Н.** О некоторых методах повышения точности статистических моделей *D*-области ионосферы // Труды IV Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». Санкт-Петербург. 2016. С. 62–66.
13. **Беккер С.З., Козлов С.И., Ляхов А.Н.** Результаты сопоставления радиофизических расчетов по статистическим моделям *D*-области ионосферы с экспериментальными данными ГФО Михнево на разных трассах // Труды XXV Всероссийской открытой конференции «Распространение радиоволн». Томск. 2016. Т. 2. С 152–155.
14. **Беккер С.З., Ляхов А.Н.** Сопоставление расчетов электронной концентрации по модели IRI с экспериментальными данными ИСЗ DE–2 // Труды 59 научной конференции МФТИ с международным участием «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики». Москва. 2016. С. 259–260.

15. **Беккер С.З., Козлов С.И., Ляхов А.Н.** Сопоставление расчетов электронной концентрации по модели IRI с экспериментальными данными ИСЗ DE-2 // Сборник трудов конференции «Минцевские чтения – 2016». Москва. 2016.
16. **Ляхов А.Н., Козлов С.И., Беккер С.З.** Сравнительный анализ системы APERS (США) и отечественной системы Росгидромет прогноза ионосферы и радио связи // Сборник тезисов Двенадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе». Москва. 2017. С. 140.
17. **Беккер С.З., Козлов С.И., Лисова С.С., Ляхов А.Н.** Статистическая модель E_s области ионосферы для расчета распространения радиоволн // Труды XX Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». Санкт-Петербург. 2017. С. 30
18. **Беккер С.З.** Уточнение исходных параметров детерминированно-вероятностной модели D -области ионосферы и сопоставление результатов радиофизических расчетов с экспериментальными данными // Труды IV Всероссийской конференции «Триггерные эффекты в геосистемах». Москва. 2017. С. 18–19.
19. **Аксенов О.Ю., Беккер С.З., Дюжева М.М., Козлов С.И., Ляхов А.Н., Якубовский С.В.** Обоснование необходимости разработки и применения вероятностно-статистических моделей ионосферы в интересах радиолокационных средств РКО // Труды V Всероссийской научно-технической конференции «РТИ системы ВКО – 2017». Москва. 2017. С. 18.
20. **Беккер С.З., Ляхов А.Н.** Уточнение варьируемых параметров детерминированно-вероятностной модели D -области ионосферы на основании экспериментальных данных // Тезисы докладов Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике "Физические процессы в космосе и околоземной среде". Иркутск. 2017. С. 79.
21. **Ряховский И.А., Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Ляхов А.Н., Поклад Ю.В., Беккер С.З.** Исследование пространственно-временных характеристик ионосферных неоднородностей при помощи трехбазной сети приемников ГНСС // Тезисы докладов Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике "Физические процессы в космосе и околоземной среде". Иркутск. 2017. С. 92–93.
22. **Bekker S., Ryakhovskiy I.** Statistical analysis of UV emissions from TIMED GUVI data // Abstracts of the 3rd COSPAR Symposium. Korea. 2017. P. 82.
23. **Ryakhovskiy I., Gavrilov B., Klimov S., Poklad Yu., Zetzer Yu., Bekker S.** Simultaneous registration of VLF signals by onboard instruments of "Chibis-M" microsatellite and by ground-based receivers // Abstracts of the 3rd COSPAR Symposium. Korea. 2017. P. 83.
24. **Беккер С.З.** Краткий анализ существующих моделей ионосферы для расчета распространения радиоволн // Сборник трудов конференции «Минцевские чтения – 2017». Москва. 2017. С. 9.
25. **Беккер С.З., Козлов С.И., Ляхов А.Н.** Вероятностно-статистические модели D -области ионосферы, верифицированные по радиофизическим данным ГФО Михнево // Сборник тезисов Тринадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе». Москва. 2018. С. 73.
26. **Ляхов А.Н., Козлов С.И., Беккер С.З.** Оценка точности расчетов по международной справочной модели ионосферы IRI-2016 // Сборник тезисов Тринадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе». Москва. 2018. С. 206.