

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ДЕТЕРМИНИРОВАННО-ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ СРЕДНЕШИРОТНОЙ НЕВОЗМУЩЕННОЙ D-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

ANALYSIS OF ELECTRON DENSITY CALCULATIONS USING DETERMINISTIC-PROBABILISTIC MODEL OF THE IONOSPHERIC D-REGION

С.З. Беккер

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

S.Z. Bekker

*Institute of Geosphere Dynamics RAS,
Moscow, Russia, susanna.bekker@gmail.com*

Аннотация. Работа посвящена разработке принципиально новой детерминированно-вероятностной методики моделирования D-области ионосферы и анализу результатов расчетов электронной концентрации (N_e), выполненных с использованием данного подхода. Это направление исследования имеет важное фундаментальное значение, связанное с отказом от детерминированного описания непрерывно изменяющихся сред, таких как ионосфера. Расчеты N_e проводятся по 5-компонентной системе уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла D-области с учетом плотностей распределения входных параметров модели. При оценке плотности вероятности скорости ионообразования учитываются наиболее важные источники ионизации D-области. Определено количество итераций расчета, необходимое для сходимости электронной плотности вероятности $P(N_e)$ в диапазоне высот $h=50-85$ км на среднеширотной трассе в различных гелиогеофизических условиях. В результате сопоставления теоретических распределений с экспериментальными $P(N_e)$, полученными по двум статистически обработанным банкам данных N_e , получено весьма хорошее согласие на высотах, значимых для распространения радиоволн СДВ–ДВ-диапазона (сверхдлинные — длинные волны). Обоснована необходимость более тщательной верификации $P(N_e)$ по экспериментальным радиофизическим данным распространения СДВ–ДВ-волн.

Ключевые слова: моделирование D-области ионосферы, вероятностно-статистическое моделирование, теория вероятности, скорость ионизации, электронная концентрация, распространение СДВ–ДВ.

Abstract. The work is devoted to the development of a fundamentally new way of modeling the ionospheric D-region — deterministic-probabilistic. The results of electron density (N_e) calculations using this technique are analyzed. Research of this kind is of fundamental importance, related to the rejection of a purely deterministic description of a continuously changing environment such as the ionosphere. In this work, N_e is calculated using a five-component system of ionization-recombination cycle equations. Probability density functions (PDFs) of input parameters of the model are used to solve the system. The most important sources of the D-region ionization are taken into account to calculate PDFs of the ionization rate. The necessary number of iterations is determined by the convergence of PDFs of the electron density from 50 to 85 km at midlatitudes under different heliogeophysical conditions. Theoretical N_e PDFs have been shown to be in good agreement with two experimental databases on electron density, especially at large D-region heights. The next important stage of modeling is the thorough verification of PDFs from experimental radiophysical data on VLF—LF propagation.

Keywords: modeling of the ionospheric D-region, probabilistic statistical modeling, theory of probability, ionization rate, electron density, VLF—LF propagation.

ВВЕДЕНИЕ

Не вызывает вопросов, что ионосфера как среда распространения радиоволн оказывает существенное влияние на работу радиотехнических систем, следовательно, для компенсации ошибок при расчете распространения радиоволн необходимо знание параметров среды в весьма широком диапазоне высот и широт [Мощные..., 2013].

Широко используемые на сегодняшний день детерминированные методы описания среды не учитывают нерегулярность и непрерывную изменчивость ионосферы и потому непригодны для оперативной коррекции радиолокационных данных.

В последние несколько лет на примере D-области ионосферы и распространения через нее радиоволн СДВ–ДВ-диапазона активно разрабатывается принципиально новое направление моделирования — вероятностно-статистическое [Козлов и др., 2014]. Вероятностно-статистические модели позволяют получать плотности распределения ионосферных параметров во всем многообразии комбинаций гелиогеофизических условий. Эти параметры выбираются согласно их законам распределения и используются при расчете радиофизических величин. В конечном счете имеем плотности вероятности амплитуды и фазы волны на выбранных трассе и

частоте в разных условиях солнечной и магнитной активности, на разных широтах, в разные сезоны и время суток. Плотности распределения всех обсуждаемых выше величин дают детальную картину геофизической и радиофизической обстановки на трассе, содержат в себе информацию о надежности установления связи в тех или иных условиях и дают практическую информацию разработчикам радиотехнических систем указанного ранее диапазона о наиболее и наименее благоприятных условиях передачи информации. Все эти сведения не могут быть получены из детерминированных моделей, независимо от того, на каких принципах они строятся, как часто корректируются и какой объем экспериментальных данных используют.

К настоящему моменту обоснованы два направления вероятностно-статистического моделирования: детерминированно-вероятностное и эмпирически-статистическое [Козлов и др., 2014]. Цель настоящей работы — расчет $P(N_e)$ на основании детерминированно-вероятностного (Д-В) подхода и анализ полученных результатов. В основу данного подхода положены теоретические исследования (уравнения ионизационно-рекомбинационного цикла), в которых варьируются неизвестные параметры.

Детерминированно-вероятностное моделирование состоит из следующих этапов.

1. Определение неизвестных и наиболее изменчивых параметров ионосферы, входящих в уравнения ионизационно-рекомбинационного цикла D-области ионосферы.

2. Нахождение законов распределения этих параметров с шагом по высоте в различных гелиогеофизических условиях по многолетним экспериментальным спутниковым данным.

3. Генерация N профилей этих параметров согласно полученным функциям распределения с помощью генератора случайных чисел (сгенерированные значения должны описываться теми же распределениями, что и входные экспериментальные данные). Количество N определяется сходимостью решений уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла.

4. Решение системы дифференциальных уравнений при каждом наборе сгенерированных профилей.

5. Использование полученных профилей N_e в качестве среды распространения радиоволн. Получение плотностей распределения радиофизических параметров на конкретных СДВ-трассах. Верификация функций распределения амплитуды и фазы волны проводится по независимо полученным экспериментальным данным комплексных радиофизических исследований геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево».

ИОНИЗАЦИОННО-РЕКОМБИНАЦИОННЫЙ ЦИКЛ И ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ

В рамках работы для вычисления высотных профилей N_e была использована 5-компонентная система дифференциальных уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла D-области ионосферы, впервые приведенная в [Егошин и др., 2012]. Эта система

учитывает основные аэрономические процессы, влияющие на N_e в нижней ионосфере: ионизацию солнечным излучением и космическими лучами q , фотоотлипание электронов от O_2^- , реакции преобразования NO^+ и O_2^- в кластерные положительные и отрицательные ионы, прилипание электронов в тройных соударениях к O_2 , диссоциативную рекомбинацию электронов с положительными ионами и ион-ионную рекомбинацию. Обсуждаемая система уравнений является стационарной и решается методом установления. Работоспособность 5-компонентной модели неоднократно проверялась по геофизическим и радиофизическим экспериментальным данным в спокойных условиях, а также во время солнечных вспышек разных классов. В настоящий момент существуют глобальные численные модели ионосферы, например [Krivolutsky et al., 2015], описывающие более полное взаимодействие нейтральных и заряженных составляющих на высотах D-области и включающие в рассмотрение сотни фотохимических реакций. Такие модели, естественно, обладают более высокой точностью по сравнению с используемой в работе 5-компонентной моделью, однако для отработки основных принципов вероятностного моделирования невозмущенной среднеширотной D-области ионосферы рассмотрения поведения основного набора заряженных составляющих ионосферы более чем достаточно.

Неизвестными варьируемыми параметрами системы являются скорость ионизации q , температура нейтралов T , концентрации $[O_2]$, $[N_2]$, $[H_2O]$, $[O_3]$ и $[CO_2]$. К настоящему времени накоплен большой объем экспериментальных спутниковых данных по температуре и плотности нейтральных составляющих ионосферы, а также концентрациям малых нейтральных составляющих в широком диапазоне высот и геомагнитных широт. Была проведена статистическая обработка экспериментальных банков данных входных параметров T , $[O_2]$, $[N_2]$, $[H_2O]$, $[O_3]$ спутника AURA и данных $[CO_2]$ спутника TIMED за 2009, 2010 и 2012 г. Рассматривались четыре сезона: зима (ноябрь–февраль), весна (март, апрель), лето (май–август), осень (сентябрь, октябрь), в качестве дневного и ночного времени приняты соответственно часы освещенной и неосвещенной ионосферы. Модель строилась независимо в различных гелиогеофизических условиях, в ней не учитывался суточный ход параметров и не рассматривалось прохождение терминатора, так как в это время ионосфера крайне нестабильна. Для всех комбинаций гелиогеофизических условий в диапазоне высот $h=50-85$ км с шагом 5 км получены кривые плотности вероятности T , $[O_2]$, $[N_2]$, $[H_2O]$, $[O_3]$ и $[CO_2]$. Согласно распределениям, сгенерированы профили входных параметров, которые используются при решении системы дифференциальных уравнений цикла. На рис. 1, 2 в качестве примера приведены кривые плотности вероятности параметров T и $[N_2]$ на разных высотах. Эти данные соответствуют дневным и периоду осеннего равноденствия 2009 г. (минимум солнечной активности).

Видно, что кривые сложно описать какими-либо конкретными законами распределения, поэтому было решено не привязываться к ним, а генерировать

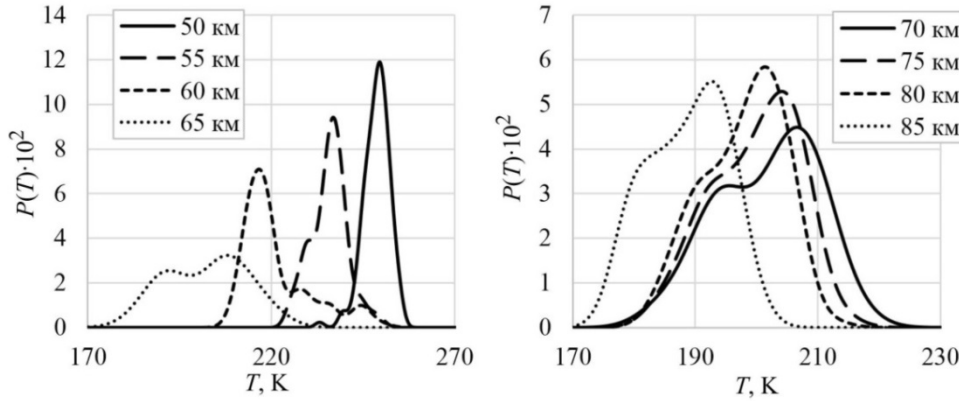


Рис. 1. Плотность вероятности T для высот $h=50-85$ км (дневные часы, период осеннего равноденствия 2009 г., средние широты)

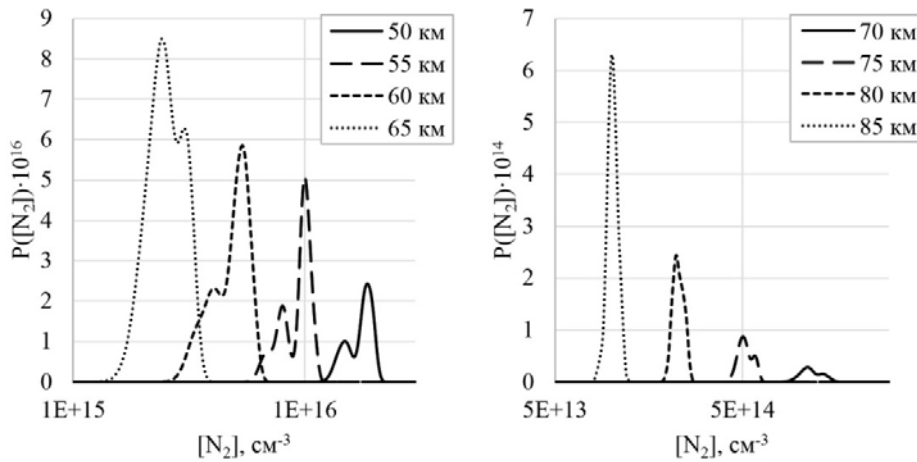


Рис. 2. Плотность вероятности $[N_2]$ для высот $h=50-85$ км (дневные часы, период осеннего равноденствия 2009 г., средние широты)

профили напрямую согласно эмпирически полученным кривым. Количество генерируемых профилей, необходимое для сходимости выходных решений системы, обсуждается ниже.

Наличие большого объема спутниковых данных по плотности и температуре нижней ионосферы, а также концентрациям малых нейтральных составляющих позволяет надежно оценить значения всех, кроме одного, варьируемых входных параметров модели. Наиболее важной и до сих пор нерешенной проблемой моделирования является отсутствие достоверной информации о поведении одного из наиболее значимых параметров ионизационно-рекомбинационного цикла — скорости ионизации. Анализ чувствительности решений уравнений цикла показал, что на высотах отражения СДВ поведение N_e наиболее чувствительно к изменению именно q и T , что также естественно по чисто физическим соображениям.

РАСЧЕТ СКОРОСТИ ИОНИЗАЦИИ

Для оценки q были рассмотрены основные источники ионизации на высотах D-области ионосферы.

1. Ионизация космическими лучами

Космические лучи являются единственным источ-

источником ионизации нижней части D-области ионосферы на высотах $h \approx 50-65$ км. Поток космических лучей очень мал, а следовательно, для ионизации необходима высокая концентрация нейтралов $[M]$, которая, как известно, убывает с высотой, поэтому выше 65 км вклад космических лучей в ионизацию неощутим.

Скорость ионизации нижней ионосферы космическими лучами $q_{кл}$ в зависимости от высоты, солнечной активности и широты можно оценить по параметризованным уравнениям, полученным Хипсом [Hears, 1978] и представленным в таблице.

В рамках данной работы для последующей верификации полученных результатов по радиофизическим данным скорость ионизации рассчитывалась для конкретной среднеширотной СДВ-трассы. Передатчик ДНО, работающий на частоте 23.4 кГц, расположен в Германии ($53^\circ N, 8^\circ E$), а приемник находится в ГФО «Михнево» ($56^\circ N, 38^\circ E$). Поэтому для оценки было выбрано значение $\varphi=54.5^\circ$ и использованы соответствующие формулы из таблицы.

2. Ионизация NO линией La ($\lambda=121.6$ нм)

Вопрос ионизации ионосферы в диапазоне высот $h \approx 65-85$ км всегда вызывал наибольшую трудность. Дело в том, что излучение $\lambda < 100$ нм не проникает на высоты D-области ионосферы, а кванты с длинами

Скорость ионизации космическими лучами для различных широт ϕ и уровней солнечной активности

	Высокая солнечная активность	Низкая солнечная активность
$ \phi < 53^\circ$	$q_{\text{КЛ}} = (1.74 \cdot 10^{-18} + 1.93 \cdot 10^{-17} \sin \phi ^4) [\text{M}]$	$q_{\text{КЛ}} = (1.74 \cdot 10^{-18} + 2.84 \cdot 10^{-17} \sin \phi ^4) [\text{M}]$
$ \phi > 53^\circ$	$q_{\text{КЛ}} = 1.44 \cdot 10^{-17} [\text{M}]$	$q_{\text{КЛ}} = (1.44 \cdot 10^{-17} + 4.92 \cdot 10^{-18}) [\text{M}]$

волн больше 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 n -й компоненты нейтрального газа можно оценить по формуле [Брюнелли, Намгаладзе, 1988]

$$q_n(h) = n_n(h) j_n(h) = n_n(h) \sigma_{n,\lambda}^{\text{нон}} F_{\lambda}^{\infty} \exp\left(-\sec \chi \sum_i \sigma_i^{\text{погл}} \int_h^{+\infty} n_i(h) dh\right), \quad (1)$$

где n_n — концентрация n -й компоненты, j_n — коэффициент фотоионизации, $\sigma_{n,\lambda}^{\text{нон}}$ — сечение фотоионизации n -й компоненты излучением с длиной волны λ , F_{λ}^{∞} — поток фотонов на длине волны λ за пределами атмосферы, χ — зенитный угол Солнца, $\sigma_i^{\text{погл}}$ — сечение поглощения фотона с длиной волны λ , $\int_h^{+\infty} n_i(h) dh$ — число молекул поглощающей компоненты в столбе единичного сечения (см^{-2}) над данной высотой h .

Стоит отметить, что формула (1) справедлива только для $\chi < 80^\circ$, а при больших зенитных углах $\sec \chi$ необходимо заменить на функцию Чепмена.

Для оценки ионизации NO линией Лайман-альфа ($\text{L}\alpha$) в дневные часы получаем

$$q_{\text{L}\alpha}(h) = \sigma_{\text{NO}}^{\text{нон}} [\text{NO}](h) F_{\text{L}\alpha} \exp\left(-\sigma_{\text{O}_2}^{\text{погл}} \sec \chi \int_h^{+\infty} [\text{O}_2](h) dh\right). \quad (2)$$

Средний поток излучения для дневных часов составляет $F_{\text{L}\alpha} = 3.49 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ по измерениям 2009 г. [Котов, 2011]. Необходимые для расчета сечение поглощения O_2 и сечение ионизации NO $\sigma_{\text{O}_2}^{\text{погл}} = 1.13 \cdot 10^{-20} \text{ см}^{-2}$, $\sigma_{\text{NO}}^{\text{нон}} = 1.86 \cdot 10^{-18} \text{ см}^{-2}$. Зенитный угол Солнца определяется выражением

$$\cos \chi = \sin \phi \sin \delta - \cos \phi \cos \delta \cos(\omega t), \quad (3)$$

где ϕ — географическая широта, t — время суток, ω — угловая скорость вращения Земли, δ — склонение Солнца, определяемое следующим образом:

$$\text{tg} \delta = \text{tg} 23.5^\circ \sin\left(\frac{2\pi}{365}(d - 80)\right), \quad (4)$$

где d — номер дня в году.

Определение концентрации [NO] — наиболее сложный и важный этап расчета скорости ионизации. Известно, что существует метод оценки концентрации атмосферной компоненты по мере ее оптической эмиссии. В книге [Шефов и др., 2006] исследуется излучение молекулы NO на длине волны 5.3 мкм и показано, что $Q_{5.3} = k [\text{NO}]$, где $Q_{5.3}$ — мера эмиссии NO на длине волны 5.3 мкм, k — коэффициент пропорциональности, который является сложной функцией концентраций нейтральных, заряженных, возбужденных составляющих ионосферы и констант скоростей реакций, часть которых попросту неизвестна. Тем не менее, обнаруженная пропорциональность позволяет утверждать, что поведение плотности вероятности [NO] будет абсолютно идентично поведению плотности вероятности величины $Q_{5.3}$, которая с начала 2002 г. измеряется радиометром SABER, установленном на спутнике TIMED [http://saber.gats-inc.com/browse_data.php]. Таким образом, в различных гелиогеофизических условиях осталось определить опорные средние профили [NO].

В 60–70 гг. прошлого века была проведена серия ракетных экспериментов по измерению [NO] [Данилов, Ледомская, 1984], однако использовать какой-либо единичный экспериментальный профиль было бы как минимум некорректно. Усреднять полученные значения также не представляется возможным, поскольку экспериментов было проведено чуть больше десяти, и, естественно, их трудно распространить на другие гелиогеофизические условия.

В качестве опорных величин для расчета концентрации [NO] можно выбрать профили Стандарта США [Anderson et al., 1986], которые даются в единицах ppmv (объемная концентрация в миллионных долях), и, следовательно, по концентрациям O_2 и N_2 со спутника AURA можно рассчитать профили для любых гелиогеофизических условий в рассматриваемый период. В качестве альтернативного варианта в диапазоне средних широт для высот меньше 90 км можно использовать приближение Abby Normal, предложенное в работе [Schumer, 2009] и определяемое выражением

$$[\text{NO}] = \frac{[\text{O}]}{2 \cdot 10^4} + \frac{[\text{O}_2]}{2 \cdot 10^7}, \quad (5)$$

что также не ставит ограничений на определение концентрации для различных условий. Сопоставление обсуждаемых высотных профилей [NO], соответствующих дневным часам месяцев осеннего рав-

ноденствия 2009 г. и среднеширотной трассе ДНО — Михнево (рассматривалась область 53°–56° N, 8°–38° E), показано на рис. 3, а. Видно, что отличия между профилями начинаются только при $h > 75$ км, при этом порядки величин совпадают во всем рассматриваемом высотном диапазоне. Далее будут приведены результаты расчетов N_e для двух представленных кривых.

В ночные часы источником фотоионизации является излучение Солнца, рассеянное на ночную сторону. В [Thomas, Bowman, 1985] предложена аппроксимация ночного потока, при которой последние два множителя формулы (2) заменяются функцией зенитного угла и высоты, в результате чего формула скорости ионизации принимает вид

$$q_{La}^{ночная}(h) = \sigma_{NO}^{ион} [NO](h) \frac{4.9 \cdot 10^8}{\cos^2 \chi + 0.1} \times \exp(-0.48 \exp(0.15(85 - h) - 1)). \quad (6)$$

3. Ионизация $O_2(^1\Delta_g)$ в диапазоне $\lambda = 102.7 - 111.8$ нм

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.

Скорость ионизации $O_2(^1\Delta_g)$ в УФ-диапазоне в работе [Paulsen et al, 1971] предложено аппроксимировать аналитическим выражением

$$q_{v\phi}(h) = [O_2(^1\Delta_g)] \times \left(0.549 \cdot 10^{-9} \exp\left(-2.406 \cdot 10^{-20} \int_h^{+\infty} [O_2](h) dh\right) + 2.614 \cdot 10^{-9} \exp\left(-8.508 \cdot 10^{-20} \int_h^{+\infty} [O_2](h) dh\right) \right). \quad (7)$$

Рекомендуемый усредненный экспериментальный профиль $O_2(^1\Delta_g)$ показан на рис. 3, б.

4. Ионизация потоком высокоэнергичных частиц

Ночная среднеширотная область D изучена очень плохо — в первую очередь, это связано с трудностью измерений концентраций ее малых составляющих. В дневные часы в спокойных условиях скорости ионизации, которые обеспечиваются высыпавшимися из радиационных поясов протонами и электронами, принципиально меньше, чем дает ионизация молекул NO в линии La. Тем не менее, уже стало понятно, что высыпавшиеся электроны с энергиями в несколько десятков килоэлектронвольт вносят значительный вклад в ионизацию ночной области D даже на средних широтах. Для учета скорости ионообразования, обусловленного воздействием энергичных электронов, использованы оценки, предложенные в работе [Кошелев, 1983].

Ионизация высыпавшимися протонами и электронами может быть существенным источником дневной ионизации среднеширотной ионосферы, но

только в периоды сильных геомагнитных возмущений и солнечных протонных событий [Криволюцкий, Репнев, 2009; Krivolutsky et al., 2017].

5. Суммарная ионизация

Средние значения суммарной ионизации, полученные в результате учета перечисленных выше источников ионизации для дневных и ночных часов, показаны на рис. 4. Расчеты выполнены для среднеширотной трассы ДНО — Михнево с использованием профиля [NO], предложенного в работе [Anderson et al., 1986].

Видно, что ионизация космическими лучами на больших широтах практически не имеет суточной зависимости. В дневные часы уже на 65 км становится существенной ионизация NO линией La, еще выше появляется ионизация $O_2(^1\Delta_g)$ в УФ-диапазоне и примерно на 85 км последняя начинает преобладать над ионизацией NO, но затем резко идет на спад. Несмотря на это, общая ионизация E-области продолжает расти за счет ионизации молекул O_2 линией Lβ. В ночные часы, начиная примерно с 65 км, D-область ионизируется за счет потока высокоэнергичных электронов, высыпавшихся из радиационных поясов. Ночная ионизация NO здесь практически неощутима.

На рис. 5 видна сезонная зависимость суммарной скорости ионизации. Во всем высотном диапазоне величина \bar{q} больше в летние месяцы, а в периоды осеннего и весеннего равноденствий значения практически совпадают между собой (меньше летних на ~20 %). В зимние месяцы выше 60 км ионизация существенно ниже и в дневные, и в ночные часы, а основной вклад в эту разницу вносит величина q_{La} .

Распределения концентраций [NO] и [M] во всем высотном диапазоне позволили получить распределения суммарной скорости ионизации в различных гелиогеофизических условиях. В качестве примера на рис. 6 приведена плотность вероятности q в дневные часы месяцев осеннего равноденствия 2009 г. Данные распределения, как и распределения остальных входных параметров модели, используются для генерации высотных профилей, которые подставляются в систему дифференциальных уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

Как было сказано выше, расчет N_e осуществлялся по 5-компонентной системе дифференциальных уравнений, включающей в качестве выходных параметров N_e , $[NO^+]$, $[O_2^+]$, $[XY^+]$, $[XY^-]$, где $[XY^+]$ и $[XY^-]$ — концентрации положительных и отрицательных кластерных ионов. С шагом 5 км по высоте согласно уже полученным плотностям вероятности было сгенерировано N наборов входных профилей. С каждым этим набором решалась система уравнений, и на выходе было получено N профилей N_e . Важным этапом задачи было определение количества итераций, достаточного для сходимости плотности вероятности N_e в любых рассматриваемых гелиогеофизических условиях. На рис. 7 показана зависимость

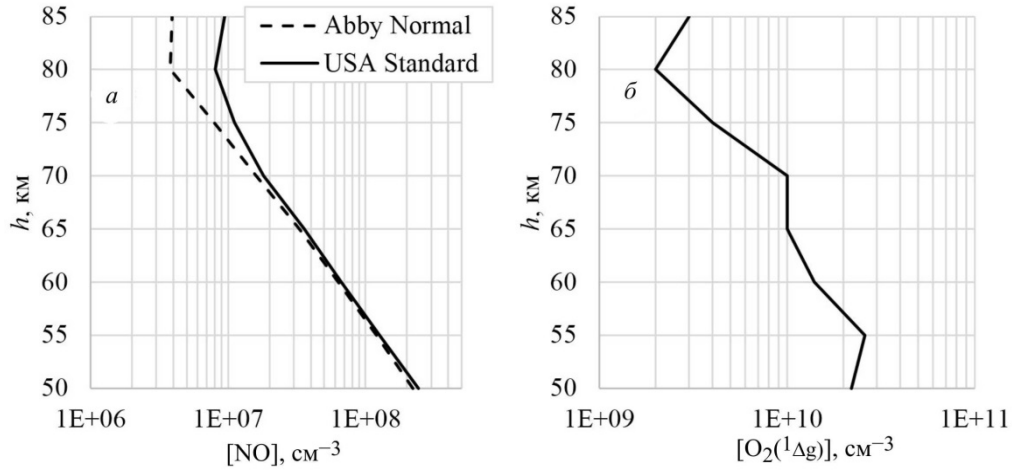


Рис. 3. Средние высотные профили [NO] (а) и профиль [O₂(¹Δ_g)] (б) (дневные часы, период осеннего равноденствия 2009 г., средние широты)

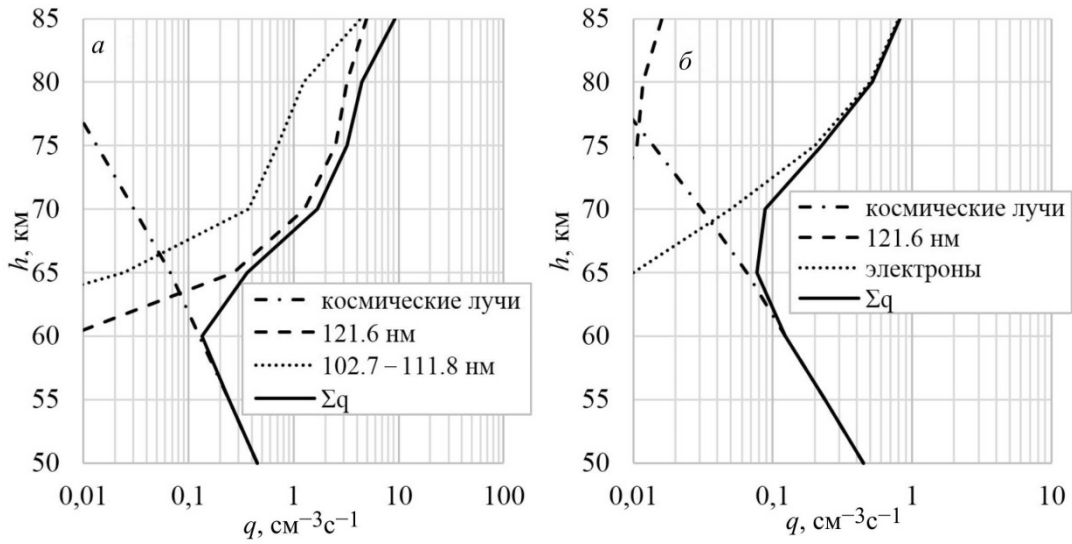


Рис. 4. Средние значения скорости ионизации различными источниками в дневные часы (а) и ночные часы (б) (период осеннего равноденствия 2009 г., средние широты)

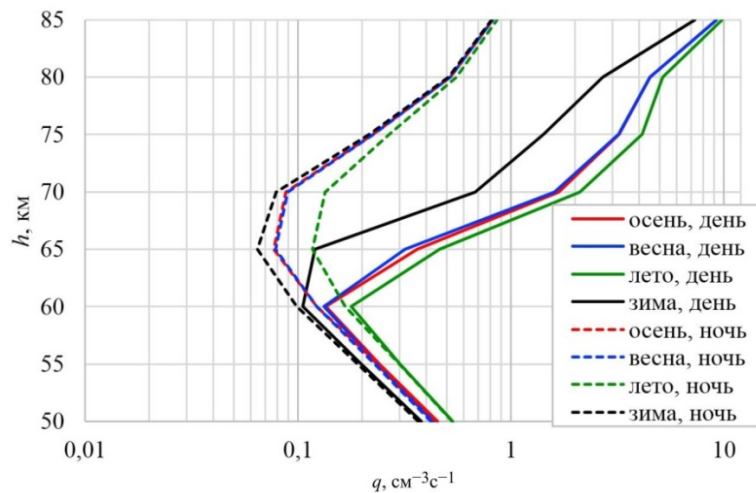


Рис. 5. Средние значения суммарной скорости ионизации в различные сезоны и времена суток (2009 г., средние широты)

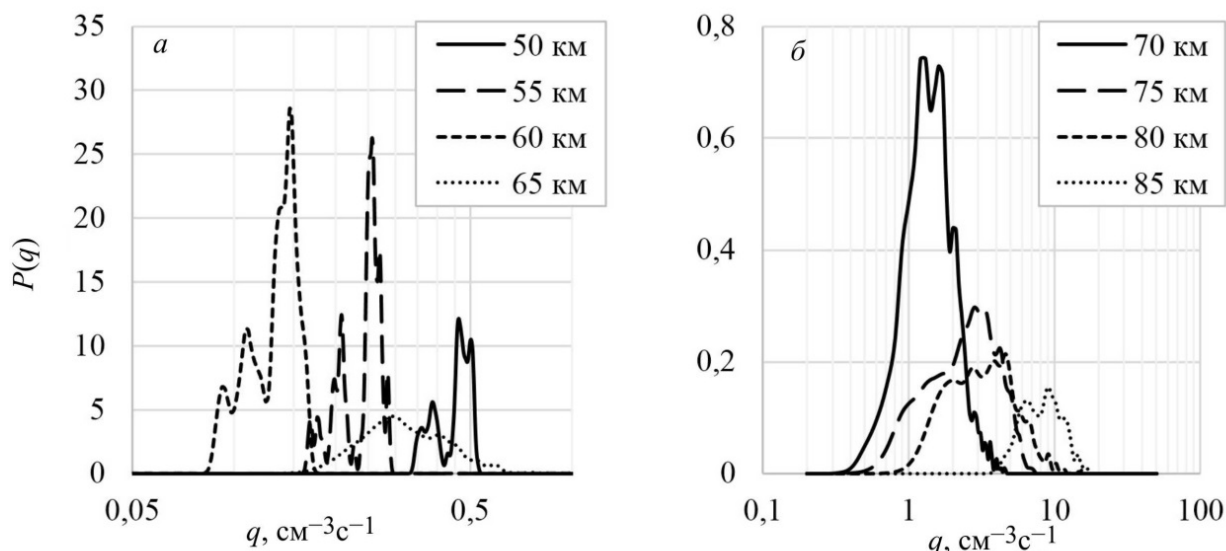


Рис. 6. Плотность вероятности q для высот $h=50-85$ км (дневные часы, период осеннего равноденствия 2009 г., средние широты)

$P(N_e)$ от количества итераций на двух высотах. Дискретизация распределений на высоте $h=60$ км проводилась с шагом 0.1 см^{-3} , а на высоте $h=80$ км — с шагом 8 см^{-3} . Для оценки сходимости было решено сравнивать распределения с условно предельной кривой, построенной при $N=10\,000$. Оказалось, что начиная с $N=1000$ отклонения распределений от предельной кривой не превышают 2%. Было решено, что этого значения достаточно для сходимости решения и корректного построения распределений.

Для верификации полученных значений N_e был использован ГОСТ Р-25645.15-94 электронной концентрации. В основу ГОСТ положена глобальная модель N_e и эффективной частоты соударений электронов в нижней ионосфере, построенная на основании результатов согласования расчетных и экспериментальных данных о распространении радиоволн преимущественно СДВ-диапазона. На рис. 8, а изображены теоретически полученные \bar{N}_e для двух разных профилей [NO] (Abby Normal и Стандарт США) по данным месяцев осеннего равноденствия 2009 г. на трассе ДНО — Михнево и соответствующий профиль N_e , взятый из ГОСТ. Как и ожидалось, расчетные профили на всех высотах отличаются менее чем в два раза, поэтому далее будут приводиться результаты с использованием только профилей NO из Стандарта США (Д-В модель). На рис. 8 видно, что в дневные часы осенних месяцев наблюдается хорошее согласие при $h>65$ км, но имеется расхождение на высотах, где за ионизацию отвечают космические лучи. Стоит отметить, что при таких малых концентрациях полученное расхождение несущественно, поскольку отражение СДВ происходит выше этой области. В летние месяцы 2009 г. ситуация схожая (рис. 9, а), а в зимние месяцы максимальное расхождение приходится на высоту ~ 70 км (рис. 9, б). Несмотря на относительно низкие значения средней скорости ионизации в зимние месяцы (рис. 5), среднее значение N_e получилось выше летнего. Из анализа входных экспериментальных дан-

ных, соответствующих разным сезонам, можно сделать вывод, что это связано с сезонным перепадом температуры T , к которой N_e наиболее чувствительна. В ночные часы значения практически не отличаются во все сезоны и в логарифмической шкале имеют линейный вид (рис. 8, б).

Выходными параметрами детерминированно-вероятностной модели D-области ионосферы являются не средние значения N_e , а $P(N_e)$. В преимуществах использования вероятностного подхода можно убедиться, рассмотрев $P(N_e)$ в точках наибольшего расхождения $\bar{N}_{e\text{ теор}}$ и $\bar{N}_{e\text{ ГОСТ}}$ в дневные часы осенних месяцев 2009 г., т. е., как следует из рис. 8, а, на высотах 60 и 65 км. Кривые $P(N_e)$ показаны на рис. 10. Для построения кривых, соответствующих ГОСТ, были объединены все среднширотные профили выбранных сезона, солнечной активности и времени суток. Показаны также $P(N_e)$, построенные по экспериментальному банку данных N_e [Нестерова, Гинзбург, 1985] (далее Каталог), в котором собраны электронные профили, полученные с помощью ракет, методом частичных отражений и др. На рис. 8 на выбранных высотах $\bar{N}_{e\text{ ГОСТ}}$ превосходит $\bar{N}_{e\text{ теор}}$, однако на рис. 10 видно, что это смещение связано с тяжелыми «хвостами» функции плотности вероятности $N_{e\text{ ГОСТ}}$, при этом максимальные значения теоретической кривой и кривой ГОСТ находятся значительно ближе. Максимумы распределений, построенных по КATALOGу, на двух рассматриваемых высотах приходятся практически на те же значения N_e , что и максимумы теоретических распределений.

На рис. 11 показаны кривые, соответствующие летним месяцам 2009 г. на высотах 75 и 80 км. На рис. 9 видно, что средние значения $\bar{N}_{e\text{ теор}}$ и $\bar{N}_{e\text{ ГОСТ}}$ на высоте 75 км согласуются лучше, чем на 80 км, однако на рис. 11 видна противоположная картина, где наиболее вероятные величины N_e на 80 км явно ближе друг к другу, чем на 75 км.

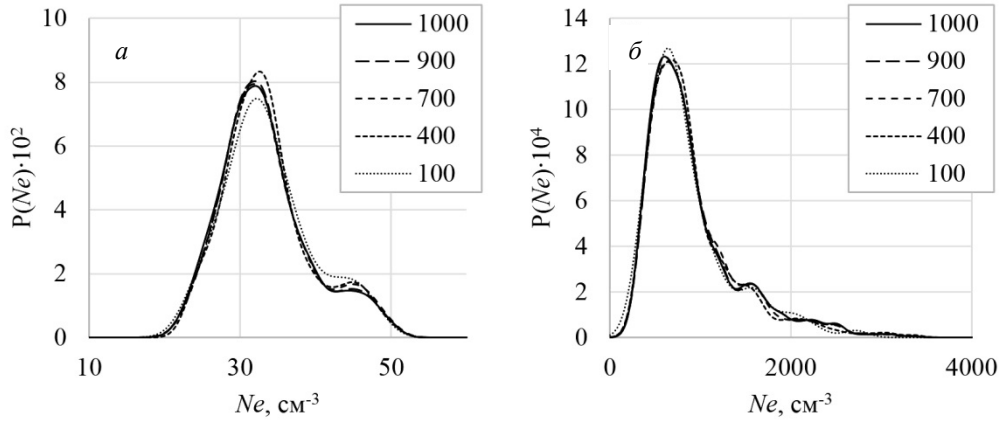


Рис. 7. $P(N_e)$ для $h=60$ км (а) и $h=80$ км (б) (дневные часы, период осеннего равноденствия 2009 г., средние широты)

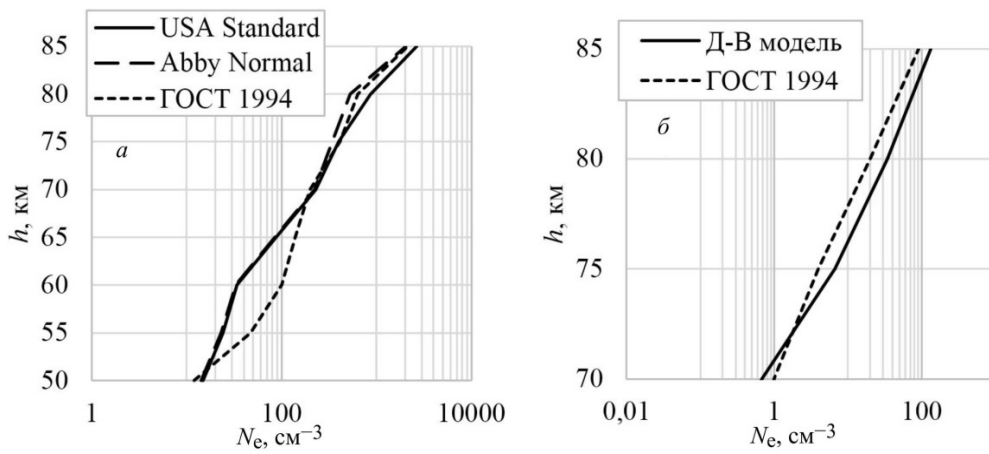


Рис. 8. Средние профили $\overline{N_e}$ для дневных (а) и ночных часов (б) (период осеннего равноденствия 2009 г., средние широты)

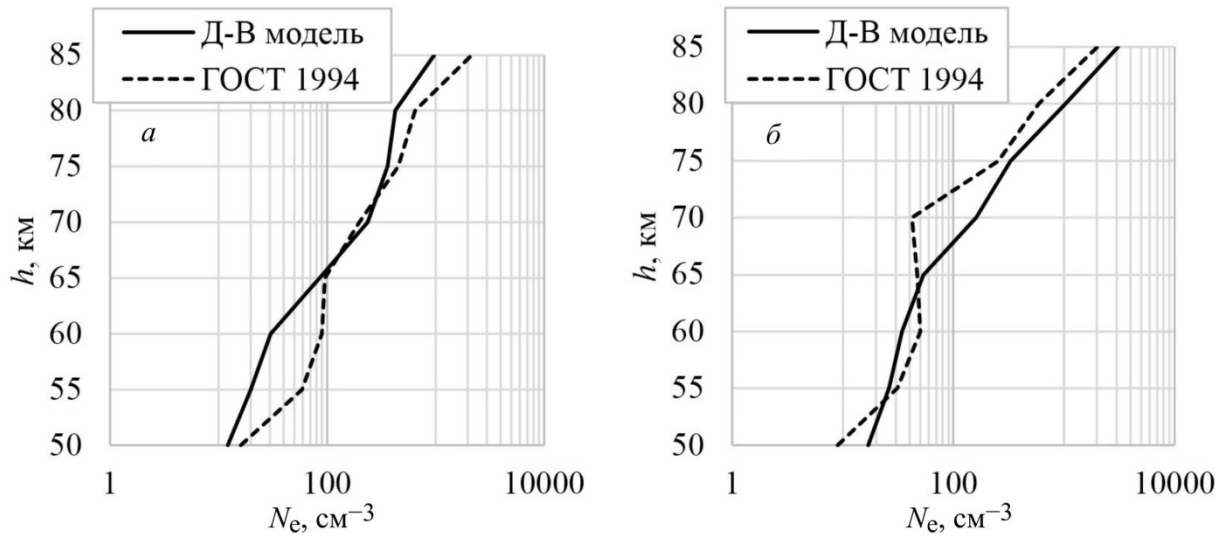


Рис. 9. Средние профили $\overline{N_e}$ для летних (а) и зимних месяцев (б) (дневные часы, 2009 г., средние широты)

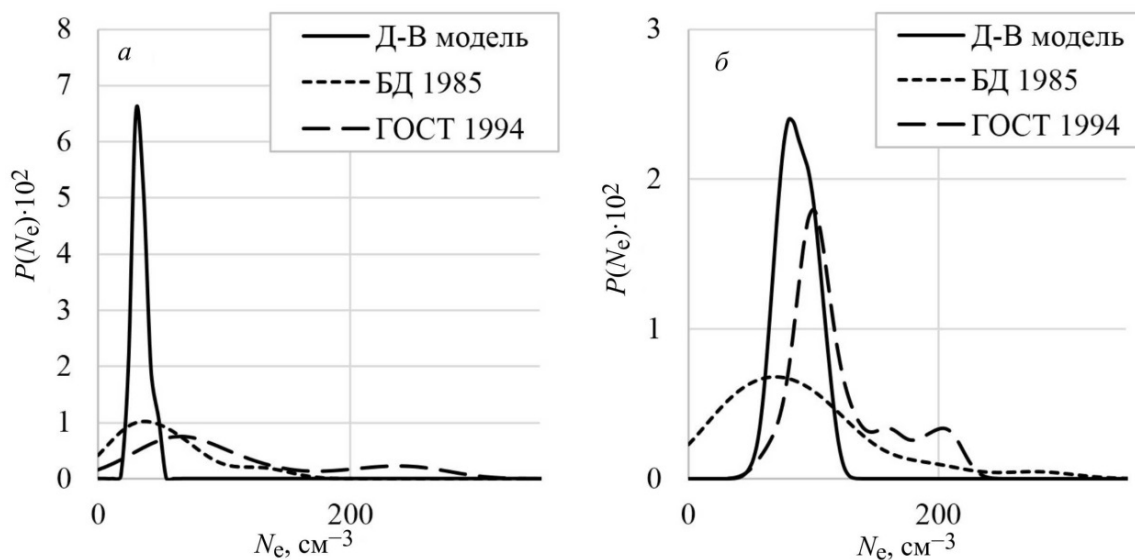


Рис. 10. Плотность вероятности N_e для $h=60$ км (а) и $h=65$ км (б) (дневные часы, период осеннего равноденствия 2009 г., средние широты)

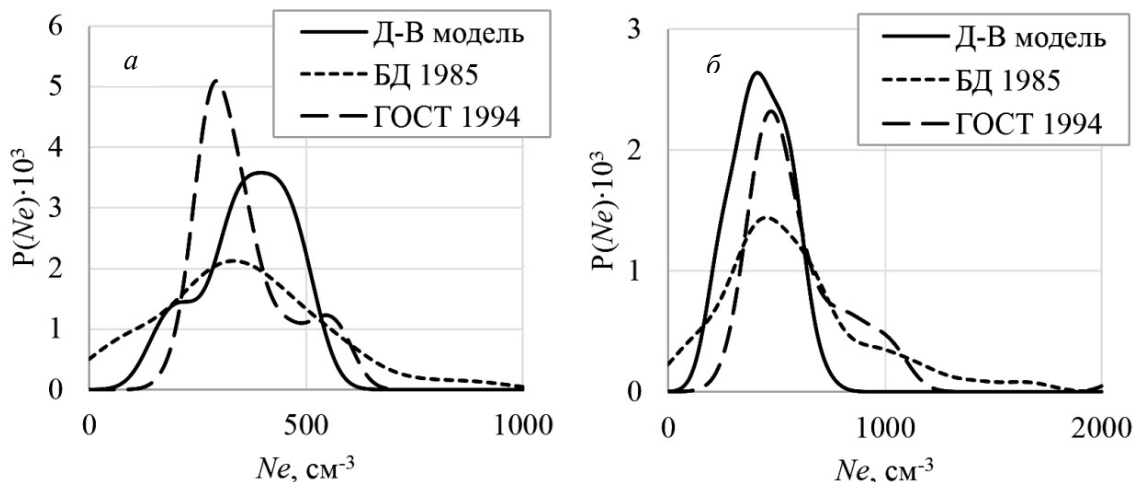


Рис. 11. $P(N_e)$ для $h=75$ км (а) и $h=80$ км (б) (дневные часы, летние месяцы 2009 г., средние широты)

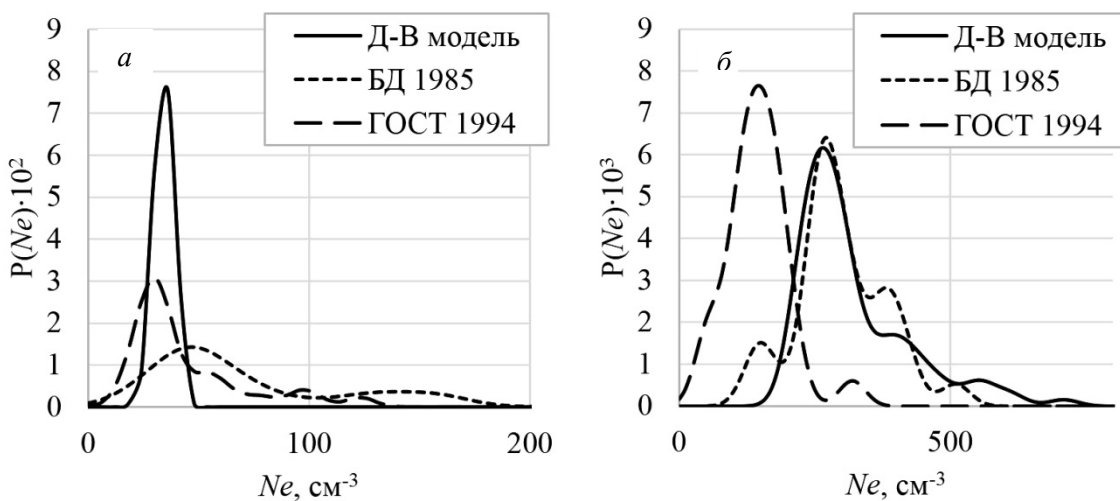


Рис. 12. $P(N_e)$ для $h=60$ км (а) и $h=75$ км (б) (дневные часы, зимние месяцы 2009 г., средние широты)

На рис. 12 показаны распределения по данным зимних месяцев 2009 г. Для анализа выбраны высоты 60 и 75 км, на которых относительная разница между $\bar{N}_{e\text{ теор}}$ и $\bar{N}_{e\text{ ГОСТ}}$ примерно одинакова, чего нельзя сказать о соответствующих распределениях. Так, например, максимальные значения распределений на высоте 60 км очень близки, а на 70 км видна очевидная разница.

Проведенный анализ показывает, что использование медианных значений не позволяет делать корректные выводы о согласии теоретических и экспериментальных геофизических величин.

В рамках представленной работы проведен расчет кривых плотностей вероятности N_e на среднеширотной трассе по данным 2009, 2010 и 2012 гг. В дневные часы летних месяцев и месяцев равноденствия в годы низкой солнечной активности (2009 и 2010 г.) на высотах $h > 65$ км теоретические расчеты хорошо согласуются с данными ГОСТ. В нижней части D-области ионосферы в эти сезоны модель имеет худшее согласие с ГОСТ и Каталогом, однако порядки величин совпадают даже на этих высотах. В 2012 г. наблюдается несколько иная картина, появляется существенное расхождение между ГОСТ и Каталогом, а теоретические кривые в различные сезоны близки то с одним, то с другим банком или лежат примерно между ними.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вероятностное направление моделирования позволяет уйти от чисто детерминированного описания среды, которое сейчас активно используется и у нас, и за рубежом. Как было показано выше, среднее значение не может проиллюстрировать истинную картину поведения геофизических параметров, поскольку в большей части случаев оно совершенно не совпадает с наиболее вероятной величиной.

В заключение еще раз подчеркнем [Козлов и др., 2014; Беккер и др., 2016], что любая ионосферная модель, включая рассмотренную здесь детерминированно-вероятностную, не может быть рекомендована к использованию без тщательной верификации по радиофизическим экспериментальным данным. Этот этап работы представляет особенный интерес, поскольку детерминированно-вероятностная модель, помимо явного фундаментального значения, имеет очевидный прикладной характер и, в первую очередь, необходима для повышения точности прогноза распространения радиоволн СДВ–ДВ-диапазонов.

Выражаю особую благодарность Козлову С.И. за основную идею и научное руководство работой, а также Ляхову А.Н. за многочисленные обсуждения результатов и помощь в исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.

Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.

Данилов А.Д., Ледомская С.Ю. Окись азота в области D. I. Экспериментальные данные о распределении [NO] // Геомагнетизм и аэронаука. 1984. Т. 24, № 4. С. 614–619.

Егошин А.А., Ермак В.М., Зецер Ю.И. и др. Влияние метеорологических и волновых процессов на нижнюю ионосферу в условиях минимума солнечной активности по экспериментальным данным по распространению СДВ–ДВ в средних широтах // Физика Земли. 2012. № 3. С. 101–112.

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

Котов Ю.Д. Высокоэнергетичные вспышечные процессы на Солнце и их исследование на спутниках КОРОНАС // УФН. 2011. Т. 180, № 6. С. 647–661.

Кошелев В.В., Климов Н.Н., Сутырин Н.А. Аэронаука мезосферы и нижней термосферы. М.: Наука, 1983. 184 с.

Кривоулицкий А.А., Репнев А.И. Воздействие космических факторов на озоносферу Земли. М.: ГЕОС, 2009. 382 с.

Мощные надгоризонтные РЛС дальнего обнаружения. Разработка. Испытания. Функционирование / под ред. Боева С.Ф. М.: Изд. Радиотехника, 2013. 168 с.

Нестерова И.И., Гинзбург Э.И. Каталог профилей электронной концентрации области D ионосферы. Новосибирск: Изд-во ИГиГ, 1985. 210 с.

Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы — индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.

Anderson G.P., Clough S.A., Kneizys F.X., et al. Atmospheric constituent profiles (0–120 km) // Environmental Res. Papers. 1986. N 954. 46 p.

Heaps M.G. A parameterization of cosmic ray ionization // Planet. Space Sci. 1978. V. 26. P. 513–517.

Krivolutsky A.A., Cherepanova L.A., Vyushkova T.Yu., Repnev A.I. The three-dimensional numerical model CHARM-I: the incorporation of processes in the ionospheric D-region // Geomagnetism and Aeronomy. 2015. V. 55, N 4. P. 468–487.

Krivolutsky A.A., Vyushkova T.Yu., Mironova I.A. Changes in chemical composition of the atmosphere in polar regions after solar proton flares (3D modeling) // Geomagnetism and Aeronomy. 2017. V. 57, N 2. P. 173–194.

Paulsen D.E., Huffman R.E., Larrabe J.C. Improved photoionization rates of $O_2(^1\Delta_g)$ in the D-region // Radio Sci. 1971. V. 7, N 1. P. 51–55.

Schumer E.A. Improved modeling of midlatitude D-region ionospheric absorption of high frequency radio signals during solar X-ray flares. Dissertation. Department of the Air Force Air University. Air Force Institute of Technology, 2009.

Thomas L., Bowman M.R. Model studies of the D-region negative-ion composition during day-time and night-time // J. Atmos. Terr. Phys. 1985. V. 47, N 6. P. 547–556.

URL: http://saber.gats-inc.com/browse_data.php (дата обращения 29 декабря 2017 г.).

REFERENCES

Anderson G.P., Clough S.A., Kneizys F.X., Chetwynd J.H., Shettle E.P. Atmospheric Constituent Profiles (0–120 km). *Environmental Res. Papers*. 1986, no. 954, 46 p.

Bekker S.Z., Kozlov S.I., Lyakhov A.N. On some methods of increasing the accuracy of statistical models of the D-region of the ionosphere. *Trudy IV Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii "Problemy voenno-prikladnoi geofiziki i kontrolya sostoyaniya prirodnoi sredy"*. [Proc. the IV National Scientific Conference "Problems of the Military-Applied Geophysics

and Environment Control"]. St. Petersburg, 2016, pp. 62–66. (In Russian).

Brunelli B.E., Namgaladze A.A. *Fizika ionosfery* [Physics of the Ionosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 528 p. (In Russian).

Danilov A.D., Ledomskaya S.Y. Nitric oxide in the D-region. I. Experimental data of the [NO] distribution. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1984, vol. 24, no. 4, pp. 614–619 (In Russian).

Egoshin A.A., Ermak V.M., Zetzer Yu.I., Kozlov S.I., Kudryavtsev V.P., Lyakhov A.N., Poklad Yu.V., Yakimenko E.N. Influence of meteorological and wave processes on the lower ionosphere during solar minimum conditions according to the data on midlatitude VLF–LF propagation. *Fizika Zemli* [Physics of the Solid Earth]. 2012, vol. 48, no. 3, pp. 275–286. (In Russian).

Heaps M.G. A parameterization of cosmic ray ionization. *Planet Space Sci.* 1978, vol. 26, pp. 513–517.

Kozlov S.I., Lyakhov A.N., Bekker S.Z. Key principles of constructing probabilistic statistical ionosphere models for the radiowave propagation problems. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2014, vol. 54, no. 6, pp. 767–779. (In Russian).

Kotov Y.D. High-energy solar flare processes and their investigation onboard Russian satellite missions CORONAS. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Adv. In Physical Sciences]. 2011, vol. 180, no. 6, pp. 647–661 (In Russian).

Koshelev V.V., Klimov N.N., Sutyurin N.A. *Aeronomiya mezofery i nizhnei termosfery* [Aeronomy of the Mesosphere and Lower Thermosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1983, 184 p. (In Russian).

Krivolutsky A.A., Repnev A.I. *Vozdeistvie kosmicheskikh faktorov na ozonosferu Zemli* [Impact of Space Factors on Earth's Ozonosphere]. Moscow, GEOS, 2009, 382 p. (In Russian).

Krivolutsky A.A., Cherepanova L.A., Vyushkova T.Yu., Repnev A.I. The three-dimensional numerical model CHARM-I: the incorporation of processes in the ionospheric D-region. *Geomagnetizm and Aeronomy.* 2015, vol. 55, no. 4, pp. 468–487.

Krivolutsky A.A., Vyushkova T. Yu., Mironova I.A. Changes in chemical composition of the atmosphere in polar regions after solar proton flares (3D modeling). *Geomagnetizm and Aeronomy.* 2017, vol. 57, no 2, pp. 173–194.

Moshchnye nadgorizontnye RLS dal'nego obnaruzheniya. Razrabotka. Ispytaniya. Funktsionirovanie [Powerful Over-Horizon Early Warning Radar. Development. Tests. Operation]. Ed. Boev S.F. Moscow, Radioengineering Publ., 2013, 168 p. (In Russian).

Nesterova I.I., Ginzburg E.I. *Katalog profilei elektronnoi kontsentratsii oblasti D ionosfery* [Catalog of the Electron Concentration Profiles of the Ionosphere D-region]. Novosibirsk, Inst. of Geology and Geochemistry Publ., 1985, 210 p. (In Russian).

Paulsen D.E., Huffman R.E., Larrabe J.C. Improved photoionization rates of $O_2(^1\Delta_g)$ in the D region. *Radio Sci.* 1971, vol. 7, no. 1, pp. 51–55.

Schumer E.A. *Improved modeling of midlatitude D-region ionospheric absorption of high frequency radio signals during solar x-ray flares.* Dissertation. Department of the Air Force Air University. Air Force institute of technology. 2009.

Shefov N.N., Semenov A.I., Khomich V.Yu. *Izluchenie verkhnei atmosfery – indikator ee struktury i dinamiki* [Upper Atmospheric Radiation As An Indicator of Its Structure and Dynamics]. Moscow, GEOS Publ., 2006, 741 p. (In Russian).

Thomas L., Bowman M.R. Model studies of the D-region negative-ion composition during day-time and night-time. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1985, vol. 47, no. 6, pp. 547–556.

URL: http://saber.gats-inc.com/browse_data.php (accessed December 29, 2017).

Как цитировать эту статью

Беккер С.З. Анализ результатов расчетов концентрации электронов по детерминированно-вероятностной модели среднеширотной невозмущенной D-области ионосферы. *Солнечно-земная физика.* 2018. Т. 4, № 3. С. 84–94. DOI: [10.12737/szf-43201809](https://doi.org/10.12737/szf-43201809).