

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию *Сусанны Зейтуллаевны Беккер «Вероятностно-статистические модели нижней невозмущенной среднеширотной ионосферы, верифицированные по данным наземных радиофизических измерений»*, представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – «физика атмосферы и гидросферы»

Диссертационная работа С.З. Беккер посвящена разработке принципиально нового вероятностно-статистического подхода к построению моделей невозмущенной среднеширотной *D*-области ионосферы, предназначенной для прогноза распространения СДВ-ДВ радиоволн, и её верификации по экспериментальным данным радиофизических измерений в СДВ диапазоне.

**Актуальность исследования.** На настоящий момент времени наименее изученной остается нижняя часть ионосферы. Трудности исследования области *D* обусловлены как сложностью регистрации на этих высотах параметров ионосферы и большим количеством протекающих в ней фотохимических процессов, так и влиянием на неё процессов, протекающих в выше и ниже лежащих слоях атмосферы. Анализ существующих методов описания среды распространения СДВ, ДВ радиосигналов показывает, что она может быть корректно описана только вероятностными моделями, поэтому тема диссертационной работы, посвященная разработке вероятностных моделей среднеширотной невозмущенной *D*-области ионосферы, позволяющих описывать изменчивый характер нейтральных и заряженных составляющих ионосферы является **актуальной и своевременной**.

**Содержание работы.** Диссертационная работа С.З. Беккер состоит из Введения, четырёх глав, Заключения и Списка литературы. Она содержит 129 страниц текста, 59 рисунков, 32 таблицы и список цитированной литературы из 119 наименований.

Во **Введении** обозначена цель и дано обоснование актуальности диссертационной работы; определён круг решаемых в ней задач; сформулированы выносимые на защиту научные положения, указаны их новизна, научная и практическая значимость.

В **первой главе** проведен анализ преимуществ и недостатков известных моделей *D*-области ионосферы и указано, что основными недостатками всех известных моделей

*D*-области являются: ограниченный объем экспериментальных данных; отсутствие верификации по экспериментальным данным распространения радиоволн СДВ диапазона; детерминированный характер моделей.

**Вторая глава** посвящена разработке эмпирически-статистических моделей невозмущенной среднеширотной *D*-области ионосферы. В ней были использованы известные базы данных электронной концентрации в *D*-области, проведена статистическая обработка профилей  $N_e$  при следующих гелиогеофизических ограничениях: два (высокий и низкий) уровня солнечной активности, средние широты и отсутствие возмущений геомагнитного поля. Отмечено, что основной трудностью при разработке любых моделей *D*-области являются пробелы в экспериментальных данных. Поскольку полученные массивы данных  $N_e$  по большей части не описывались нормальным либо логнормальным законами распределения, то генерация профилей  $N_e$  проводилась по полученным автором экспериментальным функциям плотности вероятности  $P(N_e)$ .

В **третьей главе** решались задачи, связанные с построением вероятностной плазмохимической модели невозмущенной среднеширотной *D*-области ионосферы. В основу модели положена 5-компонентная система уравнений ионизационно-рекомбинационных реакций в *D*-области (скорость ионизации, температура нейтральной компоненты, концентрации  $[O_2]$ ,  $[N_2]$ ,  $[H_2O]$ ,  $[O_3]$  и  $[CO_2]$ ). Для определения законов распределения варьируемых параметров была проведена статистическая обработка экспериментальных баз спутниковых данных за несколько лет. В результате установлено, что функции плотности вероятности  $N_e$  (как и остальных составляющих *D*-области ионосферы) в общем случае также не подчиняются нормальному закону распределения. Это позволило сделать следующее заключение: медианными, а тем более средними, значениями невозможно корректно описать среду. Предложен способ уточнения входных параметров ионизационно-рекомбинационной части модели по спутниковым данным о концентрации нейтральных компонент *D*-области и её температуре, что позволило минимизировать ошибку расчета плотности вероятности  $N_e$ .

**Четвертая глава** посвящена разработке метода верификации вероятностных моделей *D*-области ионосферы по натурным измерениям характеристик распространения радиоволн на системе радиотрасс СДВ диапазона. Верификация

предложенных автором моделей  $D$ -области позволила установить, что характеристики распространения радиоволн СДВ диапазона, которые рассчитаны по этим моделям, адекватны экспериментально зарегистрированным на системе радиотрасс СДВ диапазона. Сравнительный анализ прогнозов распространения СДВ-радиоволн, выполненных по эмпирически-статистическим моделям и по вероятностной плазмохимической модели, позволил установить, что прогноз распространения СДВ-радиоволн на трассах, передатчики которых находятся выше  $60^\circ$  с.ш., является более надежным для первой группы моделей. Для той части среднеширотных радиотрасс, на которых отсутствует влияние полярной ионосферы, включая условия высокой солнечной активности, прогноз распространения радиоволн является более надежным для вероятностной плазмохимической модели.

**Наиболее важные научные результаты работы:**

- предложен и реализован принципиально новый вероятностно-статистический подход (на примере  $D$ -области ионосферы) к моделированию нерегулярных, непрерывно изменяющихся природных сред;
- доказано, что вероятностный подход позволяет описывать изменчивое поведение исследуемой среды функциями плотности вероятности ионосферных параметров и эти сведения не могут быть получены из детерминированных моделей, вне зависимости от того, на каких принципах и на основании какого объёма данных они построены;
- предложен и апробирован способ верификации вероятностно-статистических моделей  $D$ -области ионосферы по данным регистрации характеристик СДВ-радиосигналов, распространяющихся на системе СДВ-радиотрасс.

**К замечаниям** по работе, не отражающих на ее оценке, следует отнести.

1. В третьем защищаемом положении автором указано « ... **параметры  $D$ -области в общем случае не подчиняются нормальному закону** ... ». К сожалению автор работы ограничился только констатацией данного факта и не обратил своего внимания на следующее обстоятельство.

Из приведенных в диссертационной работе иллюстраций плотности вероятности различных параметров невозмущенной среднеширотной  $D$ -области ионосферы (концентрации электронов  $P(N_e)$  на рис. 2.7-2.12, 3.19, 3.27, 3.28; температуры  $P(T)$  – рис. 3.1; азота  $P(N_2)$  – рис. 3.2) следует, что приведенные распределения являются

би- или много- модальными, каждое из которых имеет своё среднее значение и дисперсию. Поэтому, естественно, что итоговое распределение и не подчиняется нормальному закону. Существование би- и много- модальных распределений в специально отобранных однородных гелиогеофизических условиях прямо указывает на то, что в этих однородных гелиогеофизических условиях возможен дискретный ряд стабильных состояний *D*-области ионосферы, каждое из которых обладает своими, отличными от других, профилями температуры, электронной концентрации, концентрациями нейтральных компонент и ионов. На обоснованность и достоверность этого предположения указывает то, что би- или много- модальные распределения выявляются независимо от вида модели (эмпирические или плазмохимическая).

Данное замечание скорее является пожеланием.

2. В четвертом положении (*«Проведена верификация построенных вероятностно-статистических моделей D-области ионосферы по независимым данным наземных радиофизических измерений»*) автором защищается оригинальный способ верификации моделей среды по данным о распространении радиоволн. Однако, в чем заключается суть этого способа становится ясно после прочтения текста работы.
3. При разработке вероятностной плазмохимической модели среднеширотной *D*-области в основу положена 5-компонентная система уравнений ионизационно-рекомбинационных реакций в *D*-области. Анализ решений этой системы уравнений на изменение входных параметров показал, что концентрация электронов наиболее чувствительна к варьированию скорости ионизации, температуры и [O<sub>2</sub>]. Поэтому непонятно – для решения какой задачи был проведён анализ данных по [N<sub>2</sub>], [H<sub>2</sub>O], [O<sub>3</sub>] со спутника AURA и данных [CO<sub>2</sub>] со спутника TIMED.
4. В тексте диссертации и автореферата встречаются неудачные выражения, стилистические неточности.

**Апробация работы.** Материалы, вошедшие в диссертационную работу, прошли серьезную апробацию: докладывались на Всероссийских и Международных конференциях, опубликованы в 32 научных работах (в том числе – 6 статей в журналах, входящих в перечень ВАК). Достоверность результатов и выводов работы

обеспечивается большим объемом используемых спутниковых данных и независимых данных радиофизических измерений, использованием физически и математически обоснованных методов интерпретации и обработки данных, а также подтверждается данными исследований, полученных другими авторами в пересекающихся областях исследований.

**Заключение.** Содержание диссертации, выдвинутые в ней научные положения и сформулированные выводы дают основание считать, что цель исследования достигнута, а поставленные в диссертации задачи успешно решены. Диссертация **С.З. Беккер «Вероятностно-статистические модели нижней невозмущенной среднеширотной ионосферы, верифицированные по данным наземных радиофизических измерений»** является законченной научно-квалифицированной работой, полностью соответствующей требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. п. 9 (ред. от 01.10.2018 г.), а её автор, С.З. Беккер, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание, а опубликованные работы раскрывают основные положения диссертационного исследования.

Официальный оппонент,  
профессор, доктор физико-математических наук,  
(специальность 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы)  
Нагорский Петр Михайлович



ФБГУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
(ИМКЭС СО РАН), ведущий научный сотрудник лаборатории физики климатических систем.  
6340055, г. Томск, пр. Академический 10/3  
e-mail: [npm\\_sta@mail.ru](mailto:npm_sta@mail.ru)  
Тел. (3822) 49-15-65

Я, Нагорский Петр Михайлович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись в.н.с. **П.М. Нагорского** заверяю.  
Ученый секретарь ИМКЭС СО РАН,

канд. техн. наук \_\_\_\_\_ **О.В. Яблокова**  
15 ноября 2018 г.

