

УТОЧНЕНИЕ ВАРЬИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТЕРМИНИРОВАННО-ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ D-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ НА ОСНОВАНИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

С.З. Беккер, А.Н. Ляхов

Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия
susanna.bekker@gmail.com

PRECISING VARIABLE PARAMETERS USED IN DETERMINISTIC-PROBABILISTIC MODEL OF THE D REGION OF THE IONOSPHERE, USING EXPERIMENTAL DATA

S.Z. Bekker, A.N. Lyakhov

Institute of Geosphere Dynamics RAS, Moscow, Russia

Аннотация. Рассматриваются новые методы уточнения детерминированно-вероятностной модели ионосферы на примере D-области. Сравняются плотности вероятности входных параметров, рассчитанные в 2014 г. и в 2017 г. Обсуждаются плюсы и минусы усовершенствованной модели, и предложены новые способы повышения ее точности.

Ключевые слова: ионосфера, детерминированно-вероятностная модель, теория вероятности, плотность вероятности, распространение СДВ-ДВ-волны.

Abstract. New methods of improving accuracy of deterministic-probabilistic ionosphere model are considered by the example of D-region. Calculated in 2014 and 2017 probability density functions of input parameters are compared. Advantages and disadvantages of the renewed model are discussed. New ways of improving model accuracy are proposed.

Keywords: ionosphere, deterministic-probabilistic model, probability theory, probability density function, VLF-LF radio wave propagation.

Введение

Ионосфера как непостоянная непрерывно изменяющаяся среда корректно может быть описана исключительно вероятностными моделями. На сегодняшний день ни у нас, ни за рубежом такие модели практически не разрабатываются. Наиболее перспективной из вероятностных моделей является детерминированно-вероятностная модель, в которой варьируются параметры, входящие в уравнения ионизационно-рекомбинационного цикла. Первый вариант такой модели был разработан в 2014 г. на примере D-области ионосферы в интересах решения задач распространения СДВ-ДВ волн [Козлов, 2014; Беккер, 2014]. Анализ системы уравнений с учетом современных представлений о D-области на высотах ниже 100 км показали, что наиболее изменчивыми (или неизвестными) параметрами являются: α_i , α_d , q , $[\text{CO}_2]$, $[\text{H}_2\text{O}]$, $[\text{O}_3]$ и T . В 2014 г. средние значения, пределы варьирования и законы распределения этих параметров были выбраны на основании анализа большого объема литературы. Однако, стоит отметить, что такая оценка носила довольно приближенный характер. По рассчитанным электронным профилям были построены кривые плотности вероятности распределения амплитуды СДВ волны на среднеширотной трассе длиной ~2000 км. Полученные кривые в различных гелиогеофизических условиях сравнивались с независимыми экспериментальными кривыми плотности вероятности амплитуды волны, построенными по измерениям ГФО Михнево.

Целью настоящей работы является уточнение этих параметров по экспериментальным данным, полученным из различных источников, и верификация результатов обновленной модели по радиофизическим данным.

Сравнение предыдущей и новой моделей

Предыдущая модель имела грубое разбиение на ночные и дневные часы и была ограничена средними широтами, то есть фактически работала только в спокойных магнитных условиях. На данный момент в различных гелиогеофизических условиях удалось найти достаточно массивные банки данных концентраций $[\text{CO}_2]$, $[\text{O}_3]$, $[\text{H}_2\text{O}]$ и температуры T . Такое количество экспериментальных значений позволяет решить задачу при различных условиях солнечной и магнитной активности и для разных трасс (среднеширотная, полярная, меридианная) и, как следствие, сопоставить рассчитанные радиофизические параметры с экспериментальными значениями на разных частотах.

Одно из важных преимуществ усовершенствованной детерминированно-вероятностной модели D-области ионосферы заключается в том, что теперь можно не ограничиваться конкретными законами распределения, а использовать полученные кривые плотности вероятности напрямую, то есть генерировать с помощью датчика случайных чисел (ДСЧ) входные значения системы согласно полученным по экспериментальным данным кривым. Сопоставление исходной кривой плотности вероят-

ности и кривой, полученной при генерации 10 000 значений, на примере $[H_2O]$ на высоте 65 км приведено на рис. 1. Как видно из рисунка, указанного количества значений достаточно для описания исходной функции с высокой точностью. Подобное согласие присутствует практически на всех графиках, соответствующих другим параметрам, высотам и геофизическим условиям. Исключение составляют лишь случаи с малым объемом экспериментальных данных или их рваным характером.

На рис. 2–5 представлены кривые плотности вероятности распределения обсуждаемых входных параметров, построенные согласно «интуитивно»

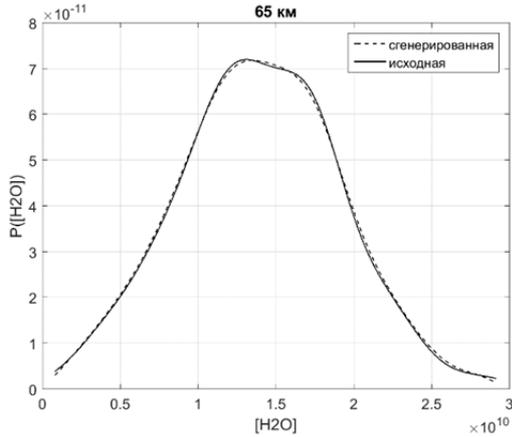


Рис. 1. Плотность вероятности распределения $[H_2O]$ на высоте 65 км, построенная по экспериментальным данным и генерированная с помощью ДСЧ

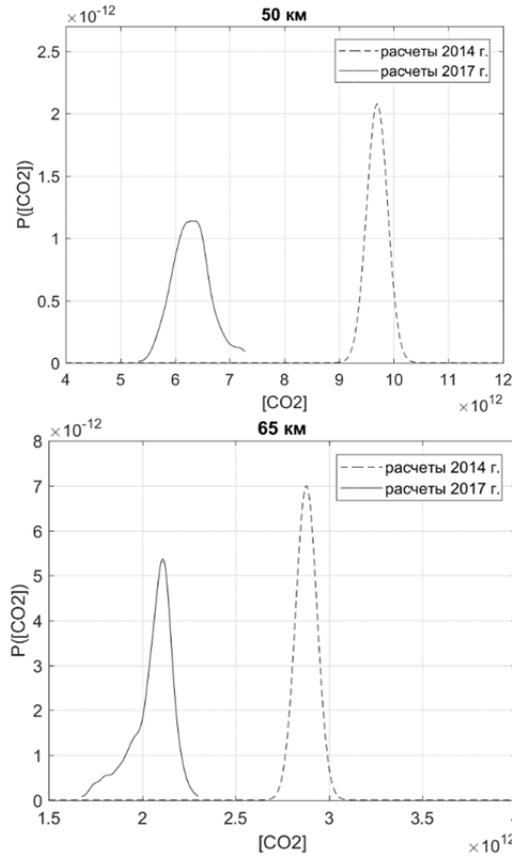


Рис. 2. Плотности вероятности распределения $[CO_2]$, полученные в 2014 г. и в 2017 г. на высотах 50 км (вверху) и 65 км (внизу)

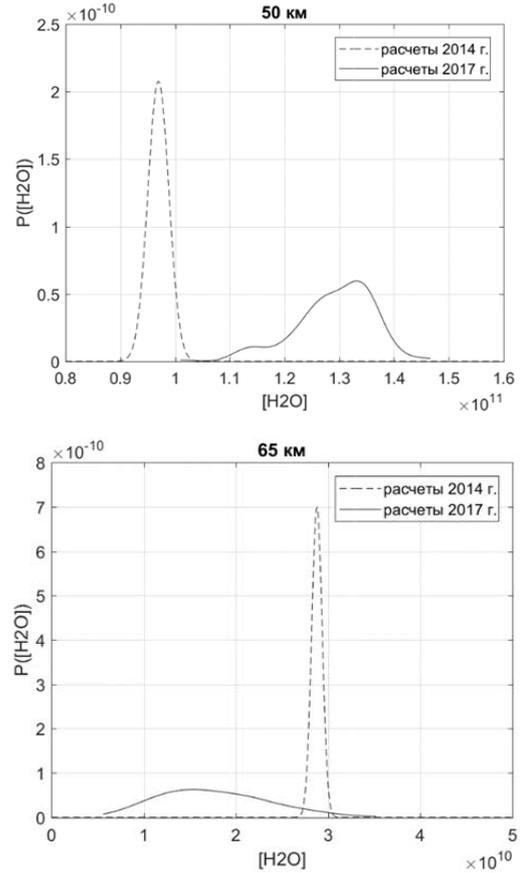


Рис. 3. Плотности вероятности распределения $[H_2O]$, полученные в 2014 г. и в 2017 г. на высотах 50 км (вверху) и 65 км (внизу)

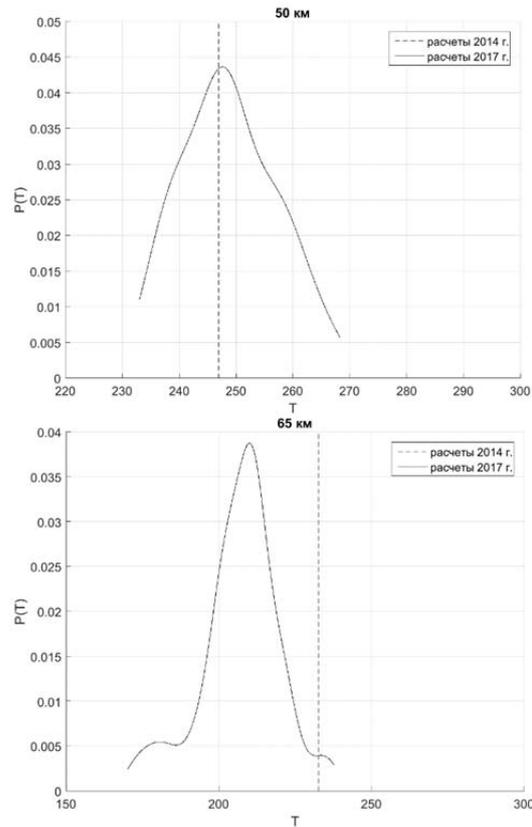


Рис. 4. Плотности вероятности распределения $[T]$, полученные в 2014 г. и в 2017 г. на высотах 50 км (вверху) и 65 км (внизу)

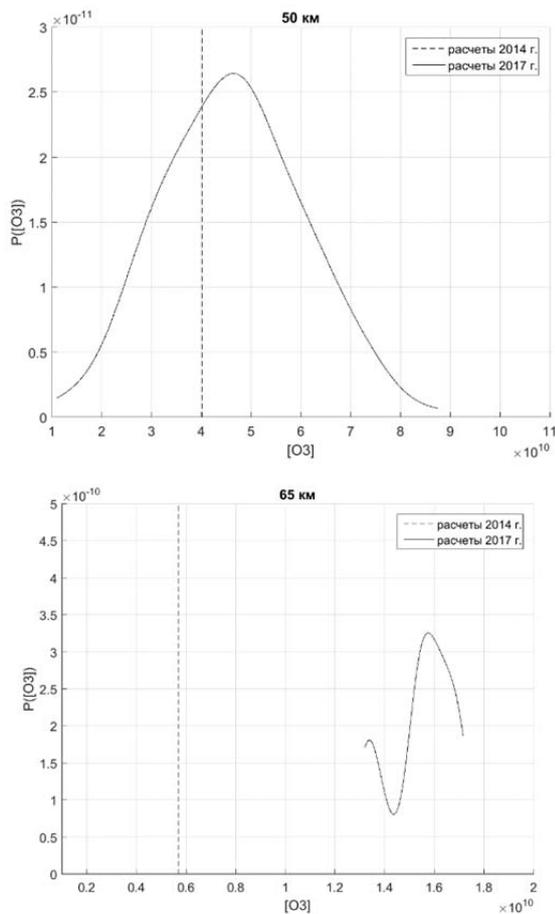


Рис. 5. Плотности вероятности распределения $[O_3]$, полученные в 2014 г. и в 2017 г. на высотах 50 км (вверху) и 65 км (внизу)

выбранным законам распределения и пределам варьирования в 2014 г. и построенные на основании большого объема экспериментальных данных. В качестве примера графики приведены для двух высот D-области — 50 и 65 км. В ряде случаев наблюдается принципиальное отличие кривых. Так, например, в первоначальном варианте было допущено, что температура и концентрация озона подчиняются равномерному закону распределения, но более точный анализ демонстрирует соответствие закону распределения, напоминающему нормальный или логнормальный закон (рис. 4–5).

Заключение

Предполагается, что проделанная работа позволит улучшить согласие теоретических результатов новой детерминированно-вероятностной модели D-области ионосферы с независимо полученными экспериментальными значениями радиофизических параметров в различных гелиогеофизических условиях и на разных трассах.

На данный момент также проведен анализ чувствительности решений уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла ко всем входным параметрам [Беккер, 2016]. В результате получено, что наиболее весомой величиной является скорость ионизации q (что также естественно по чисто физическим соображениям). Поэтому следующим принципиальным шагом повышения точности модели является уточнение концентрации $[NO]$, которая существенным образом влияет на высотный профиль q . Однако банки данных последних величин в свободном доступе отсутствуют.

Список литературы

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.

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.

Козлов С.И., Ляхов А.Н., Беккер С.З. Основные принципы построения вероятностно-статистических моделей ионосферы для решения задач распространения радиоволн. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2014. Т. 54, № 6. С. 767–779.