

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт динамики геосфер Российской академии наук

На правах рукописи

Беккер Сусанна Зейтуллаевна

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
НИЖНЕЙ НЕВОЗМУЩЕННОЙ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ,
ВЕРИФИЦИРОВАННЫЕ ПО ДАННЫМ
НАЗЕМНЫХ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Направление 03.06.01 – Физика и астрономия
Направленность 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физ.-мат. наук, Козлов С.И.

Москва – 2018

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. КРАТКИЙ ОБЗОР НАИБОЛЕЕ ИЗВЕСТНЫХ МОДЕЛЕЙ <i>D</i> -ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ.....	16
1.1. Международная справочная модель IRI (International Reference Ionosphere).....	18
1.2. Двухпараметрическая модель Уайта–Фергюсона.....	21
1.3. Модель SIMP (System of Ionospheric Monitoring and Prediction).....	21
1.4. Программный комплекс моделирования ионосферы и распространения радиоволн КВ и СДВ-ДВ диапазонов.....	22
1.5. Глобальные численные модели <i>D</i> -области ионосферы.....	24
Основные выводы к Главе 1.....	27
2. ЭМПИРИЧЕСКИ-СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ <i>D</i> -ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ.....	29
2.1. Банки данных электронной концентрации, объем и качество выборки.....	29
2.1.1. Каталог электронной концентрации.....	29
2.1.2. ГОСТ электронной концентрации.....	31
2.2. Анализ математических ожиданий и среднеквадратических отклонений N_e , полученных по эмпирически-статистическим моделям.....	32
2.2.1. Результаты расчетов $\mu(N_e)$ и $\sigma(N_e)$ по данным Каталога.....	32
2.2.2. Результаты расчетов $\mu(N_e)$ и $\sigma(N_e)$ по данным ГОСТ.....	34
2.2.3. Сопоставление математических ожиданий электронной концентрации по двум банкам данных.....	36
2.3. Законы распределения электронной концентрации, полученной из банков данных.....	38
2.3.1. Проверка распределений N_e на соответствие нормальному закону распределения.....	40
2.3.2. Проверка распределений N_e на соответствие логнормальному закону распределения.....	43
2.3.3. Генерация случайных величин N_e , подчиняющихся эмпирическому закону распределения.....	47
2.3.4. Сходимость плотности вероятности концентрации электронов, полученной по эмпирически-статистической модели.....	51
Основные выводы к Главе 2.....	53

3. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ <i>D</i> -ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ.....	54
3.1. Ионизационно-рекомбинационный цикл <i>D</i> -области ионосферы.....	54
3.2. Анализ чувствительности решений уравнений цикла к входным параметрам.....	57
3.3. Получение плотностей вероятности $[N_2]$, $[O_2]$, $[H_2O]$, $[CO_2]$, $[O_3]$, T по спутниковым данным.....	60
3.4. Источники ионизации ионосферы на высотах <i>D</i> -области ионосферы. Расчет скорости ионизации.....	66
3.4.1. Ионизация космическими лучами.....	66
3.4.2. Ионизация NO солнечным излучением в линии L_α ($\lambda = 121.6$ нм).....	67
3.4.3. Ионизация $O_2(^1\Delta_g)$ в диапазоне $\lambda = 102.7-111.8$ нм.....	70
3.4.4. Ионизация потоком высокоэнергичных частиц.....	71
3.4.5. Суммарная ионизация.....	71
3.5. Анализ результатов расчетов концентрации электронов по вероятностной плазмохимической модели.....	77
3.5.1. Сходимость плотности вероятности концентрации электронов, полученной по вероятностной плазмохимической модели.....	77
3.5.2. Сопоставление результатов расчетов $Ne(h)$, полученных по вероятностной плазмохимической модели и по банкам данных Ne	78
3.5.3. Сопоставление функций плотности вероятности $Ne(h)$, полученных по вероятностной плазмохимической модели и по банкам данных Ne	82
Основные выводы к Главе 3.....	87
4. ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ РАДИОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ ГФО МИХНЕВО.....	89
4.1. Зависимость амплитуды радиоволны от количества профилей Ne на трассе.....	90
4.2. Верификация моделей по разнице амплитуд радиоволн на разных частотах.....	91
4.2.1. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными на трассе RЖ-77 – Михнево.....	92
4.2.2. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными на трассе RЖ-63 – Михнево.....	99

4.2.3. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными на трассе RJH-90 – Михнево.....	102
4.3. Верификация моделей по суточному изменению амплитуды радиоволны.....	105
4.3.1. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными на трассе ДНО38 – Михнево.....	106
4.3.2. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными на трассе ТВВ – Михнево.....	109
4.3.3. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными на трассе NRК – Михнево.....	112
Основные выводы к Главе 4.....	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	115
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	117

ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера Земли традиционно делится на несколько областей: D ($50 \leq h < 90$), E ($90 \leq h < 120$), $F1$ ($120 \leq h < 200$) и $F2$ ($200 \leq h < 500$). Такое деление в первую очередь обусловлено различными источниками ионизации на разных высотах, существенно отличающимся составом (и, как следствие, протекающими физическими процессами) и высотным градиентом концентрации электронов. Каждый из ионосферных слоев отвечает за распространение радиоволн конкретного диапазона частот. Так, например, распространение радиоволн СДВ-ДВ (3–300 кГц) диапазона идет в волноводе Земля–ионосфера с отражением от D и E слоев. Для КВ радиоволн (2–30 МГц) ионосфера является каналом распространения, и, следовательно, здесь необходима модель ионосферы в полном объеме, включая $F2$ -область (Кринберг и Тащилин, 1984; Брюнелли и Намгаладзе, 1988; Нагорский и др., 1987).

Основными источниками энергии для атмосферных процессов являются ионизирующее излучение Солнца в УФ и рентгеновском диапазонах спектра, космические лучи и потоки энергичных частиц из магнитосферы. Поток излучения Солнца зависит от солнечной активности, которая меняется согласно приблизительно 11-летнему циклу и определяется количеством пятен на Солнце, количеством солнечных вспышек, их интенсивностью и т.д. Величина потока является одним из основных индикаторов солнечной активности и определяется радиоизлучением на длине волны 10.7 см (2800 МГц). Для ее описания введен индекс $F10.7$, который соответствует потоку излучения на длине волны 10.7 см в единицах $[10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}]$. Солнечная активность является причиной возникновения магнитных бурь и суббурь, для описания и классификации которых используются индексы магнитной активности. Наиболее часто используемый из них – планетарный индекс Kp . Невозмущенная ионосфера характеризуется стандартной динамикой в течение 11-летнего цикла солнечной активности, отсутствием солнечных вспышек и низкими значениями магнитной активности

($Kp < 3$) (изложенные выше соображения являются общеизвестными (Брюнелли и Намгаладзе, 1988; Деминов и др., 2011; Pfaff, 2012; Тертышников и др., 2013)).

Несмотря на то, что к настоящему моменту накоплен большой объем теоретических оценок и экспериментальных данных о протекающих в ионосферной плазме процессах и о пространственном распределении концентраций ее составляющих, точность предсказания поведения параметров ионосферы, в том числе невозмущенной, в подавляющем большинстве гелиогеофизических условий мала (Ferguson, 1995; Bilitza, 2002; Крашенинников и др., 2008; Курикша и Липкин, 2013; Basak, 2013; Verronen et al., 2016; Аксенов и др., 2017; Ляхов и др., 2019).

Ионосферу по доминирующим физическим процессам можно условно разбить на полярную ($|\varphi| \geq 60^\circ$), среднеширотную ($30^\circ \leq |\varphi| \leq 60^\circ$) и экваториальную ($|\varphi| \leq 30^\circ$), где φ – геомагнитная широта. По охватываемой площади, частоте возникновения, амплитудам и продолжительности, наибольшие возмущения возникают в полярной ионосфере. Поэтому разработка моделей этой части ионосферы представляется весьма сложной. Среднеширотная ионосфера также подвержена воздействиям как регулярного (суточный, сезонный ход), так и спорадического характера, структуру которых зачастую сложно описать и интерпретировать за счет большого количества гелиогеофизических факторов, влияющих на среду (Козлов и др., 2014; Деминов, 2015; Криволицкий, 2015б; Иванов-Холодный и Михайлов, 1980). Более того, еще до конца не изучены механизмы переноса возмущений из полярных широт в средние (например, перенос окиси азота). По этим причинам до сих пор остаётся множество вопросов при моделировании ионосферы, в том числе средних широт.

Наименее изученной до сих пор остается нижняя часть ионосферы ($h < 100$ км). Трудности исследования области D обусловлены не только сложностью определения на этих высотах параметров ионосферы, в первую очередь, концентрации электронов, но и большим количеством протекающих в ней фотохимических процессов. С прикладной точки зрения, исследование D -области ионосферы в первую очередь определяется существенным влиянием на

устойчивость радиосвязи в СДВ (3–30 кГц) и ДВ (30–300 кГц) диапазонах (Wait and Spies, 1964; Брюнелли и Намгаладзе, 1988; Hargreaves, 1995; Schunk and Nagy, 2009; Han et al., 2011; Боев и др., 2013; Кулямин и Дымников, 2014; Bekker et al., 2014; Ponomarchuk, 2015; Ткачев, 2017).

Из вышесказанного следует, что изучение и моделирование невозмущенной среднеширотной *D*-области ионосферы крайне актуально, поэтому она была выбрана предметом данного исследования.

Все модели ионосферы, как известно, можно разбить на исследовательские и прикладные. Первые из них являются в основном теоретическими и весьма сложными, включают большое количество физико-химических и динамических процессов, охватывают широкий диапазон высот вплоть до магнитосферных. На таких моделях либо уточняют существующие представления о среде, либо выявляют какие-то новые механизмы, влияющие на ионосферу в рамках солнечно-земных связей («сверху–вниз») или литосферно-атмосферно-ионосферных взаимодействий («снизу–вверх») (Козлов и др., 2014).

Результаты многолетнего непрерывного мониторинга радиофизических характеристик сигналов СДВ диапазона (см., например, (Егошин и др., 2012; Гаврилов и др., 2016; geospheres-dynamics.com/data.html)) свидетельствуют о существовании значительных вариаций амплитуды и фазы радиоволны даже в спокойных гелиогеофизических условиях (более подробно см. п. 4.2). Исходя из современного понимания физики распространения радиоволн, можно сделать вывод, что наблюдаемые вариации амплитудно-фазовых характеристик связаны с непрерывным изменением ионосферных параметров.

Существующий широко используемый детерминированный подход к описанию ионосферных слоев (см. главу 1) не позволяет описывать нерегулярность и непрерывную изменчивость параметров ионосферы (в частности, *D*-области), поэтому подобная среда может быть корректно описана только вероятностно-статистическими моделями (Lyakhov et al., 2013; Беккер и др., 2013; Козлов и др., 2014; Ляхов и др., 2016; Беккер и др., 2018). Впервые этот подход обсуждался в

1978 году (Козлов и др., 1978), но в дальнейшем исследования не получили достаточного развития.

Диссертация посвящена разработке нового вероятностного подхода к описанию непрерывно изменяющейся среды, представленного в практической реализации эмпирически-статистическими и вероятностной плазмохимической моделями невозмущенной среднеширотной D -области ионосферы. Разрабатываемый метод моделирования базируется на общепринятых фундаментальных принципах, при этом из анализа отечественной и зарубежной литературы можно сделать вывод, что он до сих пор не был использован ни в одной модели D -области ионосферы.

Вероятностно-статистические модели позволяют получать плотности вероятности ионосферных параметров (в том числе, электронной концентрации) в различных гелиогеофизических условиях. Полученные плотности вероятности используются при расчете плотностей вероятности амплитуды и фазы волны на выбранных трассах и частотах в различных условиях солнечной и магнитной активности, на разных широтах, в различные сезоны и времена суток. В рамках диссертации разработаны два типа вероятностных моделей: эмпирически-статистические, создаваемые на основании статистического анализа экспериментальных данных электронной концентрации, и вероятностные плазмохимические, в основу которых положены уравнения плазмохимии, в которых варьируются входные параметры.

В настоящем исследовании критерием адекватности разрабатываемых моделей является верификация по радиофизическим данным. В отличие от общепринятых метрик верификации, основанных на сравнении моделей с точно измеренными профилями электронной концентрации, данный подход обеспечивает достоверность модели во всем выбранном диапазоне высот и широт. Объем радиофизических данных на много порядков превышает объем измерений концентрации электронов в D -области, что также улучшает качество верификации. Построенные модели были верифицированы на 6 среднеширотных СДВ трассах по

данным наземных радиофизических измерений, выполненных в геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» (см. главу 4).

Цель настоящей работы – построение вероятностно-статистических моделей невозмущенной среднеширотной D -области ионосферы и оценка их возможностей для прогноза распространения СДВ радиоволн на средних широтах.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проведена статистическая обработка экспериментальных спутниковых данных нейтральных составляющих мезосферы и трех экспериментальных банков данных электронной концентрации на высотах D -области в различных гелиогеофизических условиях.
2. Разработана вероятностная модель среднеширотной D -области ионосферы, основанная на эмпирических законах распределения электронной концентрации, полученных на основании упомянутых банков данных.
3. Разработана вероятностная плазмохимическая модель D -области ионосферы с использованием эмпирических функций распределения свободных параметров.
4. В численном эксперименте исследована и показана сходимость ряда функций плотности вероятности заряженных компонент D -области ионосферы и функций плотности вероятности амплитуды СДВ радиоволны на выбранных среднеширотных трассах.
5. Проведена статистическая обработка экспериментальных данных наземных радиофизических измерений, полученных в ГФО Михнево в различных гелиогеофизических условиях. По ним проведена верификация полученных результатов вероятностно-статистических моделей на 6 среднеширотных СДВ трассах.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Разработан принципиально новый вероятностно-статистический подход к моделированию такой нерегулярной, непрерывно изменяющейся среды как ионосфера. Вероятностный подход позволяет описывать изменчивое поведение исследуемой среды функциями плотности вероятности

ионосферных параметров, по которым рассчитываются плотности вероятности амплитуды радиоволны на заданных трассах в различных гелиогеофизических условиях.

- Функции плотности вероятности позволяют получить наиболее вероятную картину геофизической и радиофизической обстановки на трассе и дают практическую информацию разработчикам радиотехнических систем указанного диапазона о наиболее и наименее благоприятных условиях для передачи сигнала. Эти сведения не могут быть получены из детерминированных моделей, независимо от того, на каких принципах и на основании какого объема данных они строятся и как часто корректируются.
- Разработаны принципы ассимиляции не асиноптических спутниковых измерений, а их функций плотности вероятности для получения актуальных функций распределения концентрации электронов.
- Впервые проведен комплексный анализ функций распределения ионосферных параметров на основании многолетних спутниковых измерений нейтральной атмосферы. Показано, что в общем случае функции распределения параметров ионосферы не подчиняются нормальному закону распределения, а их наиболее вероятные величины отличны от медианных значений.

Основное **фундаментальное значение** работы заключается в отказе от детерминированного описания непрерывно изменяющейся среды. Вероятностно-статистический подход позволяет исследовать среду с точки зрения наиболее вероятных значений ее параметров, а не медианных величин. Кроме того, с помощью вероятностно-статистических моделей можно исследовать и уточнять механизмы, влияющие на концентрацию электронов, и оптимизировать используемые схемы ионизационно-рекомбинационного цикла.

Практическая значимость работы заключается:

- в повышении точности прогноза распространения радиоволн СДВ-ДВ диапазона, так как разработанный подход позволяет вычислять наиболее

вероятные величины радиофизических параметров, а не их медианные значения;

- в получении из функций плотности вероятности радиофизических параметров информации о наиболее и наименее благоприятных условиях для передачи сигнала, которая может быть использована для оптимизации режимов работы систем.

Методы исследования

В рамках работы использованы методы статистической обработки экспериментальных банков данных электронной концентрации, спутниковых данных нейтральных компонент нижней ионосферы и экспериментальных данных радиофизических измерений в СДВ диапазоне. Для получения значений концентрации заряженных компонент D -области ионосферы использованы численные методы решения систем дифференциальных уравнений. Расчет распространения СДВ-ДВ волн производится методом параболического уравнения. При генерации значений в соответствии с эмпирическими законами распределения ионосферных параметров применяется метод Монте-Карло. При оценке сходимости рядов функций плотности вероятности электронной концентрации и амплитуды волны, а также при сопоставлении теоретически полученных плотностей вероятности амплитуды радиоволны с экспериментальными данными, полученными в ГФО Михнево, использованы методы теории вероятности и математической статистики.

Защищаемые положения

- Разработаны эмпирически-статистическая и вероятностная плазмохимическая модели среднеширотной D -области ионосферы, описывающие ее нерегулярность и непрерывную изменчивость.
- Разработаны принципы ассимиляции данных спутниковых измерений на высотах D -области в рамках вероятностной плазмохимической модели.
- Показано, что ионосферные параметры D -области в общем случае не подчиняются нормальному закону распределения.

- Проведена верификация построенных вероятностно-статистических моделей D -области ионосферы по независимым данным наземных радиофизических измерений.
- Верификация моделей подтвердила их работоспособность в расчетах вероятностных радиофизических характеристик на среднеширотных СДВ-трассах.

Важнейшие результаты

- Разработана методика вероятностно-статистического моделирования D -области ионосферы для расчета вероятностных полей ионосферных параметров на среднеширотных трассах в спокойных условиях. Учет естественных и искусственных возмущений может быть осуществлен соответствующей модификацией уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла.
- Анализ функций плотности вероятности радиофизических параметров позволяет получить информацию о влиянии геофизических параметров на условия передачи информации по СДВ радиоканалам.
- Вероятностно-статистический подход позволяет восстановить состояние ионосферных параметров по радиофизическим измерениям распространения СДВ.
- На основании разработанных методик вероятностно-статистического моделирования возможно создание глобальной ассимиляционной вероятностной ионосферной модели, которая может быть использована, в частности, для оперативной коррекции радиолокационных данных.

Достоверность полученных результатов обеспечивается большим объемом используемых экспериментальных спутниковых данных, полученных с использованием современных апробированных методик измерений и обработки данных, тщательным анализом имеющихся опубликованных материалов и верификацией результатов по независимо полученным данным экспериментальных радиофизических измерений.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в постановке конкретных задач исследования, поиске и статистической обработке экспериментальных банков данных ионосферных параметров, разработке алгоритмов вероятностного моделирования, статистической обработке экспериментальных данных наземных радиофизических измерений в ГФО Михнево, проведении расчетов и анализе получаемых результатов, обзоре литературы по тематике исследования.

Апробация работы

Основные результаты диссертационного исследования были доложены лично автором на 2 семинарах, 3 международных и 12 всероссийских конференциях: семинаре ИПГ Росгидромета «Моделирование ионосферы Земли» (г. Москва, 2014 г.), семинаре ИДГ РАН «Динамические процессы в геосферах» (г. Москва, 2017 г.), Международной научной ассамблее «COSPAR 2014» (г. Москва, 2014 г.), Международном симпозиуме COSPAR «Small Satellites for Space Research» (Республика Корея, 2017 г.), Международной Байкальской школе по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде» (г. Иркутск, 2017 г.), конференциях ИКИ «Физика плазмы в солнечной системе» (г. Москва, 2016 г., 2018 г.), Всероссийской научной конференции Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.), Всероссийских научно-технических конференциях РТИ «Минцевские чтения» (г. Москва, 2016, 2017 гг.), Всероссийской научной конференции ИДГ РАН «Триггерные эффекты в геосистемах» (г. Москва, 2017 г.), Всероссийских научно-практических конференциях «Актуальные проблемы защиты и безопасности» (г. Санкт-Петербург, 2014, 2016 гг.), Всероссийских научных конференциях МФТИ «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики» (г. Москва, 2013, 2014, 2015, 2016 гг.).

По теме диссертации автором опубликовано 32 научные работы, в том числе 6 статей в рецензируемых журналах (входящих в перечень ВАК), 26 статей и тезисов работ в научных сборниках и трудах конференций.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 119 наименований. Общий объем диссертации – 129 страниц, включая 59 рисунков и 32 таблицы.

В первой главе проведен анализ наиболее известных и широко используемых во всем мире моделей *D*-области ионосферы, обсуждаются их преимущества и недостатки. Приведены результаты сопоставления расчетов по модели IRI с экспериментальными данными распространения радиоволн СДВ диапазона.

Вторая глава посвящена разработке эмпирически-статистических моделей невозмущенной среднеширотной *D*-области ионосферы. Приведены результаты статистической обработки банков данных в различных гелиогеофизических условиях. Проведен сравнительный анализ полученных функций плотности вероятности электронной концентрации.

Третья глава посвящена разработке вероятностной плазмохимической модели, в основу которой положена 5-компонентная система дифференциальных уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла *D*-области ионосферы. Проведена статистическая обработка спутниковых данных, определены основные источники ионизации, проанализированы полученные функции плотности вероятности электронной концентрации и сопоставлены с результатами эмпирически-статистических моделей.

В последней, четвертой, главе описаны используемые для верификации экспериментальные данные наземных радиофизических измерений и представлены результаты верификации построенных моделей на 6 среднеширотных СДВ трассах.

Основные выводы сформулированы в конце каждой главы и в заключении диссертации.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н. С.И. Козлову за основную идею и постоянное внимание к работе; к.т.н. Ляхову А.Н. за помощь в работе и ценные указания при проведении исследований; к.ф.-м.н. Покладу Ю.В. и к.ф.-м.н. Ряховскому И.А. за предоставленные экспериментальные данные и помощь в их обработке; д.ф.-м.н. Зецеру Ю.И., д.ф.-

м.н. Гаврилову Б.Г. и к.ф.-м.н. Корсунской Ю.А. за внимание к работе, обсуждение результатов, ценные рекомендации и замечания.

1. КРАТКИЙ ОБЗОР НАИБОЛЕЕ ИЗВЕСТНЫХ МОДЕЛЕЙ *D*-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

Базируясь на общих соображениях и учитывая, что *D*-область играет важную роль в распространении радиоволн (прежде всего СДВ-ДВ диапазона) (Брюнелли и Намгаладзе, 1988; Hargreaves, 1995; Schunk and Nagy, 2009; Боев и др., 2013; Кулямин и Дымников, 2014; Bekker et al., 2014; Ponomarchuk, 2015; Ткачев, 2017; Аксенов и др., 2017; Козлов и др., 2018), модели нижней ионосферы можно классифицировать по следующим признакам:

- по методам построения – теоретические, эмпирические, полуэмпирические;
- по физической сущности – детерминированные, динамические, вероятностные;
- по форме представления – табличные, графические, аналитические;
- по географическому признаку – глобальные, региональные, экваториальные, среднеширотные, полярные;
- по времени суток – день, ночь, переходное время в результате движения терминатора;
- по сезонам – зима, лето, равноденствие;
- по ионосферным параметрам, определяемым моделью – электронная концентрация и ее градиенты по высоте, широте и долготе; частота столкновения электронов с нейтралами; температуры нейтралов;
- по степени возмущенности ионосферы в зависимости от широты, солнечной и магнитной активности.

Согласно минимальному перечню требований (Козлов и др., 2018) модели *D*-области ионосферы в интересах расчета распространения СДВ-ДВ должны:

1. охватывать диапазон высот вплоть до ~ 90 км;
2. определять высотное распределение электронной концентрации и эффективной частоты соударений;
3. описывать поведение среды во всем широтном диапазоне;

4. учитывать очевидное свойство ионосферы – она является нерегулярной, непрерывно изменяющейся средой;
5. пройти верификацию по экспериментальным радиофизическим данным.

Сразу отметим, что получение экспериментальных данных параметров D -области ионосферы (концентрация электронов, концентрации нейтралов, плотность атмосферы, температура нейтралов) в зависимости от высоты до сих пор затруднено, и оно возможно весьма ограниченными средствами – установками частичного отражения и некогерентного рассеяния, геофизическими ракетами и по данным распространения СДВ–ДВ. Кроме того, точность измерения этих параметров не очень велика. Поэтому зачастую результаты даже широко известных эмпирических моделей оказываются противоречивы.

Теоретические исследования D -области интенсивно начались в 50-х годах прошлого столетия. Их можно условно разделить на два этапа. На первом из них (примерно до 1967 – 1969 гг.) исследования строились на основании достаточно простых представлений о поведении области D : ионизация атмосферы солнечным излучением и космическими лучами, образование отрицательного иона O_2^- в результате прилипания электрона к O_2 , уничтожение электронов из-за диссоциативной рекомбинации на ионах O_2^- , N_2^- , NO^+ , фотоотлипание электронов от O_2^- , ион-ионная рекомбинация (Николе, 1964; Данилов, 1967; Уиттен и Поппов, 1968; Иванов-Холодный и Никольский, 1969). Система уравнений непрерывности для расчета концентрации электронов N_e имела вид:

$$\frac{dN_e}{dt} = q - \alpha_d N_e N^+ - \beta \cdot N_e + I \cdot N^-; \quad (1.1)$$

$$\frac{dN^+}{dt} = q - \alpha_d N_e N^+ - \alpha_i N^+ N^-; \quad (1.2)$$

$$\frac{dN^-}{dt} = \beta \cdot N_e - \alpha_i N^+ N^- - I \cdot N^-, \quad (1.3)$$

где q – скорость ионизации, α_d – константа скорости диссоциативной рекомбинации, β – константа скорости прилипания электронов в тройных соударениях к O_2 , I – скорость фотоотлипания электрона от O_2^- , α_i – коэффициент ион-ионной рекомбинации.

Второй этап теоретических исследований характеризуется двумя наиболее важными моментами (Данилов и Власов, 1973; Blank et al., 1974; Данилов и Симонов, 1975; Anderson, 1976; Митра, 1977; Уиттен и Поппов, 1977; Мак-Ивен, 1978; Смирнов, 1978; Вирин и др., 1979; Месси, 1979; Offermann, 1979; Baulch et al., 1980; Елецкий и Смирнов, 1982). Во-первых, с помощью масспектрометров в ракетных экспериментах было надежно установлено, что на высотах $h \leq 80-90$ км преобладают сложные кластерные положительные и отрицательные ионы, а не первичные. Во-вторых, в связи с этим пришло понимание, что большую роль в кинетике электронов играют малые нейтральные и возбужденные компоненты атмосферы. Данные обстоятельства привели к отказу от уравнений (1.1) – (1.3) и необходимости рассмотрения ионизационно-рекомбинационного цикла с учетом большего количества заряженных частиц и малых нейтральных составляющих, заметно изменяющихся в различных гелиогеофизических условиях, особенно в возмущенных (Козлов, 1984). Были разработаны модели *D*-области, в которых учитывается различное количество заряженных и малых нейтральных компонент (Haug and Landmark, 1970; Егошин и др., 2012; Кудрявцев и Романюха, 1995). Расчеты показывают, что наращивание уравнений непрерывности, например, для невозмущенной ионосферы, не значительно улучшает конечные результаты.

Ниже приведен краткий анализ наиболее известных моделей нижней ионосферы.

1.1.Международная справочная модель IRI (International Reference Ionosphere)

На данный момент наиболее известной и широко используемой во всем мире для решения и прикладных и фундаментальных задач является международная справочная модель ионосферы IRI (Raver et al., 1978; Bilitza, 2002; Bilitza, 2017). Модель IRI включает в себя глобальные эмпирические детерминированные модели, построенные на основании обработки большого объема экспериментальных данных, полученных различными радиофизическими

методами, а также прямыми измерениями параметров ионосферы с помощью геофизических ракет и ИСЗ. Эта модель регулярно уточняется и, как заявлено авторами, работоспособна в условиях солнечных и магнитных возмущений и является прогностической (версия IRI–2016). Поскольку большая часть данных ионосферы накоплена на Европейских и североамериканских широтах, ионосфера этих регионов лучше прогнозируется моделями IRI. Наиболее изменчивый полярный регион описывается недостаточно точно, так как здесь модель опирается на результаты всего нескольких наземных станций и спутников (ANSI/AIAA G-034-1998).

Эта модель – простой в использовании и требующий небольшого количества входных данных инструмент, позволяющий решать задачи распространения радиоволн широкого диапазона частот. Однако в некоторых гелиогеофизических условиях у обсуждаемой модели наблюдается явное расхождение с экспериментальными данными, что говорит о ее непригодности в решении практических задач, например, для оперативной коррекции радиолокационных измерений.

По моделям IRI можно сделать следующие выводы:

1. В ряде условий модели IRI достаточно корректно описывают ионосферные слои, что подтвердила верификация по экспериментальным радиофизическим данным.
2. В некоторых гелиогеофизических условиях модели дают противоречивые результаты. Например, модель может оказаться пригодна только в средних широтах, а в полярных районах – неэффективна.
3. Полное электронное содержание успешно корректируется с помощью управляющего параметра ($F10.7$ или W).
4. Авторы модели IRI-2016 считают, что она более или менее соответствует реальному состоянию среды и в спокойных условиях, и в условиях возмущений. Однако сопоставление результатов IRI с измерениями N_e на спутнике DE-2 это не подтвердило (Беккер и Ляхов, 2016; Ляхов и др., 2018; Ляхов и др., 2019).

На данный момент верификация результатов моделей на высотах D -области возможна в основном по данным распространения СДВ-ДВ, так как прямое измерение электронной концентрации на этих высотах затруднено. Поэтому на рисунке 1.1а представлен экспериментальный суточный ход амплитуды радиоволны на частоте 23.4 кГц на среднеширотной трассе DHO38 (53° с.ш., 8° в.д.) – Михнево (55° с.ш., 38° в.д.) и три расчетных кривых, полученных по моделям IRI (IRI, Friedrich (FR), Данилова-Смирновой (DS)). По сути, эти модели являются различными аппроксимациями одних и тех экспериментальных данных. На рисунке 1.1б представлен экспериментальный сезонный ход амплитуды СДВ сигнала на частоте 26.7 кГц на трассе ТВВ (37° с.ш., 27° в.д.) – Михнево и результаты тех же трех моделей, входящих в состав IRI (Козлов и др., 2014).

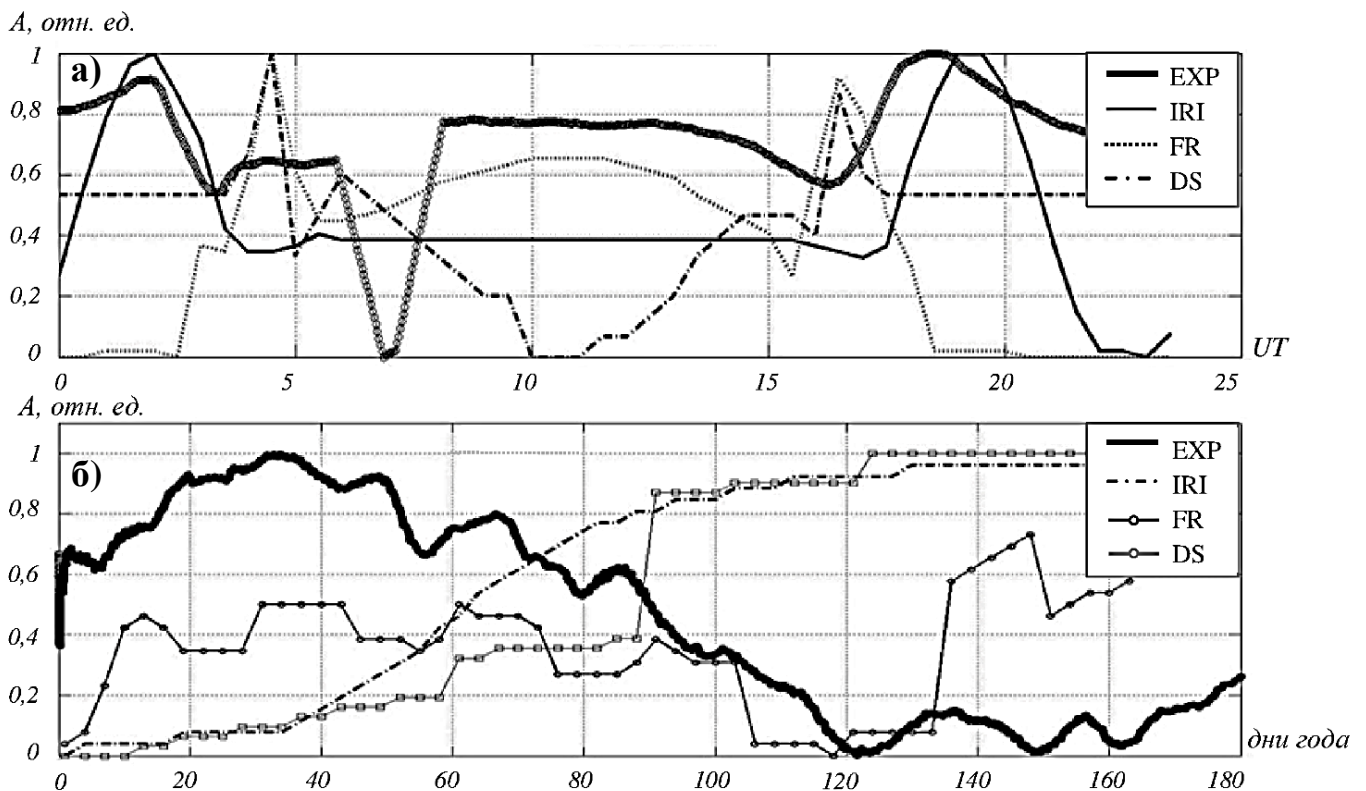


Рисунок 1.1 – Экспериментальные и теоретические (полученные по моделям IRI) значения амплитуды в относительных единицах на частотах 23.4 кГц (DHO38) (а) и 26.7 кГц (ТВВ) (б)

Как видно из рисунка 1.1, имеется существенное расхождение между результатами моделей и экспериментальными измерениями.

По результатам сопоставления расчетов с экспериментальными данными можно сделать вывод о том, что модели IRI пригодны для интерпретации

экспериментальных данных и прогноза функционирования радиотехнических систем не во всех гелиогеофизических условиях (Ляхов и др., 2019).

1.2. Двухпараметрическая модель Уайта–Фергюсона

В 1964 году Уайтом было предложено аппроксимировать электронную концентрацию двухпараметрическим экспоненциальным профилем (Wait and Spies, 1964). Согласно Уайту электронная концентрация на высотах D -области рассчитывается по формуле:

$$N_e(h) = 1.43 \cdot 10^{13} \exp(-0.15h') \exp[(\beta - 0.15)(h - h')], \quad (1.4)$$

где параметр β [км^{-1}] отвечает за наклон профиля в логарифмической шкале, а параметр h' [км] за его высоту (Cummer, 1997; Cummer et al., 1998; Basak, 2013). Стандартная среднеширотная невозмущенная дневная ионосфера описывается значениями $\beta = 0.3 \text{ км}^{-1}$ и $h' = 74 \text{ км}$.

Эта эмпирическая модель неплохо согласуется с экспериментальными профилями электронной концентрации (Sechrist, 1974) и прошла верификацию по данными распространения СДВ–ДВ радиоволн в диапазоне частот $f = 9.3 - 60 \text{ кГц}$ (Ferguson, 1995). Для сопоставления расчетов модели с экспериментальными данными мощность сигнала вычислялась на расстоянии от 0 до 4000 км от передатчика с шагом в 500 км. Было получено, что в среднем абсолютная разница между экспериментальными и расчетными значениями амплитуды в дневные часы лежит в пределах 6 дБ, т.е. величины отличаются в 2 раза.

1.3. Модель SIMP (System of Ionospheric Monitoring and Prediction)

Совместная модель институтов ИЗМИРАН и ИПГ является эмпирической детерминированной и предложена авторами в качестве нового ГОСТ распределения электронной концентрации в ионосфере (Лапшин и др., 2016). Как отмечают сами авторы, она не распространяется на условия высокой магнитной

активности и не учитывает спорадический слой *Es*. Прикладное использование модели ограничено в основном КВ диапазоном.

При построении модели *D*-области были использованы базовая модель IRI (Bilitza, 1981; Bilitza, 1998), эмпирическая модель Данилова, Родевич и Смирновой (Danilov et al., 1991; Danilov et al., 1995) и полуэмпирическая модель нижней ионосферы FIRI (McKinnell, 2007). Модель дает значения электронной концентрации выше 65 км для заданной точки, зенитного угла, уровня солнечной активности. Концентрация электронов определяется комбинацией экспоненциальной функции и полинома третьей степени. Для получения значения *N_e* на высоте *h* эмпирически подбираются коэффициенты функций в зависимости от времени суток.

Модель в целом не верифицирована по радиофизическим экспериментальным данным, но при этом она является единственной отечественной альтернативой модели IRI.

1.4. Программный комплекс моделирования ионосферы и распространения радиоволн КВ и СДВ-ДВ диапазонов

С 2008 по 2015 год совместными усилиями ИСЗФ СО РАН и ИДГ РАН разрабатывался программный комплекс моделирования ионосферы и распространения радиоволн КВ и СДВ-ДВ диапазона для всего разнообразия геомагнитной и солнечной активности (Пономарчук и др., 2016).

Комплекс включает в себя несколько блоков (Беккер, 2017):

1. Блок моделирования ионосферы и плазмосферы на высотах более 100 км.

Блок представляет собой детерминированную полуэмпирическую модель, в которой численно решаются уравнения динамики плазмы.

В целом, для полуэмпирических моделей ионосферы, в этом блоке достигнуты вполне удовлетворительные результаты, подтвержденные как физическим, так и радиофизическим тестированием. Расчеты затухания КВ радиоволн в условиях солнечных вспышек оказались в полном согласии с

экспериментальными данными наклонного зондирования в диапазоне частот 2-30 МГц.

Среди недостатков блока стоит отметить техническую сложность эксплуатации программного комплекса, большие затраты машинного времени, отсутствие верификации по спутниковым данным, и то, что модель применима исключительно в невозмущенных условиях.

2. Блок моделирования авроральной ионосферы на высотах E -слоя (90-150 км).

Этот блок является 38-компонентной плазмохимической моделью (учитывающей процессы ионизации УФ излучением, высыпавшимися электронами и протонами).

Результаты расчетов верифицировались по измерениям вертикального профиля электронной концентрации (на радарх некогерентного рассеяния, по измерениям оптических эмиссий (в видимом и ИК диапазоне), по наклонному зондированию ионосферы в условиях сильных геомагнитных возмущений), в итоге была достигнута точность ~ 5 –20%.

Минусом этого блока также являются большие затраты машинного времени и отсутствие учета динамики плазмы.

3. Блок моделирования D -области ионосферы (40-100 км).

Этот блок представляет собой 22-компонентную плазмохимическую модель. Главное его достоинство – явный корректный учет ионизации рентгеновским излучением во время солнечных вспышек (Стрелков, 2012; Корсунская и Стрелков, 2013; Стрелков, 2014; Корсунская, 2015).

Верификация выполнялась радиофизическими методами путем сопоставления результатов расчетов с данными наблюдения за сигналами СДВ-ДВ передатчиков. Сопоставление с данными наблюдений амплитуд СДВ передатчиков дало качественно правильный отклик на трассах разной ориентации и протяженности в условиях вспышек разных классов.

Стоит отметить, что модель ионосферы ИСЗФ-ИДГ одна из немногих прошла интенсивную верификацию на радиофизических данных (КВ диапазона).

1.5. Глобальные численные модели *D*-области ионосферы

К настоящему моменту большую популярность обрели глобальные численные трехмерные модели, описывающие взаимодействие нейтральных и заряженных составляющих и их перенос в атмосфере. Эти модели отличаются количеством учитываемых атмосферных компонент и процессов, некоторые из них включают в рассмотрение сотни фотохимических реакций.

Модель CHARM-I (Chemical Atmospheric Research Model with Ions) (Криволуцкий и др., 2015б) является развитием трехмерной глобальной фотохимической модели нейтральных составляющих CHARM (Криволуцкий и др., 2015а) и описывает достаточно полное взаимодействие ионных и нейтральных составляющих от поверхности Земли до высоты 90 км. В модели учтены 245 химических реакций и 48 реакций фотодиссоциации и ионизации. Ионизация обусловлена солнечным УФ излучением в линии Лайма-альфа, галактическими космическими лучам и энергичными частицам в периоды вспышек на Солнце. Выходными данными модели являются глобальные распределения концентраций нейтральных составляющих, электронов, положительных и отрицательных ионов, участвующих в ионно-молекулярных реакциях, реакциях ионизации, фотоотлипания и реакциях фотодиссоциации в интервале высот 0–90 км. Несмотря на внушительное количество учитываемых в модели компонент, авторы отмечают необходимость ее расширения.

Одной из наиболее известных моделей *D*-области ионосферы считается фотохимическая модель геофизической обсерватории Соданкюля SIC (Sodankyla Ion Chemistry) (Burns et al., 1991), включающая в описание 36 положительных, 19 отрицательных ионов и 146 химических реакций. Первая версия модели (Turunen et al., 1992; Turunen et al., 1996) была разработана для спокойных условий и рассматривала ионизацию N_2 , O_2 , O , NO , $O_2(^1\Delta_g)$ космическими лучами и в диапазоне длин волн 5 – 134 нм. Позже модель SIC была расширена, и сейчас учитывает солнечные протонные события. Нейтральная атмосфера описывается полуэмпирической моделью MSIS-90 (Hedin, 1991), входными данными которой

являются координаты, время, уровень солнечной и магнитной активности. Полученные нейтральные составляющие используются для расчета скорости ионообразования и скорости химических реакций. В качестве минусов модели можно отметить неточность в задании констант скоростей реакции, неучет эффектов, вызванных прохождением терминатора и неучет рассеянного излучения при моделировании ночной ионосферы (ANSI/AIAA G-034-1998).

В 2014 году представлена глобальная трехмерная модель общей циркуляции тропосферы-стратосферы-мезосферы, являющаяся частью реализации программы создания модели всей ионосферы (Кулямин и Дымников, 2014; Кулямин и Дымников, 2015). Основными задачами работы является исследование формирования аномалий тропосферной циркуляции и их связь с характеристиками средней и верхней атмосферы, и, в целом, моделирование «климата» ионосферы. Авторами отмечено, что исследование *D*-области ионосферы определяется существенным влиянием на характеристики распространения радиоволн, однако в их работе отсутствует верификация полученных результатов (в том числе по радиофизическим измерениям). Моделирование *D*-области в рамках этой модели проведено с использованием простой 5-компонентной схемы.

Наиболее развитой на сегодня является глобальная трехмерная климатическая модель верхней атмосферы Земли WACCM (Whole Atmosphere Community Climate Model) (Verronen et al., 2016), она разрабатывается в Национальном центре атмосферных исследований США (NCAR). Модель охватывает диапазон высот от поверхности Земли до 140 км. WACCM является усовершенствованным расширенным вариантом предыдущей версии модели, учитывающей химию, радиацию и динамику среды (Neale et al., 2012). WACCM представляет из себя подробную нейтральную химическую модель атмосферы, учитывающую ионизацию в ультрафиолетовом диапазоне, мягким рентгеновским излучением, энергичными частицами на полярных широтах.

WACCM-D – вариант климатической модели, который рассматривает фотохимию *D*-области. Основная цель этой модели – воспроизведение

ионосферных эффектов, вызванных высокоэнергичными частицами в области полярных широт.

В литературе отсутствует информация о верификации моделей WACCM и WACCM-D по радиофизическим данным. На разных этапах приводятся лишь результаты сопоставления с другими модельными расчетами, в том числе с моделью SIC, что естественно не гарантирует достоверности получаемых результатов.

Явным преимуществом некоторых из описанных климатических моделей является учет большого количества фотохимических реакций, однако высокая точность требует заметно больших затрат машинного времени, а потому их нецелесообразно использовать для решения прикладных задач.

Основные выводы к Главе 1

На основании представленного обзора наиболее известных моделей нижней ионосферы можно сделать следующие выводы:

- Существуют две большие группы моделей D -области ионосферы: эмпирические, которые основаны на больших рядах экспериментальных данных, и теоретические, которые моделируют процессы возникновения, потери, переноса заряженных частиц в ионосфере для получения концентрации электронов.
- Теоретические модели учитывают большее количество физических процессов, протекающих в плазме, и могут быть использованы для решения задач, где необходимо в том числе исследовать солнечные и магнитные возмущения, высыпания электронов и протонов и др. При этом, как правило, такие модели требуют значительных компьютерных мощностей и не предназначены для использования другими исследователями, не принимавшими участие в разработке программ.
- Эмпирические модели представляют собой более простой инструмент. Такие модели обладают быстроедействием, однако могут не учитывать важные физические механизмы, влияющие на поведение электронной концентрации в ионосфере. Ограниченный объем экспериментальных данных в условиях естественных и искусственных возмущений не позволяет смоделировать среду достаточно корректно.
- Все модели, и особенно прикладные, целесообразно верифицировать по данным радиофизических измерений. Принципиальным недостатком большинства представленных моделей является отсутствие подобной верификации.
- Каждая из описанных моделей обладает своими преимуществами при решении задач тех типов, для которых она первоначально предназначена. Однако стоит отметить, что все они являются детерминированными, а

значит, не учитывают непрерывную изменчивость параметров ионосферы, в том числе и D -области.

2. ЭМПИРИЧЕСКИ-СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ *D*-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

В основу эмпирически-статистических моделей кладется статистическая обработка экспериментальных данных электронной концентрации с учетом солнечной активности и времени суток, в результате чего оцениваются плотности вероятности $P(N_e)$ на различных высотах. Для построения эмпирически-статистических моделей независимо использовались два банка данных электронной концентрации: «Каталог профилей электронной концентрации области *D* ионосферы» (Нестерова и Гинзбург, 1985) (далее «Каталог») и «Модель глобального распределения концентрации и эффективной частоты соударения электронов для прогнозирования низкочастотных радиополей» (ГОСТ Р–25645.157–94, 1994) (далее «ГОСТ»). В ходе исследования банки данных были сопоставлены по нескольким критериям. В их числе – объем и качество выборки.

Помимо описанных выше банков данных был рассмотрен «Каталог профилей электронной концентрации *D*-области ионосферы средних широт. Разработка принципов построения эмпирической модели» (Беликович и др., 1983). Как оказалось, данный банк строится почти по тем же экспериментальным данным, что и Каталог, при этом он описывает только дневную ионосферу. Поэтому строить на его основе отдельную эмпирическую-статистическую модель не имеет смысла.

2.1. Банки данных электронной концентрации, объем и качество выборки

2.1.1. Каталог электронной концентрации

В Каталоге собрано более 900 опубликованных в литературе профилей электронной концентрации нижней ионосферы, полученных на ракетах, методами частичных отражений, по данным распространения СДВ–ДВ радиоволн и др.

К сожалению, данные из Каталога имеют «рваный» характер. При некоторых гелиогеофизических условиях профили отсутствуют. Стоит отметить, что эти пропуски имеют место только в ночное время, в дневное время имеется достаточное количество профилей электронной концентрации при любых гелиогеофизических условиях.

Для обработки выбирались среднеширотные ($30^\circ \leq |\varphi| \leq 60^\circ$) высотные профили, соответствующие исключительно спокойным магнитным условиям. Поскольку на этих широтах вдоль параллелей верхние слои атмосферы не претерпевают значительных изменений, было решено группировать $Ne(h)$ – профили вне зависимости от долготы, на которой были произведены измерения. В итоге весь объем профилей был разбит на 12 блоков, каждый из которых соответствовал некоторому набору геофизических признаков. Среди критериев были: сезон, время суток, солнечная активность.

Весенние и осенние месяцы объединены в один блок «равноденствие». Так как во время восхода и захода солнца ионосфера крайне нестабильна, рассматриваются только дневной (10:00 – 18:00 LT) и ночной (00:00 – 04:00 LT) промежутки времени. Выбранное разбиение на группы согласно гелиогеофизическим условиям приведено в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Разбиение профилей Ne из Каталога на подгруппы по гелиогеофизическим условиям

Геофизические условия	Подгруппы	Ограничения
сезон	зима	ноябрь, декабрь, январь, февраль
	равноденствие	март, апрель, сентябрь, октябрь
	лето	май, июнь, июль, август
время суток	день	10:00 – 18:00 LT
	ночь	00:00 – 04:00 LT
солнечная активность	низкая солнечная активность	$F_{10.7} < 110$
	высокая солнечная активность	$F_{10.7} > 150$

2.1.2. ГОСТ электронной концентрации

Настоящий стандарт содержит модель глобального распределения значений концентрации и эффективной частоты соударения электронов в ионосфере Земли в интервале высот $h = 45\text{--}105$ км для любого времени суток, различных дней года, уровней солнечной активности и любой точки земного шара.

Как отмечается в ГОСТ, в дневных условиях для средних широт погрешность модельных значений электронной концентрации наименьшая в диапазоне высот $h = 65\text{--}75$ км и составляет 13%; с уменьшением высоты ошибка возрастает, но не превышает 50%: для $h > 75$ км погрешность составляет 20%.

Для определения электронной концентрации на различных высотах задаются географическая широта и долгота выбранной точки, дата, местное время и среднее значение числа Вольфа. Данный банк данных не распространяется на периоды ионосферных возмущений. Выбранное разбиение данных ГОСТ на группы согласно гелиогеофизическим условиям приведено в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Разбиение профилей N_e из ГОСТ на подгруппы по гелиогеофизическим условиям

Геофизические условия	Подгруппы	Ограничения
сезон	зима	январь
	равноденствие	сентябрь
	лето	июнь
время суток	день	10:00 – 17:00 LT
	ночь	00:00 LT
солнечная активность	низкая солнечная активность	среднее значение числа Вольфа $\bar{W} = 10$
	высокая солнечная активность	среднее значение числа Вольфа $\bar{W} = 100$

Равноденствие, день, высокая солнечная активность									
μ	108	210	347	198	386	1060	2212	4899	18891
σ	203	551	1049	181	339	741	2760	5700	19489
Равноденствие, день, низкая солнечная активность									
μ	64	117	163	193	255	508	718	1928	4552
σ	109	197	291	364	519	823	767	1530	2643
Равноденствие, ночь, высокая солнечная активность									
μ									
σ									
Равноденствие, ночь, низкая солнечная активность									
μ				6	11	147	200	237	1222
σ				0	14	243	242	211	1690
Лето, день, высокая солнечная активность									
μ	14	30	43	62	148	350	1325	4619	13142
σ	12	27	27	37	123	249	1670	4063	9409
Лето, день, низкая солнечная активность									
μ	37	79	121	192	381	707	946	2576	13964
σ	30	101	87	145	295	731	553	1891	9433
Лето, ночь, высокая солнечная активность									
μ	2	9	27	34	46	16	50	119	1285
σ	0	11	42	44	35	9	46	91	342
Лето, ночь, низкая солнечная активность									
μ		7	37	114	56	33	87	303	2839
σ		0	0	29	63	62	156	459	639

В дневное время, как и следовало ожидать, электронная концентрация значительно превосходит ночную, что хорошо видно из таблицы 2.3.

В летние месяцы значения N_e при низкой солнечной активности превосходят значения N_e при высокой. В то же время, зимой и в месяцы равноденствия электронная концентрация увеличивается с ростом W , что более естественно. Отсутствие четкой зависимости N_e от солнечной активности можно объяснить

либо сильной зависимостью концентраций Ne от концентраций $[NO]^+$, либо неточностью данных из Каталога.

Как видно из таблицы 2.3, большинство значений σ превосходят соответствующие значения μ (особенно в зимние месяцы). Большой разброс данных из Каталога, вероятно, связан с тем, что собранные в нем значения Ne были получены разными методами наблюдения.

2.2.2. Результаты расчетов $\mu(Ne)$ и $\sigma(Ne)$ по данным ГОСТ

В таблице 2.4 представлены значения $\mu(Ne)$ и $\sigma(Ne)$ по данным ГОСТ в различных гелиогеофизических условиях.

Таблица 2.4 – Математические ожидания и среднеквадратические отклонения Ne из ГОСТ на высотах 55–95 км

	55	60	65	70	75	80	85	90	95
Зима, день, высокая солнечная активность									
μ	23	43	53	39	212	467	1871	9924	44770
σ	13	25	36	13	90	176	766	4899	26475
Зима, день, низкая солнечная активность									
μ	34	44	37	30	145	364	1599	9027	43470
σ	20	27	14	11	56	134	630	4271	23976
Зима, ночь, высокая солнечная активность									
μ	2	3	9	27	95	423	1896	8498	29592
σ	0	1	7	33	137	616	2757	12378	41989
Зима, ночь, низкая солнечная активность									
μ	15	3	9	25	94	378	1892	8483	29578
σ	0	1	7	33	137	588	2759	12387	42035
Равноденствие, день, высокая солнечная активность									
μ	41	103	166	206	451	882	3472	16142	59597
σ	25	69	55	49	121	297	1161	5410	22695

Равноденствие, день, низкая солнечная активность									
μ	67	109	121	136	277	553	1976	8239	35674
σ	44	74	39	33	77	381	813	3394	14443
Равноденствие, ночь, высокая солнечная активность									
μ		3	11	34	93	417	1869	8424	29613
σ		1	7	35	138	619	2771	12403	42010
Равноденствие, ночь, низкая солнечная активность									
μ		3	11	34	93	417	1869	8424	29613
σ		1	7	35	138	619	2771	12403	42010
Лето, день, высокая солнечная активность									
μ	52	110	126	212	588	1325	4275	19501	66165
σ	34	76	49	104	184	779	1487	6416	21210
Лето, день, низкая солнечная активность									
μ	87	116	94	131	354	856	2218	8598	33908
σ	60	80	33	34	101	1138	836	2821	10991
Лето, ночь, высокая солнечная активность									
μ		2	8	16	37	182	1082	6254	30127
σ		1	5	19	71	329	1604	8591	38205
Лето, ночь, низкая солнечная активность									
μ	1	5	10	15	32	152	815	4690	21534
σ	0	3	7	19	72	325	1505	7372	29569

Здесь согласованность дневной и ночной электронной концентрации выражена значительно лучше.

Данные из ГОСТ явно демонстрируют зависимость концентрации от солнечной активности в любое время года и суток (Беккер, 2014). Следовательно, предположение о недостаточности данных из Каталога становится более весомым.

В ГОСТ значения σ редко превосходят соответствующие значения μ . Это можно наблюдать лишь в ночное время суток, когда объем выборки мал.

2.2.3. Сопоставление математических ожиданий электронной концентрации по двум банкам данных

На рисунках 2.1 – 2.5 построены в одной системе координат высотные профили $\mu(Ne)$ и $\sigma(Ne)$ на основе данных из ГОСТ и Каталога. Синей линией обозначены средние значения Ne из Каталога, красным – из ГОСТ, а среднеквадратические отклонения от них полупрозрачными областями.

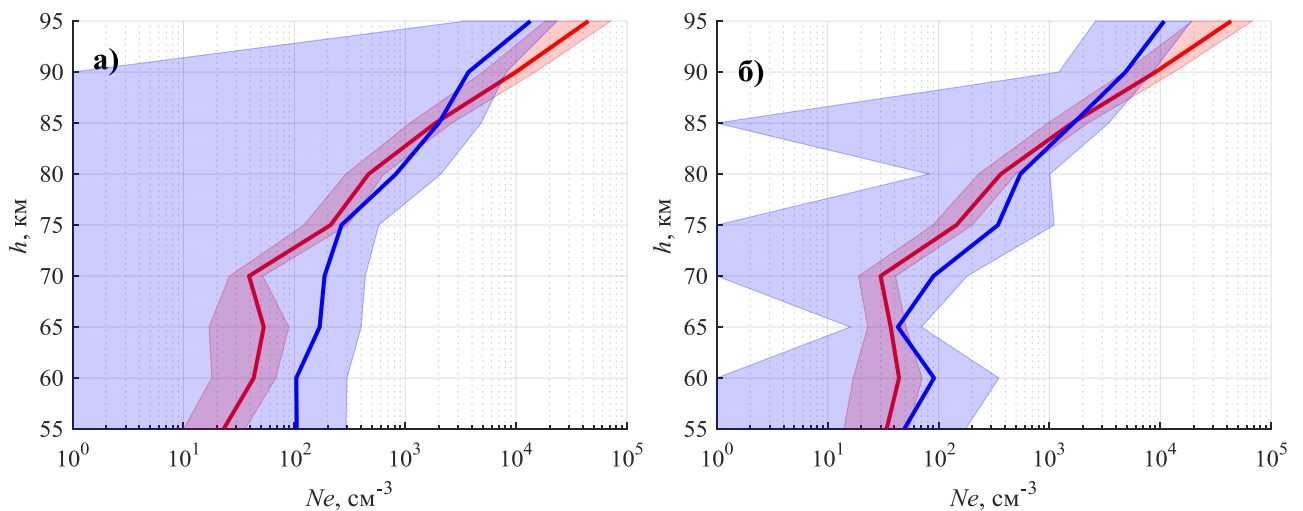


Рисунок 2.1 – Значения $\mu(Ne) \pm \sigma(Ne)$ по данным ГОСТ (красный) и Каталога (синий) для зимних месяцев, дневных часов

(а) – высокая солнечная активность; (б) – низкая солнечная активность

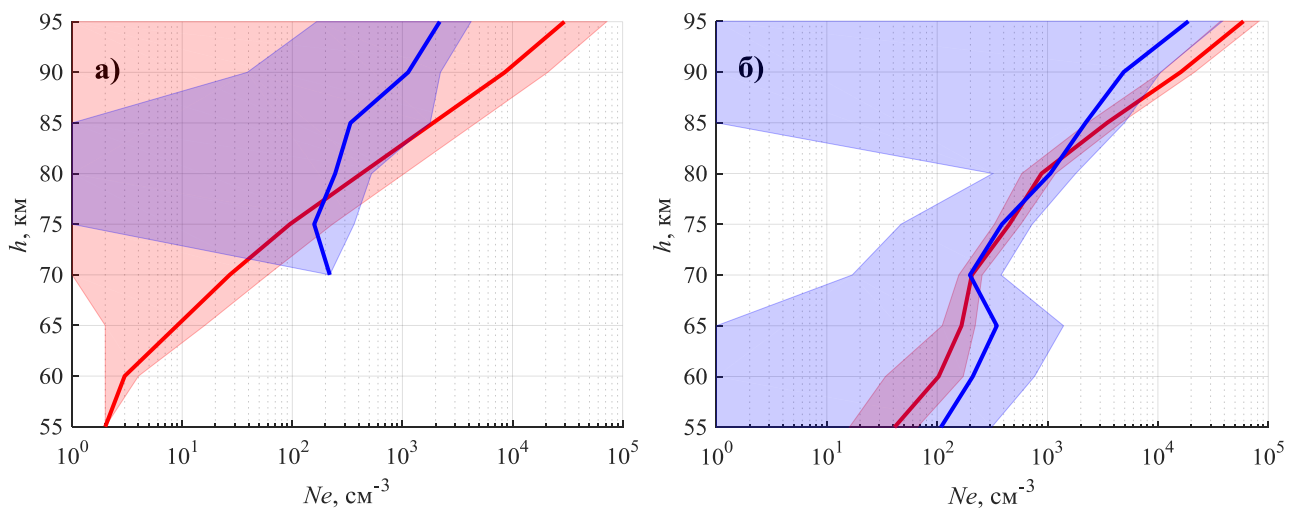


Рисунок 2.2 – Значения $\mu(Ne) \pm \sigma(Ne)$ по данным ГОСТ (красный) и Каталога (синий) для высокой солнечной активности

(а) – зима, ночь; (б) – равноденствие, день

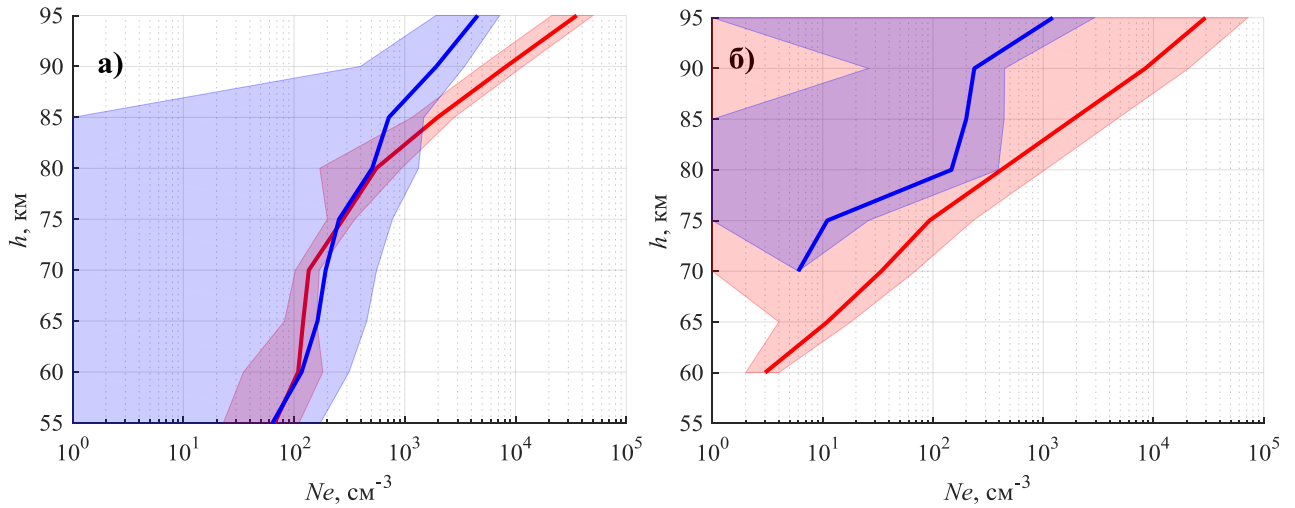


Рисунок 2.3 – Значения $\mu(Ne) \pm \sigma(Ne)$ по данным ГОСТ (красный) и Каталога (синий) для равноденствия, низкой солнечной активности. (а) – день; (б) – ночь

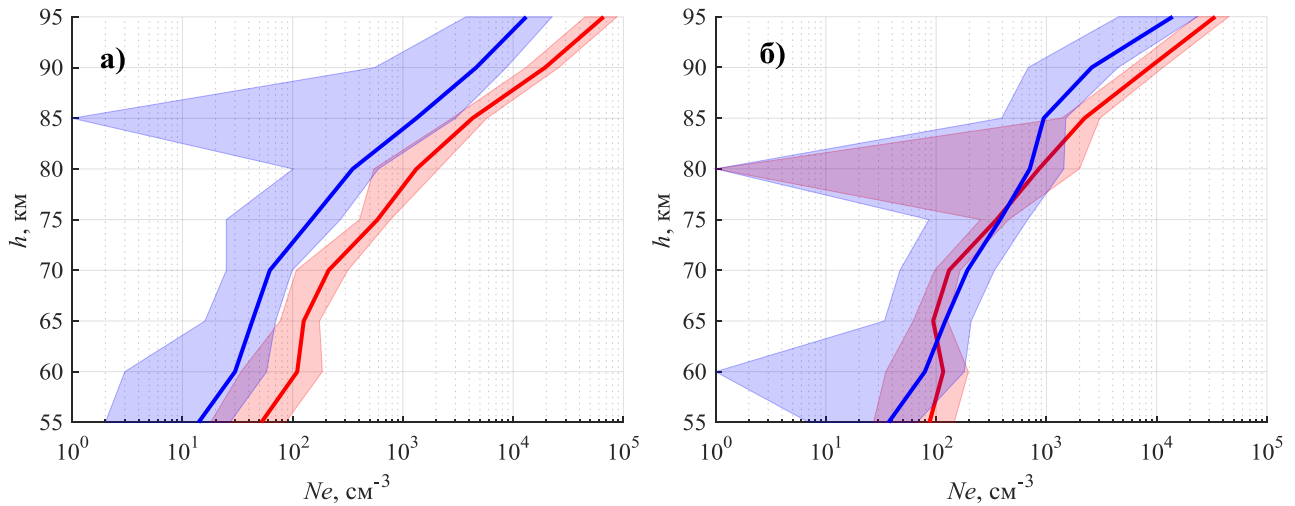


Рисунок 2.4 – Значения $\mu(Ne) \pm \sigma(Ne)$ по данным ГОСТ (красный) и Каталога (синий) для летних месяцев, дневных часов. (а) – высокая; (б) – низкая солнечная активность

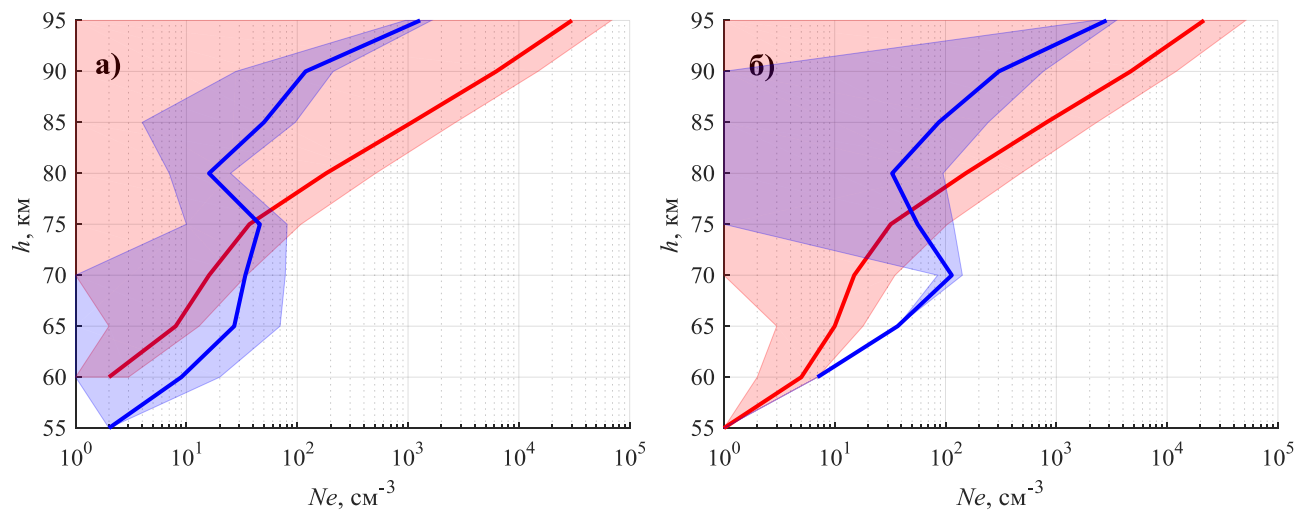


Рисунок 2.5 – Значения $\mu(Ne) \pm \sigma(Ne)$ по данным ГОСТ (красный) и Каталога (синий) для летних месяцев, ночных часов (а) – высокая; (б) – низкая солнечная активность

Из рисунков 2.1 – 2.5 видно, насколько разброс данных из Каталога превышает разброс данных из ГОСТ. Стоит отметить, что в дневные часы ниже 90 км области $\mu \pm \sigma$ из ГОСТ целиком лежат в соответствующих областях из Каталога. В ночные часы из-за малого количества данных в обоих банках нет смысла делать обобщенный анализ.

В целом, в дневное время высотные профили $\mu(Ne)$ достаточно близки независимо от сезона и уровня солнечной активности. Но, несмотря на эту согласованность, не остается сомнений в том, что значения электронной концентрации, собранные в ГОСТ, представляют большую ценность по сравнению с данными из Каталога.

2.3. Законы распределения электронной концентрации, полученной из банков данных

Очевидно, что функция плотности вероятности Ne обладает большей информативностью, чем математическое ожидание и дисперсия.

Причина широкого применения нормального закона распределения для описания физических величин связана с центральной предельной теоремой, которая утверждает, что большой массив данных, как правило, подчиняется нормальному закону распределения. Для проверки нормальности используются различные критерии, позволяющие выяснить, отличается ли от нормального выборочное распределение измеренной переменной. Показателями нормального распределения являются асимметрия и эксцесс (Елисеева и Юзбашев, 1999), которые вычисляются следующим образом:

$$As = \frac{1}{N} \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^3}{\sigma^3}; \quad (2.1)$$

$$Ex = \frac{1}{N} \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4}, \quad (2.2)$$

где N – объем выборки.

По значениям асимметрии и эксцесса можно судить о близости распределения к нормальному.

Так, например, распределение можно считать нормальным, если показатели асимметрии и эксцесса не превышают своих двукратных среднеквадратических отклонений σ_{as} и σ_{ex} (далее этот критерий будем называть «первым») (Елисеева и Юзбашев, 1999). Эти среднеквадратические отклонения вычисляются по формулам:

$$\sigma_{as} = \sqrt{\frac{6(N-1)N}{(N-2)(N+1)(N+3)}}; \quad (2.3)$$

$$\sigma_{ex} = \sqrt{\frac{24N(N-1)^2}{(N-3)(N-2)(N+3)(N+5)}}. \quad (2.4)$$

Есть и другой критерий, который определяет допустимую степень отклонения эмпирических значений асимметрии и эксцесса от нулевых значений, соответствующих нормальному распределению. Допустимая степень отклонения – та, которая позволяет считать, что эти статистики существенно не отличаются от нормальных параметров. Величина допустимых отклонений определяется так называемыми стандартными ошибками асимметрии и эксцесса (Наследов, 2004).

Для асимметрии стандартная ошибка определяется по формуле:

$$As_{sd} = 3\sqrt{\frac{6(N-1)}{(N+1)(N+3)}}. \quad (2.5)$$

Для эксцесса стандартная ошибка определяется как:

$$Ex_{sd} = 5\sqrt{\frac{24N(N-2)(N-3)}{(N+1)^2(N+3)(N+5)}}. \quad (2.6)$$

Выборочные значения асимметрии и эксцесса значительно отличаются от нуля, если не превышают значения своих стандартных ошибок. Это можно считать признаком соответствия выборочного распределения нормальному закону (далее этот критерий будем называть «вторым»).

Стоит отметить, что первый критерий предназначен для проверки теоретических результатов, а второй – для экспериментальных данных, поэтому результаты проверки по второму критерию будут представлять больший интерес.

ночь	–	–	+	+	+	+	–	–	–
Лето, низкая солнечная активность									
день	–	–	–	–	–	–	–	+	+
ночь		–	–	–	+	–	–	–	+

Таблица 2.6 – Соответствие данных ГОСТ нормальному закону распределения по первому критерию на высотах 55–95 км

	55	60	65	70	75	80	85	90	95
Зима, высокая солнечная активность									
день	–	–	–	–	–	–	–	–	–
ночь	+	+	+	–	–	–	–	–	–
Зима, низкая солнечная активность									
день	–	–	–	–	–	–	–	–	–
ночь	+	+	+	–	–	–	–	–	–
Равноденствие, высокая солнечная активность									
день	–	–	–	–	–	–	–	–	–
ночь		+	+	+	–	–	–	–	–
Равноденствие, низкая солнечная активность									
день	–	–	–	–	–	–	–	–	–
ночь		+	+	+	–	–	–	–	–
Лето, высокая солнечная активность									
день	–	–	–	–	–	–	–	–	–
ночь		–	+	–	–	–	–	–	–
Лето, низкая солнечная активность									
день	–	–	–	–	–	–	–	–	–
ночь	–	+	+	–	–	–	–	–	–

Очевидно, полученные в ходе данного анализа результаты демонстрируют практически полное несоответствие нормальному закону распределения. Как видно, лишь $k_1 = 14\%$ данных ГОСТ подчиняются нормальному закону распределения, и $k_2 = 13\%$ данных из Каталога подчиняются нормальному закону распределения.

Зима, низкая солнечная активность									
день	–	+	–	–	–	–	–	+	+
ночь	+	+	+	+	+	–	+	+	+
Равноденствие, высокая солнечная активность									
день	+	+	+	+	+	+	+	+	+
ночь		+	+	+	+	+	+	+	+
Равноденствие, низкая солнечная активность									
день	+	+	+	+	+	–	+	+	+
ночь		+	+	+	+	+	+	+	+
Лето, высокая солнечная активность									
день	+	+	+	–	+	–	+	+	+
ночь		–	+	–	–	–	–	–	+
Лето, низкая солнечная активность									
день	+	+	+	+	+	–	+	+	+
ночь	–	+	+	–	–	–	–	–	–

Здесь коэффициенты равны: $k_1 = 72\%$, $k_2 = 36\%$.

Согласно второму критерию большее количество данных подчиняется нормальному закону распределения, однако значения коэффициентов k_1 и k_2 не достаточно велики для надежного его использования в дальнейшем.

2.3.2. Проверка распределений N_e на соответствие логнормальному закону распределения

Значения N_e , собранные в ГОСТ и Каталоге, были проверены на подчинение логарифмически-нормальному закону распределения, который по своему типу очень близок к нормальному. Результаты проверки представлены в таблицах 2.9 – 2.12.

Равноденствие, высокая солнечная активность									
день	–	–	–	–	–	–	–	–	–
ночь		+	+	+	+	+	+	+	+
Равноденствие, низкая солнечная активность									
день	–	–	–	–	–	–	–	–	–
ночь		+	+	+	+	+	+	+	+
Лето, высокая солнечная активность									
день	–	–	–	–	–	–	–	–	–
ночь		–	+	–	–	–	+	+	+
Лето, низкая солнечная активность									
день	–	–	–	–	–	–	–	–	–
ночь	–	+	+	–	–	–	–	+	+

Таблица 2.11 – Соответствие данных Каталога логнормальному закону распределения по второму критерию на высотах 55–95 км

	55	60	65	70	75	80	85	90	95
Зима, высокая солнечная активность									
день	+	–	–	–	–	–	–	–	–
ночь				–	–	–	–	–	+
Зима, низкая солнечная активность									
день	–	–	+	–	–	–	–	–	–
ночь									
Равноденствие, высокая солнечная активность									
день	+	+	–	–	–	–	–	–	+
ночь									
Равноденствие, низкая солнечная активность									
день	+	–	–	–	–	–	–	–	–
ночь					–	+	+	+	+
Лето, высокая солнечная активность									
день	+	+	+	+	+	–	–	–	–
ночь	–	–	+	+	+	+	+	+	+

Лето, низкая солнечная активность									
день	+	-	-	-	-	-	-	+	+
ночь				-	+	+	+	+	+

Таблица 2.12 – Соответствие данных ГОСТ логнормальному закону распределения по второму критерию на высотах 55–95 км

	55	60	65	70	75	80	85	90	95
Зима, высокая солнечная активность									
день	-	-	-	+	+	+	+	-	-
ночь	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Зима, низкая солнечная активность									
день	-	-	+	+	+	+	+	+	-
ночь	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Равноденствие, высокая солнечная активность									
день	+	+	+	+	+	+	+	+	+
ночь		+	+	+	+	+	+	+	+
Равноденствие, низкая солнечная активность									
день	+	+	+	+	+	-	+	+	+
ночь		+	+	+	+	+	+	+	+
Лето, высокая солнечная активность									
день	-	-	+	-	+	-	+	+	+
ночь		+	+	+	+	+	+	+	+
Лето, низкая солнечная активность									
день	+	+	+	+	+	-	+	+	+
ночь	-	+	+	+	+	+	+	+	+

Значения коэффициентов, полученные по первому критерию, соответственно равны: $k_1 = 42\%$, $k_2 = 21\%$.

По второму критерию получено: $k_1 = 86\%$, $k_2 = 39\%$. Здесь значения коэффициентов больше, чем в п. 2.3.1. Следовательно, электронные концентрации из обоих банков данных подчиняются скорее логнормальному закону, нежели нормальному. Однако значения коэффициентов недостаточно велики (особенно

k_2), чтобы генерировать профили Ne с помощью ГСЧ (генератора случайных чисел) согласно этому закону распределения.

На основании полученных результатов был сделан вывод, что привязываться к какому-либо конкретному закону распределения нецелесообразно, и необходимо генерировать значения напрямую согласно полученным кривым плотности вероятности Ne в различных гелиогеофизических условиях.

2.3.3. Генерация случайных величин Ne , подчиняющихся эмпирическому закону распределения

По отобранным из двух банков данных значениям Ne были построены эмпирические функции плотности вероятности концентрации электронов. Далее эти функции использовались для генерации массивов Ne , которые должны описываться такими же законами распределения, как и исходные данные.

По умолчанию ГСЧ позволяет создать массив случайных величин, описываемых равномерным законом распределения. Для получения значений Ne с заданным произвольным законом распределения был использован метод Монте Карло (Соболь, 1973). Дискретизация функций плотности вероятности Ne была проведена с различной частотой для разных высот D -области ионосферы. Так, например, частота дискретизации распределений на высоте $h = 60$ км составила 0.1 см^{-3} , а на высоте $h = 80$ км – 8 см^{-3} .

На рисунках 2.6 – 2.11 представлены исходные эмпирические функции плотности вероятности Ne и функции, построенные по сгенерированным массивам согласно описанной методике.

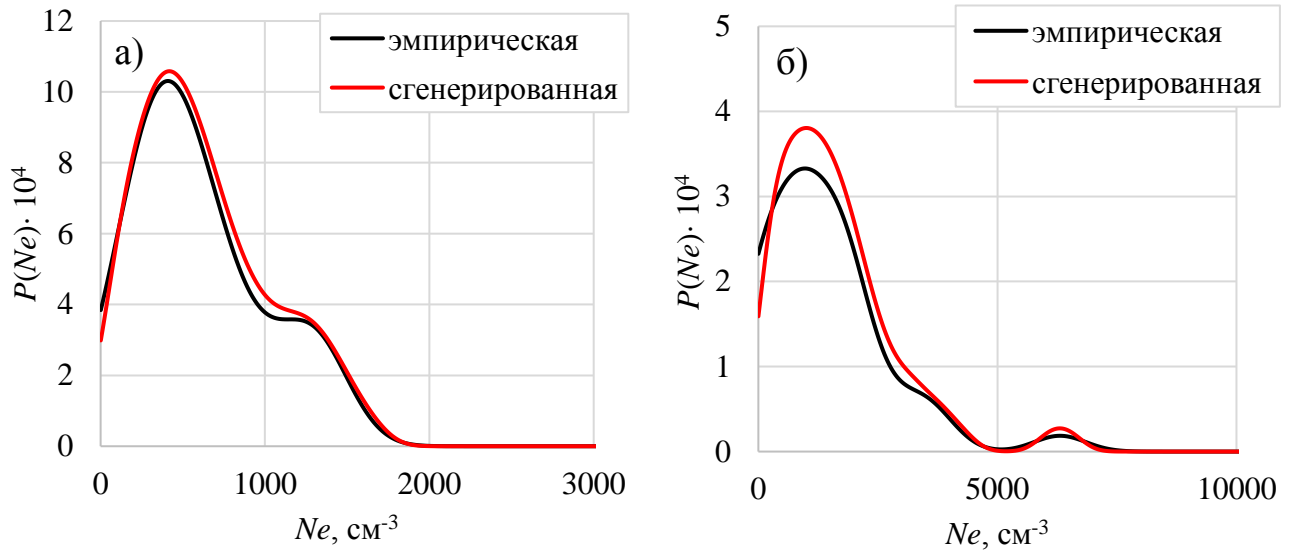


Рисунок 2.6 – Плотность вероятности Ne на высоте 85 км по данным Каталога для месяцев равноденствия, дневных часов

(а) – низкая солнечная активность; (б) – высокая солнечная активность

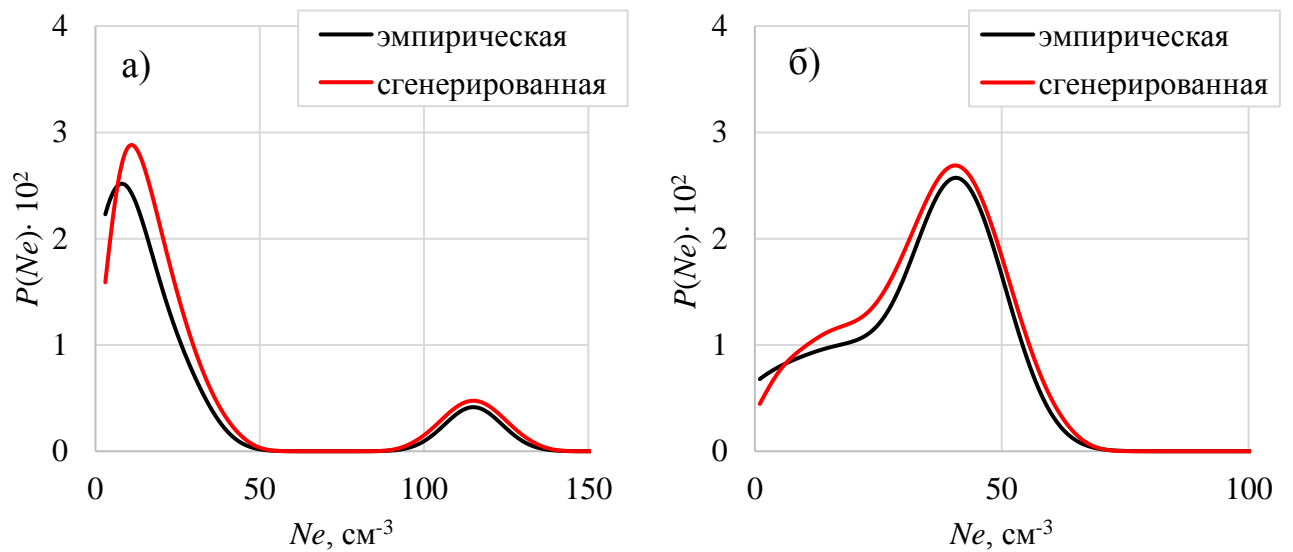


Рисунок 2.7 – Плотность вероятности Ne на высоте 85 км по данным Каталога для летних месяцев, ночных часов

(а) – низкая солнечная активность; (б) – высокая солнечная активность

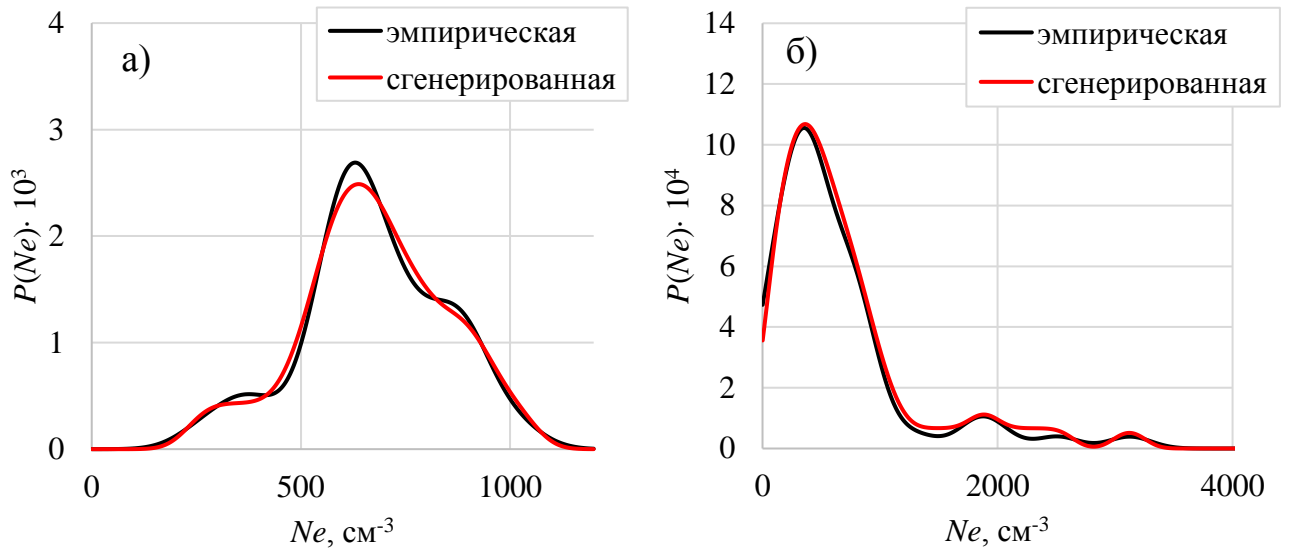


Рисунок 2.8 – Плотность вероятности Ne на высоте 80 км по данным Каталога для зимних месяцев, дневных часов

(а) – низкая солнечная активность; (б) – высокая солнечная активность

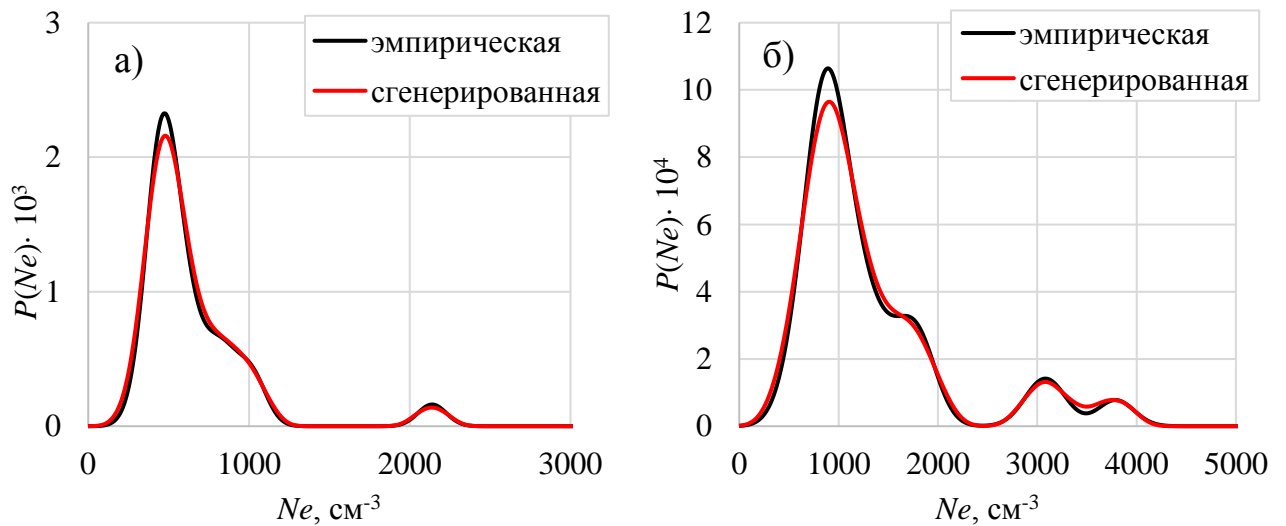


Рисунок 2.9 – Плотность вероятности Ne на высоте 80 км по данным ГОСТ для летних месяцев, дневных часов

(а) – низкая солнечная активность; (б) – высокая солнечная активность

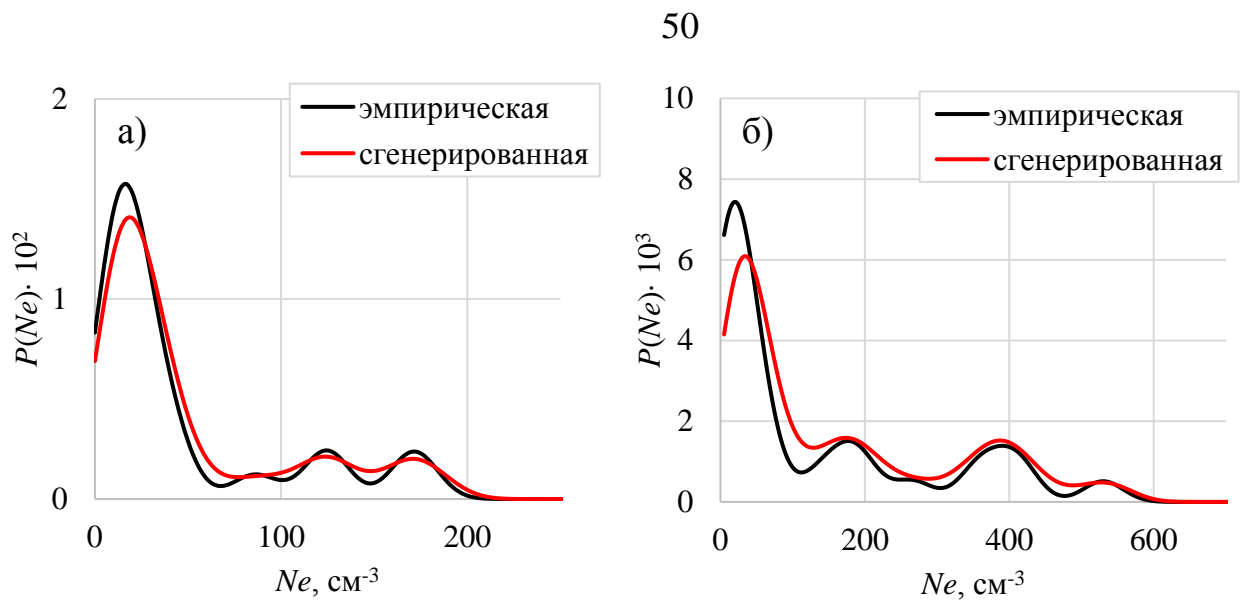


Рисунок 2.10 – Плотность вероятности Ne на высоте 80 км по данным ГОСТ для летних месяцев, ночных часов

(а) – низкая солнечная активность; (б) – высокая солнечная активность

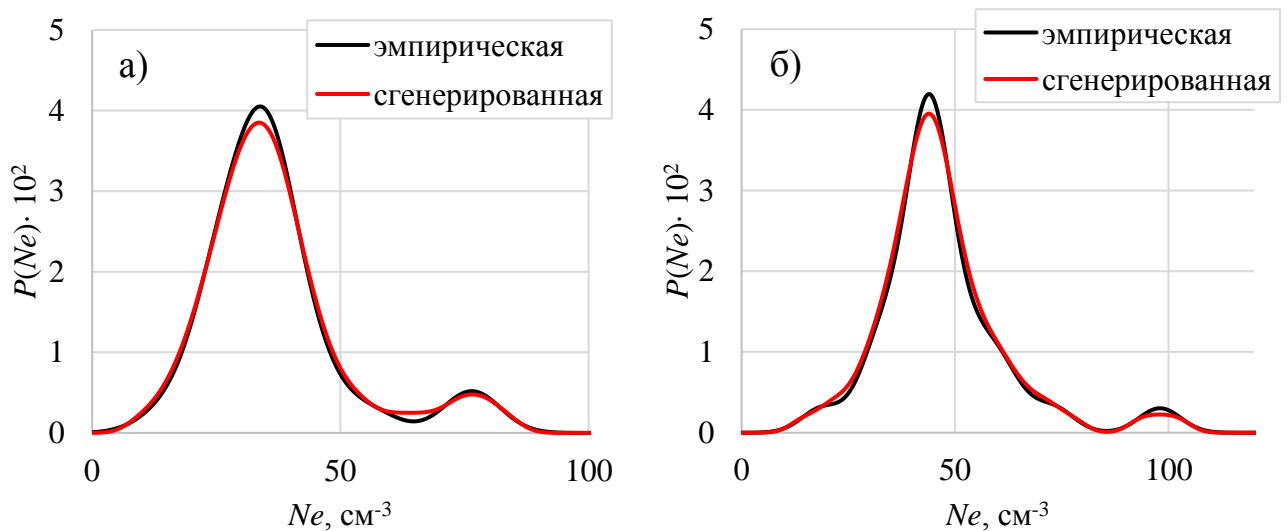


Рисунок 2.11 – Плотность вероятности Ne на высоте 65 км по данным ГОСТ для зимних месяцев, дневных часов

(а) – низкая солнечная активность; (б) – высокая солнечная активность

Как видно из рисунков 2.6 – 2.11, сгенерированные функции плотности вероятности Ne лучше всего описывают эмпирическую функцию в условиях низкой солнечной активности и дневного времени суток. Наблюдаемая в пиках распределений неточность в условиях высокой солнечной активности и ночного времени суток связана в первую очередь с малым объемом выборки данных. Тем не менее, точность задания функций таким способом намного выше

той, которая могла быть получена при генерации значений согласно нормальному (или логнормальному) закону распределения с использованием математических ожиданий и среднеквадратических отклонений, представленных в таблицах 2.3 и 2.4.

2.3.4. Сходимость плотности вероятности концентрации электронов, полученной по эмпирически-статистической модели

Для определения минимального количества значений электронной концентрации, достаточного для корректного построения распределения вероятности, исследовалась сходимость ряда функций плотности вероятности при увеличении количества генерируемых значений. Необходимо, чтобы после какого-то количества итераций кривая плотности вероятности как геофизических, так и радиофизических величин оставалась неизменной с некоторой заданной точностью в любых гелиогеофизических условиях.

Сходимость ряда функций плотности вероятности была исследована в численном эксперименте. Дискретизация распределений проводилась с той же частотой, что представлена в п. 2.3.3. Для оценки сходимости распределения сравнивались с условно предельной кривой, построенной при $N = 10000$. Оказалось, что начиная с $N = 1000$ отклонения распределений от предельной кривой не превышают 2% в каждой рассматриваемой точке. Этого значения вполне достаточно для сходимости решения и корректного построения распределений.

На рисунке 2.12 в качестве примера представлена зависимость плотности вероятности $P(Ne)$ от количества итераций по данным ГОСТ и Каталога на двух высотах.

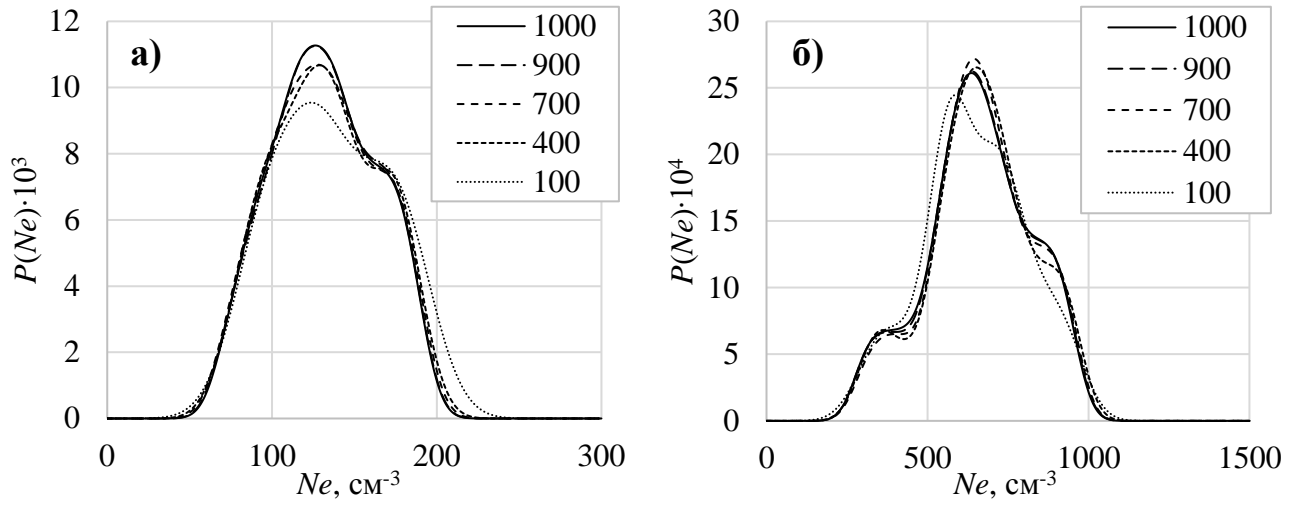


Рисунок 2.12 – Плотность вероятности Ne
по данным ГОСТ для месяцев равноденствия на $h = 70$ км (а)
и по данным Каталога для зимних месяцев на $h = 85$ км (б)
(день, низкая солнечная активность)

Основные выводы к Главе 2

На основании результатов, полученных в ходе построения эмпирически-статистических моделей D -области ионосферы, можно сделать следующие выводы:

- Основная трудность при разработке эмпирически-статистических моделей – отсутствие экспериментальных данных, перекрывающих весь диапазон вариаций гелиогеофизических условий.
- Статистическая обработка банков данных электронной концентрации показала, что данные ГОСТ в любых гелиогеофизических условиях представлены в более полном объеме, чем данные Каталога. В связи с малым объемом данных и, как следствие, высоким разбросом значений N_e , среднеквадратические отклонения из Каталога существенно превышают соответствующие значения из ГОСТ.
- Полученные массивы значений электронной концентрации в общем случае не описываются нормальным и логнормальным законами распределения, поэтому генерацию профилей N_e необходимо проводить напрямую согласно полученным функциям плотности вероятности $P(N_e)$.
- Получена численная сходимость ряда функций плотности вероятности $P(N_e)$ в зависимости от количества генерируемых значений. Оказалось, что 1000 итераций достаточно для корректного построения функции плотности вероятности (в этом случае отличие от условно предельно кривой не превышает 2%).

3. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ *D*-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

Суть вероятностного плазмохимического (В-П) моделирования заключается в варьировании наиболее изменчивых и плохо известных параметров уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла *D*-области согласно их законам распределения и решению системы дифференциальных уравнений с каждым набором параметров в различных гелиогеофизических условиях.

Вероятностное плазмохимическое моделирование состоит из следующих этапов:

1. Определение наиболее изменчивых параметров нейтральной ионосферы, входящих в уравнения ионизационно-рекомбинационного цикла *D*-области ионосферы.
2. Нахождение законов распределения этих параметров на разных высотах в различных гелиогеофизических условиях по многолетним экспериментальным спутниковым данным.
3. Генерация N профилей этих параметров согласно полученным функциям распределения с помощью ГСЧ. Количество итераций N определяется сходимостью решений уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла.
4. Решение системы дифференциальных уравнений при каждом наборе сгенерированных профилей.
5. Использование полученных профилей электронной концентрации в качестве среды распространения радиоволн.

3.1. Ионизационно-рекомбинационный цикл *D*-области ионосферы

В рамках диссертации для вычисления высотных профилей электронной концентрации была использована 5-компонентная система дифференциальных

уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла *D*-области ионосферы, впервые приведенная в (Егошин и др., 2012):

$$\frac{d[\text{NO}^+]}{dt} = q - 4 \cdot 10^{-7} \left(\frac{300}{T} \right)^{1/5} [\text{NO}^+] N_e - B[\text{NO}^+] - \alpha_i[\text{NO}^+] ([\text{O}_2^-] + [\text{XY}^-]); \quad (3.1)$$

$$\frac{d[\text{XY}^+]}{dt} = B[\text{NO}^+] - \alpha_d[\text{XY}^+] N_e - \alpha_i[\text{XY}^+] ([\text{O}_2^-] + [\text{XY}^-]); \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d[\text{O}_2^-]}{dt} = & 1.4 \cdot 10^{-29} \left(\frac{300}{T} \right) \exp\left(-\frac{600}{T}\right) [\text{O}_2] N_e - 0.33[\text{O}_2^-] - 4 \cdot 10^{-10} [\text{O}_3][\text{O}_2^-] - \\ & - \alpha_i[\text{O}_2^-] ([\text{NO}^+] + [\text{XY}^+]) - 4 \cdot 10^{-31} [\text{O}_2]^2 [\text{O}_2^-]; \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\frac{d[\text{XY}^-]}{dt} = 4 \cdot 10^{-10} [\text{O}_3][\text{O}_2^-] + 4 \cdot 10^{-31} [\text{O}_2]^2 [\text{O}_2^-] - \alpha_i[\text{XY}^-] ([\text{NO}^+] + [\text{XY}^+]) - I \cdot [\text{XY}^-]; \quad (3.4)$$

$$\frac{dN_e}{dt} = \frac{d[\text{NO}^+]}{dt} + \frac{d[\text{XY}^+]}{dt} - \frac{d[\text{O}_2^-]}{dt} - \frac{d[\text{XY}^-]}{dt}; \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} B = & 1.8 \cdot 10^{-28} (308/T)^{4.7} [\text{H}_2\text{O}][\text{N}_2] + \frac{2 \cdot 10^{-31} (300/T)^{4.4} [\text{N}_2]^2 \times 10^{-9} [\text{H}_2\text{O}]}{C} + \\ & + \frac{10^{-9} [\text{H}_2\text{O}]}{3.1 \cdot 10^4 T^{-4} \exp(-4590/T) [\text{N}_2] + 10^{-9} [\text{H}_2\text{O}]} \times \\ & \times \left(7 \cdot 10^{-30} (300/T)^3 [\text{CO}_2][\text{N}_2] + \frac{2 \cdot 10^{-31} (300/T)^{4.4} [\text{N}_2]^2 \times 10^{-9} [\text{CO}_2]}{C} \right); \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$C = 1.5 \cdot 10^6 T^{-5.4} \exp(-2450/T) [\text{N}_2] + 10^{-9} ([\text{CO}_2] + [\text{H}_2\text{O}]). \quad (3.7)$$

Эта система учитывает практически все аэрономические процессы, влияющие на концентрацию электронов в нижней ионосфере: ионизацию солнечным излучением и космическими лучами, реакции преобразования NO^+ (через коэффициент *B* (Козлов и др., 1982)) и O_2^- в кластерные положительные XY^+ и отрицательные ионы XY^- , фотоотлипание электронов от O_2^- и XY^- , прилипание электронов в тройных соударениях к O_2 , диссоциативную рекомбинацию электронов с положительными ионами и ион-ионную рекомбинацию. Работоспособность используемой пятикомпонентной модели неоднократно проверялась по геофизическим и радиофизическим экспериментальным данным в спокойных условиях, а также во время солнечных вспышек различного класса. В настоящий момент существуют многомерные численные модели ионосферы,

описывающие более полное взаимодействие нейтральных и заряженных составляющих на высотах D -области и включающие в рассмотрение сотни фотохимических реакций (Боярчук и др., 2006; Krivolutsky et al., 2015). Такие модели, естественно, обладают более высокой точностью по сравнению с используемой в работе моделью. Однако для отработки основных принципов вероятностного моделирования невозмущенной среднеширотной D -области ионосферы учета основного набора заряженных составляющих ионосферы более чем достаточно (Беккер, 2018).

Плохо известными и, следовательно, 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 плотности и температуры нейтральной ионосферы, а также концентраций малых нейтральных составляющих в широком диапазоне высот и геомагнитных широт. Была проведена статистическая обработка экспериментальных банков данных входных параметров T , $[O_2]$, $[N_2]$, $[H_2O]$, $[O_3]$ со спутника AURA (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>; Waters et al., 2006) и данных $[CO_2]$ со спутника TIMED (ftp://saber.gats-inc.com/Version2_0/Level2C/; Bekker and Ryakhovskiy, 2017) за несколько лет. Рассматривались 4 сезона: зима (ноябрь, декабрь, январь, февраль), весна (март, апрель), лето (май, июнь, июль, август), осень (сентябрь, октябрь), в качестве дневного и ночного времени приняты соответственно часы освещенной и неосвещенной ионосферы (зависящие от трассы и сезона). 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 $h = 50\text{--}85$ км с шагом в 5 км получены кривые плотности вероятности T , $[O_2]$, $[N_2]$, $[H_2O]$, $[O_3]$ и $[CO_2]$.

3.2. Анализ чувствительности решений уравнений цикла к входным параметрам

Анализ чувствительности решений уравнений фотохимии D -области ионосферы, в частности, электронной концентрации, к изменению входных параметров, позволяет определить наиболее весомые при варьировании коэффициенты и к их заданию отнестись особенно аккуратно (Saltelli et al., 2005; Davis et al., 2011; Беккер и др., 2016).

Чувствительность решения $y(p_1, p_2, \dots, t)$ к параметру p_i определяется как частная производная:

$$s_i(t) = \frac{\partial y(p_1, p_2, \dots, t)}{\partial p_i}. \quad (3.8)$$

При рассмотрении чувствительности решения к параметру p_i , все остальные параметры p_j ($i \neq j$) фиксируются. Для нахождения значений чувствительности к какому-либо параметру необходимо систему (3.1) – (3.5) решить совместно с системой дифференциальных уравнений для чувствительности:

$$\dot{s}_i(t) = \frac{\partial f}{\partial y} s_i + \frac{\partial f}{\partial p_i} = J \cdot s_i + F_j. \quad (3.9)$$

где f – вектор-функция, составленная из правых частей уравнений (3.1) – (3.5), J – якобиан системы, F_j – производные правых частей по j -му параметру.

Таким образом, для системы из пяти уравнений с пятью неизвестными получаем якобиан:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_1} & \frac{\partial f_1}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial y_5} \\ \frac{\partial f_2}{\partial y_1} & \frac{\partial f_2}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial y_5} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_5}{\partial y_1} & \frac{\partial f_5}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial f_5}{\partial y_5} \end{pmatrix}, \quad (3.10)$$

вектор производных правых частей по параметру:

$$F_j = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial p_j} \\ \frac{\partial f_2}{\partial p_j} \\ \vdots \\ \frac{\partial f_5}{\partial p_j} \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

и вектор значений чувствительности

$$S_j = \begin{pmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial p_j} \\ \frac{\partial y_2}{\partial p_j} \\ \vdots \\ \frac{\partial y_5}{\partial p_j} \end{pmatrix}. \quad (3.12)$$

Полученные значения чувствительности концентраций $[\text{NO}^+]$, $[\text{XY}^+]$, $[\text{O}_2^-]$, $[\text{XY}^-]$, Ne к входным параметрам q , T , $[\text{O}_2]$, $[\text{N}_2]$, $[\text{O}_3]$, $[\text{H}_2\text{O}]$ и $[\text{CO}_2]$ на высотах 50 и 85 км представлены в таблицах 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1 – Чувствительность $[\text{NO}^+]$, $[\text{XY}^+]$, $[\text{O}_2^-]$, $[\text{XY}^-]$, Ne к q , T , $[\text{O}_2]$, $[\text{N}_2]$, $[\text{O}_3]$, $[\text{H}_2\text{O}]$ и $[\text{CO}_2]$ на высоте 50 км

	$[\text{NO}^+]$	$[\text{XY}^+]$	$[\text{O}_2^-]$	$[\text{XY}^-]$	Ne
q	0.32	2676	0.03	2676	0.04
T	$5.84 \cdot 10^{-3}$	$1.02 \cdot 10^{-3}$	$1.23 \cdot 10^{-7}$	$7.14 \cdot 10^{-3}$	$-7.80 \cdot 10^{-5}$
$[\text{O}_2]$	$-7.21 \cdot 10^{-18}$	$5.60 \cdot 10^{-16}$	$-1.41 \cdot 10^{-18}$	$5.61 \cdot 10^{-16}$	$-5.62 \cdot 10^{-18}$
$[\text{N}_2]$	$-9.93 \cdot 10^{-18}$	$1.12 \cdot 10^{-17}$	$-3.73 \cdot 10^{-19}$	$1.09 \cdot 10^{-18}$	$-5.20 \cdot 10^{-21}$
$[\text{O}_3]$	$-2.00 \cdot 10^{-15}$	~ 0	$-1.75 \cdot 10^{-13}$	~ 0	$-1.99 \cdot 10^{-15}$
$[\text{H}_2\text{O}]$	$-6.53 \cdot 10^{-13}$	$6.06 \cdot 10^{-13}$	~ 0	~ 0	~ 0
$[\text{CO}_2]$	$-6.65 \cdot 10^{-15}$	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0

Таблица 3.2 – Чувствительность $[NO^+]$, $[XY^+]$, $[O_2^-]$, $[XY^-]$, Ne к q , T , $[O_2]$, $[N_2]$, $[O_3]$, $[H_2O]$ и $[CO_2]$ на высоте 85 км

	$[NO^+]$	$[XY^+]$	$[O_2^-]$	$[XY^-]$	Ne
q	125	- 0.053	0.239	10.9	113
T	46	- 1.7	0.19	24	20
$[O_2]$	$6.10 \cdot 10^{-11}$	$2.60 \cdot 10^{-13}$	$8.08 \cdot 10^{-13}$	$1.44 \cdot 10^{-10}$	$- 8.37 \cdot 10^{-11}$
$[N_2]$	$- 3.92 \cdot 10^{-13}$	$2.05 \cdot 10^{-13}$	$- 4.58 \cdot 10^{-14}$	$6.71 \cdot 10^{-12}$	$- 6.86 \cdot 10^{-12}$
$[O_3]$	$1.65 \cdot 10^{-6}$	$7.04 \cdot 10^{-9}$	$- 2.21 \cdot 10^{-8}$	$3.95 \cdot 10^{-6}$	$- 2.27 \cdot 10^{-6}$
$[H_2O]$	$- 6.63 \cdot 10^{-6}$	$3.47 \cdot 10^{-7}$	$- 1.20 \cdot 10^{-8}$	$- 5.50 \cdot 10^{-7}$	$- 5.73 \cdot 10^{-6}$
$[CO_2]$	$- 3.59 \cdot 10^{-9}$	$1.88 \cdot 10^{-10}$	$- 6.52 \cdot 10^{-12}$	$- 2.98 \cdot 10^{-10}$	$- 3.10 \cdot 10^{-9}$

Из таблицы 3.2 следует, что чувствительность Ne к параметру T на высоте 85 км составляет $s = 20$. Это означает, что при увеличении T на 1 К, значение Ne увеличится на 20 см^{-3} . В то же время известно, что вариации температуры на высоте 85 км могут составлять десятки кельвинов. Следовательно, для определения параметров, оказывающих наибольшее влияние на Ne , необходимо вычислить вариации концентрации электронов в зависимости от изменения входных параметров, к примеру, на 10%. Для оценки этих значений необходимы средние опорные профили q , T , $[O_2]$, $[N_2]$, $[O_3]$, $[H_2O]$ и $[CO_2]$, которые были взяты из работы (Козлов и др., 2014). Результаты расчетов представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Изменение концентрации Ne [см^{-3}] в зависимости от увеличения значений входных параметров на 10%

	50 км	85 км
q	0.0012	452
T	-0.0018	414
$[O_2]$	-0.0090	-1004

[N ₂]	0.0000	-110
[O ₃]	0.0000	-118
[H ₂ O]	0.0000	-36
[CO ₂]	0.0000	-34

Из таблицы 3.3 видно, что электронная концентрация наиболее чувствительна к варьированию скорости ионизации q , температуры нейтралов T и концентрации [O₂]. Следовательно, к заданию этих параметров необходимо отнестись особенно аккуратно.

Очевидно, что некоторые параметры нейтральной ионосферы жестко связаны. Например, концентрация [O₂] не может меняться независимо от [N₂]. Поэтому с физической точки зрения независимое варьирование параметров не совсем корректно. Однако оценка чувствительности является чисто математической задачей, необходимой для понимания связей между параметрами и решениями системы уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла. Далее при моделировании среды основные физические связи между параметрами системы учтены, и варьирование производится в соответствии с ними.

3.3. Получение плотностей вероятности [N₂], [O₂], [H₂O], [CO₂], [O₃], T по спутниковым данным

Для всех комбинаций гелиогеофизических условий в диапазоне высот $h = 50$ – 85 км с шагом в 5 км получены кривые плотности вероятности T , [O₂], [N₂], [H₂O], [O₃] и [CO₂]. Согласно этим распределениям сгенерированы профили входных параметров, и они были использованы при решении системы дифференциальных уравнений цикла (Беккер, 2017). На рисунках 3.1 – 3.2 в качестве примера приведены кривые плотности вероятности параметров T и [N₂] на разных высотах. Эти данные соответствуют дневным часам и месяцам осеннего равноденствия 2009 года (минимум солнечной активности).

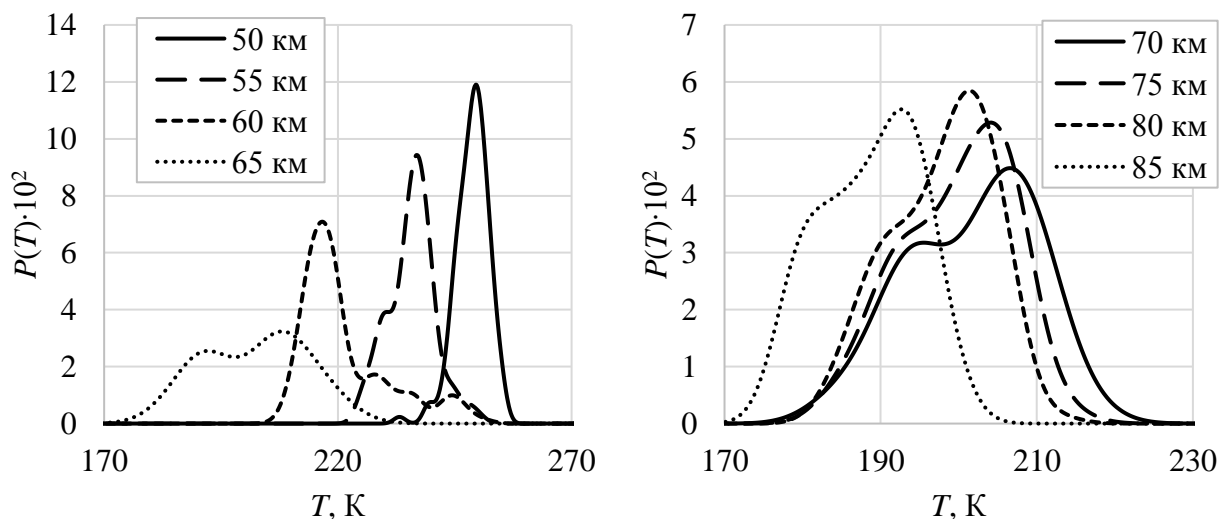


Рисунок 3.1 – Плотность вероятности T для высот $h = 50-85$ км
(день, осень 2009 г., средние широты)

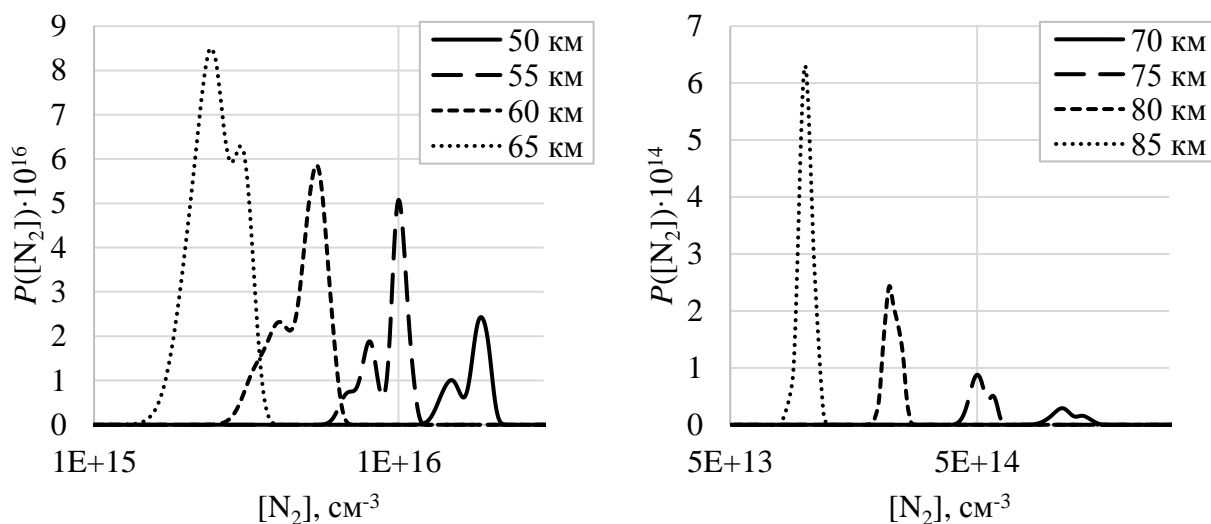


Рисунок 3.2 – Плотность вероятности $[N_2]$ для высот $h = 50-85$ км
(день, осень 2009 г., средние широты)

Как видно из рисунков, полученные кривые в общем случае не соответствуют нормальному закону распределения, и на разных высотах их поведение существенно отличается. Полученные эмпирические функции плотности вероятности напрямую использовались для генерации высотных профилей входных параметров аналогично тому, как это описано в п. 2.3.3.

Для анализа распределений входных параметров были рассмотрены высотные профили функций плотности вероятности. На рисунках 3.3 – 3.6 изображены плотности вероятности температуры нейтралов T в различные сезоны

для двух уровней солнечной активности. Цветом обозначено значение функции плотности вероятности, нормированное на максимальное значение.

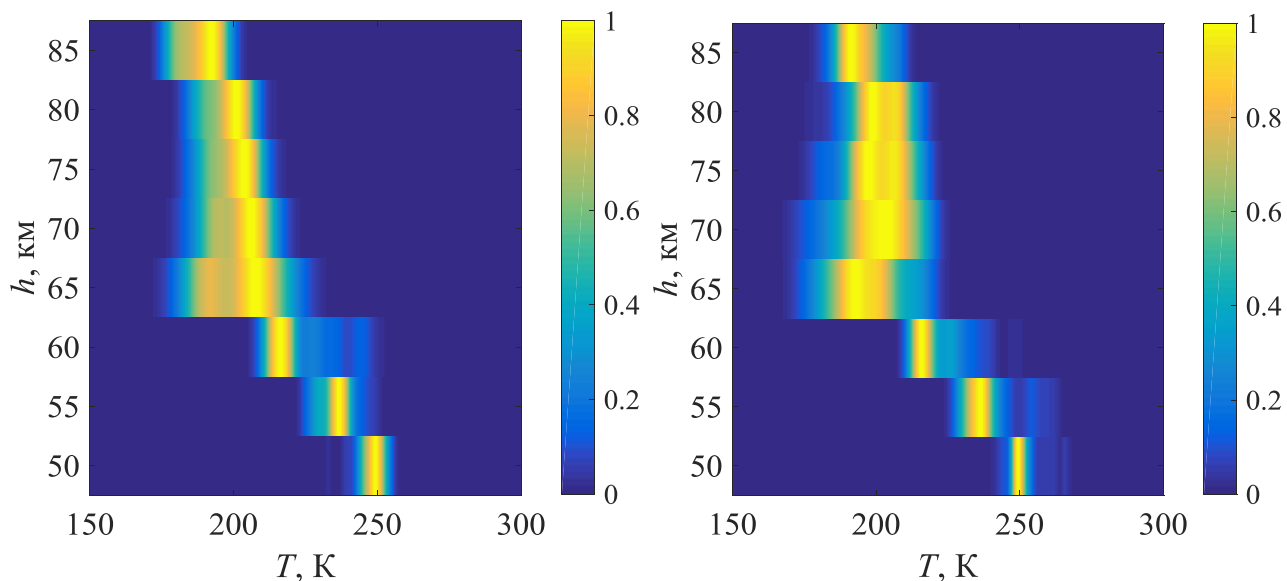


Рисунок 3.3 – Плотность вероятности T на высотах $h = 50\text{--}85$ км во время низкой (слева) и высокой солнечной активности (справа) (осень, день, средние широты)

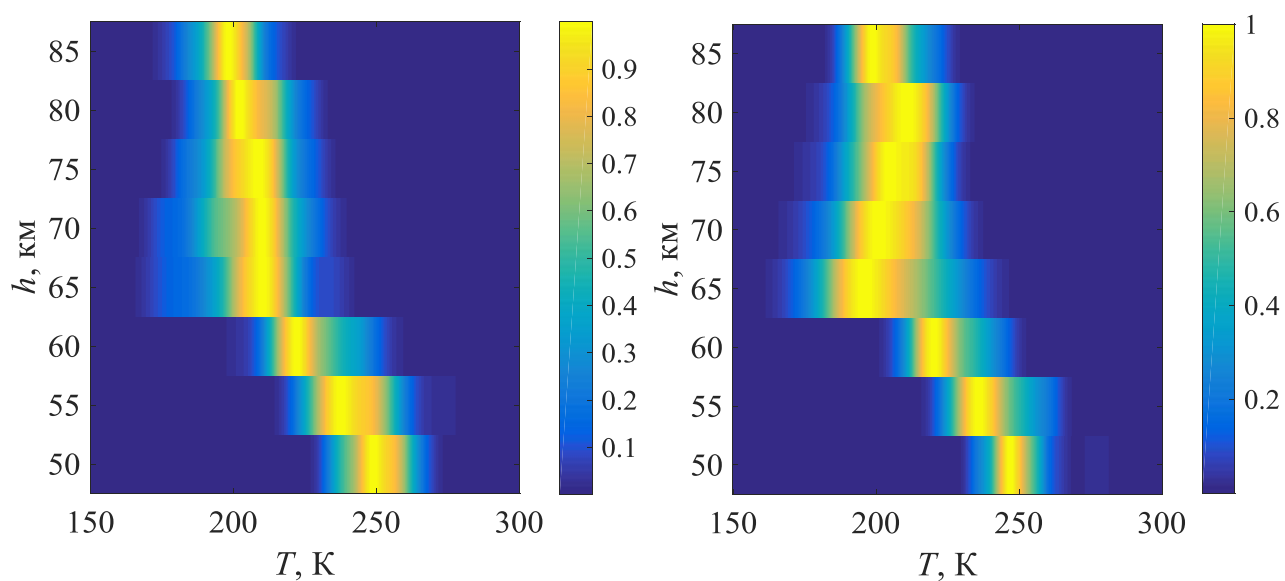


Рисунок 3.4 – Плотность вероятности T на высотах $h = 50\text{--}85$ км во время низкой (слева) и высокой солнечной активности (справа) (зима, день, средние широты)

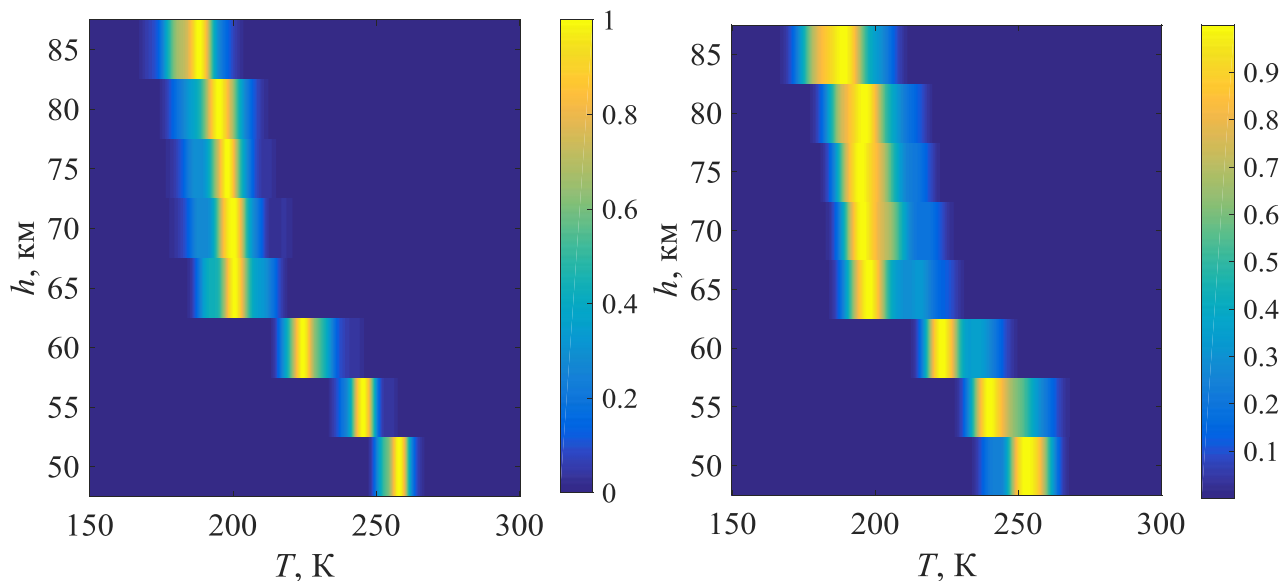


Рисунок 3.5 – Плотность вероятности T на высотах $h = 50\text{--}85$ км во время низкой (слева) и высокой солнечной активности (справа) (весна, день, средние широты)

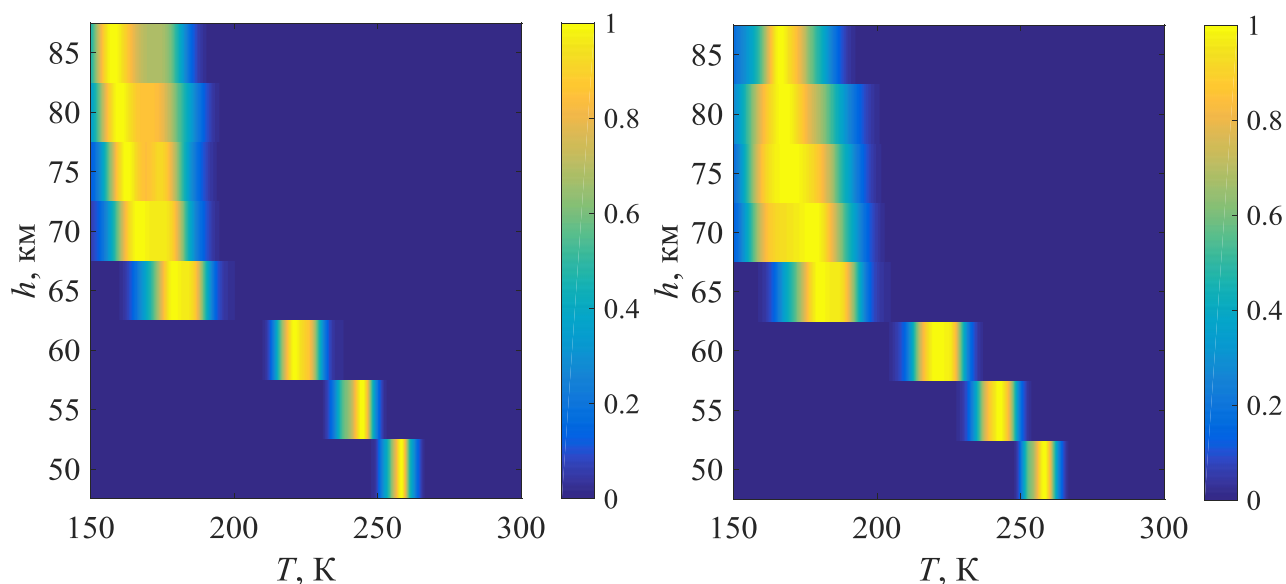


Рисунок 3.6 – Плотность вероятности T на высотах $h = 50\text{--}85$ км во время низкой (слева) и высокой солнечной активности (справа) (лето, день, средние широты)

Как видно из рисунков, разброс данных T при высокой солнечной активности выше, чем при низкой солнечной активности в любой сезон, причем наибольшее отличие наблюдается в диапазоне высот $h = 65\text{--}85$ км. Стоит отметить, что ниже 65 км функции $P(T)$ значительно уже, и, следовательно, колебания рассматриваемого параметра на данных высотах не так существенны. Помимо

этого, обнаружена сезонная зависимость функций плотности вероятности T . Оказалось, что в месяцы осеннего и весеннего равноденствия дисперсия значений меньше, чем в летние и зимние месяцы, это может быть связано с объединением при обработке меньшего количества дней (разбиение по сезонам см. в п. 3.1). Пики распределений в месяцы равноденствия и зимние месяцы довольно близки между собой, а в летний сезон при $h > 65$ км наиболее вероятные значения T существенно ниже, что должно отразиться на значениях электронной концентрации при решении системы уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла.

На рисунке 3.7 представлен высотный профиль $\lg[O_2]$ на двух разных широтах в условиях низкой солнечной активности. Как и следовало ожидать, с приближением к полярной области дисперсия концентрации увеличивается. Аналогичная ситуация наблюдается и при высокой солнечной активности, что видно из рисунка 3.8.

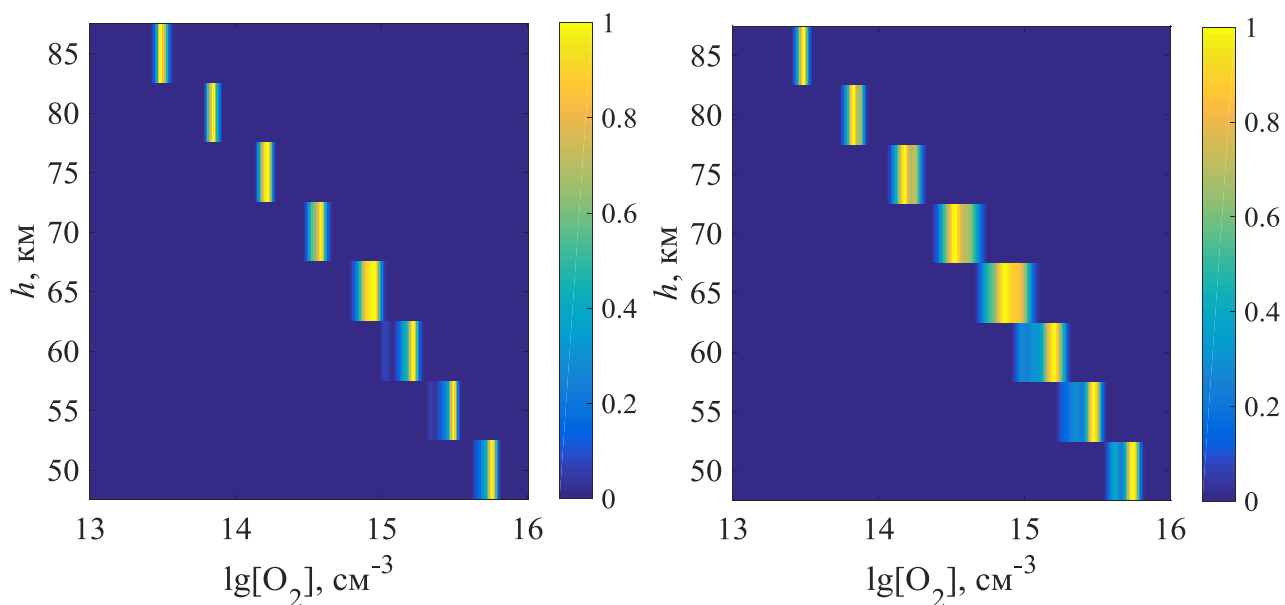


Рисунок 3.7 – Плотность вероятности $[O_2]$ на высотах $h = 50\text{--}85$ км
на 45° с.ш. (слева) и на 60° с.ш. (справа)
(день, осень, низкая солнечная активность)

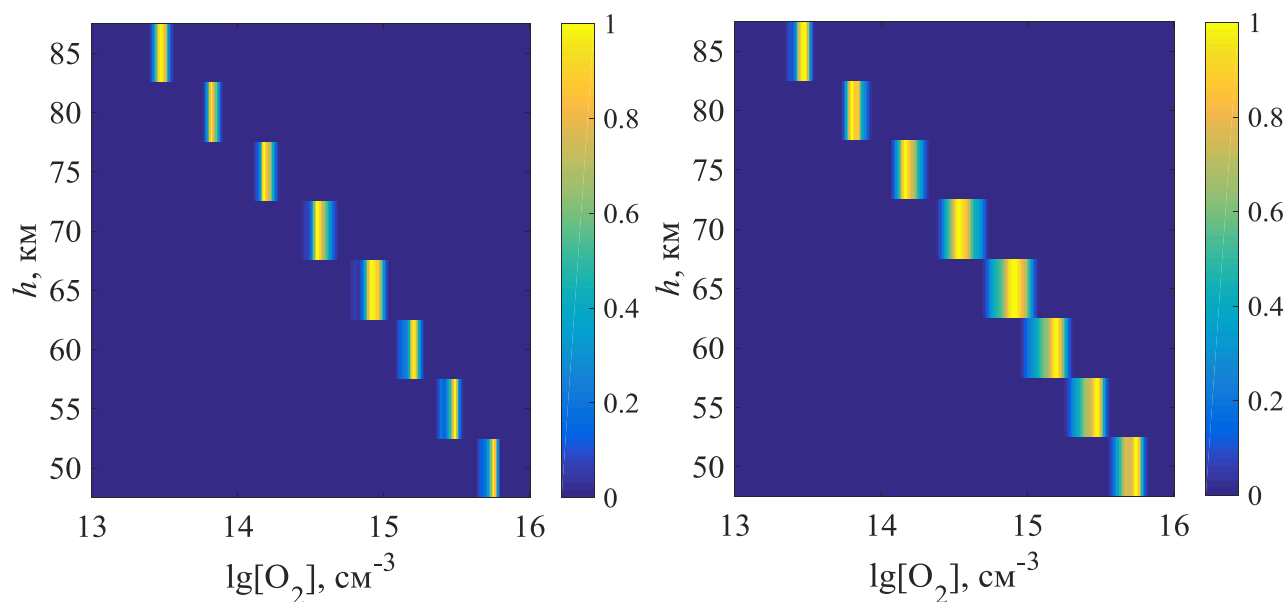


Рисунок 3.8 – Плотность вероятности $[O_2]$ на высотах $h = 50-85$ км
на 45° с.ш. (слева) и на 60° с.ш. (справа)
(день, осень, высокая солнечная активность)

Анализ плотности вероятности концентрации $[H_2O]$ показал равномерный рост дисперсии с высотой (рисунок 3.9).

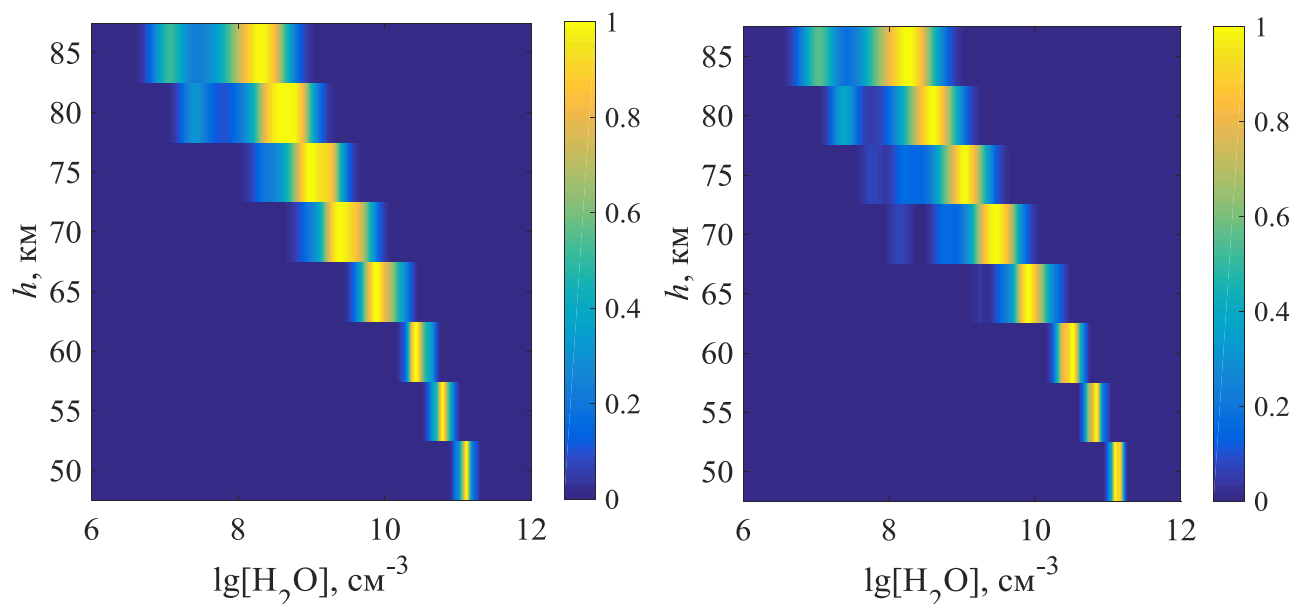


Рисунок 3.9 – Плотность вероятности $[H_2O]$ на высотах $h = 50-85$ км
во время низкой (слева) и высокой солнечной активности (справа)
(день, зима, средние широты)

Поскольку спутниковые данные концентраций малых нейтральных составляющих были даны в единицах [ppmv] (то есть абсолютные значения $[H_2O]$)

имели прямую зависимость от средних значений и среднеквадратических отклонений концентрации среды), можно предположить, что полученный разброс значений $[H_2O]$ на больших высотах связан с разбросом концентраций $[N_2]$ и $[O_2]$. Однако, как видно из рисунков 3.7 – 3.8, это – особенность поведения именно концентрации малой нейтральной составляющей.

При рассмотрении поведения концентраций остальных малых нейтральных составляющих D -области никаких зависимостей, кроме сезонной, широтной и от уровня солнечной активности обнаружено не было.

Отметим, что обработанные спутниковые данные имелись в большом объеме во всех рассматриваемых условиях. Значит, можно утверждать, что столь важные распределения T и $[O_2]$ заданы с максимально возможной точностью.

3.4. Источники ионизации ионосферы на высотах D -области ионосферы.

Расчет скорости ионизации

Наиболее важной и до конца нерешенной проблемой моделирования является отсутствие достоверной и полной информации о поведении одного из наиболее значимых параметров ионизационно-рекомбинационного цикла – скорости ионизации. Для оценки q были рассмотрены основные источники ионизации на высотах D -области ионосферы (Беккер, 2018).

3.4.1. Ионизация космическими лучами

Космические лучи являются единственным источником ионизации нижней части D -области ионосферы на $h \approx 50$ – 65 км. Скорость ионизации космическими лучами прямо зависит от концентрации нейтралов $[M]$, которая, как известно, убывает с высотой. Поэтому выше 65 км вклад космических лучей в ионизацию воздуха не ощутим.

Скорость ионизации нижней ионосферы космическими лучами $q_{кл}$ в зависимости от высоты, солнечной активности и широты можно оценить по

параметризованным уравнениям, полученным Хипсом (Heaps, 1978) и представленным в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Скорость ионизации космическими лучами для различных широт φ и уровней солнечной активности

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

3.4.2. Ионизация NO солнечным излучением в линии L_α ($\lambda = 121.6$ нм)

Вопрос ионизации атмосферы в диапазоне высот $h \approx 65\text{--}85$ км всегда вызывал наибольшую трудность. Дело в том, что излучение $\lambda < 100$ нм не проникает на высоты D -области ионосферы, а кванты с длинами волн выше 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 -ой компоненты нейтрального газа можно оценить по формуле (Брюнелли и Намгаладзе, 1988):

$$q_n(h) = n_n(h) \cdot j_n(h) = n_n(h) \cdot \sigma_{n,\lambda}^{\text{ион}} \cdot F_\lambda^\infty \cdot \exp\left(-\sec \chi \cdot \sum_i \sigma_i^{\text{погл}} \cdot \int_h^{+\infty} n_i(h) dh\right), \quad (3.13)$$

где n_n — концентрация n -ой компоненты, j_n — коэффициент фотоионизации, $\sigma_{n,\lambda}^{\text{ион}}$ — сечение фотоионизации n -ой 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 над h .

Стоит отметить, что формула (3.13) справедлива только для $\chi < 80^\circ$, а при больших зенитных углах $\sec \chi$ необходимо заменить на функцию Чепмена.

Для оценки ионизации NO линией Лайман- α в дневные часы получаем:

$$q_{L_{\alpha}}(h) = \sigma_{NO}^{ион.} \cdot [NO](h) \cdot F_{L_{\alpha}} \cdot \exp\left(-\sigma_{O_2}^{нозл.} \cdot \sec \chi \cdot \int_h^{+\infty} [O_2](h) dh\right). \quad (3.14)$$

Средний поток излучения для дневных часов составляет $F_{L_{\alpha}} = 3.49 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ по измерениям 2009 года (Котов, 2011). Необходимые для расчета сечение поглощения O_2 и сечение ионизации NO имеют значения: $\sigma_{O_2}^{нозл.} = 1.13 \cdot 10^{-20} \text{ см}^{-2}$ и $\sigma_{NO}^{ион.} = 1.86 \cdot 10^{-18} \text{ см}^{-2}$. Зенитный угол Солнца определяется выражением:

$$\cos \chi = \sin \varphi \cdot \sin \delta - \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos(\omega t), \quad (3.15)$$

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

$$\text{tg} \delta = \text{tg} 23.5^\circ \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365}(d-80)\right), \quad (3.16)$$

где d — номер дня в году.

Определение концентрации [NO] — наиболее сложный и важный этап расчета скорости ионизации. Известно, что существуют метод оценки концентрации атмосферной компоненты по мере ее оптической эмиссии (Barth C., 1966; Bailey S.M. et al., 2003; Barth C.A. et al., 2003). В книге (Шефов и др., 2006) исследуется излучение молекулы NO на длине волны 5.3 мкм и показано, что $Q_{5.3} = k \cdot [NO]$, где $Q_{5.3}$ — мера эмиссии NO на длине волны 5.3 мкм, а k — коэффициент пропорциональности, который является сложной функцией концентраций нейтральных, заряженных, возбужденных составляющих ионосферы и констант скоростей реакций, часть которых просто 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 года измеряется радиометром SABER, установленным на спутнике TIMED [http://saber.gats-inc.com/browse_data.php]. Таким образом, в различных гелиогеофизических условиях осталось определить опорные средние профили [NO], которые будут

разыграны на основании спутниковых данных оптической эмиссии NO на длине волны 5.3 мкм.

В 60–70 гг. прошлого века была проведена серия ракетных экспериментов по измерению [NO] (Данилов и Ледомская, 1984а; Данилов и Ледомская, 1984б), однако использовать какой-либо единичный экспериментальный профиль было бы как минимум некорректно. Усреднять полученные значения также не представляется возможным, поскольку экспериментов было проведено чуть более 10, 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], и, следовательно, по концентрациям O₂ и N₂ со спутника AURA можно рассчитать профили для любых гелиогеофизических условий в рассматриваемый период. В качестве альтернативного варианта в диапазоне средних широт для высот менее 90 км можно использовать приближение «Abby Normal», предложенное в работе (Schumer, 2009) и определяемое выражением:

$$[\text{NO}] = \frac{[\text{O}]}{2 \cdot 10^4} + \frac{[\text{O}_2]}{2 \cdot 10^7}, \quad (3.17)$$

что также не ставит ограничений в определении концентрации для различных условий. Сопоставление обсуждаемых высотных профилей [NO], соответствующих дневным часам месяцев осеннего равноденствия 2009 года и средним широтам, приведено на рисунке 3.10. Как видно, отличия между профилями начинаются только при $h > 75$ км, при этом порядки величин совпадают во всем рассматриваемом высотном диапазоне.

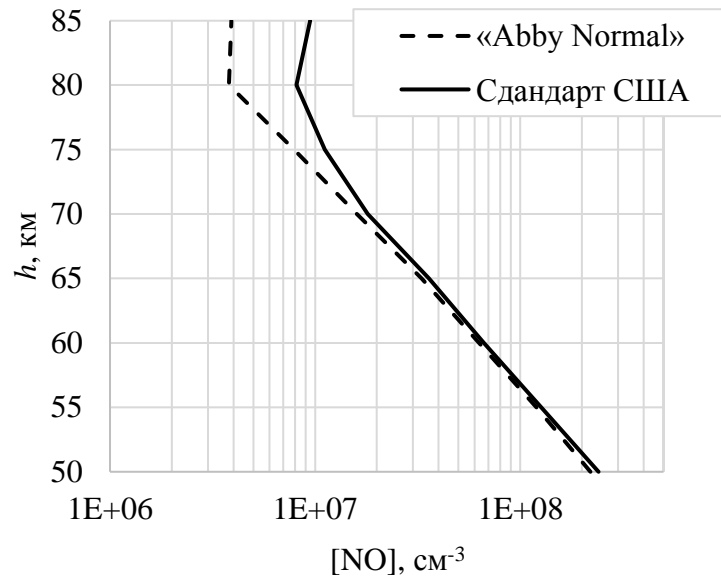


Рисунок 3.10 – Средние высотные профили $[NO]$ (день, осень 2009 г., средние широты)

В ночные часы источником фотоионизации является излучение Солнца, рассеянное на ночную сторону. В (Thomas and Bowman, 1985) предложена аппроксимация ночного потока, при которой последние два множителя формулы (3.14) заменяются функцией зенитного угла и высоты, в результате чего формула скорости ионизации принимает вид:

$$q_{L_{\alpha}}^{\text{ночная}}(h) = \sigma_{NO}^{\text{ион.}} \cdot [NO](h) \cdot \frac{4.9 \cdot 10^8}{\cos^2 \chi + 0.1} \cdot \exp[-0.48 \cdot \exp(0.15(85-h)-1)]. \quad (3.18)$$

3.4.3. Ионизация $O_2(^1\Delta_g)$ в диапазоне $\lambda = 102.7\text{--}111.8$ 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., 1972) предложено аппроксимировать аналитическим выражением:

$$q_{y\phi}(h) = [\text{O}_2(^1\Delta_g)] \cdot \left(0.549 \cdot 10^{-9} \cdot \exp\left(-2.406 \cdot 10^{-20} \cdot \int_h^{+\infty} [\text{O}_2](h) dh\right) + \right. \\ \left. + 2.614 \cdot 10^{-9} \cdot \exp\left(-8.508 \cdot 10^{-20} \cdot \int_h^{+\infty} [\text{O}_2](h) dh\right) \right). \quad (3.19)$$

Для расчетов использован усредненный экспериментальный профиль $\text{O}_2(^1\Delta_g)$ из работы (Paulsen et al., 1972).

3.4.4. 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 L_α . Тем не менее уже стало понятно, что высыпавшиеся электроны с энергиями в несколько десятков кэВ вносят значительный вклад в ионизацию ночной области D даже на средних широтах. Для учета скорости ионообразования, обусловленной воздействием энергичных электронов использованы оценки, предложенные в работе (Кошелев, 1983).

Заметим, что 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 и Репнев, 2009; Krivolutsky et al., 2017).

3.4.5. Суммарная ионизация

Средние значения суммарной ионизации, полученные в результате учета перечисленных выше источников ионизации для дневных и ночных часов, представлены на рисунке 3.11. Расчеты выполнены с использованием профиля $[\text{NO}]$, предложенного в работе (Anderson et al., 1986).

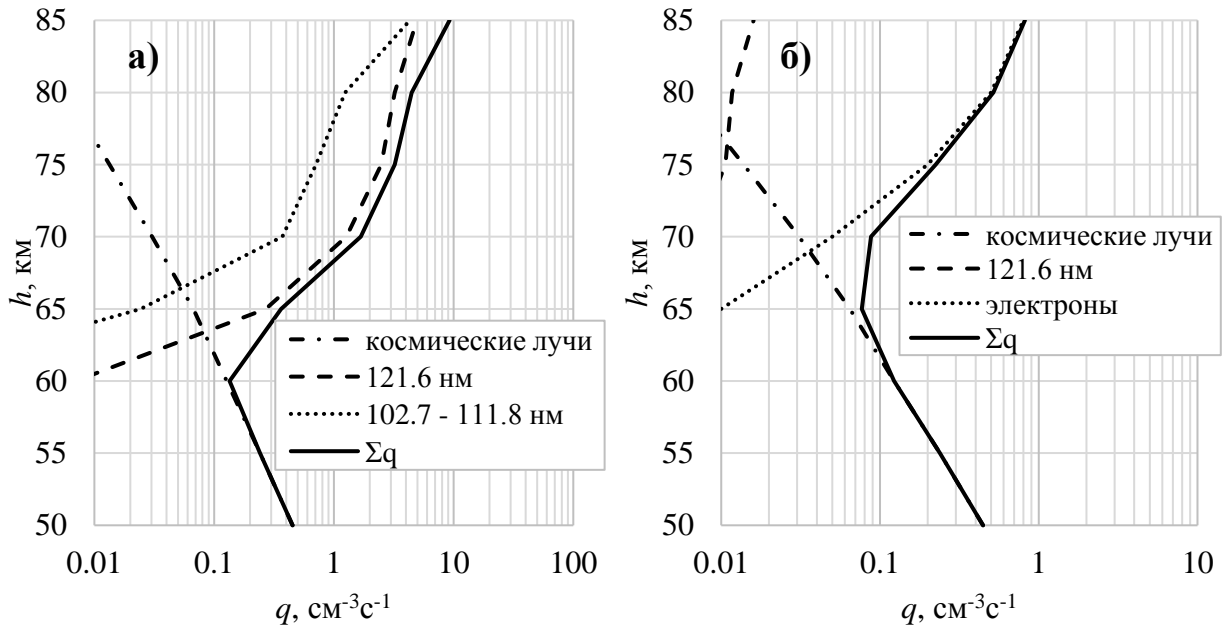


Рисунок 3.11 – Средние значения скорости ионизации различными источниками в дневные часы (а) и ночные часы (б) (осень 2009 г., средние широты)

Как видно из графиков, ионизация космическими лучами на больших широтах практически не имеет суточной и сезонной зависимости. В дневные часы уже на 65 км становится существенной ионизация NO линией Лайман- α , еще выше появляется ионизация $\text{O}_2(^1\Delta_g)$ в УФ диапазоне, и примерно на 85 км последняя начинает преобладать над ионизацией NO, но затем резко падает. Несмотря на это, общая ионизация E-области продолжает расти за счет ионизации молекул O_2 линией Лайман- β . В ночные часы, начиная примерно с 65 км, D-область ионизируется за счет потока высокоэнергичных электронов, высыпаящихся из радиационных поясов. Как оказалось, ночная ионизация NO здесь практически не ощутима.

На рисунке 3.12 представлена сезонная зависимость суммарной скорости ионизации. Во всем высотном диапазоне величина \bar{q} преобладает в летние месяцы, а в месяцы осеннего и весеннего равноденствия значения практически совпадают между собой и меньше летних приблизительно на 20%. В зимние месяцы выше 60 км ионизация существенно ниже и в дневные, и в ночные часы, и основной вклад в эту разницу вносит величина q_{L_α} .

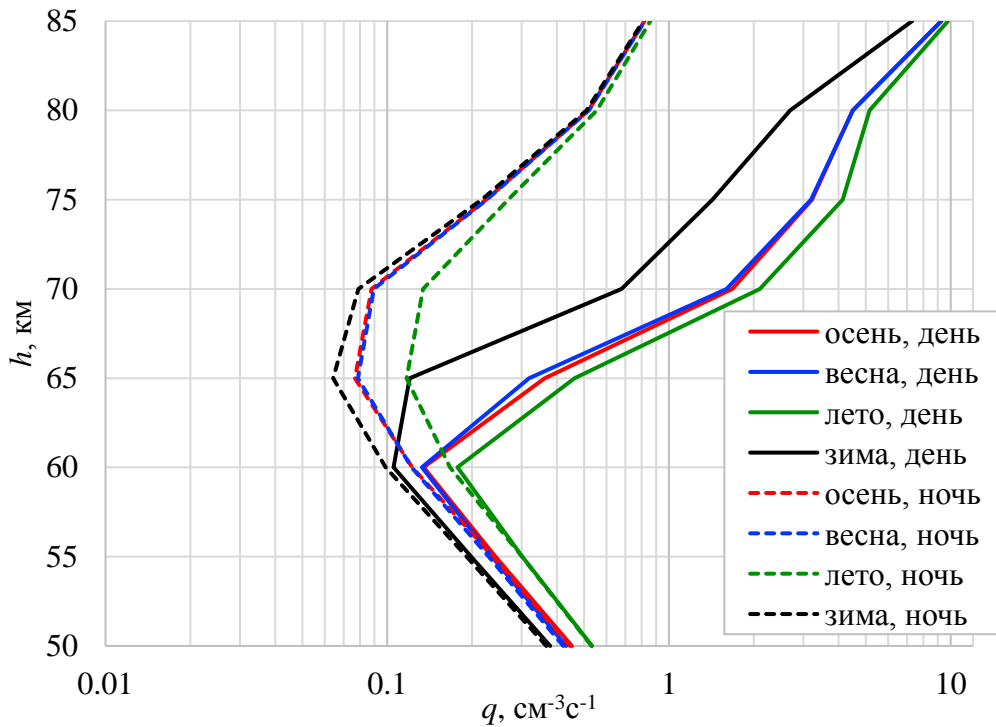


Рисунок 3.12 – Средние значения суммарной скорости ионизации в различные сезоны и времена суток (2009 г., средние широты)

Распределения концентраций $[NO]$ и $[M]$ во всем высотном диапазоне позволили получить распределения суммарной скорости ионизации в различных гелиогеофизических условиях. В качестве примера на рисунке 3.13 приведены функции плотности вероятности q в дневные часы месяцев осеннего равноденствия 2009 года. Данные распределения, как и распределения остальных входных параметров модели, используются для генерации высотных профилей, которые подставляются в систему дифференциальных уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла.

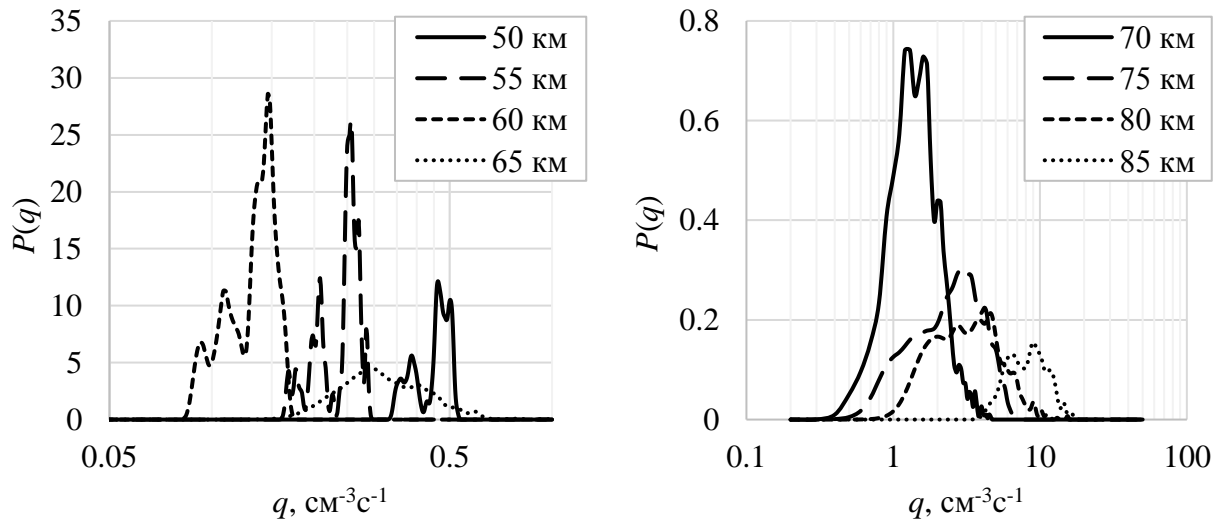


Рисунок 3.13 – Плотность вероятности q для высот $h = 50\text{--}85$ км
(день, осень 2009 г., средние широты)

На рисунках 3.14–3.17 изображены высотные профили плотности вероятности q в осенний и летний сезон в условиях различной солнечной активности.

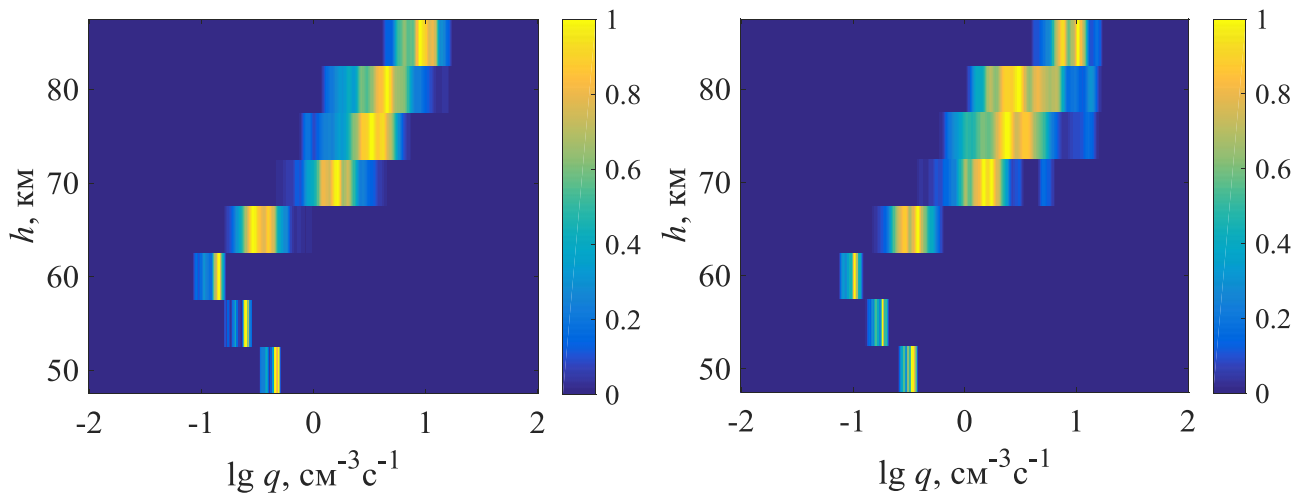


Рисунок 3.14 – Плотность вероятности q на высотах $h = 50\text{--}85$ км
во время низкой (слева) и высокой солнечной активности (справа)
(день, осень, средние широты)

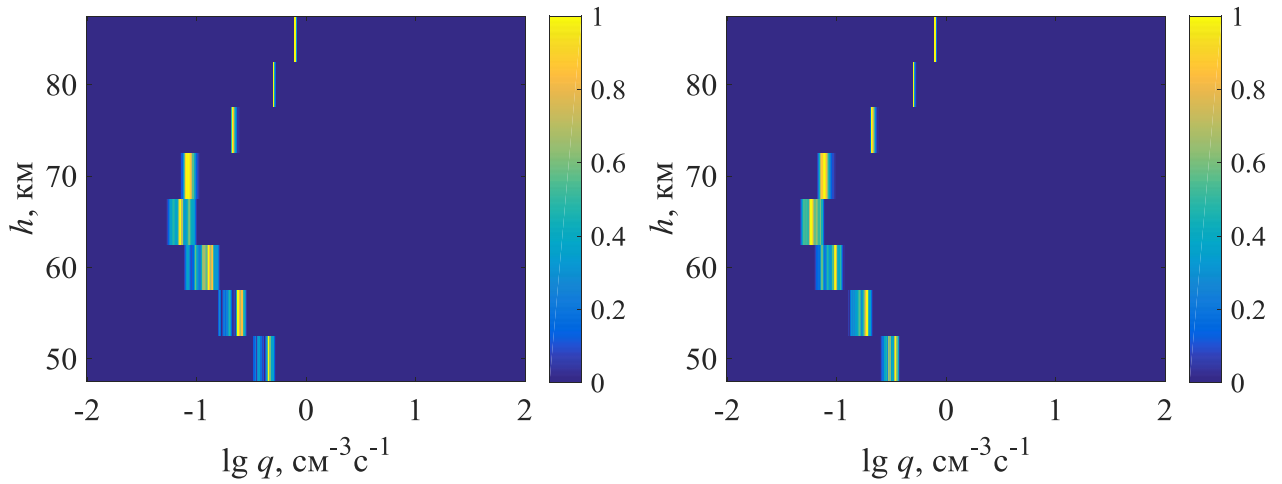


Рисунок 3.15 – Плотность вероятности q на высотах $h = 50\text{--}85$ км во время низкой (слева) и высокой солнечной активности (справа) (ночь, осень, средние широты)

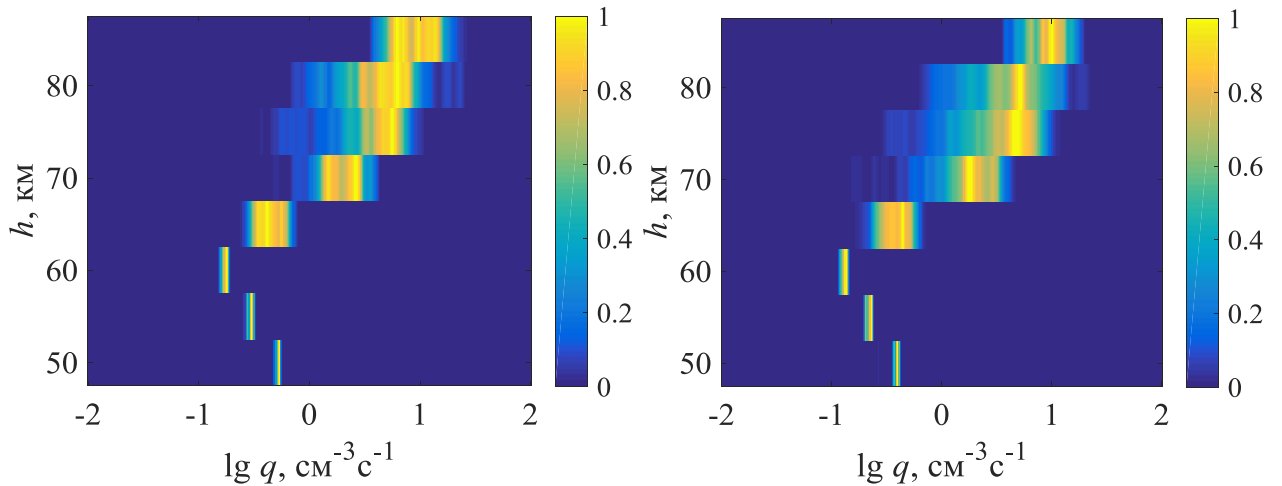


Рисунок 3.16 – Плотность вероятности q на высотах $h = 50\text{--}85$ км во время низкой (слева) и высокой солнечной активности (справа) (день, лето, средние широты)

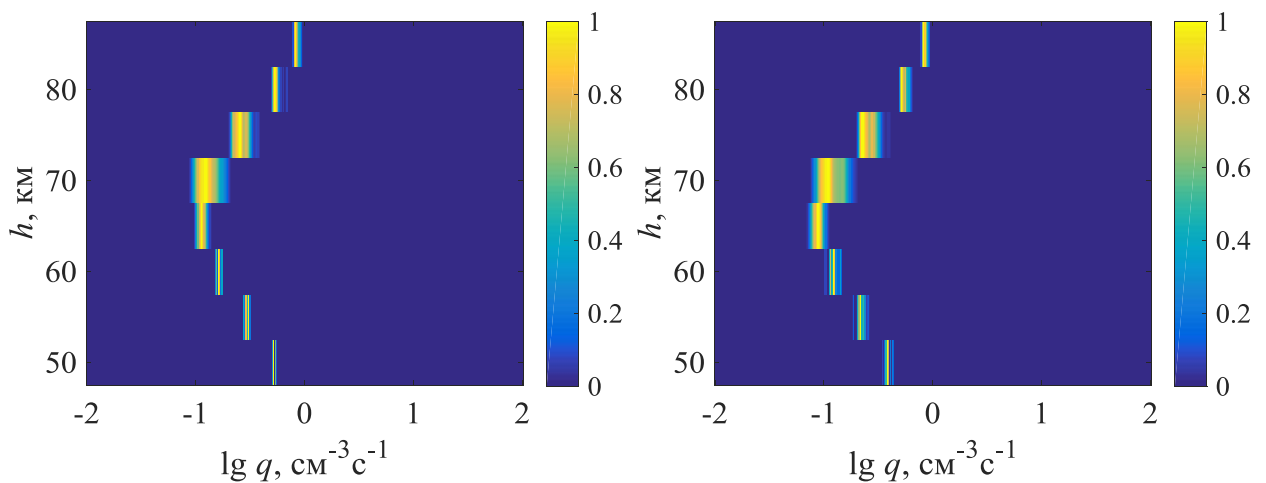


Рисунок 3.17 – Плотность вероятности q на высотах $h = 50\text{--}85$ км во время низкой (слева) и высокой солнечной активности (справа) (ночь, лето, средние широты)

На высотах, где за ионизацию отвечают космические лучи, разброс величин в дневное и ночное время почти не отличается, однако наблюдается сезонная зависимость. Например, оказалось, что в летние месяцы ниже 65 км значения q заданы намного точнее, чем в месяцы осеннего равноденствия. Очевидно, ионизация космическими лучами определяется функцией распределения концентрации среды $[M]$. Действительно, как видно из рисунка 3.18, на данных высотах летнее значение концентрации $[M]$ имеет заметно меньшие вариации, чем зимнее и осеннее.

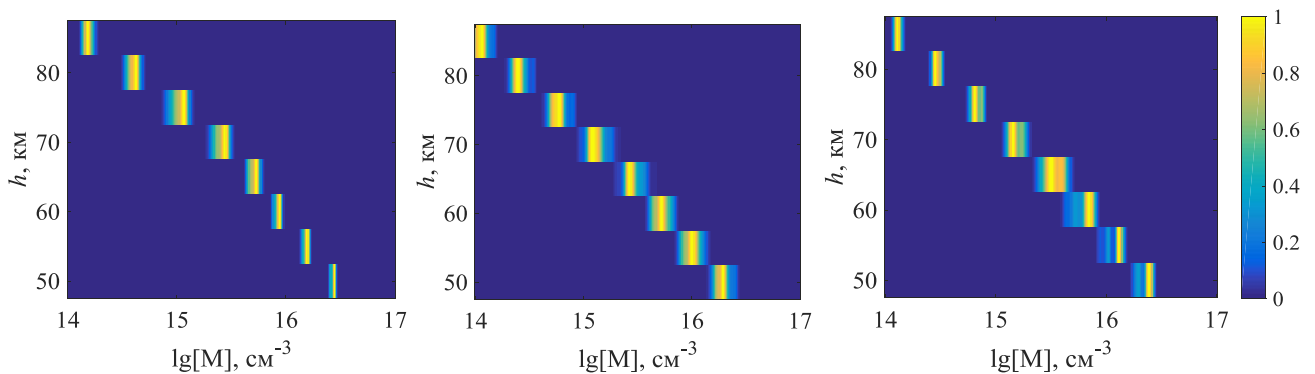


Рисунок 3.18 – Плотность вероятности $[M]$ на высотах $h = 50\text{--}85$ км летом (слева), зимой (по центру) и в месяцы осеннего равноденствия (справа) (день, низкая солнечная активность, средние широты)

Наибольшие вариации скорости ионизации в дневные часы (рисунки 3.14, 3.16) наблюдаются на высотах $h > 65$ км, где ионизируется молекула NO. Как было отмечено в п. 3.4.2, распределения $[NO]$ определялись по спутниковым данным оптической эмиссии молекулы NO на длине волны 5.3 мкм. Помимо реальных физических вариаций концентрации окиси азота, ощутимый вклад в дисперсию мог внести метод, используемый при обработке экспериментальных данных. Дело в том, что лимбовый радиометр SABER измеряет уходящее излучение горизонта планеты, а значит, спутник получает величину поверхностного свечения в ИК области спектра. Однако в открытом доступе на сайте спутника TIMED представлены данные, уже пересчитанные в объемные единицы $\left[\frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^3} \right]$. Такой пересчет был сделан при грубом допущении: значения каждого рассматриваемого профиля присваивались всей области интегрирования по толщине излучаемого

слоя (Russel et al., 1999; Mlynczak et al., 2007). Это могло существенно сказаться на разбросе значений $[\text{NO}]$.

В ночные часы (рисунки 3.15, 3.17) основные вариации скорости ионизации наблюдаются на высотах 60–70 км. Из рисунка 3.11б следует, что они вызваны колебанием концентрации $[\text{NO}]$. Ионизация высокоэнергичными частицами в работе не варьировалась в виду отсутствия данных. Поэтому в ночное время практически отсутствует разброс q в верхней части D -области ионосферы.

3.5. Анализ результатов расчетов концентрации электронов по вероятностной плазмохимической модели

3.5.1. Сходимость плотности вероятности концентрации электронов, полученной по вероятностной плазмохимической модели

Расчет электронной концентрации осуществлялся по пятикомпонентной системе дифференциальных уравнений (3.1)–(3.5), включающей в качестве выходных параметров концентрации Ne , $[\text{NO}^+]$, $[\text{O}_2^-]$, $[\text{XY}^+]$, $[\text{XY}^-]$. С шагом в 5 км по высоте согласно уже полученным плотностям вероятности было сгенерировано N наборов входных профилей. С каждым набором решалась система уравнений, и на выходе было получено N профилей концентрации Ne . Как и при разработке эмпирически-статистических моделей, была исследована сходимость плотности вероятности Ne во всех рассматриваемых гелиогеофизических условиях. На рисунке 3.19 представлена зависимость плотности вероятности Ne от количества итераций на двух высотах. Оказалось, что в данной модели $N = 1000$ также достаточно для сходимости решения и корректного построения распределений.

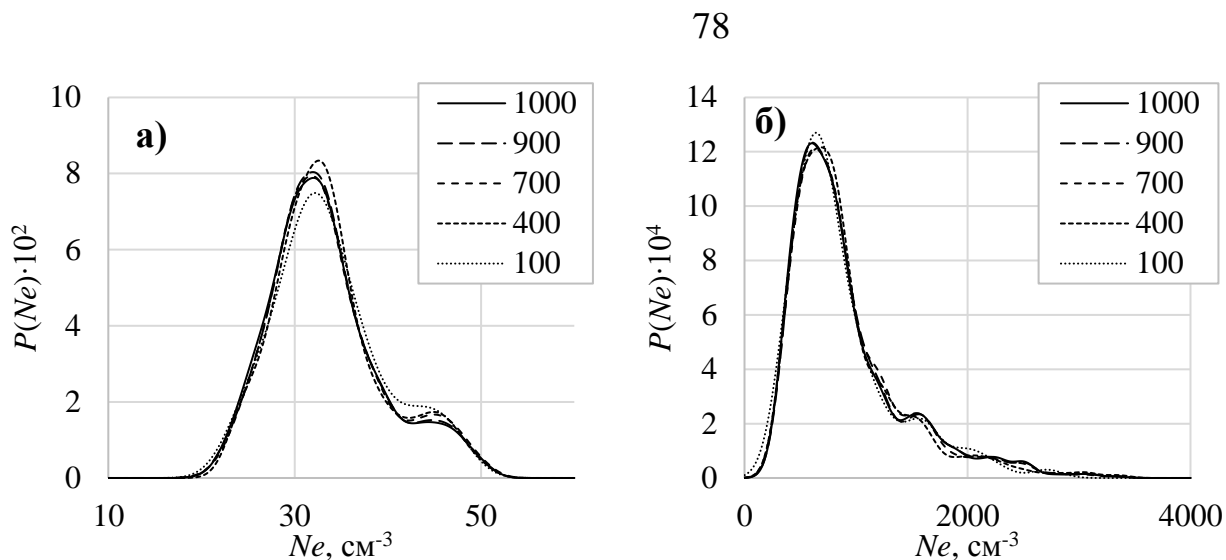


Рисунок 3.19 – Плотность вероятности Ne для $h = 60$ км (а) и $h = 80$ км (б)
(день, осень 2009 г., средние широты)

3.5.2. Сопоставление результатов расчетов $Ne(h)$, полученных по вероятностной плазмохимической модели и по банкам данных Ne

На рисунке 3.20 приведены полученные по В-П модели дневные значения Ne для двух разных профилей $[NO]$ («Abby Normal» и Стандарт США), изображенных на рисунке 3.10. Как и ожидалось, полученные профили Ne на всех высотах отличаются менее чем в 2 раза, поэтому далее будут приводиться результаты с использованием только профилей $[NO]$ из Стандарта США и обозначаться на графиках как «В-П модель».

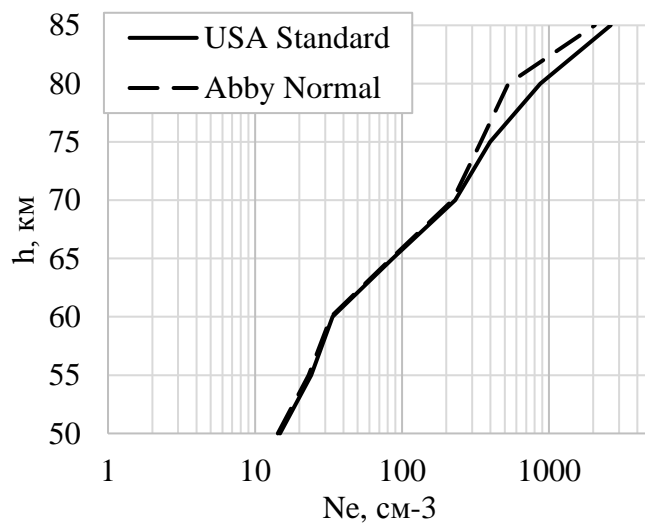


Рисунок 3.20 – Средние профили Ne , полученные с использованием разных профилей $[NO]$
(день, осень 2009 г., средние широты)

Поскольку плотности вероятности электронной концентрации из ГОСТ и Каталога в общем случае не являются симметричными функциями, необходимо провести сопоставительный анализ не средних значений N_e , а медианных. Однако из-за малого объема данных, соответствующих ночному времени суток, медианные значения ночных концентраций использовать некорректно. В то же время, результаты из таблиц 2.7 и 2.8 в ночные часы демонстрируют неплохое соответствие нормальному закону распределения, поэтому далее при сопоставлении результатов моделей ночные значения N_e усредняются, а по дневным N_e рассчитывается медиана.

Результаты сопоставления профилей концентрации электронов, полученных по вероятностно-статистической и эмпирически-статистическим моделям в условиях низкой солнечной активности, представлены на рисунках 3.21 и 3.22.

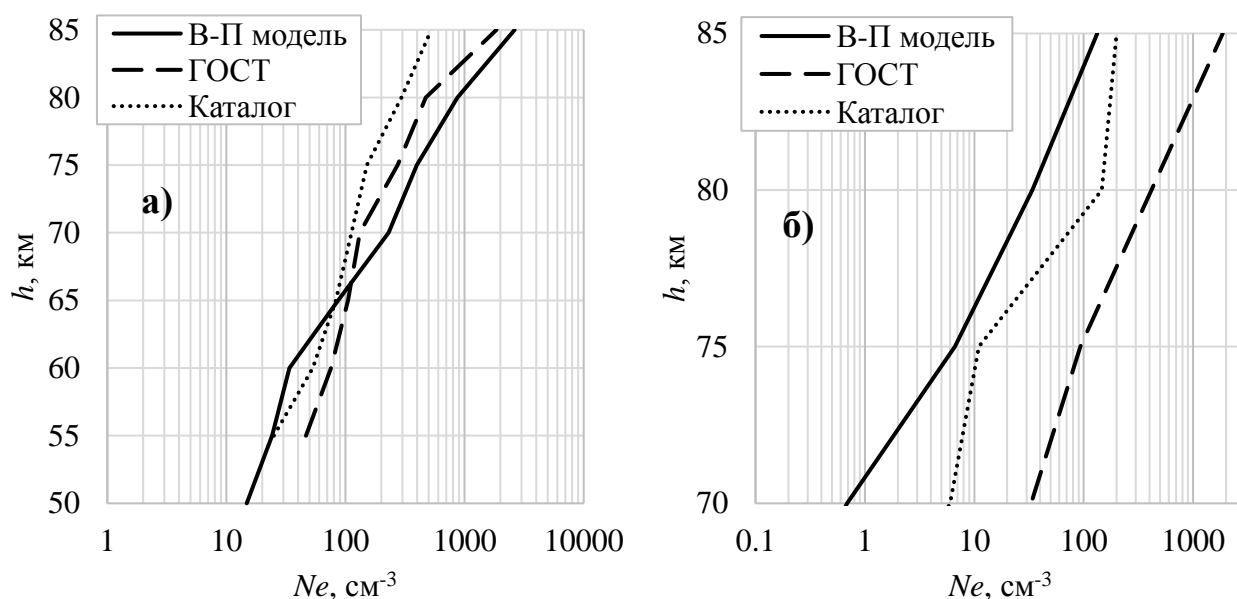


Рисунок 3.21 – Средние профили N_e для дневных (а) и ночных часов (б)
(осень, низкая солнечная активность, средние широты)

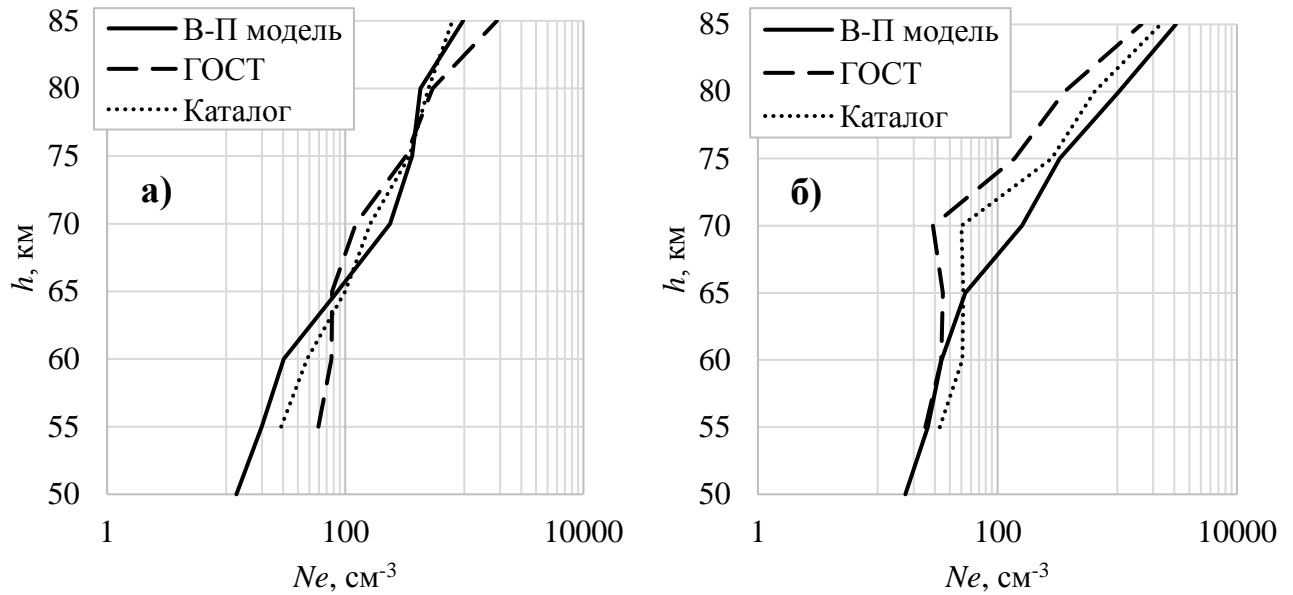


Рисунок 3.22 – Средние профили Ne для летних (а) и зимних месяцев (б)
(день, низкая солнечная активность, средние широты)

Сразу обратим внимание, что, несмотря на относительно низкие значения средней скорости ионизации, полученной по В-П модели в зимние месяцы (рисунок 3.12), зимнее значение Ne превосходит летнее за счет сезонного изменения T , описанного в п. 3.3.

В дневные часы осенних месяцев наблюдается очень неплохое согласие В-П модели и данных ГОСТ во всем рассматриваемом диапазоне высот (рисунок 3.21а). В летние месяцы ситуация схожая (рисунок 3.22а), в зимние месяцы согласие хуже, при этом максимум расхождения приходится на высоту ~ 70 км (рисунок 3.22б). В зимний период к результатам В-П модели ближе находятся данные Каталога, а не данные ГОСТ.

В ночные часы средние значения Ne отличаются на 1–2 порядка (рисунок 3.21б). Предположительно это связано с неучетом важного источника ионизации неосвещенной ионосферы и, как следствие, неточным заданием профиля q в вероятностной плазмохимической модели.

На рисунках 3.23 и 3.24 представлено сопоставление результатов при высокой солнечной активности. Оказалось, что в дневные часы месяцев равноденствия и зимних месяцев В-П модель и данные ГОСТ согласуются лучше,

чем при низкой солнечной активности. В летние месяцы согласие результатов В-П модели с обоими банками данных заметно ухудшилось.

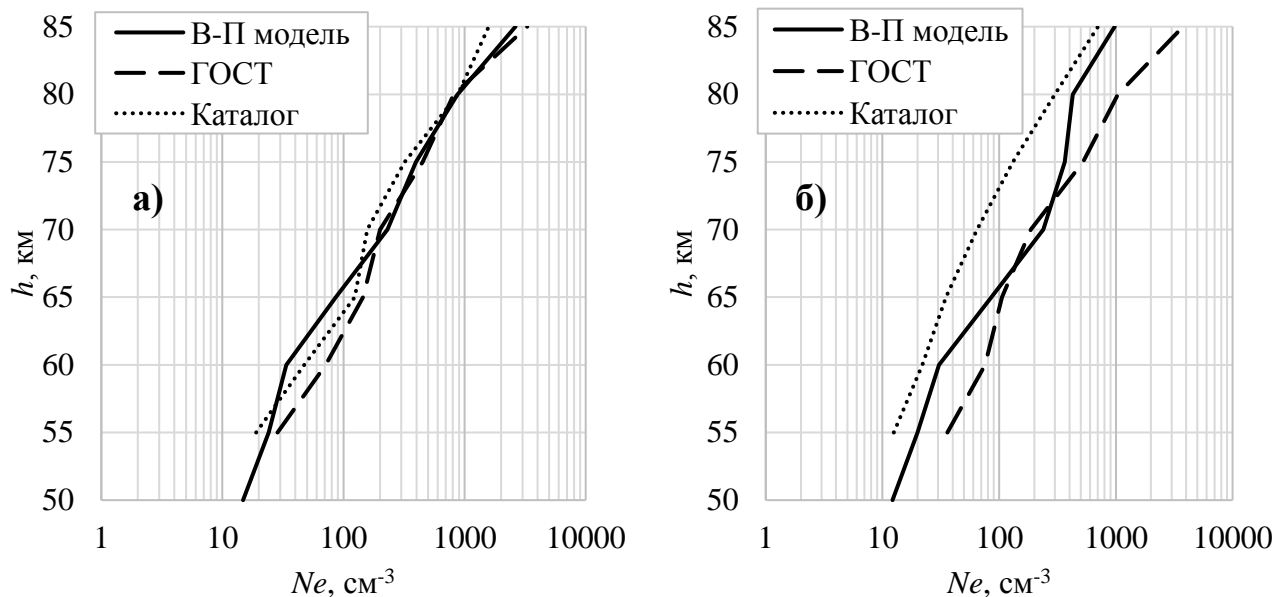


Рисунок 3.23 – Средние профили N_e для осенних (а) и летних месяцев (б)
(день, высокая солнечная активность, средние широты)

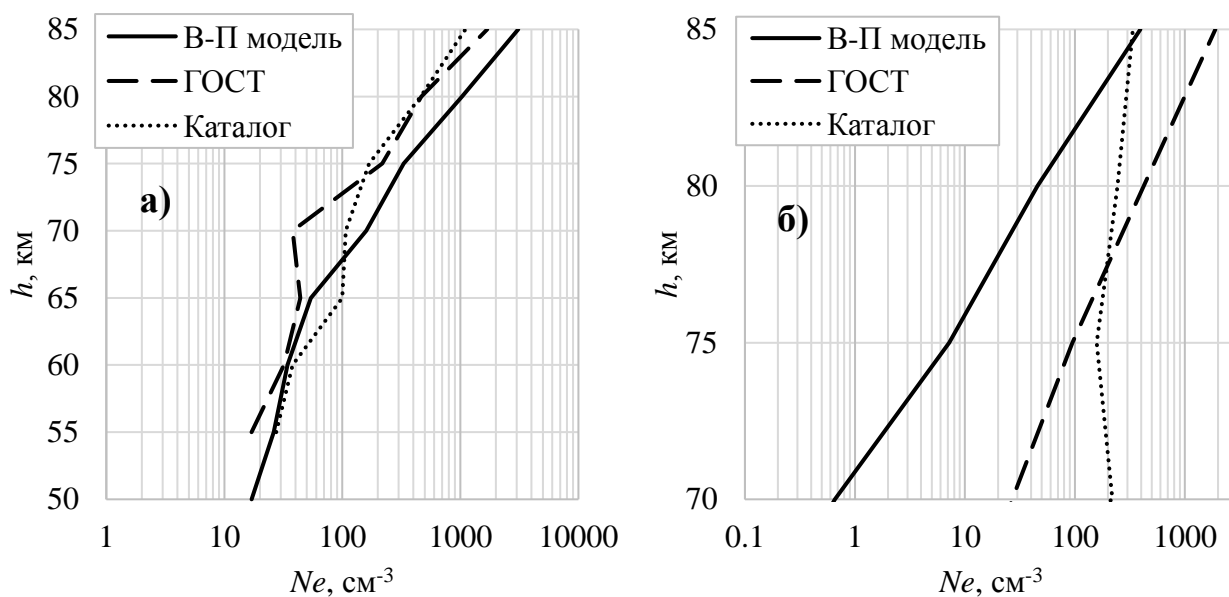


Рисунок 3.24 – Средние профили N_e для дневных (а) и ночных часов (б)
(зима, высокая солнечная активность, средние широты)

В Каталоге отсутствуют данные N_e для ночных часов в месяцы равноденствия при высокой солнечной активности (таблица 2.3), поэтому здесь для анализа ночных профилей N_e были выбраны зимние месяцы (рисунок 3.24б).

Результаты вероятностной плазмохимической модели почти во всем высотном диапазоне принципиально ниже значений из банков данных, поэтому можно считать, что эта модель в ночных условиях на данный момент не работоспособна.

3.5.3. Сопоставление функций плотности вероятности $Ne(h)$, полученных по вероятностной плазмохимической модели и по банкам данных Ne

Выходными параметрами вероятностно-статистических моделей D -области ионосферы являются не средние (или медианные) значения величины Ne , а ее плотности вероятности $P(Ne)$.

В качестве примера рассмотрим функции плотности вероятности Ne в дневные часы осенних месяцев при низкой солнечной активности на высотах 60 км и 65 км. Кривые плотности вероятности представлены на рисунке 3.25.

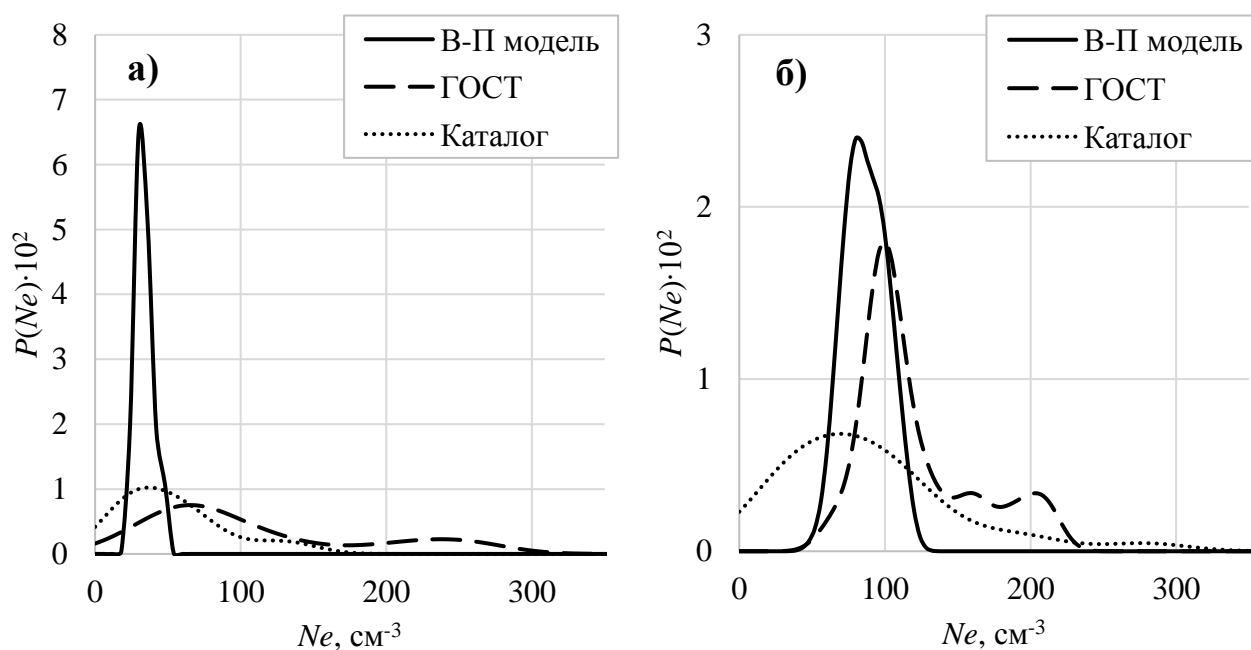


Рисунок 3.25 – Плотность вероятности Ne для $h = 60$ км (а) и $h = 65$ км (б)
(день, осень, низкая солнечная активность, средние широты)

Заметим, что на рисунке 3.21а при $h = 60$ км $Ne_{ГОСТ}$ превосходит $Ne_{В-П}$, однако из рисунка 3.25 видно, что это смещение связано с «тяжелым хвостом» функции плотности вероятности $Ne_{ГОСТ}$, при этом максимальные значения распределений находятся значительно ближе друг к другу по сравнению с медианными

значениями (рисунок 3.21а). На некоторых высотах, например, $h = 65$ км, медианные значения достаточно близки к наиболее вероятным величинам, несмотря на то, что функции плотности вероятности не описываются нормальным законом распределения.

На рисунке 3.26 приведены значения $P(Ne)$, соответствующие летним месяцам и низкой солнечной активности на двух высотах — 70 и 80 км. Обратим внимание, что на рисунке 3.22а при $h = 70$ км $Ne_{\text{Каталог}} > Ne_{\text{ГОСТ}}$, а наиболее вероятные величины ведут себя противоположно, то есть $Ne_{\text{Каталог}} < Ne_{\text{ГОСТ}}$ (рисунок 3.26а). В то же время на 80 км и медианные значения, и функции плотности вероятности Ne по всем трем моделям оказались очень близки.

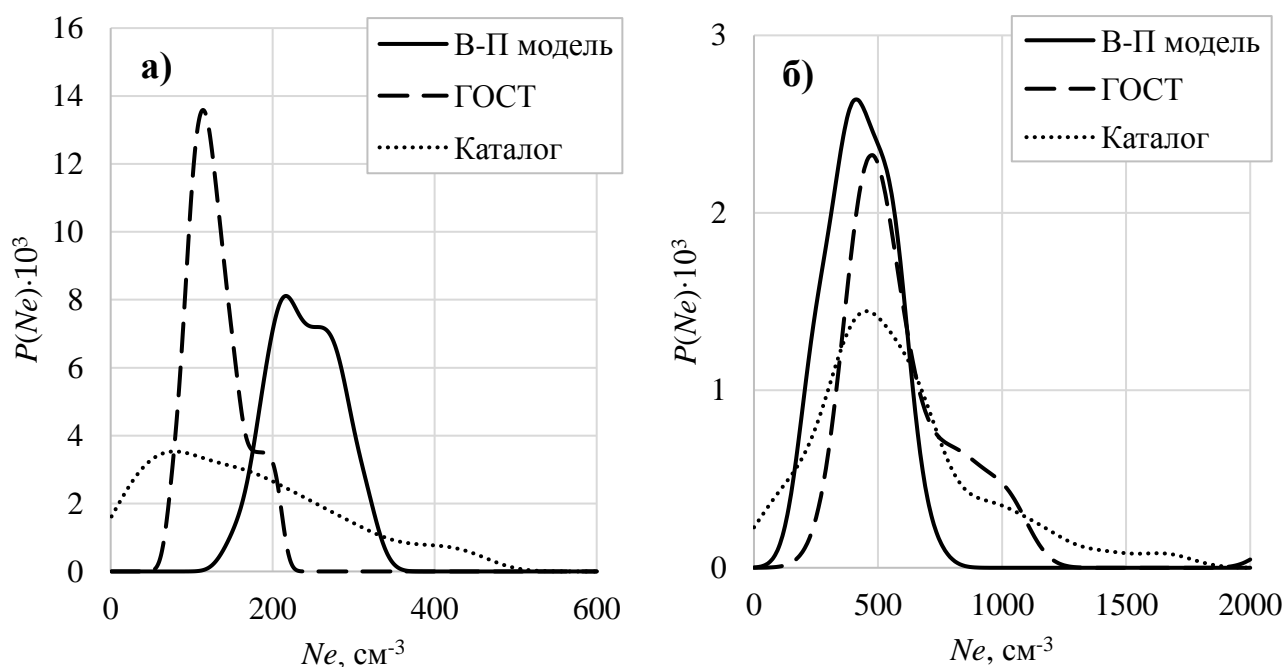


Рисунок 3.26 – Плотность вероятности Ne для $h = 70$ км (а) и $h = 80$ км (б)

(день, лето, низкая солнечная активность, средние широты)

На рисунке 3.27 изображены распределения по данным зимних месяцев при низкой солнечной активности. Для анализа выбраны близкие высоты $h = 75$ км и $h = 80$ км, при этом на меньшей из них плотности вероятности находятся в полном согласии с медианными значениями (рисунок 3.22б), а на 80 км тяжелый хвост функции, построенной по В-П модели, сместил медианное значение вправо, при этом максимумы распределений В-П модели и Каталога визуальнo совпадают.

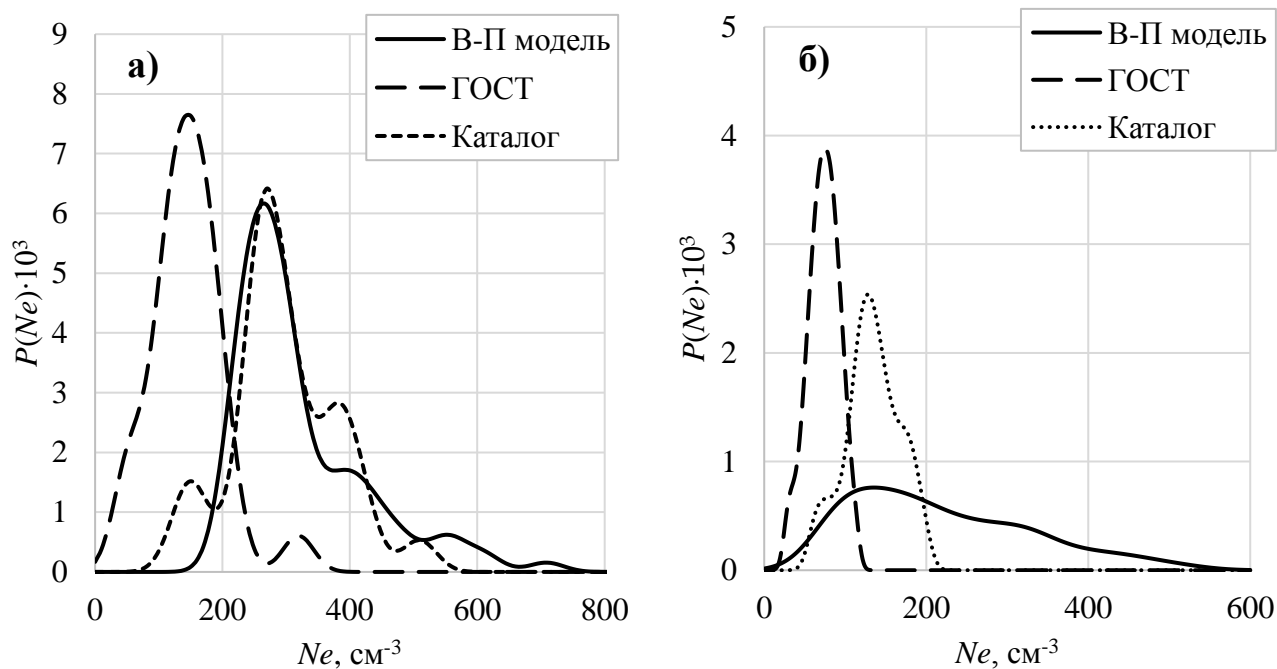


Рисунок 3.27 – Плотность вероятности Ne для $h = 75 \text{ км}$ (а) и $h = 80 \text{ км}$ (б)
(день, зима, низкая солнечная активность, средние широты)

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что средних (медианных) профилей Ne недостаточно для корректного описания среды. Более того, медианные значения электронной концентрации могут существенно отличаться от наиболее вероятных величин.

Для анализа высотных профилей плотности вероятности Ne были построены рисунки 3.28 – 3.31. Все три полученные модели демонстрируют принципиально разный характер результатов. Наибольшие дисперсии концентрации Ne наблюдаются у данных Каталога в любой сезон и при любом уровне солнечной активности. Данные из ГОСТ наименее устойчивы в нижней части D -области, данные В-П модели – в верхней. Полученные плотности вероятности Ne от солнечной активности зависят несущественно.

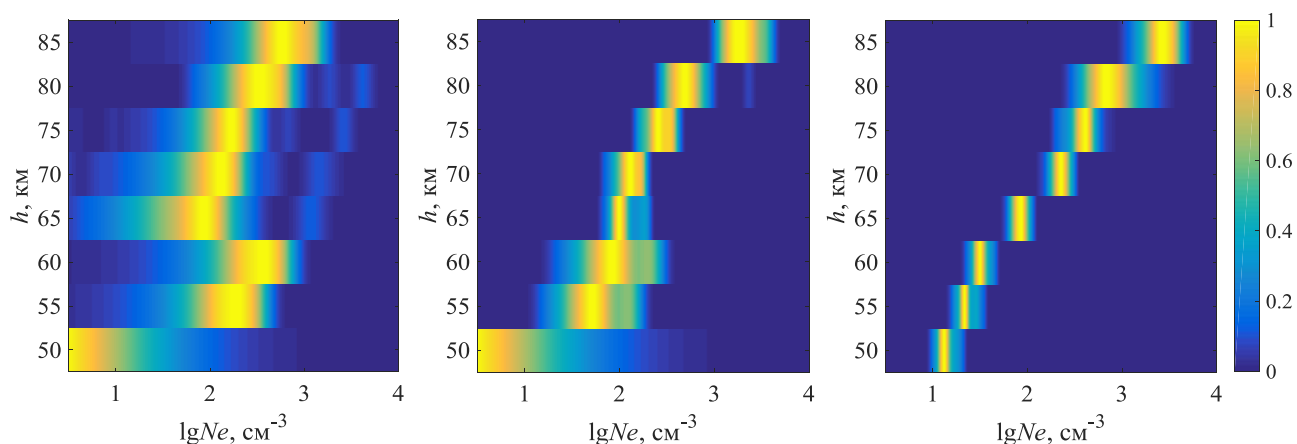


Рисунок 3.28 – Плотность вероятности Ne на высотах $h = 50–85$ км по данным Каталога (слева), по данным ГОСТ (по центру), по В-П модели (справа) (день, осень, низкая солнечная активность, средние широты)

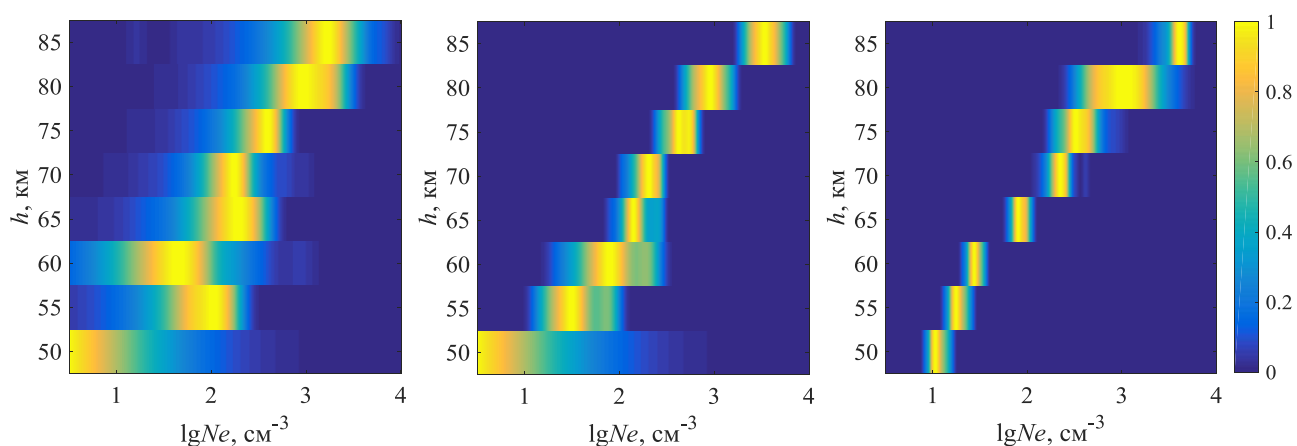


Рисунок 3.29 – Плотность вероятности Ne на высотах $h = 50–85$ км по данным Каталога (слева), по данным ГОСТ (по центру), по В-П модели (справа) (день, осень, высокая солнечная активность, средние широты)

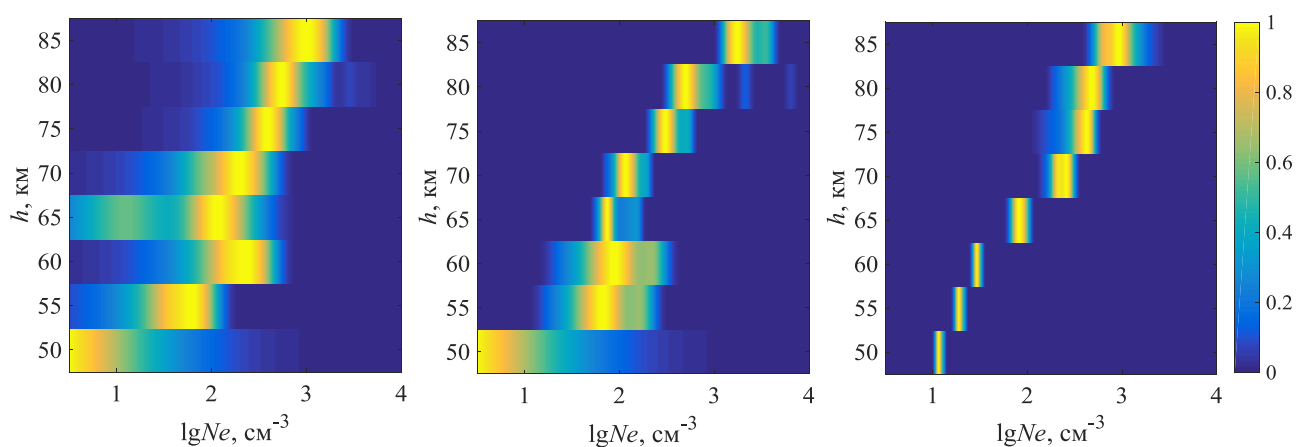


Рисунок 3.30 – Плотность вероятности Ne на высотах $h = 50–85$ км по данным Каталога (слева), по данным ГОСТ (по центру), по В-П модели (справа) (день, лето, низкая солнечная активность, средние широты)

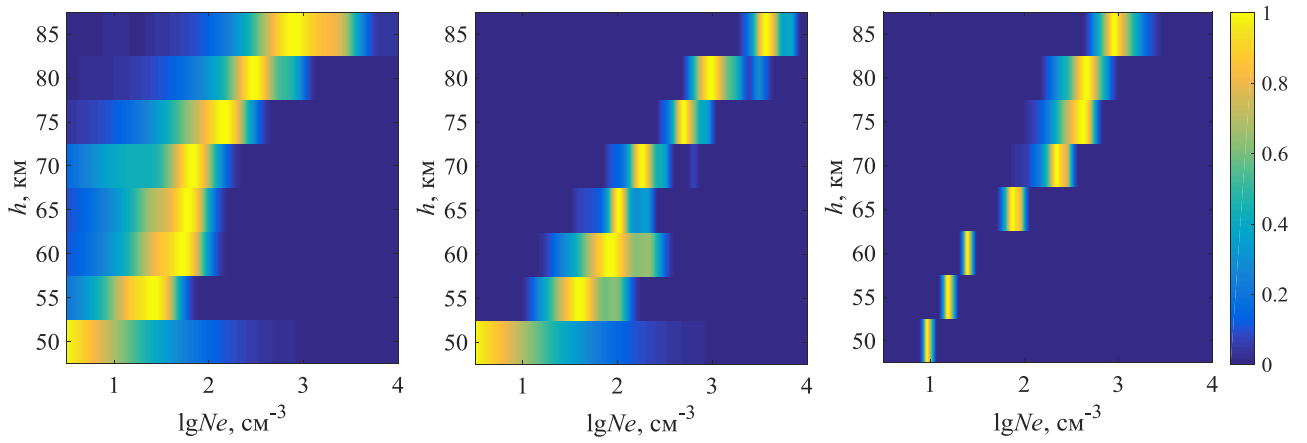


Рисунок 3.31 – Плотность вероятности N_e на высотах $h = 50$ – 85 км по данным Каталога (слева), по данным ГОСТ (по центру), по В-П модели (справа) (день, лето, высокая солнечная активность, средние широты)

Основные выводы к Главе 3

На разных этапах разработки вероятностной плазмохимической модели D -области ионосферы и сопоставления ее результатов с функциями плотности вероятности N_e , полученных по эмпирически-статистическим моделям ионосферы, были сделаны следующие выводы:

- Анализ чувствительности решений уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла к варьированию входных параметров показал, что электронная концентрация наиболее чувствительна к изменению температуры нейтралов T , концентрации молекулярного кислорода $[O_2]$ и скорости ионизации q .
- Спутниковые данные входных параметров системы дифференциальных уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла D -области (T , $[O_2]$, $[N_2]$, $[H_2O]$, $[O_3]$ и $[CO_2]$) не описываются какими-либо конкретными законами распределения, поэтому генерация соответствующих значений проводилась с использованием эмпирически полученных функций плотности вероятности.
- Учет основных источников ионизации D -области показал, что значения скорости ионизации q наименее устойчивы на высотах ионизации линией Лайман- α молекулы NO (и в дневные, и в ночные часы), функции распределения концентрации которой строились по спутниковым измерениям оптической эмиссии NO на длине волны 5.3 мкм.
- Опорные профили $[NO]$, необходимые для расчета скорости ионизации выше 65 км, оценивались двумя способами: по приближению «Abby Normal» и из Стандарта США. Оказалось, что полученные профили N_e отличаются незначительно, поэтому расчет ионизации проводился по значениям Стандарта США.
- В дневные часы результаты, полученные по вероятностной плазмохимической модели, по порядкам величин согласуются с ГОСТ и Каталогом. В ночное время наблюдается существенное расхождение,

вероятно, связанное с неучетом важного источника ионизации неосвещенной ионосферы в В-П модели.

- Сравнительный анализ медианных и наиболее вероятных значений N_e показал, что на некоторых высотах они могут существенно отличаться друг от друга в зависимости от выбранных гелиогеофизических условий. Отсюда сделан вывод, что медианными значениями (и тем более средними) невозможно корректно описать среду, и поэтому необходим переход к функциям плотности вероятности.
- На основании описанной методологии построения вероятностной плазмохимической модели возможно создание вероятностной ассимиляционной модели, которая будет уточняться за счет усвоения актуальных функций плотности вероятности спутниковых измерений концентраций нейтральных составляющих ионосферы и температуры. Знание корректных законов распределения входных параметров ионизационно-рекомбинационного цикла позволит свести ошибку расчета плотности вероятности N_e к минимуму.

4. ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ РАДИОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ ГФО МИХНЕВО

Расчет амплитуды радиоволны для профилей электронной концентрации, полученных по вероятностно-статистическим моделям, проводился с использованием созданного в Санкт-Петербургском государственном университете программного комплекса расчета распространения СДВ-ДВ радиоволн *ParabEq* (Кириллов, 1981; Кириллов и Пронин, 1997), построенного с использованием метода параболического уравнения (Levy, 2000).

Для сопоставления результатов расчетов с экспериментальными данными использовались амплитуды СДВ сигналов, принятых в подмосковной геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» (55° с.ш., 38° в.д.) от шести передатчиков, изображенных на рисунке 4.1 и перечисленных в таблице 4.1.

Вариации магнитного поля измеряются в ГФО Михнево в частотном диапазоне 0.8–65 кГц.

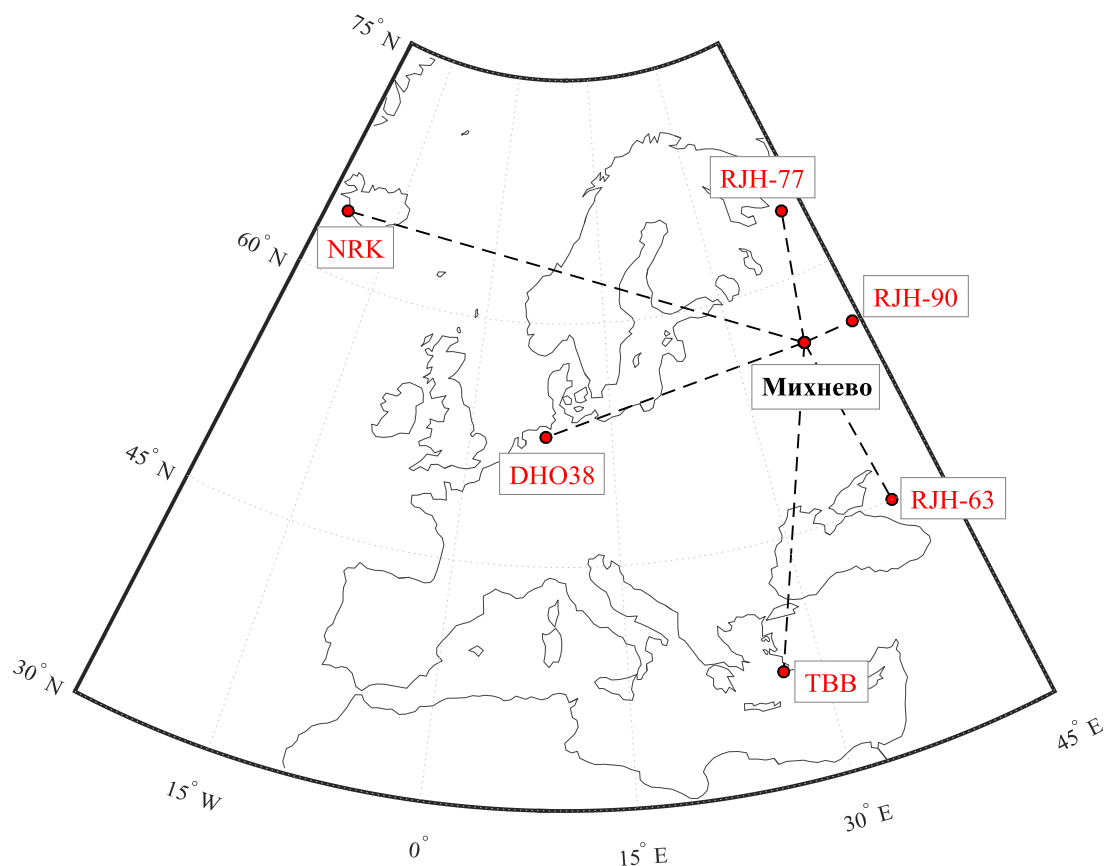


Рисунок 4.1 – Расположение СДВ передатчиков и ГФО Михнево

Таблица 4.1 – Основные характеристики СДВ передатчиков

Станция	Местоположение	Частоты (кГц)	Координаты	Длина трассы (км)
RJH-77	Россия (Архангельск)	20.5 23.0 25.0	64° с.ш., 42° в.д.	910
RJH-63	Россия (Краснодар)	20.5 23.0 25.0	45° с.ш., 40° в.д.	1230
RJH-90	Россия (Нижний Новгород)	20.5 23.0 25.0	56° с.ш., 44° в.д.	370
DHO38	Германия	23.4	53° с.ш., 8° в.д.	1950
TBB	Турция	26.7	37° с.ш., 27° в.д.	2270
NRK	Исландия	37.5	64° с.ш., -22° в.д.	3310

Передатчики RJH-77, RJH-63 и RJH-90 работают по расписанию: на каждой из трех указанных в таблице 4.1 частот они излучают сигнал в течение нескольких минут в дневное время. Передатчики DHO38, TBB и NRK работают на фиксированных частотах непрерывно в течение суток.

Четыре трассы полностью находятся в средних широтах, две частично расположены выше 60° с.ш., поэтому на них возможно проявление эффектов, присущих полярной ионосфере.

4.1. Зависимость амплитуды радиоволны от количества профилей N_e на трассе

При расчете теоретических величин амплитуды A важно понимать, как от количества профилей N_e , расставленных по трассе, зависит полученное в пункте приема значение A . Для этого в одних и тех же гелиогеофизических условиях были

рассмотрены функции $P(A)$, полученные в результате использования 1, 5, 10 и 20 профилей (k), расположенных равномерно вдоль трассы. В качестве примера, полученные результаты для дневных амплитуд В-П модели и ночных амплитуд по данным ГОСТ на трассе ДНОЗ8 – Михнево представлены на рисунке 4.2. Оказалось, что распределение меняется незначительно при $k \geq 5$. Поэтому для повышения скорости счета было выбрано 5 профилей на трассе.

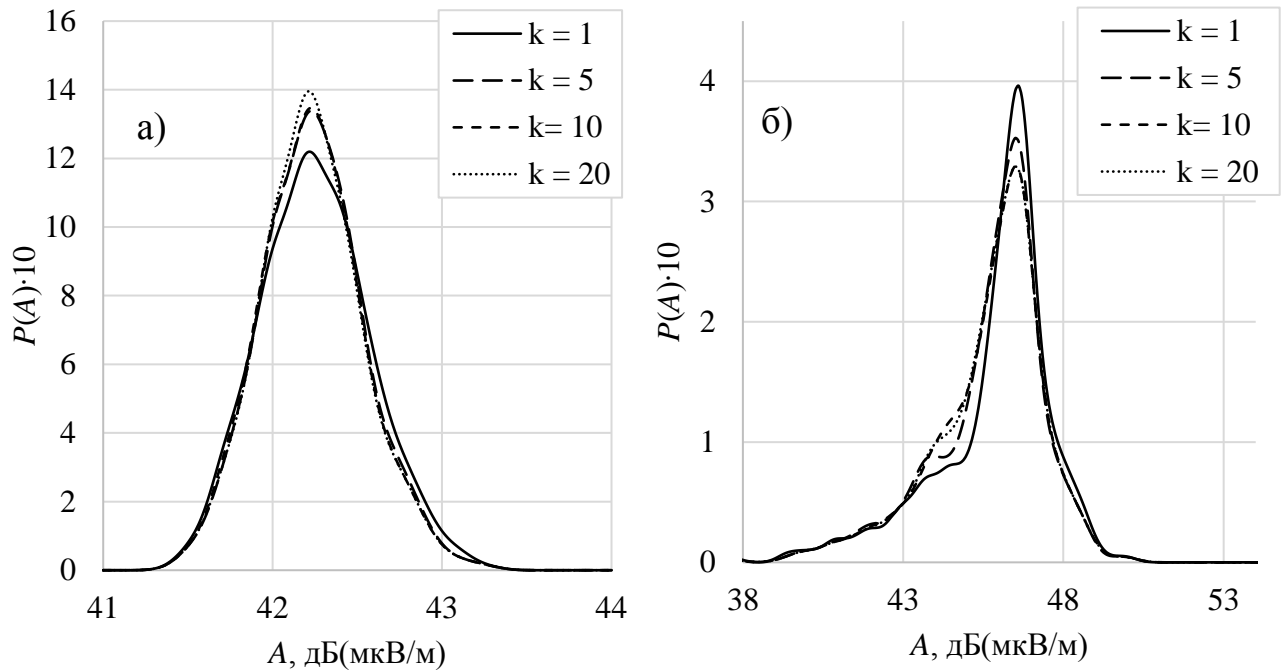


Рисунок 4.2 – Плотность вероятности A в зависимости от количества профилей N_e на трассе по дневным данным В-П модели (а) и ночным данным ГОСТ (б) (осень, низкая солнечная активность, трасса ДНОЗ8 – Михнево)

4.2.Верификация моделей по разнице амплитуд радиоволн на разных частотах

Принципиальной проблемой при сопоставлении абсолютных значений амплитуд оказалось незнание истинных мощностей передатчиков. Более того, из анализа многолетних данных, собранных в обсерватории Михнево, можно сделать вывод, что мощность передатчиков в течение года хаотично меняется. Из-за этого верификация абсолютных величин, естественно, невозможна. Поэтому для

верификации теоретических результатов необходимо использовать разницу амплитуд в [дБ].

Передатчики RJH-77, RJH-63, RJH-90 излучают сигнал постоянной мощности на нескольких частотах, поэтому для верификации была выбрана величина ΔA – разница амплитуд, принятых на разных частотах от одного передатчика. Очевидно, такая величина не зависит от мощности передатчика. Возможны редкие ситуации, когда мощность изменяется между сеансами работы на разных частотах, однако полученные значения ΔA попадут в «хвосты» распределений и на общем фоне заметны не будут.

Далее разница амплитуд сигналов на частотах 23 кГц и 25 кГц будет обозначаться как ΔA_{23-25} , на частотах 20.5 кГц и 25 кГц – ΔA_{20-25} , на частотах 20.5 кГц и 23 кГц – ΔA_{20-23} .

Расчет амплитуды радиоволны, прошедшей через теоретически смоделированную среду, осуществлялся при мощности передатчика в 1 кВт.

4.2.1. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными на трассе RJH-77 – Михнево

На рисунках 4.3 и 4.4 представлены функции плотности вероятности величин ΔA_{23-25} и ΔA_{20-25} , полученных от передатчика RJH-77, расположенного в Архангельске, в условиях низкой солнечной активности.

Как видно из рисунков, в большинстве случаев экспериментальные кривые плотности вероятности шире и ниже теоретических распределений. Разброс экспериментальных значений в ряде условий сравним лишь с функциями плотности вероятности из Каталога (рисунки 4.3б и 4.4б).

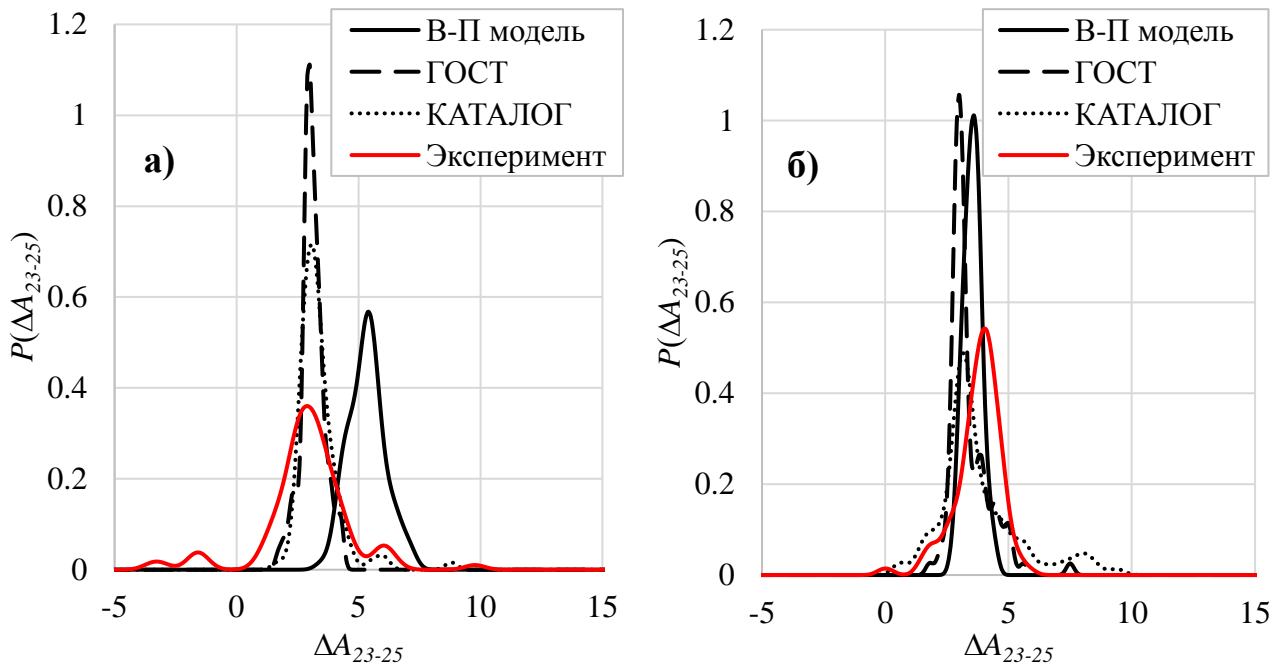


Рисунок 4.3 – Плотность вероятности ΔA_{23-25} в осенние (а) и летние месяцы (б)
(низкая солнечная активность, трасса RЖ-77 – Михнево)

Для оценки работоспособности вероятностно-статистических моделей в первую очередь необходимо сопоставить наиболее вероятные («пиковые») величины теоретических и экспериментальных функций $P(\Delta A)$. Хорошим согласием результатов построенных моделей с экспериментальными данными является попадание теоретических величин в пределы экспериментальных вариаций. Поэтому были рассмотрены среднеквадратические отклонения ΔA_{20-23} , ΔA_{20-25} и ΔA_{23-25} . В таблице 4.2 в качестве примера представлены $\sigma(\Delta A_{20-23})$, $\sigma(\Delta A_{20-23})$ и $\sigma(\Delta A_{20-23})$, полученные на трассе RЖ-77 – Михнево при низкой солнечной активности. Оказалось, что в рассматриваемых условиях вариации экспериментальных значений составляют от 10 до 50 % в зависимости от сезона и выбранных частот. Например, если величины отличаются на 2 дБ, то их отношение равно $10^{\frac{1}{20} \cdot 2[\text{дБ}]} \approx 1.26$ либо $10^{-\frac{1}{20} \cdot 2[\text{дБ}]} \approx 0.79$, следовательно, разница между ними составляет 21–26 %.

Таблица 4.2 – Среднеквадратические отклонения экспериментальных величин ΔA_{20-23} , ΔA_{20-25} и ΔA_{23-25} при низкой солнечной активности на трассе RЖ-77 – Михнево

	осень	весна	лето
$\sigma(\Delta A_{23-25})$	1.85	1.60	0.92
$\sigma(\Delta A_{20-25})$	2.98	3.53	2.43
$\sigma(\Delta A_{20-23})$	2.72	2.44	1.90

Отклонения наиболее вероятных модельных величин ΔA_{23-25} от экспериментальных в условиях низкой солнечной активности на трассе RЖ-77 – Михнево представлены в таблице 4.3а. Те значения, которые укладываются в пределы среднеквадратических отклонений из таблицы 4.2, окрашены в зеленый цвет, а те, которые укладываются в пределы 2σ , окрашены в желтый.

Таблица 4.3а – Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{23-25} в [дБ] на трассе RЖ-77 – Михнево при низкой солнечной активности

	осень	весна	лето
В-П модель	2.50	1.75	-0.50
ГОСТ	0.05	-0.60	-1.05
Каталог	0.20	-0.45	-0.90

В разные сезоны модели демонстрируют различное согласие с экспериментальными данными, и в целом результаты выглядят более чем удовлетворительными. Если проанализировать общую картину по всем сезонам, можно сделать вывод, что на данной трассе в условиях низкой солнечной активности лучшее согласие с экспериментом наблюдается у данных Каталога.

В таблице 4.3б представлены те же значения, для удобства переведенные в %. Здесь зеленым цветом обозначены результаты, попадающие в диапазон $\pm 20\%$, желтым – $\pm 40\%$.

Таблица 4.3б – Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{23-25} в [%] на трассе RJH-77 – Михнево при низкой солнечной активности

	осень	весна	лето
В-П модель	133	122	94
ГОСТ	101	93	89
Каталог	102	95	90

Параллельное рассмотрение значений, приведенных в таблицах 4.3а и 4.3б, позволяет избежать с одной стороны завышенных требований к моделям в условиях сильной изменчивости среды (и, как следствие, высоких вариаций экспериментальных данных), с другой стороны – получения мнимого согласия теории с экспериментом при неадекватно высоких значениях σ .

Стоит отметить, что в данной ситуации значения из таблиц 4.3а и 4.3б между собой хорошо коррелируют.

При анализе величины ΔA_{20-25} в условиях низкой солнечной активности получены аналогичные результаты, которые представлены на рисунке 4.4 и в таблицах 4.4а, 4.4б.

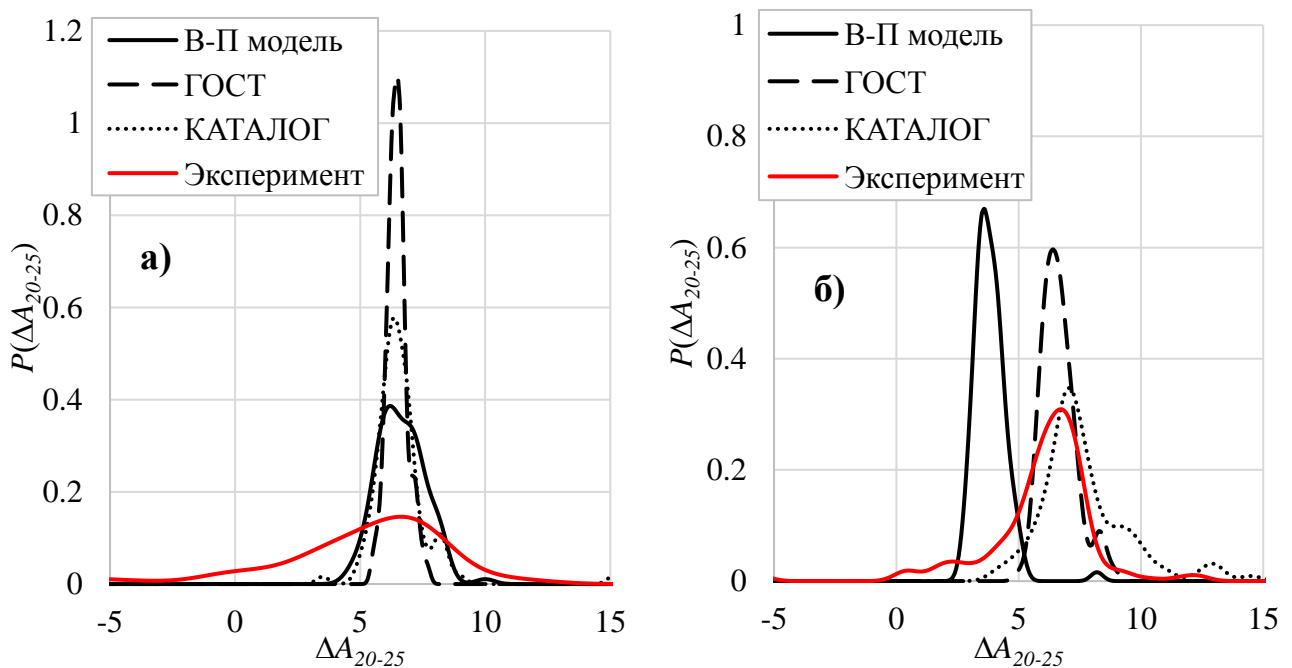


Рисунок 4.4 – Плотность вероятности ΔA_{20-25} в весенние (а) и летние месяцы (б)

(низкая солнечная активность, трасса RJH-77 – Михнево)

Таблица 4.4а – Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{20-25} в [дБ] на трассе RЖ-77 – Михнево при низкой солнечной активности

	осень	весна	лето
В-П модель	1.70	-0.15	-3.00
ГОСТ	1.55	-0.10	-0.20
Каталог	1.50	-0.15	0.45

Таблица 4.4б – Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{20-25} в [%] на трассе RЖ-77 – Михнево при низкой солнечной активности

	осень	весна	лето
В-П модель	122	98	71
ГОСТ	120	99	98
Каталог	119	98	105

На рисунках 4.5 и 4.6 представлены функции плотности вероятности величин ΔA_{23-25} и ΔA_{20-25} , полученных от передатчика RЖ-77 в условиях высокой солнечной активности.

Величина ΔA_{23-25} (таблицы 4.5а и 4.5б) почти во всех условиях лежит в пределах допустимой погрешности. А там, где выходит за ее пределы, отклонение от среднего не превышает 20 %, что можно считать очень хорошим согласием. Обратим внимание, что при высокой солнечной активности используются новые значения σ , отличные от приведенных в таблице 4.2.

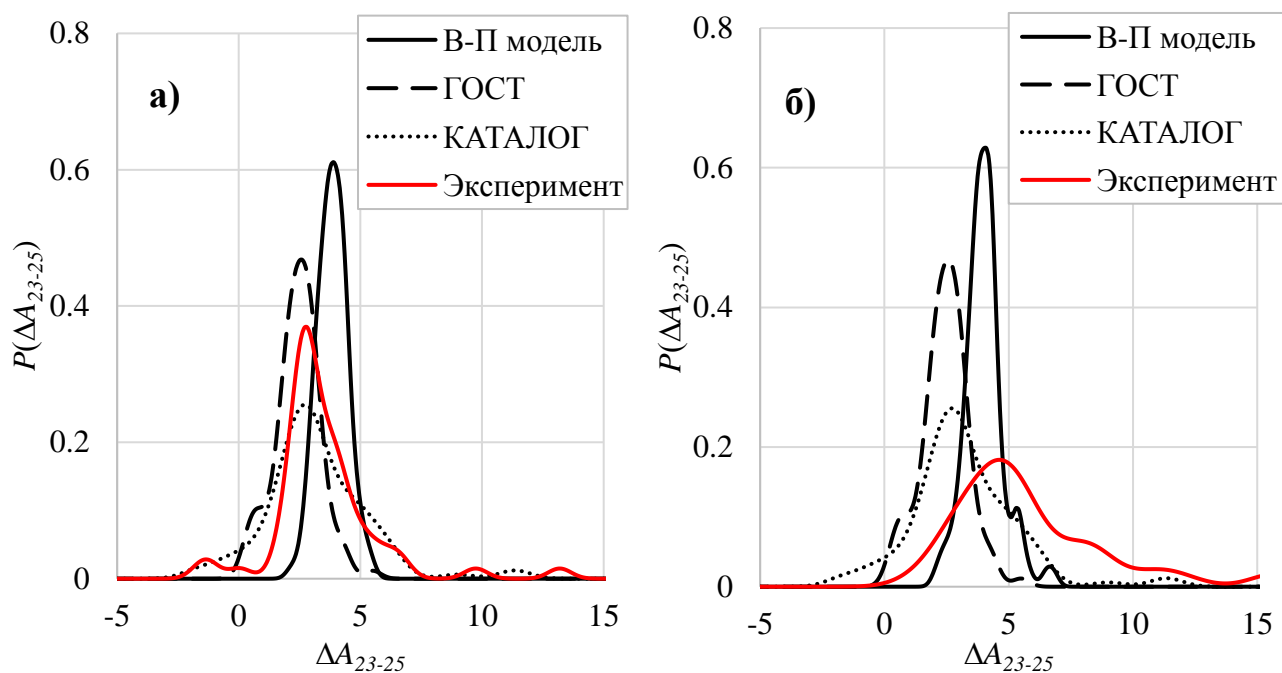


Рисунок 4.5 – Плотность вероятности ΔA_{23-25} в осенние (а) и весенние месяцы (б)
(высокая солнечная активность, трасса RJH-77 – Михнево)

Таблица 4.5а – Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{23-25} в [дБ] на трассе RJH-77 – Михнево при высокой солнечной активности

	осень	весна	лето
В-П модель	1.15	-0.60	-1.85
ГОСТ	-0.20	-2.05	-1.20
Каталог	0.00	-1.85	-1.30

Таблица 4.5б – Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{23-25} в [%] на трассе RJH-77 – Михнево при высокой солнечной активности

	осень	весна	лето
В-П модель	114	93	81
ГОСТ	98	79	87
Каталог	100	81	86

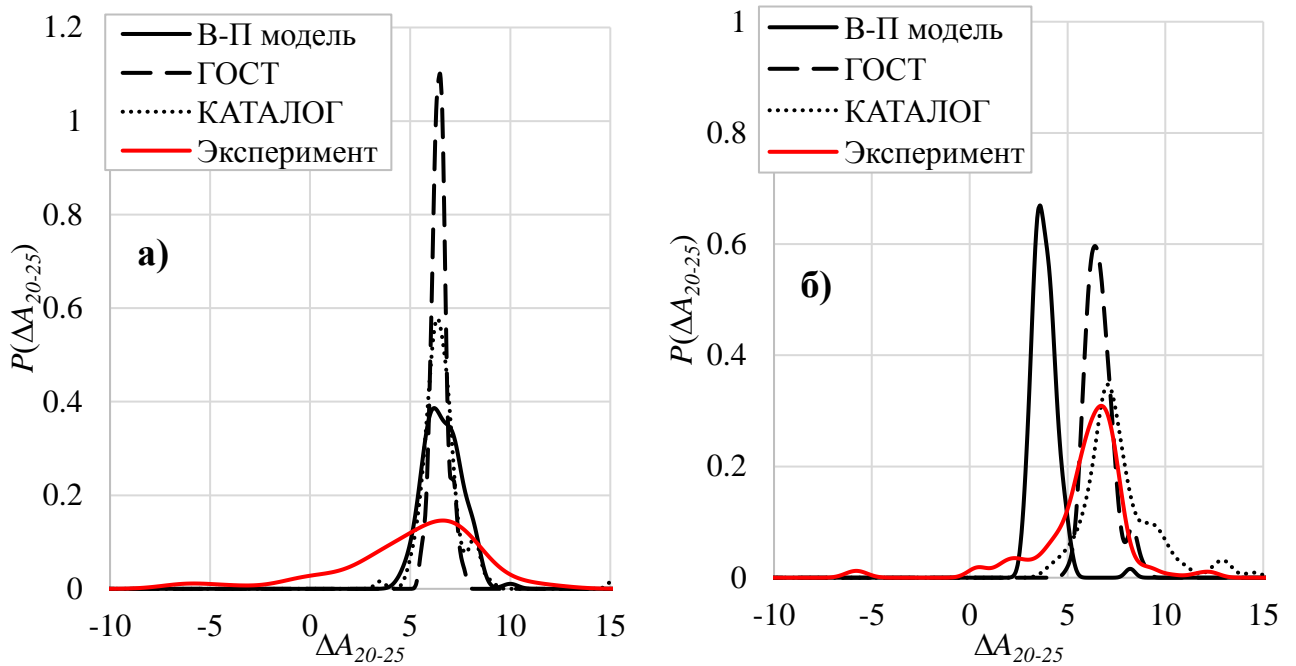


Рисунок 4.6 – Плотность вероятности ΔA_{20-25} в весенние (а) и летние месяцы (б)
(высокая солнечная активность, трасса RJH-77 – Михнево)

Таблица 4.6а – Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{20-25} в [дБ] на трассе RJH-77 – Михнево при высокой солнечной активности

	осень	весна	лето
В-П модель	0.90	-3.95	-4.95
ГОСТ	2.35	-2.45	-0.70
Каталог	2.20	-2.60	-0.65

Таблица 4.6б – Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{20-25} в [%] на трассе RJH-77 – Михнево при высокой солнечной активности

	осень	весна	лето
В-П модель	111	63	57
ГОСТ	131	75	92
Каталог	129	74	93

По значениям ΔA_{20-25} модели с экспериментальными данными согласуются хуже. Вспомним, что рассматриваемая СДВ трасса частично находится выше 60°

с.ш., а значит, здесь возможно влияние полярной ионосферы, причем в первую очередь в условиях высокой солнечной активности. Заметим, почти все результаты таблицы 4.6а укладываются в пределы σ , однако в таблице 4.6б появилось существенно больше «желтых» ячеек. Более того, здесь впервые появляется значение, не попадающее в интервал $\pm 40\%$, оно обозначено красным цветом.

В целом, на трассе RИH-77 – Михнево наблюдается хорошее согласие эмпирически-статистических моделей с экспериментальными данными распространения СДВ волн. В-П модель незначительно уступает данным ГОСТ и Каталога.

Очевидно, что $\Delta A_{20-23} = \Delta A_{20-25} - \Delta A_{23-25}$. Отсюда следует, что нет необходимости проводить анализ функций плотности вероятности и наиболее вероятных значений ΔA_{20-23} , поскольку результаты будут напрямую связаны с представленными в этом пункте. На следующих трассах в качестве примера будет представлена какая-либо одна из обсуждаемых величин. Выбор будет осуществляться на основании полноты и качества экспериментальных данных, по которым она рассчитывается.

4.2.2. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными на трассе RИH-63 – Михнево

На рисунках 4.7 и 4.8 представлены функции плотности вероятности величины ΔA_{23-25} , полученной от передатчика RИH-63, расположенного в Краснодаре, во время весенних и зимних месяцев.

Несмотря на существенно отличающуюся форму распределений, видно, что на более южной трассе наиболее вероятные значения, полученные по В-П модели, практически совпадают с экспериментальными значениями в условиях и низкой, и высокой солнечной активностей. Исключение составили только зимние месяцы, когда экспериментальных данных оказалось недостаточно для получения корректных функций плотности вероятности ΔA_{23-25} (рисунки 4.7б, 4.8б).

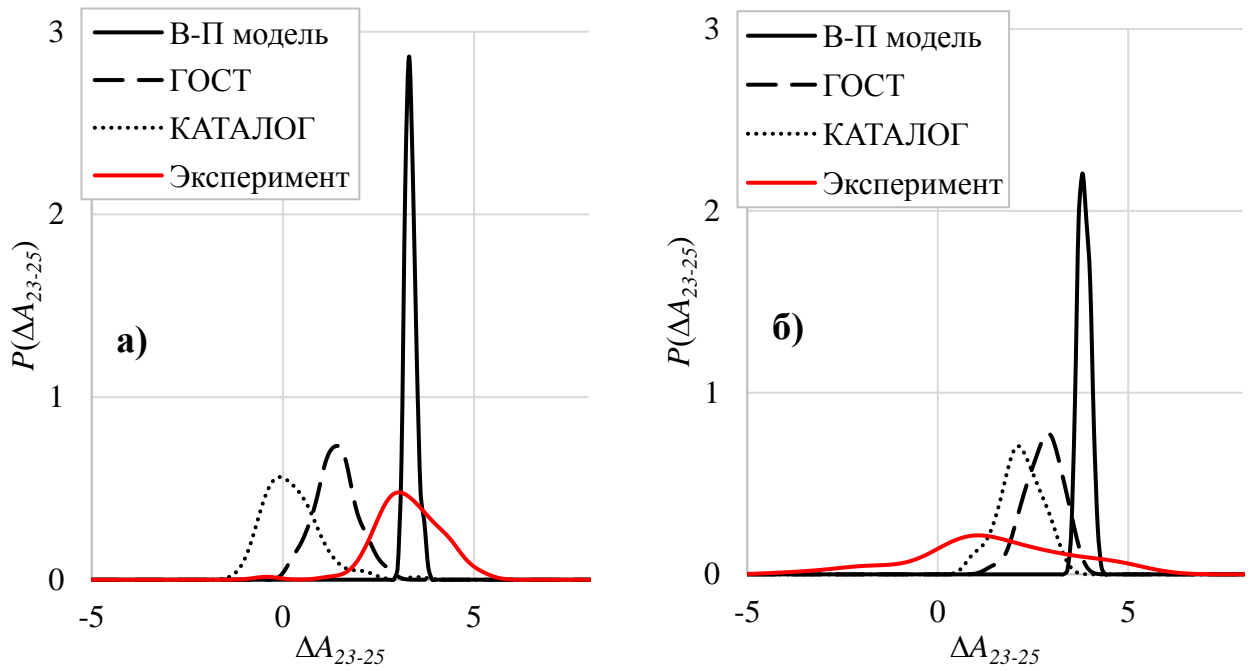


Рисунок 4.7 – Плотность вероятности ΔA_{23-25} в весенние (а) и зимние месяцы (б)
(низкая солнечная активность, трасса RJH-63 – Михнево)

Таблица 4.7а – Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{23-25} в [дБ] на трассе RJH-63 – Михнево при низкой солнечной активности

	осень	весна	лето	зима
В-П модель	0.85	0.20	-0.05	2.65
ГОСТ	-1.05	-1.70	-2.15	1.70
Каталог	-2.45	-3.10	-1.95	1.00

Таблица 4.7б – Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{23-25} в [%] на трассе RJH-63 – Михнево при низкой солнечной активности

	осень	весна	лето	зима
В-П модель	110	102	99	136
ГОСТ	89	82	78	122
Каталог	75	70	80	112

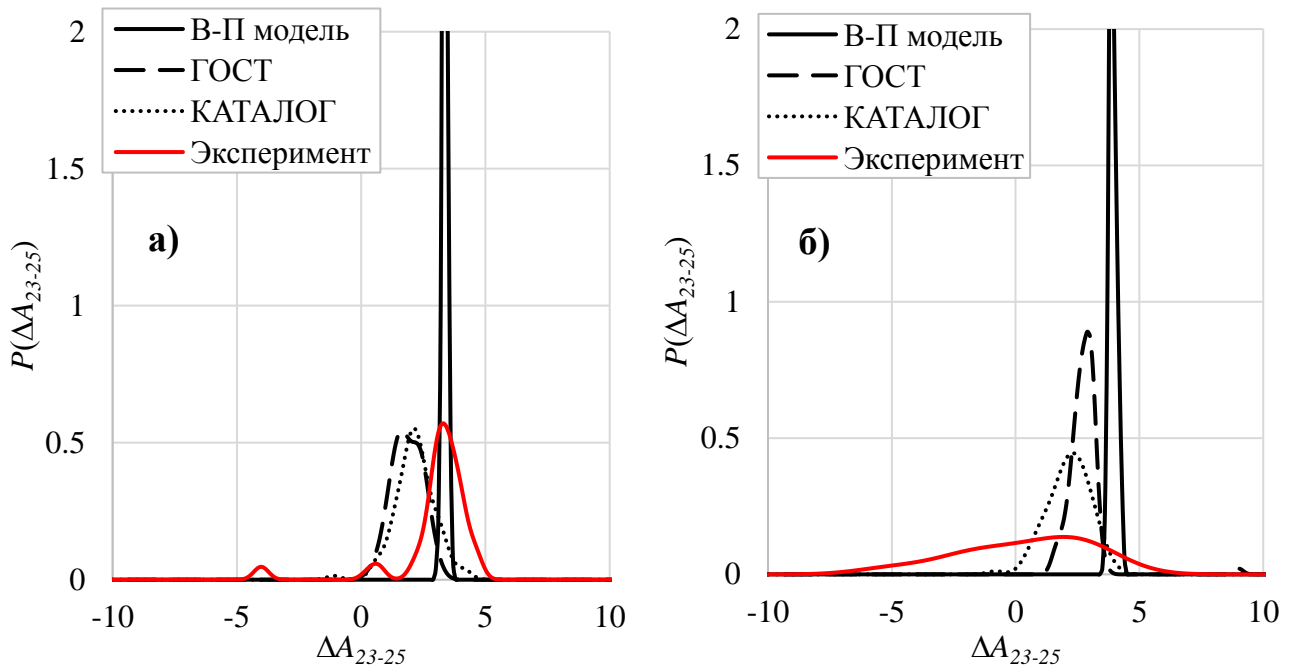


Рисунок 4.8 – Плотность вероятности ΔA_{23-25} в весенние (а) и зимние месяцы (б)
(высокая солнечная активность, трасса RJH-63 – Михнево)

Таблица 4.8а – Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{23-25} в [дБ] на трассе RJH-63 – Михнево при высокой солнечной активности

	осень	весна	лето	зима
В-П модель	0.25	0.00	-0.10	2.10
ГОСТ	-1.20	-1.50	-2.10	1.10
Каталог	-0.95	-1.25	-0.40	0.55

Таблица 4.8б – Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{23-25} в [%] на трассе RJH-63 – Михнево при высокой солнечной активности

	осень	весна	лето	зима
В-П модель	103	100	99	127
ГОСТ	87	84	79	114
Каталог	90	87	95	107

На данной трассе эмпирически-статистические модели уступают в точности В-П модели при любом уровне солнечной активности, однако в большинстве случаев и у них согласие с экспериментом достаточно хорошее.

При этом «привычного» влияния солнечной активности здесь не наблюдается (в табл 4.8а и 4.8б результаты значительно лучше, чем в 4.7а и 4.7б), что, вероятно, связано с более низкими широтами рассматриваемой трассы.

4.2.3. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными на трассе RJH-90 – Михнево

Две предыдущие трассы являлись меридиональными, а трасса RJH-90 – Михнево является широтной и имеет значительно меньшую длину.

На рисунке 4.9 представлены функции плотности вероятности величины ΔA_{23-25} , полученной от передатчика RJH-90, расположенного в Нижнем Новгороде, во время осенних и летних месяцев при низкой солнечной активности.

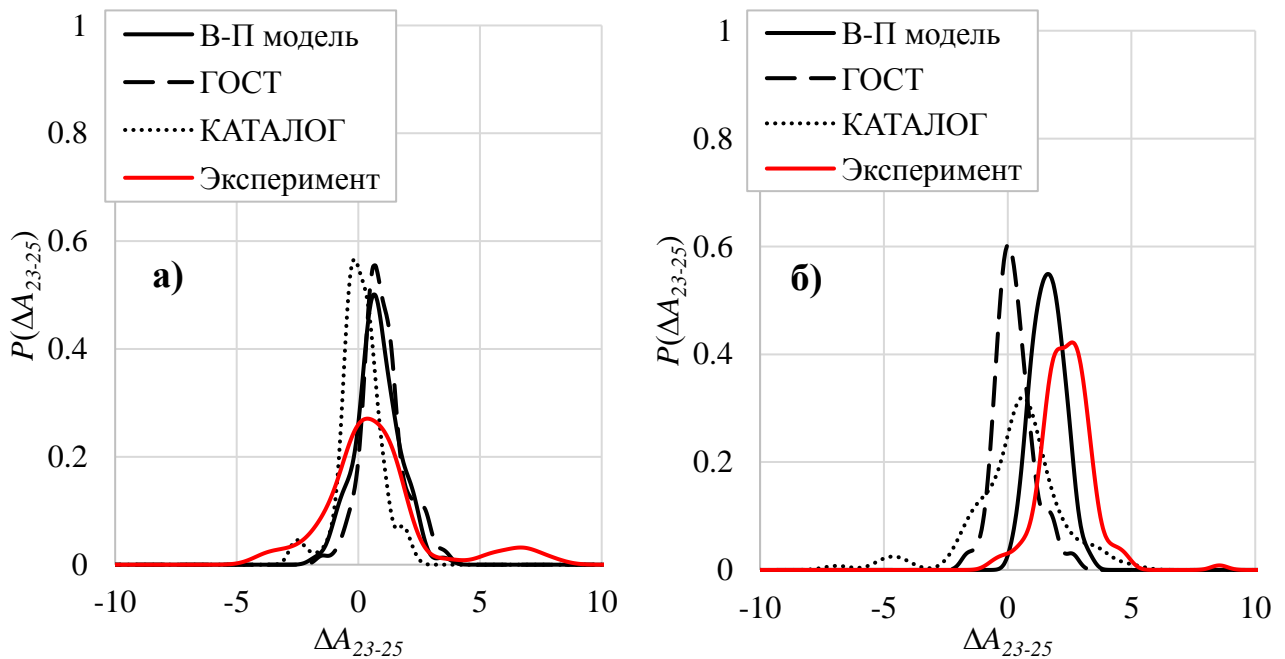


Рисунок 4.9 – Плотность вероятности ΔA_{23-25} в осенние (а) и летние месяцы (б) (низкая солнечная активность, трасса RJH-90 – Михнево)

Таблица 4.9а – Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{23-25} в [дБ] на трассе RЖ-90 – Михнево при низкой солнечной активности

	осень	весна	лето	зима
В-П модель	0.20	-1.10	-0.75	-2.75
ГОСТ	0.25	-0.60	-2.30	1.55
Каталог	-0.50	-1.35	-1.70	0.80

Таблица 4.9б – Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{23-25} в [%] на трассе RЖ-90 – Михнево при низкой солнечной активности

	осень	весна	лето	зима
В-П модель	102	88	92	73
ГОСТ	103	93	77	120
Каталог	94	86	82	110

Здесь экспериментальная и теоретические кривые имеют более схожие формы, чем на предыдущих трассах, их среднеквадратические отклонения близки. Из таблицы 4.9б видно, что практически в любой сезон наиболее вероятные величины по всем трем моделям лежат в пределах $\pm 20\%$ от экспериментальных значений, что говорит о высоких прогностических возможностях вероятностно-статистических моделей на схожих (по длине и направлению) трассах.

Во время высокой солнечной активности на данной трассе на частоте 23 кГц обнаружены существенные скачки амплитуды сигнала, не связанные с ионосферными возмущениями, из-за чего значения $\sigma(\Delta A_{23-25})$ в разные сезоны составляют $\sim 6-7$ дБ. Поэтому в этих условиях рассмотрим плотность вероятности $P(\Delta A_{20-25})$ и соответственные наиболее вероятные величины.

На рисунке 4.10 представлены функции плотности вероятности $P(\Delta A_{20-25})$ при высокой солнечной активности. Здесь экспериментальные кривые вновь демонстрируют большой разброс значений. Полученные эмпирические распределения с «тяжелыми хвостами» по форме больше схожи с распределениями

из Каталога, однако наиболее вероятные величины лучше всего описываются В-П моделью.

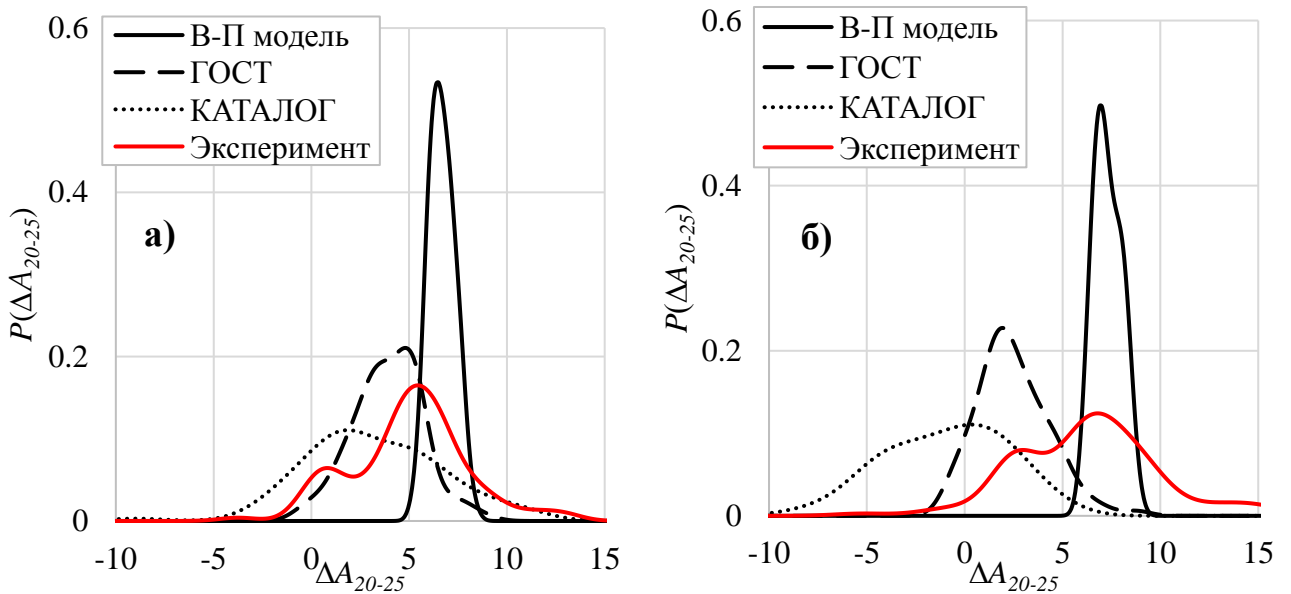


Рисунок 4.10 – Плотность вероятности ΔA_{20-25} в осенние (а) и летние месяцы (б)
(высокая солнечная активность, трасса RJH-90 – Михнево)

Таблица 4.10а – Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{20-25} в [дБ] на трассе RJH-90 – Михнево при высокой солнечной активности

	осень	весна	лето	зима
В-П модель	1.05	0.90	0.10	-3.95
ГОСТ	-1.10	-0.8	-4.9	-3.7
Каталог	-3.35	-3.05	-6.75	-4.35

Таблица 4.10б – Разница между теоретическим и экспериментальным ΔA_{20-25} в [%] на трассе RJH-90 – Михнево при высокой солнечной активности

	осень	весна	лето	зима
В-П модель	113	111	101	63
ГОСТ	88	91	57	65
Каталог	68	70	46	61

4.3.Верификация моделей по суточному изменению амплитуды радиоволны

Как было сказано выше, передатчики DHO38, ТВВ и NRK излучают сигнал на фиксированных частотах, поэтому на этих трассах использовать для верификации введенную выше величину ΔA невозможно. Однако данные передатчики работают и в дневное и в ночное время, что позволяет использовать для верификации суточный перепад амплитуды – $\Delta A_{\text{сут}}$ (разность между ночным и дневным значениями амплитуды в дБ). Этот способ верификации также не зависит от мощности передатчика.

В качестве примера на рисунке 4.11 представлены принятые в Михнево СДВ сигналы на частоте 23.4 кГц (DHO) в течение 20 ноября 2015 года и на частоте 26.7 кГц (ТВВ) в течение 22 ноября 2015 года. Для каждой трассы определялись часы полностью освещенной и полностью неосвещенной D -области, и далее для каждого рассматриваемых суток рассчитывались медианные значения – $A_{\text{ночн}}$ и $A_{\text{днев}}$. Синим цветом на рисунке 4.11 обозначен дневной диапазон, красным – ночной.

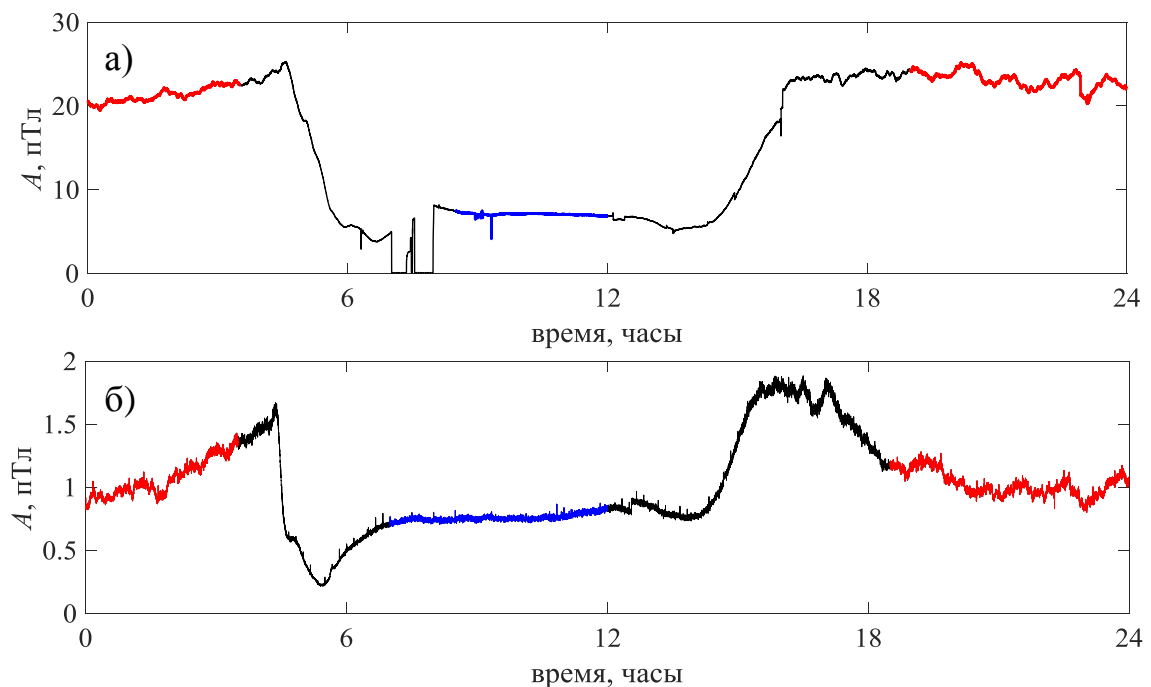


Рисунок 4.11 – Суточный ход амплитуды волны, принятый в Михнево

(а) на частоте 23.4 кГц (DHO38) в течение 20.11.2015 и

(б) на частоте 26.7 кГц (ТВВ) в течение 22.11.2015

Таким образом, для каждых суток было получено значение $\Delta A_{\text{сут}} = A_{\text{ночн}} - A_{\text{днев}}$. Далее по набору величин $\Delta A_{\text{сут}}$ для различной солнечной активности и сезона строились плотности распределения $P(\Delta A_{\text{сут}})$.

Очевидным минусом предложенной верификации является обязательное требование работоспособности модели и в дневное, и в ночное время. Поскольку вероятностная плазмохимическая модель на данный момент не пригодна для корректной оценки ночной концентрации электронов (см. п. 3.5.2), для расчета величины $\Delta A_{\text{сут}}$ по В-П модели в качестве ночных профилей были использованы ночные профили ГОСТ. Таким образом, при верификации результатов В-П модели и ГОСТ были использованы одинаковые ночные профили N_e , а дневные профили отличаются.

4.3.1. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными на трассе ДНО38 – Михнево

Плотность вероятности величины $\Delta A_{\text{сут}}$, полученной на трассе ДНО38 – Михнево экспериментально и по данным трех построенных моделей, представлена на рисунках 4.12 и 4.13 для разных сезонов при различной солнечной активности.

При низкой солнечной активности (рисунок 4.12) с экспериментальными функциями $P(\Delta A_{\text{сут}})$ лучше всего согласуются результаты В-П модели и ГОСТ.

В таблице 4.11 представлены среднеквадратические отклонения экспериментальных данных на трассе ДНО38 – Михнево при низкой солнечной активности. Во все сезоны, кроме зимы, наблюдается достаточно низкие вариации экспериментальной величины $\Delta A_{\text{сут}}$.

В таблицах 4.12а, 4.12б, 4.13а, 4.13б приведена разница между наиболее вероятными величинами представленных распределений на трассе ДНО38 – Михнево при разных уровнях солнечной активности. Несмотря на малые значения σ , большинство теоретических значений укладываются в пределы допустимой погрешности, и почти все результаты попали в диапазон $\pm 20\%$.

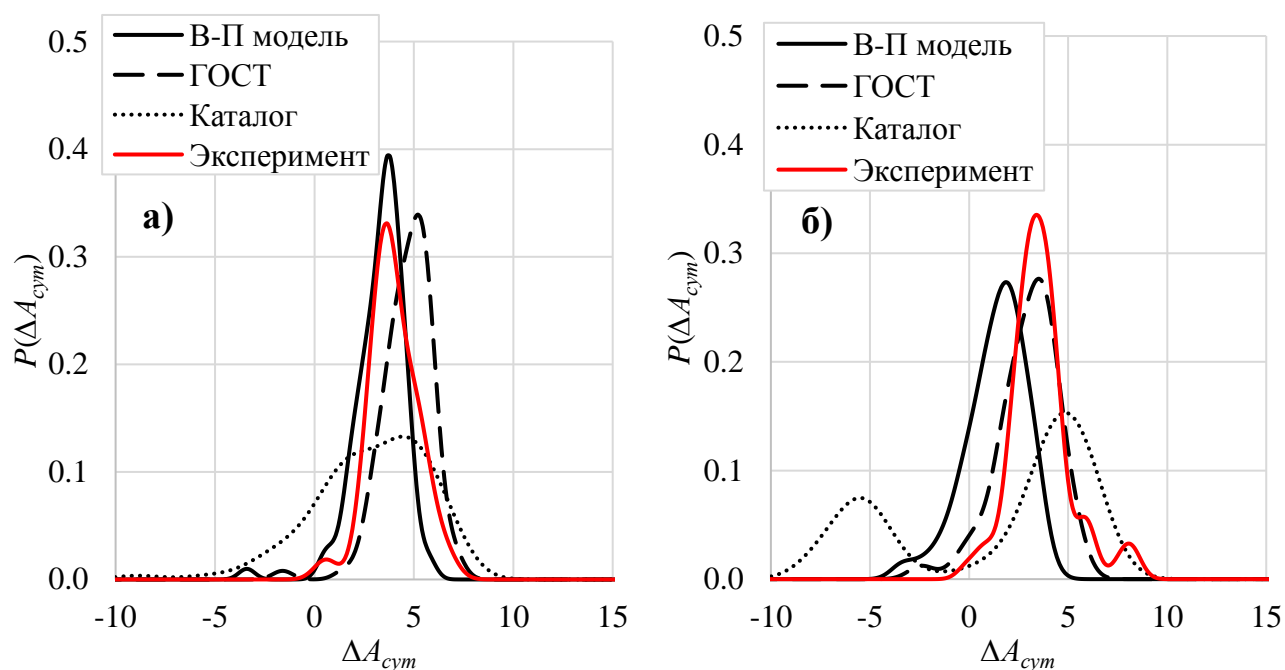


Рисунок 4.12 – Плотность вероятности $\Delta A_{сут}$ в осенние (а) и летние месяцы (б)
 (низкая солнечная активность, трасса ДНО38 – Михнево)

Таблица 4.11 – Среднеквадратические отклонения экспериментальной величины $\Delta A_{сут}$ при низкой солнечной активности на трассе ДНО38 – Михнево

	осень	весна	лето	зима
$\sigma(\Delta A_{сут})$	1.17	1.65	1.53	5.34

Таблица 4.12а – Разница между теоретическим и экспериментальным $\Delta A_{сут}$ в [дБ] на трассе ДНО38 – Михнево при низкой солнечной активности

	осень	весна	лето	зима
В-П модель	0.14	1.05	-1.61	0.28
ГОСТ	1.47	2.31	0.00	1.33
Каталог	0.28	1.12	1.40	1.26

Таблица 4.126 – Разница между теоретическим и экспериментальным $\Delta A_{\text{сут}}$ в [%] на трассе DHO38 – Михнево при низкой солнечной активности

	осень	весна	лето	зима
В-П модель	102	113	83	103
ГОСТ	118	130	100	117
Каталог	103	114	117	116

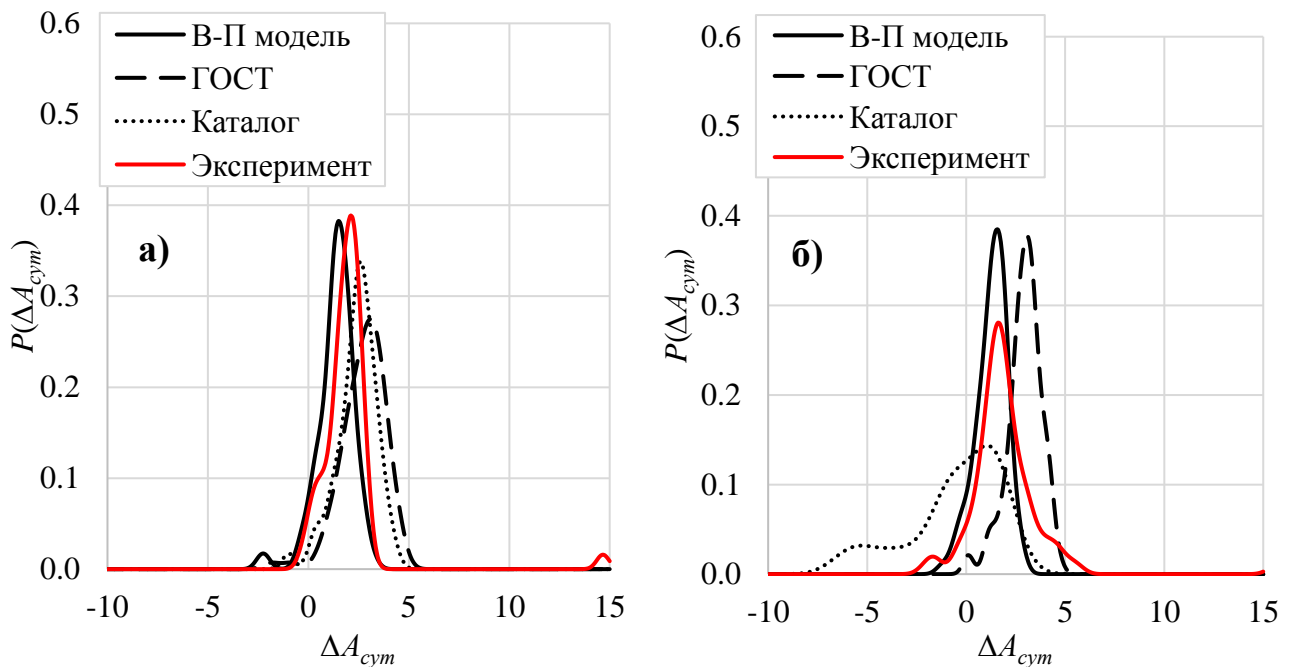


Рисунок 4.13 – Плотность вероятности $\Delta A_{\text{сут}}$ в осенние (а) и летние месяцы (б) (высокая солнечная активность, трасса DHO38 – Михнево)

Таблица 4.13а – Разница между теоретическим и экспериментальным $\Delta A_{\text{сут}}$ в [дБ] на трассе DHO38 – Михнево при высокой солнечной активности

	осень	весна	лето	зима
В-П модель	-0.77	1.19	-0.14	0.14
ГОСТ	1.40	3.36	1.96	0.70
Каталог	0.70	2.66	-1.05	2.73

Таблица 4.136 – Разница между теоретическим и экспериментальным $\Delta A_{\text{сут}}$ в [%] на трассе ДНО38 – Михнево при высокой солнечной активности

	осень	весна	лето	зима
В-П модель	92	115	98	102
ГОСТ	117	147	125	108
Каталог	108	136	89	137

При высокой солнечной активности (рисунок 4.13) наблюдается явное преимущество В-П модели и по качественным, и по количественным характеристикам. Результаты эмпирически-статистической модели, построенной по данным Каталога, качественно не описывают экспериментальные функции плотности вероятности. За счет больших значений σ функции $P(\Delta A_{\text{сут}})$ имеют более «размазанный» характер, однако наиболее вероятные величины на рассматриваемой трассе выглядят достаточно разумно, особенно в условиях низкой солнечной активности.

4.3.2. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными на трассе ТВВ – Михнево

Результаты сопоставления полученных функций плотности вероятности $\Delta A_{\text{сут}}$ с экспериментальными данными на меридиональной трассе ТВВ – Михнево представлены на рисунках 4.14 и 4.15.

Оказалось, что на меридиональной трассе почти в любой сезон и при любом уровне солнечной активности наиболее близко к экспериментальной кривой расположена кривая плотности вероятности $P(\Delta A_{\text{сут}})$, построенная по результатам В-П модели. При этом обратим внимание на большой разброс экспериментальных значений, благодаря которому результаты сопоставления ГОСТ и Каталога с экспериментом, представленные в таблицах 4.14а и 4.15а, выглядят вполне удовлетворительными (в отличие от %-ых отклонений величин).

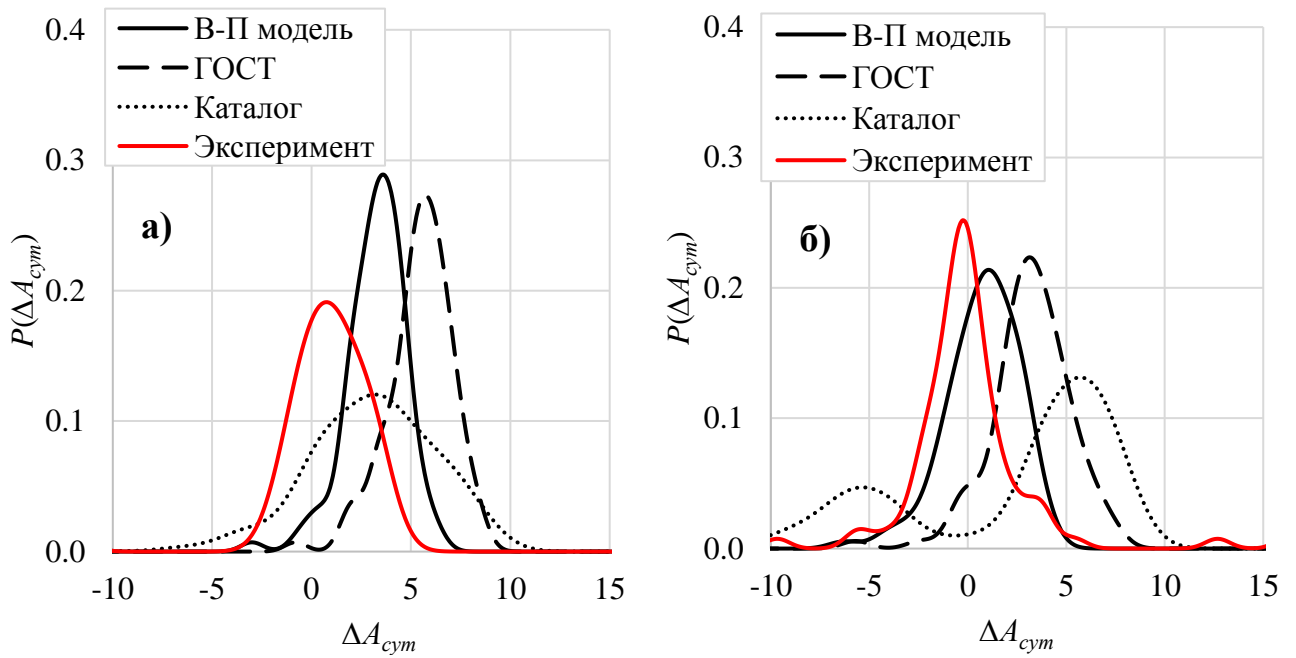


Рисунок 4.14 – Плотность вероятности $\Delta A_{сут}$ в осенние (а) и летние месяцы (б)
(низкая солнечная активность, трасса ТВВ – Михнево)

Таблица 4.14а – Разница между теоретическим и экспериментальным $\Delta A_{сут}$ в [дБ] на трассе ТВВ – Михнево при низкой солнечной активности

	осень	весна	лето	зима
В-П модель	2.73	3.99	1.33	2.59
ГОСТ	4.97	6.44	3.43	6.16
Каталог	2.31	2.94	5.95	6.86

Таблица 4.14б – Разница между теоретическим и экспериментальным $\Delta A_{сут}$ в [%] на трассе ДНО38 – Михнево при низкой солнечной активности

	осень	весна	лето	зима
В-П модель	137	158	117	135
ГОСТ	177	210	148	203
Каталог	130	140	198	220

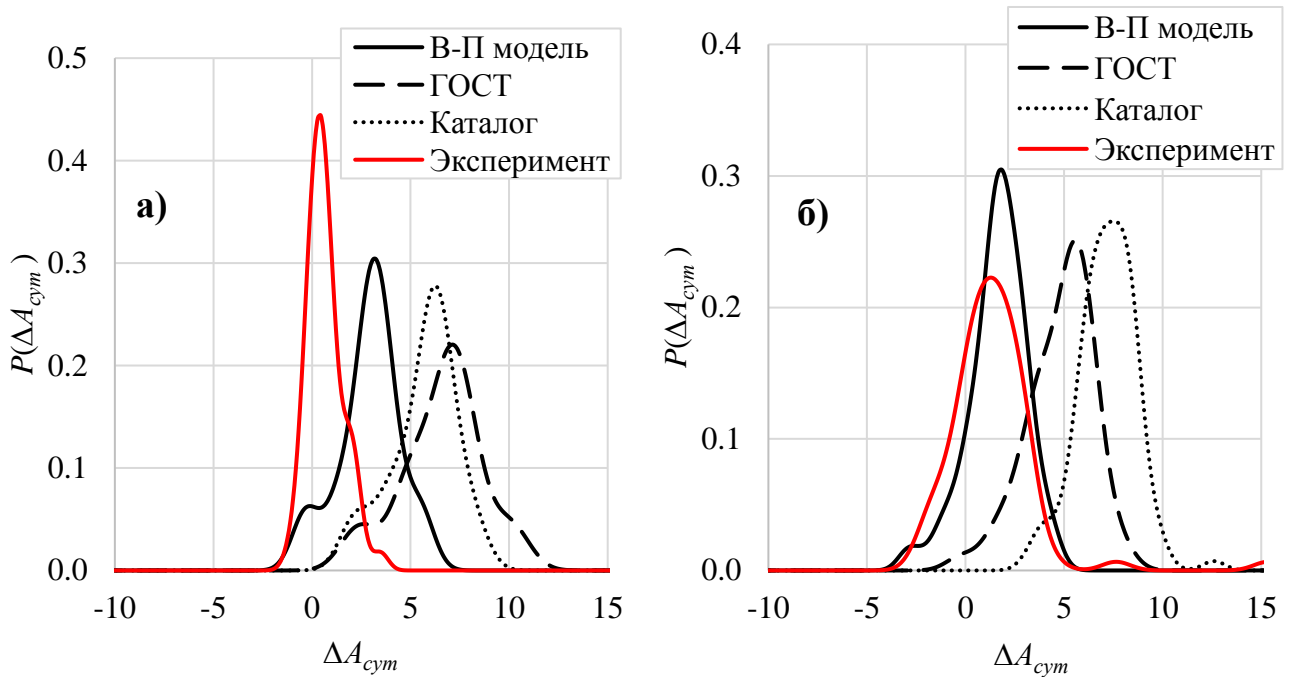


Рисунок 4.15 – Плотность вероятности $\Delta A_{сут}$ в осенние (а) и зимние месяцы (б)
 (высокая солнечная активность, трасса ТВВ – Михнево)

Таблица 4.15а – Разница между теоретическим и экспериментальным $\Delta A_{сут}$ в [дБ] на трассе ТВВ – Михнево при высокой солнечной активности

	осень	весна	лето	зима
В-П модель	2.80	2.80	2.80	0.49
ГОСТ	6.72	6.72	6.79	4.20
Каталог	5.81	5.81	4.97	6.02

Таблица 4.15б – Разница между теоретическим и экспериментальным $\Delta A_{сут}$ в [%] на трассе ТВВ – Михнево при высокой солнечной активности

	осень	весна	лето	зима
В-П модель	138	138	138	106
ГОСТ	217	217	219	162
Каталог	195	195	177	200

4.3.3. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными на трассе NRK – Михнево

Как показано в таблице 4.1 передатчик NRK работает на частоте 37.5 кГц. До июля 2018 года в ГФО Михнево магнитное поле измерялось в частотном диапазоне 0.8–32 кГц. С 7 июля 2018 приемник работал в более широком диапазоне до 65 кГц. Таким образом, на трассе NRK – Михнево для верификации удалось использовать измерения, полученные за 2 летних месяца 2018 года, которые соответствуют низкой солнечной активности. Результаты верификации моделей по этим данным представлены в таблице 4.16. Экспериментальное значение среднеквадратического отклонения $\Delta A_{\text{сут}}$ за данный период на этой трассе составило $\sigma = 5.52$ дБ.

Таблица 4.16 – Разница между теоретическим и экспериментальным $\Delta A_{\text{сут}}$ на трассе NRK – Михнево в летние месяцы при низкой солнечной активности

	$\Delta A_{\text{теор}} - \Delta A_{\text{эксп}}$, [дБ]	$\Delta A_{\text{теор}} - \Delta A_{\text{эксп}}$, [%]
В-П модель	3.85	156
ГОСТ	-2.87	72
Каталог	0.28	97

Обратим внимание, что был использован малый объем экспериментальных данных, из-за чего получено высокое значение σ .

Трасса NRK – Михнево расположена на более высоких широтах, чем две предыдущие. И здесь, как и в п. 4.1.1 лучший результат показали эмпирически-статистические модели. Стоит отметить, что для надежности результатов необходимо провести верификацию на более полном объеме данных.

Основные выводы к Главе 4

Верификация вероятностно-статистических моделей *D*-области ионосферы на шести СДВ трассах позволила сделать следующие выводы:

- На широтных трассах RJH-90 – Михнево и DHO38 – Михнево в условиях низкой солнечной активности в 92 % случаев теоретические значения ΔA лежат в пределах 20 % от экспериментальных величин. При высокой солнечной активности с экспериментом лучше согласуются результаты В-П модели.
- На высокоширотных меридиональных трассах RJH-77 – Михнево и NRK – Михнево, где возможно проявление физических эффектов, свойственных полярной ионосфере, явное преимущество оказалось у эмпирически-статистических моделей. Отклонения наиболее вероятных величин ΔA , полученных по данным Каталога, от экспериментальных во всех рассматриваемых условиях не превышают 20 % и укладываются в пределы экспериментальных вариаций величины. В-П модель на этих трассах в различных гелиогеофизических условиях проявила себя по-разному.
- На низкоширотных меридиональных трассах RJH-63 – Михнево и ТВВ – Михнево наиболее вероятные величины ΔA , полученные по В-П модели, наиболее близки к экспериментальным данным при любой солнечной активности. При этом по разности амплитуд на разных частотах (трасса RJH-63 – Михнево) ГОСТ и Каталог показали очень хорошие результаты согласия с экспериментом, особенно в условиях высокой солнечной активности (большинство значение попало в диапазон ± 20 %), а по суточному перепаду амплитуды (трасса ТВВ – Михнево) теоретические результаты смогли уложиться только в 2σ экспериментального разброса.
- Вероятностно-статистические модели подтвердили свою работоспособность при расчете распространения радиоволн СДВ диапазона. Причем вероятностная плазмохимическая модель дает лучший прогноз в той части средних широт, где отсутствует влияние полярной ионосферы (особенно в

условиях высокой солнечной активности), в то время как эмпирически-статистические модели показали надежный прогноз на трассах, передатчики которых находятся выше 60° с.ш.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее существенные выводы сформулированы в конце каждой главы диссертации. Ниже кратко представлены основные полученные результаты и сделанные на их основании выводы по диссертации в целом.

1. Основой вероятностно-статистических моделей являются функции плотности вероятности ионосферных параметров, которые позволяют описывать изменчивый характер нейтральных и заряженных составляющих ионосферы. Разработанные в диссертации модели являются первыми вероятностными моделями *D*-области.
2. Показано, что медианные значения параметров ионосферы в общем случае не совпадают с наиболее вероятными величинами, поэтому более корректно описывать ионосферу именно вероятностными моделями.
3. Любая ионосферная модель, включая рассмотренные здесь эмпирически-статистические и вероятностную плазмохимическую, может быть использована для решения прикладных задач только при тщательной верификации по радиофизическим экспериментальным данным, поскольку это единственный способ оценить ее точность и границы применимости.
4. Проведенная в диссертации верификация на 6 среднеширотных СДВ трассах подтвердила правомерность основных положений вероятностно-статистического моделирования и возможность использования построенных моделей для прогноза состояния параметров среды, как в прикладных, так и в фундаментальных задачах. Было получено хорошее согласие результатов теоретических моделей с экспериментальными данными. В большинстве гелиогеофизических условий отклонения модельных значений от измеренных в обсерватории Михнево лежат в пределах экспериментальных вариаций величины и не превышают 20 %.
5. На основании разработанной методологии вероятностного плазмохимического моделирования возможно создание глобальной

ассимиляционной ионосферной модели, которая будет претендовать на еще более высокое качество получаемых результатов. При этом моделирование может быть осуществлено и в более широком диапазоне высот (вплоть до магнитосферных) для расчета распространения радиоволн практически всех диапазонов частот – СДВ, ДВ, СВ, КВ, ВЧ, СВЧ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аксенов, О. Ю. Обоснование необходимости разработки и применения вероятностно-статистических моделей ионосферы в интересах радиолокационных средств РКО / О. Ю. Аксенов, С. З. Беккер, М. М. Дюжева, С. И. Козлов, А. Н. Ляхов, С. В. Якубовский // Труды V Всероссийской научно-технической конференции «РТИ системы ВКО – 2017». – Москва. – 2017. – С. 18.

Беккер, С. З. Анализ результатов расчетов концентрации электронов по детерминированно-вероятностной модели среднеширотной невозмущенной *D*-области ионосферы / С. З. Беккер // Солнечно-земная физика. – 2018. – Т. 4. – № 3. – С. 84–94.

Беккер, С. З. Краткий анализ существующих моделей ионосферы для расчета распространения радиоволн / С. З. Беккер // Сборник трудов конференции «Минцевские чтения – 2017». – Москва. – 2017. – С. 9.

Беккер, С. З. Статистическая модель *D*-области ионосферы. Сопоставление радиофизических расчетов по распространению СДВ-ДВ с экспериментальными данными / С. З. Беккер // Труды XVII Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». – 2014. – Т. 1. – С. 407–413.

Беккер, С. З. Уточнение исходных параметров детерминированно-вероятностной модели *D*-области ионосферы и сопоставление результатов радиофизических расчетов с экспериментальными данными / С. З. Беккер // Труды IV Всероссийской конференции «Триггерные эффекты в геосистемах». – Москва. – 2017. – С. 18–19.

Беккер, С. З. Вероятностно-статистические модели *D*-области ионосферы, верифицированные по радиофизическим данным ГФО Михнево / С. З. Беккер, С. И. Козлов, А. Н. Ляхов // Сборник тезисов Тринадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе». – Москва. – 2018. – С. 73.

Беккер, С. З. Вопросы моделирования ионосферы для расчета распространения радиоволн при решении прикладных задач / С. З. Беккер, С. И. Козлов, А. Н. Ляхов // Вопросы оборонной техники. – 2013. – Сер. 16. – Вып. 3–4. – С. 85–88.

Беккер, С. З. О некоторых методах повышения точности статистических моделей *D*-области ионосферы / С. З. Беккер, С. И. Козлов, А. Н. Ляхов // Труды IV Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». – Санкт-Петербург. – 2016. – С. 62–66.

Беккер, С. З. Сопоставление расчетов электронной концентрации по модели IRI с экспериментальными данными ИСЗ DE-2 / С. З. Беккер, А. Н. Ляхов // Труды 59 научной конференции МФТИ с международным участием «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики». – Москва. – 2016. – С. 259–260.

Беликович, В. В. Каталог профилей электронной концентрации *D*-области ионосферы средних широт. Разработка принципов построения эмпирической модели / В. В. Беликович, Е. А. Бенедиктов, В. Д. Вяхирев, Л. В. Гришкевич. – Горький: НИРФИ, 1983. – 52 с.

Боев, С. Ф. (под ред.) Мощные надгоризонтные РЛС дальнего обнаружения. Разработка. Испытания. Функционирование / С. Ф. Боев. – М.: Радиотехника, 2013. – 168 с.

Боярчук, А. К. Базовая модель кинетики ионизированной атмосферы / А. К. Боярчук, А. В. Карелин, Р. В. Широков. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2006. – 203 с.

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

Вирин, Л. И. Ионно-молекулярные реакции в газах / Л. И. Вирин, Р. В. Джагцпанян, Г. В. Караченцев, В. К. Потапов, В. Л. Тальрозе. – М.: Наука, 1979. – 548 с.

Гаврилов, Б. Г. Синхронная регистрация сигналов ОНЧ диапазона наземными и спутниковыми средствами / Б. Г. Гаврилов, Ю. И. Зецер, С. И.

Климов, Ю. В. Поклад, И. А. Ряховский // Сборник научных трудов ИДГ РАН «Динамические процессы в геосферах». – 2016. – Вып. 8. – С. 142–148.

ГОСТ Р-25645.15-94. Ионосфера Земли нижняя. Модель глобального распределения концентрации и эффективной частоты соударений электронов для прогнозирования низкочастотных радиополей. – М.: Госстандарт России, 1994. – 334 с.

Данилов, А. Д. Химия ионосферы / А. Д. Данилов. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 295 с.

Данилов, А. Д. Фотохимия ионизованных и возбужденных частиц в нижней ионосфере / А. Д. Данилов, М. Н. Власов. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 190 с.

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

Данилов, А. Д. Окись азота в области *D*. I. Моделирование высотного распределения [NO] с учетом динамики / А. Д. Данилов, С. Ю. Ледомская // Геомагнетизм и аэрномия. – 1984. – Т. 24. – № 5. – С. 754–760.

Данилов, А. Д. Положительные ионы в области *D*. I. Вариации ионного состава / А. Д. Данилов, А. Г. Симонов // Геомагнетизм и аэрномия. – 1975. – Т. 15. – № 4. – С. 643–650.

Деминов, М. Г. Ионосфера Земли: Закономерности и механизмы / М. Г. Деминов // Сборник «Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли». – М: ИЗМИРАН, 2015. – С. 295-346.

Деминов, М. Г. Изменчивость параметров максимума F2-слоя спокойной среднеширотной ионосферы при низкой солнечной активности: 1. Статистические свойства / М. Г. Деминов, Г. Ф. Деминова, Г. А. Жеребцов, О. М. Пирог, Н. М. Полех // Геомагнетизм и аэрномия. – 2011. – Т. 51. – № 3. – С. 352–359.

Егошин, А. А. Влияние метеорологических и волновых процессов на нижнюю ионосферу в условиях минимума солнечной активности по экспериментальным данным по распространению СДВ-ДВ в средних широтах / А.

А. Егошин, В. М. Ермак, Ю. И. Зецер, С. И. Козлов, В. П. Кудрявцев, А. Н. Ляхов, Ю. В. Поклад, Е. Н. Якименко // Физика Земли. – 2012. – № 3. – С. 101–112.

Елецкий, А. В. Диссоциативная рекомбинация электрона и молекулярного иона / А. В. Елецкий, Б. М. Смирнов // УФН. – 1982. – Т. 136. – № 1. – С. 25–46.

Елисеева, И. И. Общая теория статистики / И. И. Елисеева, М. М. Юзбашев. – М.: Финансы и статистика, 1999. – 480 с.

Иванов-Холодный, Г. С. Прогнозирование состояния ионосферы / Г. С. Иванов-Холодный, А. В. Михайлов. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 189 с.

Иванов-Холодный, Г. С. Солнце и ионосфера / Г. С. Иванов-Холодный, Г. М. Никольский. – М.: Наука, 1969. – 455 с.

Кириллов, В. В. Некоторый метод расчёта поля СДВ вертикального магнитного диполя в волноводном канале Земля-ионосфера / В. В. Кириллов // Проблемы дифракции и распространения волн. Л.: ЛГУ. – 1981. – Вып.18. – С. 87–103.

Кириллов, В. В. Положение существенной области для дальнего поля от СНЧ- до СВ-диапазона / В. В. Кириллов, А. Е. Пронин // Проблемы дифракции и распространения волн. Л.: ЛГУ. – 1997. – Вып.27. – С. 95 – 101.

Козлов, С. И. Фотохимия области D в условиях искусственной инжекции водорода и воды / С. И. Козлов // Геомагнетизм и аэрномия. – 1984. – Т. 24. – № 5. – С. 723–726.

Козлов, С. И. Статистическая модель основных параметров невозмущенной ионосферы для расчета распространения КВ на протяженных трассах / С. И. Козлов, Б. Ф. Бикинеев, В. М. Новикович // Тезисы докладов 4 Межвед. семинара по моделированию ионосферы. – Томск. – 1978. – С. 38–40.

Козлов, С. И. Ионная кинетика, малые нейтральные и возбужденные составляющие в области D с повышенным уровнем ионизации. 1. Постановка задачи и общая схема процессов / С. И. Козлов, В. А. Власков, Н. В. Смирнова // Космические исследования. – 1982. Т. 20. – № 6. – С. 881–891.

Козлов, С. И. Основные принципы построения вероятностно-статистических моделей ионосферы для решения задач распространения радиоволн / С. И. Козлов,

А. Н. Ляхов, С. З. Беккер // Геомагнетизм и аэрономия. – 2014. – Т. 54. – № 6. – С. 767–779.

Козлов, С. И. Обоснование требований к моделям ионосферы, используемым в радиолокационных системах дециметрового и метрового диапазонов длин волн / С. И. Козлов, А. Н. Ляхов, С. В. Якубовский, С. З. Беккер, Б. Г. Гаврилов, В. В. Яким // Труды V Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». – Санкт-Петербург. – 2018. – С. 455–457.

Корсунская, Ю. А. Влияние жесткого рентгеновского и гамма излучений Солнца на ионосферу Земли и другие процессы в геосферах. Часть I. Экспериментальные данные / Ю. А. Корсунская // Сборник ИДГ РАН «Динамические процессы в геосферах». – М.: ГЕОС, 2015. – С. 122–134.

Корсунская, Ю. А. Характеристики фотодиссоционных реакций в E и D-слоях ионосферы Земли / Ю. А. Корсунская, А. С. Стрелков // Сборник ИДГ РАН «Динамические процессы в геосферах». – М.: ГЕОС, 2013. – С. 234–244.

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

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

Крашенинников, И. В. Эффективность прогнозирования прохождения радиоволн в ионосфере на основе ионосферной модели IRI – 2001 / И. В. Крашенинников, И. Б. Егоров, Н. М. Павлова // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – Т. 48. – № 4. – С. 526–533.

Криволицкий, А. А. Трехмерная глобальная фотохимическая модель SCHARM. Учет вклада солнечной активности / А. А. Криволицкий, Т. Ю. Вьюшкова, Л. А. Черепанова, А. А. Куколева, А. И. Репнев // Геомагнетизм и аэрономия. – 2015а. – Т. 55. – № 1. – С. 64–93.

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

Криволицкий, А. А. Трехмерная глобальная численная фотохимическая модель CHARM-I. Учет процессов в области D ионосферы / А. А. Криволицкий, Л. А. Черепанова, Т. Ю. Вьюшкова, А. И. Репнев // Геомагнетизм и аэрономия. – 2015б. – Т. 55. – № 4. – С. 483–503.

Кринберг, И. А. Ионосфера и плазмосфера / И. А. Кринберг, А. В. Тацилин. – М.: Наука, 1984. – 177 с.

Кудрявцев, В. П. Моделирование ионизационно-рекомбинационных процессов в средней атмосфере / В. П. Кудрявцев, Н. Ю. Романюха // Математическое моделирование. – 1995. – Т. 7. – № 3. – С. 3–18.

Кулямин, Д. В. Моделирование климата нижней ионосферы / Д. В. Кулямин, В. П. Дымников // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 51. – № 3. – С. 317–337.

Кулямин, Д. В. Моделирование общей циркуляции тропосферы-стратосферы-мезосферы с включением D -слоя ионосферы / Д. В. Кулямин, В. П. Дымников // Гелиогеофизические исследования. – 2014. – № 10. – Вып. 7. – С. 15–44.

Курикша, А. А. Исследование эффективности использования модели IRI для внесения поправок в радиолокационные измерения координат спутников / А. А. Курикша, А. Л. Липкин // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2013. – Т. 18. – № 5. – С. 21–26.

Лапшин, В. Б. Модель SIMP как новый государственный стандарт распределения концентрации электронов в ионосфере (ГОСТ25645.146) / В. Б. Лапшин, А. В. Михайлов, А. Д. Данилов, М. Г. Деминов, А. Т. Карпачев, В. Н. Шубин, В. В. Михайлов, К. Г. Цыбуля, В. Н. Денисова // Труды XXV Всероссийской открытой конференции «Распространение радиоволн». – Томск. – 2016. – С. 51–56.

Ляхов, А. Н. Оценка точности расчетов по международной справочной модели ионосферы IRI–2016. I. Концентрации электронов / А. Н. Ляхов, С. И. Козлов, С. З. Беккер // Геомагнетизм и аэрономия. – 2019. – Т. 59. – №1. (принята к печати).

Ляхов, А. Н. Оценка точности расчетов по международной справочной модели ионосферы IRI–2016 / А. Н. Ляхов, С. И. Козлов, С. З. Беккер // Сборник тезисов Тринадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе». – Москва. – 2018. – С. 206.

Ляхов, А. Н. Вероятностные модели ионосферы для ЗГРЛС КВ диапазона / А. Н. Ляхов, С. И. Козлов, С. З. Беккер, С. Н. Пономарчук, А. В. Тащилин, Е. Б. Романова, В. И. Куркин, М. Пезин // Сборник тезисов Одиннадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе». – Москва. – 2016. – С. 154.

Мак-Иван, М. Химия атмосферы / М. Мак-Ивен, Л. Филлипс. – М.: Мир, 1978. – 375 с.

Месси, Г. Отрицательные ионы / Г. Месси. – М.: Мир, 1979. – 754 с.

Митра, А. П. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли / А. П. Митра. – М.: Мир, 1977. – 370 с.

Нагорский, П. М. Модовая структура КВ-сигналов во время регулярных суточных вариаций электронной концентрации / П. М. Нагорский, Ю. Е. Тарашук, Б. Б. Цыбиков // Геомагнетизм и аэрономия. – 1987. – Т. 27. – № 1. – С. 149–151.

Наследов, А. Д. Математические методы психологического исследования / А. Д. Наследов. – С-Пб: Речь, 2004. – 392 с.

Нестерова, И. И. Каталог профилей электронной концентрации области D ионосферы / И. И. Нестерова, Э. И. Гинзбург. – Новосибирск: ИГиГ, 1985. – 210 с.

Николе, М. Аэрономия / М. Николе. – М.: Мир, 1964. – 189 с.

Пономарчук, С. Н. Комплексный алгоритм расчета характеристик распространения КВ радиоволн на основе модели ионосферы и плазмосферы и метода нормальных волн / С. Н. Пономарчук, Н. В. Ильин, А. Н. Ляхов, М. С. Пензин, Е. Б. Романова, А. В. Тащилин // Известия высших учебных заведений, Физика. – 2016. – Т. 59. – №12. – С. 70–73.

Смирнов, Б. М. Отрицательные ионы / Б. М. Смирнов. – М.: Атомиздат, 1978. – 176 с.

Соболь, И. М. Численные методы Монте-Карло / И. М. Соболь. – М.: Наука, 1973. – 312 с.

Стрелков, А. С. Вторичное электронообразование в *E*- и *D*-слоях ионосферы в процессе ионизации жестким ультрафиолетовым рентгеновским излучением Солнца / А. С. Стрелков // Сборник ИДГ РАН «Динамические процессы в геосферах». – М.: ГЕОС, 2012. – С. 130–140.

Стрелков, А. С. Электронно- и ионно- образование электронным ударом на высотах *D*- и *E*-слоев ионосферы / А. С. Стрелков // Сборник ИДГ РАН «Динамические процессы в геосферах». – М.: ГЕОС, 2014. – С. 25–37.

Тертышников, А. В. Индексы геомагнитной активности / А. В. Тертышников, М. А. Морозова, С. А. Нечаев и др. – М.: ФГБУ «ИПГ», 2013. – 87 с.

Ткачев, Г. Н. Проблема оперативного обеспечения средств дальней радиолокации геофизическими данными / Г. Н. Ткачев // Тез. докладов XV Конф. молодых ученых. «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск 11-16 сентября 2017 г. – Иркутск. – 2017. – С. 7–9.

Уиттен, Р. К. Основы аэрномии / Р. К. Уиттен, И. Дж. Поппов. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 406 с.

Уиттен, Р. К. Физика нижней ионосферы / Р. К. Уиттен, И. Дж. Поппов. – М.: Мир, 1968. – 292 с.

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

Anderson, L. G. Atmospheric chemical kinetic data survey / L. G. Anderson. // Rev. Geophys. Space Phys. – 1976. – Vol. 14. – N 2. – P. 151–192.

Anderson, G. P. Atmospheric Constituent Profiles (0-120km) / G. P. Anderson, S. A. Clough, F. X. Kneizys, et al. // Environmental research papers. – 1986. N 954. – 46 p.

ANSI/AIAA G-034-1998. Guide to Reference and Standard Ionosphere Models. – Reston, Virginia, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999. – p. 56.

Bailey, S. M. A model of nitric oxide in the lower thermosphere / S. M. Bailey, C. A. Barth, S. C. Solomon. // J. Geophys. Res. – 2003. – Vol. 107. – N. A8. – 1205.

Barth, C. Nitric oxide in the upper atmosphere / C. Barth. // Annales De Geophysique. – 1966. – Vol. 22. – P. 198–207.

Barth, C. A. Global observations of nitric oxide in the thermosphere / C. A. Barth, K. D. Mankoff, S. M. Bailey, S. C. Solomon. // J. Geophys. Res. – 2003. – Vol. 108. – N. A1. – 1027.

Basak, T. Study of the effects on lower ionosphere due to solar phenomena using very low frequency radio wave propagation / T. Basak. – Dissertation. Department of physics. University of Calcutta. – 2013.

Baulch, D. L. Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry / D. L. Baulch, R. A. Cox, R. F. Hampson et al. // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1980. – Vol. 9. – N 2. – P. 295–322.

Bekker, S. Probabilistic ionospheric models for radiowave propagation problems / S. Bekker, S. Kozlov, A. Lyakhov. // Abstracts of 40th COSPAR Scientific Assembly. Moscow. – 2014. – P. 191.

Bekker, S. Statistical analysis of UV emissions from TIMED GUVI data / S. Bekker, I. Ryakhovskiy. // Abstracts of the 3rd COSPAR Symposium. Korea. – 2017. – P. 82.

Bilitza, D. Electron density in the D-region as given by the IRI / D. Bilitza // Rep. UAG-82. Boulder, Co.: WDC A for Sol.-Terr. Phys. – 1981. – P. 7–10.

Bilitza, D. Ionospheric models for radio propagation studies / D. Bilitza // Review of Radio Science 1999 – 2002, edited by W.R. Stone, IEEE and Wiley. – 2002. – P. 625–679.

Bilitza, D. The *E*-and *D*-region in IRI / D. Bilitza // Adv. Space Res. – 1998. – Vol. 21. – P. 871–874.

Bilitza, D. International Reference Ionosphere 2016: from ionospheric climate to real-time weather predictions / D. Bilitza, D. Altadill, V. Truhlik, V. Shubin, I. Galkin, B. Reinisch, X. Huang // Space Weather. – 2017. – Vol. 15. – N 2. – P. 418–429.

Blank, C. A. Physical and Chemical characteristics of the Earth's atmosphere / C. A. Blank, T. Bauren, M. H. Bortner, A. A. Feryok. – Report DNA 3467H. – 1974. – 271 p.

Burns, C. J. Chemical modelling of the quiet summer *D* and *E* regions using EISCAT electron density profiles / C. J. Burns, J. K. Hargreaves, E. Turunen, H. Matreinen, H. Ranta // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1991. – Vol.53. – P. 115–134.

Cummer, S. A. Lightning and ionospheric remote sensing using VLF/ELF radio atmospherics / S. A. Cummer. – Dissertation. Department of electrical engineering and the committee on graduate studies of Stanford university. – 1997.

Cummer, S. A. Ionospheric *D* region remote sensing using VLF radio atmospherics / S. A. Cummer, U. S. Inan, T. F. Bell // *Radio Science.* – 1998. – Vol. 33. – P. 1781–1792.

Danilov, A. D. Parametric model of the *D*-region, taking meteorological effects into account / A. D. Danilov, A. I. Rodevich, N.V. Smirnova // *Geomagn. Aeron.* – 1991. – Vol. 31. – P. 881–885.

Danilov, A. D. Problems with incorporating a new *D*-region model into the IRI / A. D. Danilov, A. I. Rodevich, N. V. Smirnova // *Adv. Space Res.* – 1995. Vol. 15. – P. 165–168.

Davis, M. J. Global sensitivity analysis of chemical-kinetic reaction mechanisms: construction and deconstruction of the probability density function / M. J. Davis, R. T. Skodje, A. S. Tomlin // *J. Physical Chemistry.* – 2011. – Vol. 115. – P. 1556–1579.

Ferguson, J. A. Ionospheric model validation at VLF and LF / J. A. Ferguson // *Radio Science.* – 1995. – Vol. 30. – N. 3. – P. 775–782.

Han, F. Daytime ionospheric *D* region sharpness derived from VLF radio atmospherics / F. Han, S. A. Cummer, J. Li, G. Lu // *J. Geophysical research.* – 2011. – Vol. 116. – A05314.

Hargreaves, J. K., *The solar-terrestrial environment* / J. K. Hargreaves. – Cambridge University Press, 1995. – 420 p.

Haug, A. A two-ion model of electron-ion recombination in the *D* region / A. Haug, B. Landmark // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1970. – Vol. 32. – N 3. – P. 405–407.

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

Hedin, A. E. Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere / A. E. Hedin // *J. Geophys. Res.* – 1991. – Vol. 96. – P. 1159–1172.

Krivolutsky, A. A. The Three-Dimensional Numerical Model CHARM-I: The Incorporation of Processes in the Ionospheric D-region / A. A. Krivolutsky, L. A. Cherepanova, T. Yu. Vyushkova, A. I. Repnev // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2015. – Vol. 55. – N 4. – P. 468–487.

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

Levy, M. Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation / M. Levy. – IET, 2000. – 336 p.

Lyakhov, A. The concept of the probabilistic-statistical model of the lower ionosphere / A. Lyakhov, S. Kozlov, S. Bekker // *International living with a star workshop.* Irkutsk. – 2013. – P. 41.

McKinnell, L-A. A neural network-based ionospheric model for the auroral zone / L-A. McKinnell, M. Friedrich // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2007. – Vol. 69. – P. 1459–1470.

Mlynczak, M. G. Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry observations of daytime mesospheric $O_2(^1\Delta_g)$ 1.27 mm emission and derivation of ozone, atomic oxygen, and solar and chemical energy deposition rates / M. G. Mlynczak, B. T. Marshall, F. J. Martin-Torres, J. M. Russell III, R. E. Thompson, E. E. Remsberg, L. L. Gordley // *J. Geophys. Res.* – 2007. – Vol. 112. – D15306.

Neale, R. B. Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 5.0) / R. B. Neale, C-C. Chen, P. H. Lauritzen et al. – 2012 Tech. Rep. NCAR/TN-486+STR. NCAR, Boulder, Colo. – 2012. – 274 p.

Offermann, D. Recent advances in the study of the D-region / D. Offermann // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1979. – Vol. 41. – N 7/8. – P. 735–752.

Paulsen, D.E. Improved photoionization rates of $O_2(^1\Delta_g)$ in the D – region / D. E. Paulsen, R. E. Huffman, J. C. Larrabe // *Radio Sci.* – 1972. – Vol. 7. – N 1. P. 51–55.

Pfaff, R. F. Jr. The near-Earth plasma environment / R. F. Pfaff Jr. // *Space Sci. Rev.* – 2012. – Vol. 168. – P. 23 – 112.

Ponomarchuk, S. N. The modeling of HF radio wave propagation characteristics during the periods of solar flares / S. N. Ponomarchuk, V. I. Kurkin, A. N. Lyakhov, E. B. Romanova, A. V. Tashchilin // *SPIE Proceedings, 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics.* – 2015. – Vol. 9680. – 96805F- 1.

Russell, J. M. III. An Overview of the SABER Experiment and Preliminary Calibration Results / J. M. Russell III., M. G. Mlynczak, L. L. Gordley, J. Tansock, R. Esplin // *Space Dynamics Lab Publications.* – 1999. – Paper 114.

Rawer, K. Goals and status of the International Reference Ionosphere / K. Rawer, D. Bilitza, S. Ramakrishnan // *Rev. Geophys.* – 1978. – Vol. 16. – P. 177–181.

Saltelli, A. Sensitivity analysis for chemical models / A. Saltelli, M. Ratto, S. Tarantola, F. Campolongo // *Chemical Reviews.* – 2005. – Vol. 105. – N 7. – P. 2811–2828.

Sechrist, C. F. Jr. Comparisons of techniques for measurement of D-region electron densities / C. F. Jr. Sechrist // *Radio Sci.* – 1974. – Vol. 9. – N 2. – P. 137–149.

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

Schunk, R. W., Nagy A. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry* / R. W. Schunk, A. Nagy. – Cambridge University Press, 2009. – 628 p.

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

Turunen, E. Sodankyla Ion Chemistry (SIC) model / E. Turunen, H. Matveinen, H. Ranta. – Sodankyla Geophysical Observatory. Rept. 49. Finland. – 1992.

Turunen, E. *D* Region Ion Chemistry Model / E. Turunen, J. Tolvanen, H. Matveinen, H. Ranta. – *STEP Handbook of Ionospheric Models*, edited by R.W. Schunk. – 1996. – N 2. – P. 1–25.

Verronen, P. T. WACCM-D – Whole atmosphere community climate model with D-region ion chemistry / P. T. Verronen, M. E. Andersson, D. R. Marsh, T. Kovacs, J. M. C. Plane // *J. Adv. Model. Earth Syst.* – 2016. – Vol. 8. – P. 954–975.

Wait, J. R. Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves / J. R. Wait, K. P. Spies. – NBS Technical Note 300, 1964. – 110 p.

Waters, J. W. The Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS MLS) on the Aura satellite / J. W. Waters, L. Froidevaux, R. S. Harwood et al. // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* – 2006. – Vol. 44. – N 5. – P. 1075–1092.