

**АНАЛИЗ ПРИКЛАДНЫХ МОДЕЛЕЙ ИОНОСФЕРЫ  
ДЛЯ РАСЧЕТА РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН  
И ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
В ИНТЕРЕСАХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ.  
II. ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ МОДЕЛИ**

**ANALYZING EXISTING APPLIED MODELS OF THE IONOSPHERE  
TO CALCULATE RADIO WAVE PROPAGATION AND A POSSIBILITY OF THEIR  
USE FOR RADAR-TRACKING SYSTEMS.  
II. DOMESTIC MODELS**

**В.В. Алпатов**

*Институт прикладной геофизики им. академика  
Е.К. Федорова Росгидромета,  
Москва, Россия, v\_alpatov@mail.ru*

**С.З. Беккер**

*Институт динамики геосфер им. академика  
М.А. Садовского РАН,  
Москва, Россия, susanna.bekker@gmail.com*

**С.И. Козлов**

*Институт динамики геосфер им. академика  
М.А. Садовского РАН,  
Москва, Россия, s\_kozlov@inbox.ru  
Научно-исследовательский испытательный центр  
ЦНИИ войск ВКО,  
Москва, Россия*

**А.Н. Ляхов**

*Институт динамики геосфер им. академика  
М.А. Садовского РАН,  
Москва, Россия, alyakhov@idg.chph.ras.ru*

**В.В. Яким**

*Институт динамики геосфер им. академика  
М.А. Садовского РАН,  
Москва, Россия, 12-220@list.ru  
Научно-исследовательский испытательный центр  
ЦНИИ войск ВКО,  
Москва, Россия*

**С.В. Якубовский**

*Научно-исследовательский испытательный центр  
ЦНИИ войск ВКО,  
Москва, Россия, syakubovskiy@mail.ru*

**V.V. Alpatov**

*Fedorov Institute of Applied Geophysics,  
Moscow, Russia,  
v\_alpatov@mail.ru*

**S.Z. Bekker**

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

**S.I. Kozlov**

*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of RAS,  
Moscow, Russia, s\_kozlov@inbox.ru  
Research Testing Center, Central Research Institute,  
Aerospace Defense Forces,  
Moscow, Russia*

**A.N. Lyakhov**

*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of RAS,  
Moscow, Russia, alyakhov@idg.chph.ras.ru*

**V.V. Yakim**

*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of RAS,  
Moscow, Russia, 12-220@list.ru  
Research Testing Center, Central Research Institute,  
Aerospace Defense Forces,  
Moscow, Russia*

**S.V. Yakubovskiy**

*Research Testing Center, Central Research Institute,  
Aerospace Defense Forces,  
Moscow, Russia, syakubovskiy@mail.ru*

**Аннотация.** Из ионосферных моделей, разработанных в институтах России (СССР), выбираются те, которые могут быть использованы в интересах загоризонтных декаметровых и надгоризонтных сантиметровых, дециметровых и метровых радиолокационных средств (РЛС). Таких моделей оказалось только три: детерминированная модель ИЗМИРАН и ИПГ Росгидромета, детерминированная модель ИСЗФ СО РАН и ИДГ РАН, вероятностно-статистическая модель ИДГ РАН. Дается краткое описание этих моделей и проводится их анализ на соответствие требованиям, изложенным в [Аксенов и др., 2019]. Показывается, что вероятностно-статистические модели могут удовлетворить всем требованиям и их разработка должна быть одним из основных направлений в ионосферном моделировании в интересах РЛС.

**Ключевые слова:** радиолокационные средства, модели ионосферы.

**Abstract.** We consider the ionospheric models that are suitable for over-the-horizon HF and UHF band radars. Namely, there are three such models: the numerical model developed by IZMIRAN and Fedorov Institute of Applied Geophysics, the numerical model designed by ISTP SB RAS and IDG RAS, and the probabilistic model worked out by IDG RAS. We briefly describe these models and report the results of the analysis of their compliance with radar requirements. Probabilistic models are shown to be most promising; hence, they must be placed at the frontier of ionosphere simulation.

**Keywords:** radar means, ionospheric models.

## ВВЕДЕНИЕ

В первой части статьи [Аксенов и др., 2019] дается подробная классификация моделей ионосферы, кратко описываются существующие методы учета состояния ионосферы в современных РЛС сантиметрового, дециметрового, метрового и декаметрового диапазонов длин волн, формулируются требования к моделям ионосферы с целью их использования в радиолокации, что позволяет значительно улучшить характеристики РЛС. Цель данной, второй части работы — анализ отечественных моделей на соответствие этим требованиям.

Основная сложность проведения исследования заключается в выборе моделей ионосферы, которые следует включить в анализ. Дело в том, что к настоящему времени достаточно хорошо известны физические процессы, определяющие поведение электронной концентрации  $N_e$ , во всяком случае, на высотах  $h \leq 500\text{--}600$  км и накоплены весьма большие объемы экспериментальных данных, полученных радиофизическими методами, а также с помощью ракет и спутников. Все это послужило основой для разработки в России (СССР) множества теоретических, эмпирических, полумпирических моделей ионосферы различной степени сложности и предназначения (см., например, [Данилов, 1967, 1981; Поляков и др., 1968; Иванов-Холодный, Никольский, 1969; Данилов, Власов, 1973; Гершман, 1974; Ионосферные модели, 1975; Чавдаров и др., 1975; Гершман и др., 1976; Андрияко и др., 1978; Козлов и др., 1978, 2014; Кринберг, 1978; Фаткуллин, 1978, 1982; Иванов-Холодный, Нусинов, 1979; Намгаладзе, 1979; Смирнова, Власов, 1979; Иванов-Холодный, Михайлов, 1980; Мизун, 1980, 1983; Фаткуллин и др., 1981; Кошелев и др., 1983; Кринберг, Тащилин, 1984; Брюнелли, Намгаладзе, 1988; Зевакина и др., 1990; Часовитин и др., 1990; Шефов и др., 2006; Беккер и др., 2013, 2017; Лапшин и др., 2016а, б; Павлов, Павлова, 2016; Wang Zheng et al., 2017; Дашкевич и др., 2017; Криволицкий и др., 2017; Шубин, 2017; Беккер, 2018; Деминов, Шубин, 2018; Шубин, Деминов, 2019; Сергиенко, 2019]).

Мы не ставим задачу дать обзор опубликованных работ, и, по всей видимости, представленный выше перечень не является полным. Тем не менее выскажем некоторые общие соображения. Подавляющее большинство разработанных моделей являются детерминированными, хотя хорошо известно, что ионосфера — непрерывно изменяющаяся (случайно-неоднородная) среда, следовательно, для описания ее лучше всего подходят вероятностно-статистические методы. Отечественные эмпирические модели ионосферы строились в основном на использовании зарубежных экспериментальных данных из-за серьезного отставания СССР, а затем и Российской Федерации в количестве и качестве средств измерения ионосферных параметров. В то же время теоретические модели в принципе не уступали зарубежным. Многие модели можно охарактеризовать как частные (например, модели критической частоты  $f_oF_2$ , максимальной электронной концен-

трации  $N_{emE}$  и тому подобные). В целом разработанные и создаваемые в настоящее время модели ионосферы (за редким исключением) возможно использовать для расчета распространения только декаметровых волн, т. е. для односкачковых загоризонтных РЛС [Аксенов и др., 2019].

Так по каким же критериям выбрать модели для дальнейшего анализа? Мы основываемся на трех весьма простых принципах.

1. Модель должна быть разработана в последние 15–20 лет (допускается, что идеи для построения такой модели были высказаны и обоснованы значительно раньше), т. е. она должна быть построена на современном научном уровне.

2. Модель ионосферы может быть использована в интересах как загоризонтных, так и надгоризонтных РЛС, т. е. она должна описывать и внешнюю ионосферу.

3. Имеется более или менее подробное описание модели, которое позволит в полном объеме оценить ее на соответствие требованиям [Аксенов и др., 2019].

Оказалось, что только три модели более или менее удовлетворяют сформулированным выше требованиям. Во-первых, детерминированная модель, созданная в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН (ИЗМИРАН) и Институте прикладной геофизики (ИПГ) Росгидромета [Лапшин и др., 2016а], во-вторых, детерминированная модель, разработанная в Институте солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН и Институте динамики геосфер (ИДГ) РАН [Кринберг, Тащилин, 1984; Стрелков, 2012; Корсунская, Стрелков, 2013; Пономарчук и др., 2015, 2016; Корсунская, 2015; Ponomarchuk et al., 2015] и, в-третьих, вероятностно-статистическая модель, разрабатываемая в Институте динамики геосфер РАН [Козлов и др., 1978, 2014; Беккер и др., 2013, 2017; Беккер, 2018]. Ниже приведен анализ этих моделей: даются их краткие описания и приводятся результаты оценок исходя из основной цели исследования.

## МОДЕЛЬ ИОНОСФЕРЫ, РАЗРАБОТАННАЯ В ИЗМИРАН И ИПГ РОСГИДРОМЕТА

Разработка теоретических, эмпирических и полумпирических моделей ионосферы являлась и является важнейшим направлением ионосферных исследований. В зависимости от солнечной и магнитной активности, сезона, времени суток, геомагнитной широты создавались модели областей D, E, F1, F2, слоя E<sub>s</sub>, редко внешней ионосферы, а также различной природы ионосферных возмущений [Аксенов и др., 2019].

Одним из итогов работы по проблеме ионосферного моделирования является разработка ИПГ и ИЗМИРАН совместного проекта нового ГОСТ [Лапшин и др., 2016а]. Кратко опишем основные подходы и принципы, использованные при создании модели.

Прежде всего укажем, что она предназначена для замены части ГОСТа [Часовитин и др., 1990], где

рассчитывается  $N_e$  в интервале высот  $h = 65\text{--}1000$  км над всей земной поверхностью при любом времени суток, сезоне и различных уровнях солнечной активности. Входными параметрами модели являются географическая широта и долгота, день года или дата, местное или всемирное время, значение индекса солнечной активности  $R_z$ , усредненное по 12 месяцам года ( $R_{12}$ ). Сначала вычисляются максимальные концентрации электронов  $N_{em}$  и соответствующие им высоты  $h_m$ , т. е.  $h_mD$ ,  $N_{emD}$ ;  $h_mE$ ,  $N_{emE}$ ;  $h_mF1$ ,  $N_{emF1}$ ;  $h_mF2$ ,  $N_{emF2}$ . Во многих случаях используются соответствующие  $N_{em}$  значения критических частот слоев  $f_o$  в МГц,  $N_e$  в  $\text{м}^{-3}$ . Для описания  $N_e(h)$  в разных областях ионосферы применяется известная функция Эпштейна.

Расчет  $N_e(h)$  в разных слоях ионосферы базировался как на относительно старых исследованиях, так и на принципиально новых. Так, моделирование D-области проводилось на основе модели IRI [Bilitza, 1981], а при создании медианной модели области F2 использовался традиционный метод сферических гармоник. Описание области F1 практически не отличается от [Bilitza, 2001]. В то же время модели областей E и слоя F2 для Северного полушария являются новыми. Особенно стоит отметить разработку модели высокоширотного слоя E, играющего важную роль при работе РЛС дециметрового и метрового диапазонов, расположенных на полярных широтах (данный факт подтверждается в процессе эксплуатации этих РЛС).

Разработанная ИПГ и ИЗМИРАН модель ионосферы в целом является эмпирической детерминированной. Как отмечают сами авторы, она не распространяется на условия высокой магнитной активности и не учитывает спорадический слой E<sub>s</sub>.

### МОДЕЛЬ ИОНОСФЕРЫ, РАЗРАБОТАННАЯ В ИСЗФ СО РАН И ИДГ РАН

Программный комплекс для моделирования ионосферы и распространения радиоволн разрабатывался совместно ИСЗФ СО РАН и ИДГ РАН в 2008–2015 гг. Целью разработки являлось создание аппаратно-программного комплекса (АПК) для прогноза распространения КВ- и СДВ/ДВ-радиоволн при всех наблюдаемых диапазонах вариаций параметров геомагнитной и солнечной активности. В дальнейшем пришло понимание, что модель можно использовать и для сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов длин волн.

АПК включает в себя пять отдельных блоков:

- 1) блок моделирования ионосферы и плазмосферы на высотах более 100 км;
- 2) блок моделирования авроральной ионосферы на высотах E-слоя (90–150 км);
- 3) блок моделирования D-слоя ионосферы (40–100 км);
- 4) блок моделирования распространения КВ-радиоволн (2–30 МГц);
- 5) блок моделирования распространения СДВ/ДВ-радиоволн (10–100 кГц).

Разработка составных частей модели велась на основе существовавших к 2008 г. численных моделей, а также результатов исследований D-области [Стрелков, 2012; Корсунская, Стрелков, 2013; Корсунская, 2015]. В процессе разработки АПК была выполнена сквозная верификация программных кодов, благодаря которой удалось добиться достоверной воспроизводимости результатов расчетов при запусках под управлением разных операционных систем и при сборке под разными компиляторами. Отдельная задача, решавшаяся в ходе разработки АПК, заключалась в максимальном ускорении скорости расчетов. Эта задача была решена частично. Кратко рассмотрим отдельные блоки модели.

### Блок моделирования ионосферы и плазмосферы на высотах более 100 км

Данная модель относится к классу детерминированных полуэмпирических моделей ионосферы и плазмосферы. В модели численно решаются уравнения динамики плазмы. Параметры нейтральной атмосферы задаются по эмпирической модели NRLMSISE-2000. Скорость нейтрального ветра в рабочей версии АПК рассчитывается по эмпирической модели HWM-2007. В исследовательской версии применялся режим численного расчета скоростей нейтрального ветра, что позволило повысить точность расчета критической частоты F2-слоя и высоты его максимума. Параметры геомагнитного поля рассчитываются по модели IGRF-2012.

Модель относится к полулагранжевым, использует явное расщепление по физическим процессам. Данный подход позволяет получить в принципе произвольное пространственное разрешение. Практически разрешение по пространству и времени определяется физически доступными параметрами моделей нейтральной атмосферы (15° по долготе и 1 ч по времени). Меньшее разрешение используется при расчетах в авроральной зоне и при учете ограничений, накладываемых блоками расчета распространения радиоволн.

Используемая в модели идеология является на сегодня уникальной. Процесс расчета начинается с задания требуемых координат и текущего времени. Формирование исходных данных включает задание предыстории геомагнитной активности ( $K_p$ -индекс) за восемь трехчасовых интервалов, текущего и среднего за три месяца значений солнечной активности (индекс  $F10.7$ ). В трехмерной дипольной системе координат строится ионосферная (плазмосферная) силовая трубка в точке с заданными координатами. Далее с обратным временем на трое суток назад решается задача движения (нахождения траектории) выбранной силовой трубки в ионосфере и плазмосфере с записью условий солнечного освещения, потоков высыпавшихся из магнитосферы частиц, электрических полей, параметров нейтральной атмосферы. Из найденной точки пространства выполняется расчет вперед по времени в исходную точку. При этом в выбранной трубке на эйлеровой сетке решается система уравнений в частных производных, описывающая динамику ионосферной плазмы.

Принципиальное отличие модели ИСЗФ СО РАН от известных трубочных иностранных моделей FLIP, STIP, Graz, SAMI-2, -3 заключается в согласованном рассмотрении кинетики сверхтепловых электронов в ионосфере и плазмосфере.

Таким образом, в расчетах выбранная плазменная трубка существует 72 ч, подвергаясь переменному воздействию солнечной и корпускулярной ионизации и проходя через разную нейтральную ионосферу. Это позволяет учесть эффекты памяти атмосферно-ионосферного и плазмосферно-ионосферного взаимодействия.

Первичная верификация модели выполнялась по измерениям параметров ионосферы на сети ионозондов высоких и средних широт.

Медианные значения абсолютной величины отклонения рассчитанных  $f_oF_2$  от измеренных превышают 1 МГц только для высокой солнечной активности и меньше 0.52 МГц для низкой солнечной активности. Тенденция увеличения  $f_oF_2$  с ростом солнечной активности сохраняется для всех сезонов.

Максимальные значения абсолютной величины отклонения рассчитанных  $f_oF_2$  от измеренных больше 2 МГц только для двух случаев из 48 при низкой солнечной активности, для восьми случаев из 48 при средней и для 31 случая из 48 при высокой солнечной активности.

Согласно оценке математического ожидания этого закона распределения наиболее вероятная погрешность разработанной модели при воспроизведении пространственно-временных характеристик F2-области ионосферы составляет 0.9 МГц. В исследовательском варианте была разработана модель самосогласованного учета нейтрального ветра. Предварительные результаты тестирования модели с использованием самосогласованного подхода к расчету ветров показали, что можно существенно улучшить точность расчетов, во всяком случае, в спокойных геофизических условиях.

Вторичная верификация модели была выполнена по радиофизическим измерениям на трассах наклонного ионосферного зондирования в КВ-диапазоне. В целом для полуэмпирических моделей ионосферы достигнуты вполне удовлетворительные результаты, подтвержденные как физическим, так и радиофизическим тестированием.

Недостатки модели:

1. Программный код не может эксплуатироваться на современной 64-разрядной вычислительной технике. Устойчивая работа модуля расчета ионосферы достигается только при компиляции в 32-разрядном режиме и только в 32-разрядной операционной системе.

2. Необходимость расчета истории на 72 ч назад приводит к требуемому времени вычислений 1 мин на одну точку по координатам при выдаче информации в диапазоне высот 40–500 км с шагом по высоте 10 км на процессоре Xeon 3 ГГц. Реально расчеты выполняются до высот апекса силовой трубки магнитного поля (в случае замкнутых силовых линий) или до 10 радиусов Земли для разомкнутых силовых линий в полярной зоне. Верификация результатов рас-

чета электронной концентрации в плазмосфере по спутниковым данным не выполнялась. Корректность расчета плазмосферно-ионосферного взаимодействия проверялась косвенно по улучшению точности расчета параметров F2-области.

3. Модель принципиально написана под моделирование естественных условий. «Горячий» старт от текущего времени с дополнительным источником ионизации в существующем программном коде невозможен.

4. Отклик нейтральной атмосферы и системы нейтральных ветров на геомагнитные возмущения, интенсивные высыпания электронов и протонов учитывается только эмпирическими моделями. Точность последних требует отдельного исследования.

5. Эффекты жестких высыпаний в высоких широтах не учитываются. Используется эмпирическая модель HARDY-08, задающая медианные значения средней энергии и потока частиц как функции  $K_p$ -индекса, геомагнитной широты и магнитного локального времени.

6. Временная динамика электрического поля, отвечающего за формирование траектории ионосферной трубки в течение 72 ч, рассчитывается по эмпирической модели WEIMER-2001. Самосогласованного расчета изменения электрического поля и системы токов нет.

### Блок моделирования авроральной ионосферы на высотах E-слоя

Данный блок может использоваться для уточнения характеристик E-слоя в высоких широтах при совместных протонных и электронных высыпаниях. Данный блок является нуль-мерной 38-компонентной плазмохимической моделью, учитывающей процессы ионизации УФ-излучением, высыпающимися электронами и протонами. В модели учитываются колебательно-возбужденные состояния NO до 16-го уровня включительно. Модель верифицировалась по измерениям вертикального профиля электронной концентрации на радарх некогерентного рассеяния в Sondstrom и Tromsø, по измерениям интенсивности оптических эмиссий (в видимом и ИК-диапазонах), измерениям  $f_oE$  на ионозондах и по регистрации треков наклонного зондирования ионосферы на трассе Соданкюла–Михнево в условиях сильных геомагнитных возмущений. Достигнута точность расчетов 5–20 % в зависимости от использования эмпирической модели высыпаний или реально измеренных спектров электронов и протонов на спутнике, находившемся в силовой трубке геомагнитного поля, опирающейся на наземный пункт наблюдений.

Недостатки модели:

- использование эмпирической модели нейтральной атмосферы;
- использование эмпирической модели высыпаний энергичных частиц;
- отсутствие учета динамики плазмы и электрических полей;
- время расчетов порядка 5 с на одну точку по высоте на процессоре 2.2 ГГц.



### Блок моделирования нижней ионосферы

Достаточно типовая 22-компонентная нульмерная плазмохимическая модель. Главное достоинство — явный корректный учет ионизации рентгеновским излучением во время солнечных вспышек. Верификация выполнялась радиофизическими методами путем сопоставления результатов расчетов с данными наблюдения за сигналами СДВ/ДВ-передатчиков. Сопоставление с данными наблюдений амплитуд сигналов СДВ-передатчиков дало качественно правильный отклик на трассах разной ориентации и протяженности во время вспышек разных классов. Разброс исходных данных по параметрам излучения в открытых источниках достигает порядка величины.

Расчеты затухания КВ-радиоволн во время вспышек разных классов находятся в согласии (в первом приближении) с экспериментальными данными наклонного зондирования в диапазоне частот 2–30 МГц.

### Обобщенные выводы

Модель ионосферы, разработанная совместно ИСЗФ СО РАН и ИДГ РАН, является на сегодня единственной отечественной моделью, прошедшей интенсивную верификацию на радиофизических данных КВ-диапазона. Модель может быть немедленно использована для решения задач загоризонтной радиолокации. Для получения опорных данных в задачах надгоризонтной радиолокации первую очередь необходимо уменьшить время расчетов на 2–3 порядка.

### ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, РАЗРАБОТАННАЯ В ИДГ РАН

Рассмотренные выше модели, как отмечалось, являются детерминированными. По своей физической сущности детерминированные модели принципиально не в состоянии соответствовать двум требованиям [Аксенов и др., 2019]:

1) учету нерегулярного, непрерывно изменяющегося состояния ионосферы (данному свойству ионосферы могут удовлетворить эмпирические, теоретические или полуэмпирические вероятностно-статистические модели);

2) решению различных вероятностных задач.

Следует заметить, что необходимость использования статистических методов в ионосферных и радиофизических исследованиях (прежде всего прикладных) декларируется уже давно [Рытов, 1966; Козлов и др., 1978; Лапшин и др., 2016]. Наиболее широкое применение статистические методы нашли в радиофизике.

Суть статистического моделирования, которое в конечном счете позволяет получать вероятностные оценки, заключается в следующем. С учетом исходных данных сначала рассчитываются средние (опорные) параметры ионосферы. Затем с помощью датчиков случайных чисел (ДСЧ), включенных в модель, в соответствии с заложенными в них законами распределения выбираются (реализуются) конкрет-

ные величины, которые далее используются при расчете затухания  $W$  КВ-радиоволны. Подобным образом делается  $N$  реализаций (итераций). Общее количество итераций определяется устойчивостью (сходимостью) расчета  $W$  при росте  $N$  (сразу заметим, что привязка к затуханию в общем случае не обязательна, возможно использование и какого-либо другого радиофизического эффекта).

Важной и в методологическом плане не до конца решенной проблемой является оценка законов распределения варьируемых (статистических) параметров. Естественно, ее необходимо делать на основании статистического анализа многочисленных независимых экспериментальных данных, но выбор объема этих данных с учетом методов их получения и большой зависимости от солнечной и магнитной активности, широты, времени суток и сезона остается не до конца ясным.

Современное состояние исследований можно охарактеризовать следующим образом:

1. Первая вероятностно-статистическая модель [Козлов и др., 1978, 2014], безусловно, нуждается в совершенствовании с учетом накопленных к настоящему времени экспериментальных данных и результатов теоретических исследований. Основные направления работ: распространение модели на полярные широты и до высот  $h \approx 600\text{--}650$  км; выбор более современных опорных значений  $N_e(h)$  и включение вариаций нейтрального состава ионосферы; получение или уточнение законов распределения варьируемых параметров; разработка и включение в модель различного типа возмущений; разработка методологий и проведение верификации модели по экспериментальным данным от РЛС.

2. Практически разработана в двух вариантах (эмпирически-статистическом и детерминированно-вероятностном) модель невозмущенной среднеширотной D-области [Беккер и др., 2013; Беккер, 2018]. Верификация полученных результатов по экспериментальным данным распространения СДВ/ДВ-радиоволн, полученным в ГФО «Михнево», подтвердила правомерность основных положений вероятностно-статистического моделирования и выявила области применения разработанных направлений. Проводится дальнейшее совершенствование модели.

3. Создана приближенная эмпирически-статистическая среднеширотная модель E<sub>s</sub>-слоя [Беккер и др., 2017] на основании обработки большого объема данных. Она требует уточнения и сопоставления расчетов с экспериментальными данными РЛС, имеющих различное географическое расположение. В аналогичных исследованиях нуждается и эмпирическая, близкая к вероятностной модель максимума электронной концентрации регулярной E-области ионосферы [Павлов, Павлова, 2016].

Очевидно, что эти вероятностно-статистические модели являются наиболее подходящими для использования в системах РЛС. Они соответствуют всем требованиям, предъявляемым к моделям распространения радиоволн [Аксенов и др., 2019]. К сожалению, большим недостатком этого направления исследований является отсутствие вероятностно-статистических моделей на  $h \geq 120$  км для всех широтных областей.

Кроме того, не совсем понятна методология использования таких моделей в конкретных РЛС любого диапазона частот.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа приведены в таблице, в которой требования к моделям [Аксенов и др., 2019] обозначены римскими цифрами: I — диапазон высот, II — широты, III — геофизические условия, IV — определяемые параметры ионосферы, V — ионосферные неоднородности, VI — учет непрерывно-изменяющейся среды, VII — решение вероятностных задач, VIII — скорость расчета, IX — верификация модели, X — степень разработки модели. Знаки в ячейках означают: «+» — соответствует; «-» — не соответствует; «±» — соответствует ограниченно; «п» — принципиально может соответствовать.

Обобщенные результаты анализа моделей

№	Модели	Требования к моделям									
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
1.	ИЗМИРАН, ИПГ	± п	± п	± п	+	- п	-	-	+	± п	+
2.	ИСЗФ, ИДГ	± п	± п	± п	+	- п	-	-	±	± п	+
3.	ИДГ	± п	± п	± п	+	- п	+	+	±	± п	±

Как видно, ни одна из рассматриваемых моделей не удовлетворяет в полном объеме предъявляемым требованиям. Это обусловлено двумя основными причинами: детерминированным подходом к их созданию (первые две модели) и отсутствием многих частных моделей, что в первую очередь относится к вероятностно-статистическим разработкам. Тем не менее видно, что вероятностно-статистические модели могут в той или иной степени соответствовать всем требованиям [Козлов и др., 2019]. На наш взгляд, это направление в ионосферном моделировании является наиболее перспективным и актуальным.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аксенов О.Ю., Козлов С.И., Ляхов А.Н. и др. Анализ прикладных моделей ионосферы для расчета распространения радиоволн и возможность их использования в интересах радиолокационных средств. I. Классификация прикладных моделей и основные требования, предъявляемые к ним в интересах радиолокационных систем // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 6, № 1. С. 86–96. DOI: [10.12737/szf-61202008](https://doi.org/10.12737/szf-61202008).

Андрияко В.А., Бурлак Л.Ф., Козлов С.И. Обобщенные эмпирические модели высотного распределения электронной концентрации в спокойной ионосфере на средних широтах // Космические исследования. 1978. Т. 16, № 5. С. 705–714.

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

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

Беккер С.З., Козлов С.И., Лисова С.С., Ляхов А.Н. Статистическая модель E<sub>s</sub>-области ионосферы для расчета

распространения радиоволн // XX Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы защиты и безопасности»: Труды. Санкт-Петербург, 3–6 апреля 2017 г. Т. 1. С. 110–116.

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

Гершман Б.Н. Динамика ионосферной плазмы. М.: Наука, 1974. 256 с.

Гершман Б.Н., Игнатъев Ю.А., Каменецкая Г.Х. Механизмы образования ионосферного спорадического слоя E<sub>s</sub> на различных широтах. М.: Наука, 1976. 108 с.

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

Данилов А.Д. Фотохимия области D // Ионосферные исследования. М.: Наука, 1981. № 34. С. 6–33.

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

Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Сергиенко Т.И., Козлов Б.В. Физико-химическая модель авроральной ионосферы // Космические исследования. 2017. Т. 55, № 2. С. 94–106. DOI: [10.7868/S0023420617020029](https://doi.org/10.7868/S0023420617020029).

Деминов М.Г., Шубин В.Н. Эмпирическая модель положения главного ионосферного провала // Геомагнетизм и аэрномия. 2018. Т. 58, № 3. С. 366–373. DOI: [10.7868/S0016794018030070](https://doi.org/10.7868/S0016794018030070).

Зевакина Р.А., Жулина Е.М., Носова Г.Н., Сергеевко Н.П. Руководство по краткосрочному прогнозированию ионосферы. М.: МГК АН СССР, 1990. 71 с.

Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В. Прогнозирование состояния ионосферы (детерминированный подход). Л.: Гидрометеиздат, 1980. 190 с.

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

Иванов-Холодный Г.С., Нусинов А.А. Образование и динамика дневного среднеширотного слоя E ионосферы // Труды ИПГ. 1979. № 37. 129 с.

Ионосферные модели / Под ред. М.Н. Фаткуллина. М.: Наука, 1975. 180 с.

Козлов С.И., Бикинцев Б.Ф., Новикович В.М. Статистическая модель основных параметров невозмущенной ионосферы для расчета распространения КВ на протяженных трассах // 4-й Межвед. семинар по моделированию ионосферы: тез. докладов. Томск, 1978. С. 38–40.

Козлов С.И., Ляхов А.Н., Беккер С.З. Основные принципы построения вероятностно-статистических моделей ионосферы для решения задач распространения радиоволн // Геомагнетизм и аэрномия. 2014. Т. 54, № 6. С. 767–779. DOI: [10.7868/S0016794014060121](https://doi.org/10.7868/S0016794014060121).

Козлов С.И., Аксенов О.Ю., Беккер С.З., и др. Какие модели необходимо разрабатывать в интересах радиолокационных систем сантиметрового, дециметрового и метрового диапазона длин волн // Тез. докладов 14-й Ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 11–15.02.2019, ИКИ РАН. С. 127.

Корсунская Ю.А. Влияние жесткого рентгеновского и гамма-излучения Солнца на ионосферу Земли и другие процессы в геосферах // Динамические процессы в геосферах. 2015. № 7. С. 122–133.

Корсунская Ю.А., Стрелков А.С. Характеристики фотодиссоционных реакций в E- и D-областях ионосферы Земли // Динамические процессы в геосферах. 2013. № 4. С. 234–244.

Кошелев В.В., Климов Н.Н., Сутырин Н.А. Аэрномия мезосферы и нижней термосферы. М.: Наука, 1983. 183 с.

Криволуцкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Миронова И.А. Изменения химического состава в полярных областях Земли после протонных вспышек на Солнце (трехмерное моделирование) // Геомагнетизм и аэрномия. 2017. Т. 57, № 2. С. 173–194. DOI: [10.7868/S0016794017020079](https://doi.org/10.7868/S0016794017020079).

Кринберг И.А. Кинетика электронов в ионосфере и плазмосфере Земли. М.: Наука, 1978. 215 с.

Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984. 177 с.

Лапшин В.Б., Михайлов А.В., Данилов А.Д. и др. Модель SIMP как новый государственный стандарт распределения концентрации электронов в ионосфере (ГОСТ 25645.146) // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г. (РРВ-25): Труды. Томск: Изд-во Томского гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2016а. Т. 1. С. 51–57. URL: <https://symp.iao.ru/files/symp/rwp/25/Tom1/051-057.pdf> (дата обращения 30 ноября 2019 г.).

Лапшин В.Б., Калинин Ю.К., Алпатов В.В. и др. Вопросы статистики в прикладной геофизике. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2016б. 160 с.

Мизун Ю.Г. Полярная ионосфера. Л.: Наука, 1980. 202 с.

Мизун Ю.Г. Нижняя ионосфера полярных широт. Л.: Наука, 1983. 247 с.

Намгаладзе А.А. Проблемы моделирования ионосферных возмущений // Ионосферные исследования. М.: Наука, 1979. № 28. С. 33–36.

Павлов А.В., Павлова Н.М. Зависимости от месяца года статистических характеристик  $N_mE$  средних и низких широт в дневных геомагнитных условиях при низкой солнечной активности // Геомагнетизм и аэрномия. 2016. Т. 56, № 4. С. 433–436. DOI: [10.7868/S0016794016040167](https://doi.org/10.7868/S0016794016040167).

Поляков В.М., Щепкин Л.А., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д. Ионосферные процессы. Новосибирск: Наука, 1968. 535 с.

Пономарчук С.Н., Котович Г.В., Романова Е.Б., Тащилин А.В. Прогноз характеристик распространения дециметровых радиоволн на основе глобальной модели ионосферы и плазмосферы // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 3. С. 49–54. DOI: [10.12737/10452](https://doi.org/10.12737/10452).

Пономарчук С.Н., Ильин Н.В., Ляхов А.Н. и др. Комплексный алгоритм расчета характеристик распространения КВ-радиоволн на основе модели ионосферы и плазмосферы и метода нормальных волн // Изв. вузов. Физика. Тематический выпуск. 2016. Т. 59, № 12/2. С. 71–74.

Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука, 1966. 463 с.

Сергеенко Н.П. Статистические особенности временных рядов вариаций критической частоты слоя F2 // Геомагнетизм и аэрномия. 2019. Т. 59, № 4. С. 474–481. DOI: [10.1134/S001679401904014X](https://doi.org/10.1134/S001679401904014X).

Смирнова Н.В., Власков В.А. Атомарный кислород в возмущенной высокоширотной D-области ионосферы // Моделирование физических процессов в полярной ионосфере. Апатиты, 1979. С. 82–87.

Стрелков А.С. Вторичное электрообразование в E- и D-слоях ионосферы в процессе ионизации жестким ультрафиолетовым и рентгеновским излучением Солнца // Динамические процессы в геосферах. 2012. № 3. С. 130–140.

Фаткуллин М.Н. Ионосферные возмущения // Итоги науки и техники. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы. М.: ВИНТИ, 1978. Т. 4. С. 6–107.

Фаткуллин М.Н. Физика ионосферы // Итоги науки и техники. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы. М.: ВИНТИ, 1982. Т. 6. 224 с.

Фаткуллин М.Н., Зеленова Т.И., Козлов В.К. и др. Эмпирические модели среднеширотной ионосферы. М.: Наука, 1981. 256 с.

Чавдаров С.С., Часовитин Ю.К., Чернышева С.П., Шефтель В.М. Среднеширотный спорадический слой E ионосферы. М.: Наука, 1975. 148 с.

Часовитин Ю.К., Авдюшин С.И., Армская О.А. Модель глобального распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов. ГОСТ 25645.146-89. М.: Гос. стандарт СССР, 1990. 825 с.

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

Шубин В.Н. Глобальная эмпирическая модель критической частоты F2-слоя ионосферы для спокойных геомагнитных условий // Геомагнетизм и аэрномия. 2017. Т. 57, № 4. С. 450–462. DOI: [10.7868/S0016794017040186](https://doi.org/10.7868/S0016794017040186).

Шубин В.Н., Деминов М.Г. Глобальная динамическая модель критической частоты F2-слоя ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. 2019. Т. 59, № 4. С. 461–473. DOI: [10.1134/S0016794019040151](https://doi.org/10.1134/S0016794019040151).

Bilitza D. Electron density in the D region as given by the IRI // IRI-79. WDC-A-STP Report UAG-82. Boulder Colorado, 1981. P. 7–10.

Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 // Radio Sci. 2001. V. 36, iss. 2. P. 261–275. DOI: [10.1029/2000RS002432](https://doi.org/10.1029/2000RS002432).

Ponomarchuk S.N., Kurkin V.I., Lyakhov A.N., Romanova E.B., Tashchilin A.V. The modeling of HF radio wave propagation characteristics during the periods of solar flares // Proc. SPIE. 2015. V. 9680, 96805F. DOI: [10.1117/12.2203591](https://doi.org/10.1117/12.2203591).

Wang Zheng, Shi Jiankui, Wang Guojun, et al. Diurnal, seasonal, annual and semi-annual variation of ionospheric parameters at different latitudes in East Asian sector during ascending phase of solar activity // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 2. С. 45–53. DOI: [10.12737/22594](https://doi.org/10.12737/22594).

## REFERENCES

Aksenov O.Yu., Kozlov S.I., Lyakhov A.N., Trekin V.V., Perunov Yu.M., Yakubovsky S.V. Analyzing existing applied models of the ionosphere for calculating radio wave propagation and possibility of their use for radar systems. I. Classification of applied models and the main requirements imposed on them for radar aids. *Solar-Terrestrial Physics*. 2019, vol. 6, iss. 1, pp. 34–45. DOI: [10.12737/stp-61202008](https://doi.org/10.12737/stp-61202008).

Andriyako V.A., Burlak L.F., Kozlov S.I. Integrated empirical models of height distribution of electron density in the quiet ionosphere at mid-latitudes. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Res.]. 1978, vol. 16, no. 5, pp. 705–714. (In Russian).

Bekker S.Z. Analysis of electron density calculations using deterministic-probabilistic model of the ionospheric D-region. *Solar-Terrestrial Physics*. 2018, vol. 4, no. 3, pp. 67–75. DOI: [10.12737/stp-43201809](https://doi.org/10.12737/stp-43201809).

Bekker S.Z., Kozlov S.I., Lyahov A.N. Ionosphere models for calculation of radio wave propagation when solving applied problems. *Voprosy oboronnoi tekhniki* [Military Engineering]. Ser. 16: Counter-Terrorism Technical Devices. 2013, iss. 3–4, pp. 85–88. (In Russian).

Bekker S.Z., Kozlov S.I., Lisova S.S., Lyahov A.N. Statistic model of ionospheric Es region for calculation of radio wave propagation. *XX Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Aktual'nye problemy zashchity i bezopasnosti": Trudy*. [Proc. XX Russian National Theoretical and Practical Conference "Actual Problems of Protection and Safety"]. S.-Petersburg, 3–6 April 2017. pp. 119–123. (In Russian).

Bilitza D. Electron density in the D region as given by the IRI. *IRI-79. WDC-A-STP Report UAG-82*. Boulder Colorado, 1981, pp. 7–10.

Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000. *Radio Sci.* 2001, vol. 36, iss. 2, pp. 261–275. DOI: [10.1029/2000RS002432](https://doi.org/10.1029/2000RS002432).

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

Chasovitin Yu.K., Avdyushin S.I., Armenskaya O.A. *Model' global'nogo raspredeleniya kontsentratsii, temperatury i effektivnoi chastoty soudarenii elektronov*. GOST 25645.146-89 [The Model of Global Distribution of Electron



density, Temperature, and Effective Collision Frequency. State Standard 25645.146-89]. Moscow, Gos. standart SSSR Publ., 1990, 825 p. (In Russian).

Chavdarov S.S., Chasovitin Yu.K., Chernysheva S.P., Sheftel V.M. *Sredneshirotnyi sporadicheskii sloi E ionosfery* [Mid-latitude Sporadic E Layer of the Ionosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1975, 148 p. (In Russian).

Danilov A.D. *Khimiya ionosfery* [Chemistry of the Ionosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1967, 295 p. (In Russian).

Danilov A.D. D region photochemistry. *Ionosfernye issledovaniya* [Ionospheric Research]. Moscow, Nauka Publ., 1981, no. 34, pp. 6–33. (In Russian).

Danilov A.D., Vlasov M.N. *Fotokhimiya ionizirovannykh i vzbuzhdennykh chastits v nizhnei ionosfere* [Photochemistry of Ionized and Excited Particles in the Lower Ionosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1973, 190 p. (In Russian).

Dashkevich Zh.V., Ivanov V.E., Sergienko T.I., Kozelev B.V. Physical-chemical model of the auroral ionosphere. *Cosmic Res.* 2017, vol. 55, no. 2, pp. 88–100. DOI: [10.1134/S0010952517020022](https://doi.org/10.1134/S0010952517020022).

Deminov M.G., Shubin V.N. Empirical model of the location of the main ionospheric trough. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2018, vol. 58, no. 3, pp. 348–355. DOI: [10.1134/S0016793218030064](https://doi.org/10.1134/S0016793218030064).

Fatkullin M.N. Ionospheric disturbances. *Itogi nauki i tekhniki. Geomagnetizm i vysokie sloi atmosfery* [Results in Science and Technology. Geomagnetism and High Atmospheric Layers]. Moscow, VINITI Publ., 1978, vol. 4, pp. 6–107. (In Russian).

Fatkullin M.N. Physics of the ionosphere. *Itogi nauki i tekhniki. Geomagnetizm i vysokie sloi atmosfery* [Results in Science and Technology. Geomagnetism and High Atmospheric Layers]. Moscow, VINITI Publ., 1982, vol. 6, 224 p. (In Russian).

Fatkullin M.N., Zelenova T.I., Kozlov V.K., Legen'ka A.D., Soboleva T.N. *Empiricheskie modeli sredneshirotnoi ionosfery* [Empirical Models of the Mid-latitude Ionosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 256 p. (In Russian).

Gershman B.N. *Dinamika ionosfernoi plazmy* [Ionospheric Plasma Dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 256 p. (In Russian).

Gershman B.N., Ignatiev Yu.A., Kamenetskaya G.Kh. *Mekhanizmy obrazovaniya ionosfernogo sporadicheskogo sloya E<sub>s</sub> na razlichnykh shirotakh* [Mechanisms of Ionospheric Sporadic E<sub>s</sub> Layer Formation at Different Latitudes]. Moscow, Nauka Publ., 1976, 108 p. (In Russian).

*Ionosfernye modeli* [Ionospheric Models]. Moscow, Nauka Publ., 1975, 180 p. (In Russian).

Ivanov-Kholodnyi G.S., Mikhailov A.V. *Prognozirovaniye sostoyaniya ionosfery (determinirovannyi podkhod)* [Prediction of Ionospheric Conditions (Deterministic Approach)]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1980, 190 p. (In Russian).

Ivanov-Kholodnyi G.S., Nikolsky G.M. *Solntse i ionosfera* [The Sun and the Ionosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1969, 455 p. (In Russian).

Ivanov-Kholodnyi G.S., Nusinov A.A. *Obrazovanie i dinamika dnevnogo i sredneshirotного sloya E ionosfery* [Formation and Dynamics of Daytime Mid-latitude Ionospheric E Layer]. *Trudy IPG.* 1979, no. 37, 129 p. (In Russian).

Korsunskaya Yu.A. Effect of hard X-ray and gamma radiations on Earth's ionosphere and other processes in geospheres. *Dinamicheskie protsessy v geosferakh* [Dynamic Processes in Geospheres]. 2015, no. 7, pp. 122–132. (In Russian).

Korsunskaya Yu.A., Strelkov A.S. Photodissociation characteristics of reactions in E and D regions of Earth's ionosphere. *Dinamicheskie protsessy v geosferakh* [Dynamic Processes in Geospheres]. 2013, no. 4, pp. 234–244. (In Russian).

Koshelev V.V., Klimov N.N., Sutyryn N.A. *Aeronomiya*

*mezofery i nizhnei termosfery* [Aeronomy of the Mesosphere and Lower Thermosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1983, 183 p. (In Russian).

Kozlov S.I., Bikineev B.F., Novikovich V.M. Statistical model of main parameters of the undisturbed ionosphere for calculation of HF propagation at long paths. *IV Mezhdvostvennyi seminar po modelirovaniyu ionosfery: Tez. dokladov*. [The 4<sup>th</sup> Interdepartmental Workshop on Ionospheric Modeling]. Tomsk, 1978, pp. 38–40. (In Russian).

Kozlov S.I., Lyakhov A.N., Bekker S.Z. Key principles of constructing probabilistic statistical ionosphere models for the radio wave propagation problems. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2014, vol. 54, no. 6, pp. 750–762. DOI: [10.1134/S0016793214060127](https://doi.org/10.1134/S0016793214060127).

Kozlov S.I., Aksenov O.Yu., Bekker S.Z., Lyakhov A.N., Yakim V.V., Yakubovsky S.V. What models should be worked out for radio location systems of centimeter, decimeter and meter wavelength ranges? *XIV Ezhegodnaya konferentsiya «Fizika plazmy v Solnechnoi sisteme»: Tez. dokladov* [The XIV Annual Conference “Plasma Physics in the Solar System”: Abstracts]. IKI RAS, 11–15 February 2019, p. 127. (In Russian).

Krinberg I.A. *Kinetika elektronov v ionosfere i plazmosfere Zemli* [Electron Kinetics in Earth's Ionosphere and Plasmasphere]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 215 p. (In Russian).

Krinberg I.A., Tashchilin A.V. *Ionosfera i plazmosfera* [Ionosphere and Plasmasphere]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 177 p. (In Russian).

Krivolutsky A.A., V'yushkova T.Y., Mironova I.A. Changes in the chemical composition in Earth's polar regions after solar proton flares (3D modeling). *Geomagnetism and Aeronomy.* 2017, vol. 57, no. 2, pp. 156–176. DOI: [10.1134/S0016793217020074](https://doi.org/10.1134/S0016793217020074).

Lapshin V.B., Mikhailov A.V., Danilov A.D., Deminov M.G., Karpachev A.T., Shubin V.N., et al. The SIMP model as a new state standard for the ionospheric electron density distribution (State Standard 25645.146). *XXV Vserossiiskaya otkrytaya nauchnaya konferentsiya “Rasprostraneniye radiovoln”*: *Trudy*. [Proc. the XXV Russian National Open Scientific Conference “Radio Wave Propagation”]. Tomsk, July 4–9, 2016. Tomsk, 2016a, vol. 1, pp. 51–57. (In Russian). URL: <https://symp.iao.ru/files/symp/rwp/25/Tom1/051-057.pdf> (accessed November 30, 2019).

Lapshin V.B., Kalinin Yu.K., Alpatov V.V., Repin A.Yu., Shchelkalin A.V. *Voprosy statistiki v prikladnoi geofizike* [Statistical Matters in Applied Geophysics]. Obninsk, FGBU “VNIIGMI-MCD” Publ., 2016b, 160 p. (In Russian).

Mizun Yu.G. *Polyarnaya ionosfera* [The Auroral Ionosphere]. Leningrad, Nauka Publ., 1980, 202 p. (In Russian).

Mizun Yu.G. *Nizhnyaya ionosfera polyarnykh shirot* [The Lower Ionosphere of Polar Latitudes]. Leningrad, Nauka Publ., 1983, 247 p. (In Russian).

Namgaladze A.A. Problems in modeling of ionospheric disturbances. *Ionosfernye issledovaniya* [Ionospheric Research]. Moscow, Nauka Publ., 1979, no. 28, pp. 33–36. (In Russian).

Pavlov A.V., Pavlova N.M. Dependences of  $N_m E$  statistical characteristics on the month in a year at middle and low latitudes under daytime geomagnetic conditions at low solar activity. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2016, vol. 56, no. 4, pp. 401–406. DOI: [10.1134/S0016793216040162](https://doi.org/10.1134/S0016793216040162).

Polyakov V.M., Shchepkin L.A., Kazimirovsky E.S., Kokourov V.D. *Ionosfernye protsessy* [Ionospheric Processes]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1968, 535 p. (In Russian).

Ponomarchuk S.N., Kotovich G.V., Romanova E.B., Tashchilin A.V. The forecast of characteristics of decameter radio wave propagation on the base of the Global Ionosphere and Plasmasphere Model. *Solnechno-zemnyaya fizika* [Solar-



Terr. Phys.]. 2015, vol. 1, iss. 3, pp. 49–54. (In Russian). DOI: [10.12737/10452](https://doi.org/10.12737/10452).

Ponomarchuk S.N., Kurkin V.I., Lyakhov A.N., Romanova E.B., Tashchilin A.V. The modeling of HF radio wave propagation characteristics during the periods of solar flares. *Proc. SPIE*. 2015, vol. 9680, 96805F. DOI: [10.1117/12.2203591](https://doi.org/10.1117/12.2203591).

Ponomarchuk S.N., Ilyin N.V., Lyakhov A.N., Penzin M.S., Romanova E.B., Tashchilin A.V. Complex algorithm for calculation of characteristics of HF radio wave propagation on the basis of the Ionosphere and Plasmasphere Model and method of normal waves. *Izvestiya vyzov. Fizika* [Russian Physics Journal]. Thematic issue. 2016, vol. 59, no. 12/2, pp. 71–74. (In Russian).

Rytov S.M. *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku* [Introduction to Statistical Radio Physics]. Moscow, Nauka Publ., 1966, 463 p. (In Russian).

Sergeenko N.P. Statistical features of the time series of variations in critical frequencies of the F2 layer. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2019, vol. 59, no. 4, pp. 441–447. DOI: [10.1134/S0016793219040145](https://doi.org/10.1134/S0016793219040145).

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

Shubin V.N. Global empirical model of critical frequency of the ionospheric F2-layer for quiet geomagnetic conditions. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2017, vol. 57, no. 4, pp. 414–425. DOI: [10.1134/S0016793217040181](https://doi.org/10.1134/S0016793217040181).

Shubin V.N., Deminov M.G. Global dynamic model of critical frequency of the ionospheric F2 layer. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2019, vol. 59, no. 4, pp. 429–440. DOI: [10.1134/S0016793219040157](https://doi.org/10.1134/S0016793219040157).

turbed high-latitude D region of the ionosphere. *Modelirovanie fizicheskikh processov v polyarnoi ionosfere* [Modeling of physical processes in the polar ionosphere]. Apatity, 1979, pp. 82–87. (In Russian).

Strelkov A.S. Secondary electron generation in E and D layers of the ionosphere during ionization by solar hard UV and X-ray radiations. *Dinamicheskie protsessy v geosferakh* [Dynamic Processes in Geospheres]. 2012, no. 3, pp. 130–140. (In Russian).

Wang Zheng, Shi Jiankui, Wang Guojun, Wang Xiao, Zherebtsov G.A., Romanova E.B., Ratovsky K.G., Polekh N.M. Diurnal, seasonal, annual and semi-annual variation of ionospheric parameters at different latitudes in East Asian sector during ascending phase of solar activity. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terr. Phys.]. 2017, vol. 3, no. 2, pp. 45–53. DOI: [10.12737/22594](https://doi.org/10.12737/22594).

Zevakina R.A., Zhulina E.M., Nosova G.N., Sergeenko N.P. *Rukovodstvo po kratkosrochnomu prognozirovaniyu ionosfery* [The Manual on Short-Term Prediction of the Ionosphere]. Moscow, MGK AN SSSR Publ., 1990, 71 p. (In Russian).

#### Как цитировать эту статью

Алпатов В.В., Беккер С.З., Козлов С.И., Ляхов А.Н., Яким В.В., Якубовский С.В. Анализ прикладных моделей ионосферы для расчета распространения радиоволн и возможность их использования в интересах радиолокационных систем. II. Отечественные модели. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 3. С. 73–81. DOI: [10.12737/szf-63202008](https://doi.org/10.12737/szf-63202008).