"УТВЕРЖДАЮ"

Врио директора ИСЗФ СО РАН

доктор физ.-мат. наук

А.В. Медведев

"<u>21</u>" ноября 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Беккер Сусанны Зейтуллаевны

«Вероятностно-статистические модели нижней невозмущенной среднеширотной ионосферы, верифицированные по данным наземных радиофизических измерений», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Знание свойств крупномасштабной структуры ионосферы как части верхней атмосферы Земли имеет важное значение для решения широкого круга задач радиосвязи и радионавигации. D-область ионосферы оказывает распространение наиболее сильное влияние на длинных и средних особенно Поэтому ee состояния, знание пространственного распределения электронной концентрации, необходимо для диагностики и прогноза этих радиоканалов. Данная область ионосферы является самой трудной для изучения как экспериментальными, так и методами теоретического моделирования. Группой авторов, в которую входит С.З. Беккер, был впервые предложен и развивается новый подход к описанию и заданию характеристик ионосферной плазмы, основанный на использовании эмпирических и полуэмпирических моделей, параметры которых определяются на основе вероятностно-статистических методов. Так как при таком подходе фактически рассчитывается наиболее вероятное состояние радиоканала в заданной конфигурации геофизических условий, представленных своими распределениями плотностей вероятности, необходимость знания причинно-следственных контролирующих состояние ионосферы в конкретных геофизических ситуациях. Все это делает данный метод полезным не только при решении задач прогнозирования состояния СДВ-ДВ радиоканала, но и эффективным средством оценки высотных распределений электронной концентрации в D ионосферы статистически наиболее ожидаемых геофизических условиях. Создание таких вероятностно-статистических моделей было основной целью диссертационной работы С.З. Беккер. Актуальность этой темы исследования не вызывает сомнения по отмеченным выше причинам.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- 1. Статистическая обработка спутниковых данных о нейтральном составе мезосферы и трех экспериментальных банков данных высотных профилей электронной концентрации в D-области при различных гелиогеофизических условиях.
- 2. Построение на основе обработанных банков данных электронной концентрации вероятностно-эмпирической модели невозмущенной среднеширотной D-области ионосферы.
- 3. Создание вероятностной полуэмпирической (плазмохимической по терминологии автора) модели *D*-области ионосферы, сочетающей систему дифференциальных уравнений кинетики заряженных частиц в *D*-области ионосферы с вероятностно-эмпирическими распределениями входных параметров.
- 4. Верификация разработанных вероятностно-статистических моделей по данным наблюдений амплитуд СДВ радиосигналов на среднеширотных трассах.

Результаты решения этих задач составляют основное содержание диссертации, которая состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Во введении сформулирована актуальность темы построения вероятностных моделей ионосферы. Приведены цель, научная новизна, практическая значимость работы, защищаемые положения, личный вклад автора и сведения об апробации работы.

<u>Первая глава</u> носит обзорный характер. В ней кратко рассмотрены основные характеристики наиболее используемых эмпирических и теоретических моделей нижней ионосферы. Отмечены их преимущества и недостатки.

Вторая глава посвящена описанию вероятностного подхода к разработке модели электронной концентрации в невозмущенной среднеширотной D-области ионосферы. Метод основан на использовании наблюдений: каталога профилей электронной данных концентрации области D ионосферы (Каталог) и стандартной модели распределения концентрации эффективной И соударений электронов для прогнозирования низкочастотных радиополей (далее ГОСТ). Все данные из двух банков были распределены по высотным интервалам с шагом в 5 км в пределах 55 - 95 км, в каждом из которых данные разделены на 12 групп (выборкам), согласно принадлежности к низкому или высокому уровню солнечной активности, к зимнему или летнему или равноденственному сезону, к дневному или ночному времени суток. Электронная концентрация Ne в каждой выборке трактовалась как случайная величина. Анализ числовых характеристик распределений случайной величины Ne показал, что она не описывается нормальным или логнормальным законами распределений. Поэтому для каждой выборки был определен свой эмпирический закон распределения плотности вероятности величины Ne. Затем на основе этого эмпирического закона распределения

методом Монте-Карло разыгрывалась последовательность массивов из N значений случайной величины Ne, которая в итоге при N=1000 сходилась к выборке с искомым распределением плотности вероятности. Используя это распределение, рассчитывались среднее значение Ne и среднеквадратическое отклонение при данной совокупности геофизических условий. Полученные в результате применения этой процедуры 12 высотных профилей электронной концентрации составили содержание эмпирико-статистической модели среднеширотной невозмущенной D-области ионосферы.

В третьей главе дано описание разработанной автором вероятностной плазмохимической (ВП) модели среднеширотной невозмущенной D-области ионосферы. Эту модель можно отнести к полуэмпирическим моделям, т.к. основана на решении системы дифференциальных ионизационно-рекомбинационного цикла для 5 основных типов заряженных частиц в D-области ионосферы, входные параметры которой такие как скорость ионизации q, температура T и концентрации нейтральных частиц [O2], [N2], [H2O], [O3] и [CO2] определялись статистически по данным спутниковых наблюдений, используя методику аналогичную представленной во второй главе. Особое внимание уделено заданию высотных профилей скорости ионизации под действием космических лучей, УФ излучением Солнца в линиях L_{α} и L_{β} и потоков высокоэнергичных заряженных частиц. Здесь следует отметить как важный результат построение вероятностноэмпирических профилей концентрации окиси азота на высотах D-области ионосферы. Окончательные профили электронной концентрации были рассчитаны численного интегрирования результате дифференциальных уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла для всего набора геофизических условий. В заключение данной главы представлены результаты сравнительного анализа функций распределения вероятности Ne. полученных плотности ПО двум эмпирическимоделям (Каталог FOCT) статистическим И И вероятностной плазмохимической модели. Показано, что в зависимости от высоты, сезона и активности, распределения функции солнечной вероятности могут существенно различаться. Отмечается преимущество вероятностной плазмохимической модели, обусловленное возможностью уточнения функций плотности вероятности входных параметров в результате усвоения (ассимиляции) новых спутниковых данных.

Четвертая глава посвящена верификации построенных вероятностностатистических моделей D-области ионосферы. Для решения этой задачи была проведена статистическая обработка данных многолетних наземных радиофизических измерений амплитуды СДВ сигналов, принятых в ГФО Михнево от шести распределенных по широте и долготе передатчиков при различных гелиогеофизических условиях. Данные этих измерений сравнивались с амплитудами, рассчитанными в рамках программного комплекса расчета распространения СДВ-ДВ радиоволн ParabEq (СПбГУ), используя для задания среды распространения профили электронной концентрации, полученные по разработанным вероятностно-статистическим

моделям. Результаты верификации различных вероятностных моделей на данных широтных и долготных СДВ радиотрасс подтвердили их работоспособность при расчете распространения радиоволн СДВ диапазона, но не показали явного преимущества какой-либо одной из разработанных вероятностно-статистических моделей D-области. При этом вероятностная плазмохимическая модель дает лучший прогноз в той части средних широт, где отсутствует влияние высокоширотной ионосферы, в то время как эмпирически-статистические модели показали надежный прогноз на трассах, передатчики которых находятся выше 60° с.ш.

В заключении суммированы основные результаты работы, которые отражают ее новизну и значимость и могут быть сведены к следующему:

- 1. Разработан новый вероятностный подход к моделированию нижней ионосферы на основе функций распределения плотности вероятности ионосферных параметров.
- 2. Реализацией этого подхода явилось создание эмпирическистатистической и вероятностной плазмохимической моделей среднеширотной D-области ионосферы.
- 3. Впервые проведен комплексный анализ функций распределения плотностей вероятности электронной концентрации и параметров нейтральной атмосферы на высотах D-области ионосферы. Показано, что в общем случае функции распределения параметров ионосферы не подчиняются нормальному закону распределения, а их наиболее вероятные величины отличны от медианных значений.
- 4. Проведенная в диссертации верификация разработанных вероятностных моделей по данным измерений амплитуд радиосигналов на 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 не превышают 20 %.

Замечания по работе:

- 1. В работе использовались данные в полосе географических широт от 30^0 до 60^0 обоих полушарий. При этом в некоторых долготных секторах верхняя граница может попадать в авроральную зону. Поэтому, возможно, более корректно было делать выбор данных по геомагнитным широтам.
- 2. На рисунках 2.1 2.5 закраска областей среднеквадратического отклонения не соответствует данным Таблицы 2.4. Коридор с.к.о. должен быть симметричен относительно средних значений.
- 3. В Таблицах 4.3а,б 4.9а,б нет пояснений как трактовать числа изменений амплитуд в процентах, т.е. что означают ситуации когда эти числа больше или меньше 100.
 - 4. Текст содержит ряд опечаток, например:
- стр.17, в строке ...диссоциативной рекомбинации на ионах $O2^-$, $N2^-$... должны стоять знака (+);
 - стр.38, не определены величины \bar{x} в формулах (2.1), (2.2);

- стр.39, в знаменателе формулы (2.3) нет одного сомножителя;
- стр.80, на рисунке 3.22 неправильная оцифровка шкалы абсцисс;

Эти замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации, которая выполнена на высоком научном уровне. Выносимые на защиту положения, выводы и рекомендации являются новыми и научно обоснованными. Достоверность научных выводов и положений обеспечена достаточно большим объемом и качеством использованных экспериментальных данных, применением современных апробированных методик обработки данных, тщательным анализом имеющихся опубликованных материалов и верификацией результатов по независимо полученным данным радиофизических измерений. Научная и практическая значимость результатов диссертации определяется прежде всего тем, что они могут быть использованы для анализа физических процессов в нижней ионосфере, для решения прикладных задач радиосвязи и космической навигации, в целях диагностики и прогноза состояния ионосферы.

Результаты диссертации и разработанные вероятностные модели нижней ионосферы рекомендуется использовать в работах по исследованию и прогнозу ионосферы, а также в решении прикладных задач распространения СДВ и ДВ радиоволн в Институте динамики геосфер РАН, Институте земного магнетизма и ионосферы им. Н.В. Пушкова РАН, Институте прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, Институте солнечно-земной физики СО РАН, Полярном геофизическом институте РАН, Балтийском федеральном университете им. И. Канта и других организациях соответствующего профиля.

Основные результаты и выводы, приведенные в диссертации, изложены в научных публикациях, включая 6 публикаций в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Диссертация <u>соответствует</u> специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Автореферат верно отражает содержание диссертации.

ВЫВОДЫ. Диссертация С.3. Беккер удовлетворяет требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям: она является законченной научной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена важная и актуальная задача по разработке и реализации нового вероятностного подхода к моделированию D-области ионосферы. Следовательно, Сусанна Зейтуллаевна Беккер заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Отзыв составлен ведущим научным сотрудником Института солнечноземной физики СО РАН, доктором физ.-мат. наук Переваловой Натальей Петровной, которая согласна на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку. Отзыв обсужден и одобрен на заседании Ученого совета ИСЗФ СО РАН, протокол № $\underline{16}$ от 20.11.2018 г.

Вед. научный сотрудник ИСЗФ СО РАН, доктор физ.-мат. наук /К 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 126a, ИСЗФ СО РАН, Телефон: 8(395-2) 56-45-80, E-mail: pereval@iszf.irk.ru

Подпись Переваловой Н.П. удостоверяю: Ученый секретарь ИСЗФ СО РАН, кандидат физ.-мат. наук

«21» ноября 2018 г.

// /И.И. Салахутдинова/

/Н.П. Перевалова/