

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Беккер Сусанны Зейтуллаевны
«Вероятностно-статистические модели нижней невозмущенной среднеширотной
ионосферы, верифицированные по данным радиофизических измерений»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

Диссертационная работа Беккер Сусанны Зейтуллаевны посвящена разработке вероятностных моделей среднеширотной невозмущенной области D ионосферы, позволяющих описывать изменчивый характер нейтральных и заряженных составляющих ионосферы этой области. Основу этих моделей составляют функции плотности вероятности параметров ионосферы. Для области D такой подход является новым, поскольку построенные ранее эмпирические модели параметров ионосферы давали в основном два статистических значения искомого параметра: выборочное среднее значение этого параметра и его среднее квадратичное отклонение (СКО). Функция плотности вероятности гораздо информативнее этих двух параметров, особенно для условий области D ионосферы, где изменчивость параметров ионосферы очень высокая и функция плотности вероятности, например, концентрации электронов не подчиняется нормальному закону. Именно этим определялась **актуальность** выбранной темы исследований. Не менее важной особенностью ионосферы на высотах области D является относительно небольшое количество данных измерений концентрации электронов n_e на ракетах или по данным радаров. Радиофизические характеристики сигналов СДВ диапазона (3-30 кГц) позволяют косвенно определять концентрацию электронов на высотах области D. Данных таких сигналов на порядок больше данных прямых измерений N_e . Поэтому привлечение данных СДВ сигналов для проверки (верификации) моделей области D ионосферы является важной и актуальной задачей данного направления исследований.

Более конкретно целью настоящей работы были построение вероятностно-статистических моделей невозмущенной среднеширотной области D ионосферы и оценка их возможностей для прогноза распространения СДВ радиоволн на средних широтах. Для достижения этой цели были поставлены задачи разработки двух типов вероятностных моделей среднеширотной области D ионосферы: а) вероятностной модели на основе статистической обработки банков экспериментальных данных электронной концентрации; б) вероятностной плазмохимической модели на основе дополнительной обработки экспериментальных спутниковых данных о параметрах нейтральных составляющих мезосферы. Кроме того, была поставлена задача проверки (верификации) этих моделей по

данным СДВ сигналов, что является и проверкой прогностических возможностей этих моделей.

Результаты решения этих задач составляют основу данной диссертации, которая состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. В первой главе дан очень краткий обзор известных моделей нижней ионосферы. Эти модели состоят из эмпирических и теоретических (численных) моделей. Каждая из этих моделей обладает своими преимуществами и недостатками. Тем не менее, ни одна из этих моделей не дает функцию плотности вероятности, например, концентрации электронов в нижней ионосфере. Это ограничение существенно для использования моделей нижней ионосферы для задач, например, распространения сигналов СДВ диапазона в волноводе Земля-ионосфера. Остальные главы диссертации содержат результаты решения поставленных задач. Во второй главе представлены эмпирико-вероятностная модель концентрации электронов N_e невозмущенной среднеширотной области D ионосферы и основные этапы разработки этой модели. Эта модель основана на статистическом анализе двух банков экспериментальных данных N_e . На основе предварительного анализа этих банков данных было получено, что распределения N_e в нижней ионосфере не подчиняются нормальному или логнормальному закону. Это приводит к необходимости использования именно плотности вероятности N_e , которую дает разработанная вероятностная модель N_e . На основе метода Монте-Карло была исследована численная сходимость ряда функций плотности вероятности N_e в зависимости от количества генерируемых значений. Было установлено, что тысячи итераций достаточно для корректного построения этой функции плотности вероятности. Данный результат – один из важных элементов разработанной вероятностной модели N_e в нижней ионосфере средних широт. Эта модель является первой моделью такого типа. В третьей главе представлена вероятностная плазмохимическая модель области D ионосферы. Эта модель включает в себя систему дифференциальных уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла (5-компонентная модель), функции плотности вероятности наиболее важных параметров нейтральной атмосферы, полученных на основе статистического анализа данных спутниковых измерений этих параметров. Эти функции использованы как входные параметры 5-компонентной модели для генерации плотности вероятности концентрации электронов N_e для определенного набора гелиогеофизических условий, что является результатом созданной модели. Модель такого типа создана впервые. Важными являются и промежуточные элементы модели. Так, функции плотности вероятности параметров нейтральной атмосферы в области D, полученные в работе, дают новые знания об этих

параметрах. В четвертой главе представлены результаты проверки (верификации) созданных вероятностных моделей концентрации электронов N_e с радиофизическими данными приема СДВ сигналов в геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево». Эта проверка основана на сопоставлении амплитуд принимаемых СДВ сигналов с результатами вычисления этих амплитуд для профилей электронной концентрации, полученных по вероятностным моделям. На основе такой верификации была показана работоспособность вероятностных моделей для использования в расчетах распространения радиоволн СДВ диапазона. При этом вероятностная плазмохимическая модель дает лучший прогноз в той части средних широт, где отсутствует влияние полярной ионосферы. Не менее важной является и сама возможность использования СДВ сигналов для верификации моделей нижней ионосферы. В Заключение суммированы основные результаты работы.

Наиболее важные из них, определяя ее **научную новизну и значимость**, сводятся к следующему:

1. Созданы вероятностные модели среднеширотной невозмущенной области D ионосферы, позволяющие описывать изменчивый характер нейтральных и заряженных составляющих ионосферы этой области. Основу этих моделей составляют функции плотности вероятности параметров ионосферы. На этой методической основе разработаны два типа моделей нижней ионосферы: вероятностная эмпирико-статистическая модель концентрации электронов N_e и вероятностная плазмохимическая модель области D ионосферы. Эти модели являются первыми моделями такого типа, имеющими важное научное и прикладное значение.
2. На пути создания вероятностной плазмохимической модели области D ионосферы получены новые знания о ряде параметров нейтральной атмосферы – определены функции плотности вероятности этих параметров.
3. Разработана методика верификации вероятностных моделей нижней ионосферы, которая основана на сопоставлении амплитуд принимаемых СДВ сигналов с результатами вычисления этих амплитуд для профилей электронной концентрации, полученных по вероятностным моделям. На основе верификации созданных вероятностных моделей невозмущенной области D показана работоспособность этих моделей в задачах прогноза распространения СДВ радиоволн на средних широтах.

Замечания по работе:

1. Работа посвящена исследованию нижней ионосферы, поэтому упоминания о результатах автора по исследованию точности модели IRI в верхней ионосфере лучше было опустить. Тем более, что это никак не сказалось бы на значимости диссертации.
2. В работе не во всех случаях приводятся объемы выборок, т.е. число измерений N в статистическом анализе каждой выборки, что затрудняет оценку результатов работы. Например, в главе 4 не приведены объемы выборок для экспериментальных значений разности амплитуд принимаемых сигналов в Михнево.
3. На рисунках 4.7 и 4.8 не указан численный коэффициент (масштаб) вертикальной оси.
4. Отклонения плотности вероятности параметров нижней ионосферы от нормального распределения могут нести дополнительную информацию о неучтенных процессах, например, о метеорологических процессах, таких как стратосферные потепления. Поэтому целесообразен более детальный анализ свойств этой плотности вероятности.
5. Точность модели ионосферы можно увеличить при использовании эффективных индексов солнечной и геомагнитной активности как входных параметров модели. Например, для верхней ионосферы часто используют индекс $P = (F_{10.7} + (F_{10.7})_{81})/2$, где $(F_{10.7})_{81}$ – среднее за 81 день значение индекса солнечной активности $F_{10.7}$, которое центрировано на данный день. Было бы целесообразно выполнить поиски подобных эффективных индексов для нижней ионосферы.

Эти замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Последние два замечания является, скорее, пожеланием на будущее. Работа выполнена на высоком физико-математическом уровне и хорошо оформлена. Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации **научно обоснованы и достоверны**. Это достигнуто большим объемом используемых спутниковых данных, полученных с использованием современных апробированных методик измерений и обработки данных, использованием классических методов статистической обработки данных и проверкой результатов по независимо полученным экспериментальным данным.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

ВЫВОДЫ. Диссертация Беккер С.З. является цельной, завершенной, выполненной на высоком научном уровне научно-квалификационной работой. В ней дано решение поставленной научной задачи, имеющей существенное значение для развития физики атмосферы, включая нижнюю ионосферу, – построены вероятностно-статистические модели нижней ионосферы средних широт, которые являются первыми моделями такого типа. Работа удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых

степеней» ВАК РФ, а ее автор – Беккер Сусанна Зейтуллаевна – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы.

«Я, Деминов Марат Гарунович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, а также их дальнейшую обработку».

Г.н.с. ИЗМИРАН, д.ф.-м.н., профессор  /М.Г. Деминов /

Отзыв составил Марат Гарунович Деминов, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.12 – Геофизика, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, ИЗМИРАН 108840, Россия, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4, тел. 8(916)448-56-80, E-mail: deminov@izmiran.ru.

Подпись М.Г. Деминова заверяю.
Ученый секретарь ИЗМИРАН
кандидат физ.-мат. наук



/А.И. Рез/

« 15 » ноября 2018 г.