

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

**I. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИКЛАДНЫХ МОДЕЛЕЙ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ,
ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ В ИНТЕРЕСАХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СРЕДСТВ**

**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**

О.Ю. Аксенов

*Научно-исследовательский испытательный центр
ЦНИИ войск ВКО,
Москва, Россия, aks974@yandex.ru*

С.И. Козлов

*Научно-исследовательский испытательный центр
ЦНИИ войск ВКО,
Москва, Россия, s_kozlov@inbox.ru
Институт динамики геосфер РАН,
Москва, Россия, s_kozlov@inbox.ru*

А.Н. Ляхов

*Институт динамики геосфер РАН,
Москва, Россия, alyakhov@idg.chph.ras.ru*

В.В. Трекин

*Научно-исследовательский испытательный центр
ЦНИИ войск ВКО,
Москва, Россия, news197@mail.ru*

Ю.М. Перунов

*Институт динамики геосфер РАН,
Москва, Россия, w-dmitriev@yandex.ru*

С.В. Якубовский

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

O.Yu. Aksenov

*Scientific Research Center Kosmos,
Ministry of Defence,
Moscow, Russia, aks974@yandex.ru*

S.I. Kozlov

*Scientific Research Center Kosmos,
Ministry of Defence,
Moscow, Russia, s_kozlov@inbox.ru
Institute of Geosphere Dynamics RAS,
Moscow, Russia, s_kozlov@inbox.ru*

A.N. Lyakhov

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

V.V. Trekin

*Scientific Research Center Kosmos,
Ministry of Defence,
Moscow, Russia, news197@mail.ru*

Yu.M. Perunov

*Institute of Geosphere Dynamics RAS,
Moscow, Russia, w-dmitriev@yandex.ru*

S.V. Yakubovskiy

*Scientific Research Center Kosmos,
Ministry of Defence,
Moscow, Russia, syakubovskiy@mail.ru*

Аннотация. Дается общая характеристика современных радиолокационных средств гражданского, оборонного и двойного назначения, функционирующих в декаметровом, метровом, дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн. Поскольку ионосфера существенно влияет на распространение радиоволн указанных диапазонов, при использовании систем радиолокации необходимо учитывать это влияние. Кратко описываются методы учета, базирующиеся на привлечении дополнительных средств диагностики среды и моделей ионосферы различной степени сложности и полноты. В настоящее время проблема учета влияния среды на работу радиолокационных систем требует дальнейших серьезных исследований. Составной частью этой проблемы является разработка ионосферных моделей, соответствующих требованиям систем радиолокации. Предлагается достаточно полная классификация мо-

Abstract. We review modern HF–X band radars covering over-the-horizon problems. The ionosphere significantly affects wave propagation in all the bands. We describe available correction techniques, which use additional evidence on the ionosphere, as well as models of different degrees of complexity. The fact that the field of view cannot be covered by ground-based instruments as well as the growing requirements to the precision and stability of the radars result in the impossibility of ionospheric correction with up-to-date models, hence the latter require further elaboration. We give a virtually full classification of the models. The article summarizes the requirements to the models for the radars depending on their function.

делей ионосферы, формируются требования к ним с позиций использования в радиолокационных средствах различного назначения.

Ключевые слова: радиолокационные средства, модели ионосферы.

Keywords: radar aids, ionospheric models.

ВВЕДЕНИЕ

Это — первая из серии статей, посвященных критическому анализу зарубежных и отечественных прикладных моделей ионосферы и оценке возможности их использования в интересах радиолокационных систем.

Современные радиолокационные устройства, как известно, функционируют в декаметровом, метровом, дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн. В первом диапазоне созданы и продолжают разрабатываться так называемые однокачковые загоризонтные радиолокационные станции (ЗГ РЛС) [Акимов и др., 2014; Акимов, Калинин, 2017; Фабрицио, 2018]. Попытка создания работоспособных многоскачковых ЗГ РЛС ни в СССР, ни в США особым успехом не увенчалась. В остальных диапазонах функционируют надгоризонтные радиолокационные станции (НГ РЛС) [Щит России..., 2009; Мощные надгоризонтные РЛС..., 2013; Концептуальные подходы..., 2017].

Для ЗГ РЛС ионосфера является каналом распространения радиоволн. Использование декаметрового диапазона позволяет по информации, получаемой самими станциями, определять ряд важных геофизических и радиофизических характеристик ионосферы, что, в свою очередь, делает возможной адаптацию РЛС к непрерывно изменяющимся параметрам среды. Неотъемлемой частью ЗГ РЛС являются дополнительные радиотехнические средства (ионозонды вертикального зондирования, средства наклонного и возвратно-наклонного зондирования, приемники сигналов от глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS и др.), привлекаемые с целью более точной оценки ионосферных параметров на высотах $h \leq 400\text{--}450$ км, где и распространяются декаметровые волны. Применение моделей ионосферы при загоризонтной радиолокации определяется необходимостью:

- приближенной оценки тактико-технических характеристик ЗГ РЛС в процессе ее проектирования с учетом места дислокации и сектора обзора;
- интерпретации экспериментальных данных, носящих зачастую неопределенный характер;
- разработки краткосрочного и долгосрочного прогнозов состояния ионосферы для улучшения функционирования станций [Акимов, Калинин, 2017].

Ситуация с НГ РЛС, с одной стороны, представляется менее сложной, поскольку в этом случае ионосфера не является каналом распространения волн из-за роста частоты излучения, а является только средой, влияющей на это распространение. С другой стороны, секторы обзора наиболее важных НГ РЛС, имеющих общегосударственное значение, расположены за пределами территории России, по-

этому обеспечение в нужном количестве дополнительными средствами диагностики ионосферы (исключение — приемники сигналов ГНСС ГЛОНАСС и GPS) становится практически невозможным либо весьма дорогостоящим. Кроме того, НГ РЛС предназначаются для обнаружения и сопровождения воздушно-космических объектов на весьма больших высотах h , значительно превышающих высоты F2-области, а также на больших расстояниях от места их дислокации. Таким образом, использование каких-либо моделей ионосферы для повышения эффективности работы НГ РЛС становится не менее важным, чем для ЗГ РЛС. К трем задачам, решаемым с помощью ионосферных моделей, в интересах НГ РЛС следует добавить еще одну [Мощные надгоризонтные РЛС..., 2013] — оперативную коррекцию траекторных измерений воздушно-космических объектов (дальности L , угла места φ , скорости v).

Учет отрицательного влияния ионосферы на радиолокацию являются достаточно сложной проблемой из-за большой изменчивости ее параметров с ростом h в результате уменьшения плотности воздуха, а также наличия различного типа возмущений, связанных, прежде всего, с солнечной и магнитной активностями. Не останавливаясь на истории развития ионосферного моделирования, заметим лишь, что все модели можно разбить на два больших класса — исследовательские и прикладные. Первые из них являются в основном теоретическими и весьма сложными, включают большое количество физико-химических и динамических процессов, охватывают очень широкий диапазон высот (от $\sim 90\text{--}100$ км вплоть до магнитосферных). С помощью исследовательских моделей 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). Прикладные модели используются в первую очередь для расчетов распространения радиоволн широкого диапазона частот.

На наш взгляд, выбор моделей ионосферы для использования в радиолокационных системах в настоящее время производится несколько произвольно, исходя из поверхностного анализа выходных параметров моделей, без критического отношения к основным принципам, на которых строится та или иная модель. Общие требования к моделям подобного рода, за исключением некоторых соображений [Аксенов и др., 2017a], не сформулированы. Главная цель данной статьи — обосновать и определить эти требования, для чего потребовалось разработать весьма полную классификацию моделей ионосферы и описать современные методы учета в РЛС влияния среды на распространение радиоволн.

КЛАССИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ИОНОСФЕРЫ

Как ни странно, полная классификация моделей ионосферы в данный момент отсутствует, несмотря на очевидную необходимость ее создания (некоторые попытки были предприняты в работах [Беккер и др., 2013; Козлов и др., 2014, 2018; Аксенов и др., 2017а]). Такая классификация может быть полезна, например, при разработке тактико-технических заданий на проведение ионосферных исследований, требований к моделям и в ряде других случаев. Предложенная ниже классификация значительно уточняет изложенные в работах [Беккер и др., 2013; Козлов и др., 2014, 2018; Аксенов и др., 2017а]) предложения по классификации моделей среды.

Модели ионосферы можно классифицировать:

- 1) по методам их построения: теоретические, эмпирические, полумпирические;
- 2) по подходу: детерминированные (статические), динамические, вероятностно-статистические;
- 3) по масштабам пространства, описываемого моделью: глобальные, региональные, охватывающие ограниченный регион (например, экваториальные, среднеширотные, полярные), и локальные, построенные для какой-либо одной точки или весьма небольшого пространственного масштаба;
- 4) по сезонам: для зимы (ноябрь, декабрь, январь, февраль), весеннего (март, апрель) и осеннего (сентябрь, октябрь) равноденствия, лета (май, июнь, июль, август);
- 5) по диапазону высот: для областей D, E, F1, F2 ионосферы, спорадического слоя E, внешней ионосферы;
- 6) по времени суток: для дня, ночи, переходного времени;
- 7) по ионосферным параметрам, определяемым моделью: концентрация электронов N_e , частоты столкновений электронов с ионизированными ν_{ei} и нейтральными ν_{en} компонентами, градиенты N_e по высоте h , широте и долготе, температуры электронов T_e , ионов T_i , нейтралов T_n , ионосферные неоднородности;
- 8) по степени возмущенности ионосферы в зависимости от широты, солнечной и магнитной активности (солнечные вспышки, явления поглощения в полярной шапке, в зоне овала полярных сияний и др.) или же искусственных воздействий (нагревные стенды и т. д.) [Козлов и др., 1988, 1990; Козлов, Смирнова, 1992а, б; Физика ядерного взрыва, 1997];
- 9) по форме представления ионосферных параметров: аналитические, табличные, графические.

Многие перечисленные признаки, очевидно, взаимозависимы. Рассматриваемые здесь прикладные модели обладают несколькими признаками, но при классификации и выборе моделей следует выделять наиболее важные.

МЕТОДЫ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ СРЕДЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

Для загоризонтных и надгоризонтных РЛС методы учета среды распространения радиоволн имеют некоторые общие черты, но в основном заметно различаются.

Системы загоризонтной радиолокации

Как отмечалось ранее [Головин, Простов, 2006; Акимов и др., 2014, 2017; Фабрицио, 2018], для улучшения информационно-технических характеристик современных ЗГ РЛС их работа должна строиться по принципу частотной адаптации. Это означает, что оптимальные рабочие частоты декаметрового диапазона необходимо выбирать в зависимости от условий распространения радиоволн на выбранной трассе и помеховой обстановки в пункте приема. Многочисленные экспериментальные исследования свидетельствуют, что частотная адаптация позволяет значительно улучшить показатели функционирования ЗГ РЛС и создает предпосылки для снижения мощности передатчиков.

Процедура адаптации режима работы РЛС включает следующие основные этапы:

- зондирование ионосферы по выбранной радиотрассе на дальностях $L \leq 400\text{--}500$ км;
- определение параметров ионосферы;
- прогноз параметров ионосферы;
- адаптивное управление информационно-техническими характеристиками РЛС: рабочей частотой, скоростью передачи информации, мощностью излучения, видом излучаемого сигнала и др.

Таким образом, ЗГ РЛС требует привлечения дополнительных средств диагностики ионосферы (мы не будем здесь останавливаться на описании подобных средств), и это принципиальное отличие таких РЛС от надгоризонтных.

Модели ионосферы используются в основном на этапах проектирования и эксплуатации ЗГ РЛС, причем требования к прогнозу ионосферных параметров на этих этапах различны [Акимов, Калинин, 2017].

При проектировании ЗГ РЛС используются долгосрочные модели регулярных слоев ионосферы, учитывающие многолетнюю статистику, которая описывается усредненными характеристиками ионосферных параметров. Такой подход основан на рекомендациях Международного союза электросвязи [Рекомендации МСЭ, 2010]. В них сказано, что при оценке параметров среды следует ориентироваться либо на процедуру, основанную на международной эталонной ионосфере (IRI), либо на более гибкую процедуру, характерную для модели NeQuick. Однако использование данных статистических детерминированных моделей позволяет получать лишь средние оценки условий распространения, без вероятностных характеристик их возникновения в различных геофизических ситуациях, а это приводит к невозможности оценки вероятностных характеристик выходных параметров РЛС. Поэтому на этапе проектирования лучше использовать вероятностно-статистические модели ионосферы [Козлов и др., 2014], которые позволяют ответить на вопрос: каковы могут быть (и с какой вероятностью) характеристики ЗГ РЛС в различных геофизических условиях.

На этапе эксплуатации ЗГ РЛС, которая строится как адаптивная система, возможно использование более широкого класса моделей (в том числе и детерминированных), поскольку ни одна из разработанных моделей не отвечает с высокой долей веро-

ятности на вопрос о текущих условиях функционирования РЛС. Для проведения оперативных расчетов с использованием моделей среды необходима их корректировка по текущим измерениям параметров среды распространения. Одним из основных требований в данной ситуации является оперативное и корректное описание высотного профиля N_e до высоты максимума F2-слоя при различных вариантах корректировки.

Как показывают исследования [Рябова, 1994; Агарышев, 1995; Рябова и др., 1997], неадаптированная к конкретным условиям распространения модель пригодна лишь для предсказания с некоторой точностью регулярной составляющей максимальных применимых частот (МПЧ). В случаях планирования радиосвязи этого может оказаться достаточно. Однако для организации оптимальной оперативной работы системы радиолокации на конкретном радионаправлении такой точности недостаточно, поскольку, в зависимости от состояния среды распространения, отличия ежедневных значений МПЧ от расчетных могут достигать 50 % и более. При долгосрочном прогнозе медианные значения среднего квадратичного отклонения (СКО) МПЧ для магистральных радиолиний 2500–6000 км составляют 25–40 %. Что касается случайной компоненты, то экспериментально установлено, что СКО случайной компоненты:

- не превышает 100–150 кГц для спокойных ионосферных условий;
- не зависит от протяженности радиолинии;
- летом в 1.5–2 раза меньше, чем зимой, и составляет 6–7 % от МПЧ.

Оперативная коррекция модели в системе магистральной радиосвязи способствовала безошибочному приему тестовых сообщений в 84 % случаев в дневные (08:00–20:00) и в 90 % случаев в ночные (20:00–08:00) часы, в то время как долгосрочный прогноз обеспечивает безошибочный прием лишь в 54 % случаев в дневные часы и в 46 % случаев в ночные. При выборе помехоустойчивого канала с помощью ионозонда линейной частотной модуляцией сигнала обеспечивалась надежность связи на уровне 97 %, а при выборе канала по долгосрочному прогнозу — только ~68 % [Рябова, 2004].

Системы надгоризонтной радиолокации

Для учета влияния среды распространения радиоволн в НГ РЛС в настоящее время используется комбинация прямых и косвенных методов [Allen et al., 1977; Dulong, 1977; Hunt et al., 2000; Карачевцев, 2012; Курикса, Липкин, 2013; Соколов и др., 2012]. Элементом прямых методов является непосредственное определение текущего значения полного электронного содержания (ПЭС) на направлениях нахождения в секторе обзора НГ РЛС космических аппаратов (КА) ГНСС GPS и ГЛОНАСС с последующей корректировкой по этим данным математических моделей среды (косвенный метод).

Рассмотрим подробнее достоинства и недостатки указанных методов.

Прямой метод. Одним из перспективных направлений расчета ПЭС на трассе РЛС — среда — объект является использование данных о космических объектах, орбитальные характеристики которых известны с высокой точностью. К ним относятся юстировочные КА, данные о которых содержатся в лазерной сети, данные об эфемеридах КА ГНСС, получаемых с помощью GPS/ГЛОНАСС-приемника, дислоцированного в районе НГ РЛС. Прием сигналов КА ГНСС на разных азимутальных направлениях позволяет оперативно получать текущую информацию о ПЭС в секторе обзора. Анализ показал, что в общем случае одновременно в секторе обзора РЛС может находиться до 12 КА ГНСС.

Оценки показали, что имеет место сильная неравномерность распределения КА ГНСС по азимуту в секторах обзора различных РЛС (для примера на рис. 1 приведено распределение азимутального разброса указанных КА в секторе обзора одной из НГ РЛС). Следовательно, эффективность прямого метода зависит от соотношения между пространственно-временным разбросом КА и пространственно-временными радиусами корреляции основных параметров ионосферы. Доступные из литературы [Ионосферные возмущения..., 1971; Чернов, 2002; Благовещенский и др., 2013; Шпынев и др., 2016] данные о пространственно-временных радиусах корреляции (относящихся главным образом к F2-области) показывают, что в спокойных условиях на средних и высоких широтах радиусы корреляции могут быть: по пространству — от ~1000 до ~1500 км, по времени — от ~40–30 до ~15 мин. В возмущенных условиях радиусы уменьшаются до ~300–200 км и до ~5–3 мин соответственно.

Представленные выше сведения позволяют приближенно определить максимальный азимутальный разброс КА ГНСС, при котором величины ПЭС, найденные с помощью различных КА, коррелируют на уровне ~0.95. Так, допустимый разброс составляет ~15° для радиуса корреляции 500 км и 30° — для радиуса корреляции 1000 км. Из рис. 1 следует, что в примерно от 9 до 20 % случаев азимутальный разброс КА ГНСС превышает пространственный радиус области корреляции на уровне максимума электронной концентрации F-области ионосферы, поэтому для получения значения ПЭС между ближайшими измерениями применяется линейная интерполяция.

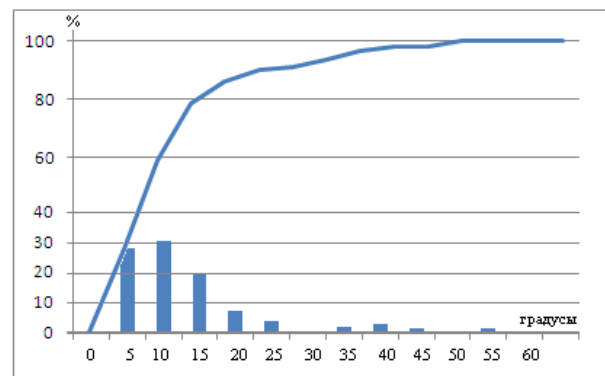


Рис. 1. Интегральное и дифференциальное распределение азимутального разброса КА ГНСС на суточном интервале в секторе обзора одной из НГ РЛС

Таким образом, использование данных GPS/ГЛОНАСС-приемников позволяет оперативно определять в направлении на КА ГНСС параметры среды (в частности, ПЭС) и осуществлять по ним текущую корректировку используемой модели ионосферы с последующим ее применением для всего сектора обзора с целью уменьшения ошибок траекторных измерений КА реального космического фона. Однако в силу неравномерности азимутального распределения КА ГНСС в секторе обзора РЛС возникают протяженные по азимуту участки пространства с нескомпенсированным влиянием среды распространения. Продолжительность существования таких участков с азимутальным размером 25° и больше, как показывает анализ азимутально-временного пребывания КА ГНСС в секторах обзора РЛС, может составлять от 15 до 145 мин, что в ряде случаев превышает временной радиус корреляции параметров ионосферы на уровне области F. Следует также добавить, что имеют место нарушения в работе КА ГНСС в периоды возмущений среды распространения (продолжительностью от единиц до десятков минут) [Куницын, Падохин, 2007; Ясюкевич и др., 2015; Пронин и др., 2019].

Согласно [Куницын, Падохин, 2007] вариации ПЭС представлены на рис. 2. Относительное увеличение ПЭС составило порядка 40 TECU на интервале примерно 40 мин во время вспышки 28.10.2003 г. и около 5 TECU на интервале 15 мин 04.11.2003 г. Видно, что имеет место достаточно резкое увеличение ПЭС (эффект внезапного увеличения электронного содержания (SITEC)).

Исходя из максимального изменения ПЭС на указанных временных интервалах и принимая линейный закон изменения ПЭС, оценим прирост ошибки по дальности в связи с изменением ПЭС.

Используя соотношение [Колосов и др., 1969]

$$\Delta R = \frac{40.3}{f^2} |\text{ПЭС}_0 - \text{ПЭС}_{\Delta T}|,$$

где f — частота излучения; ПЭС_0 и $\text{ПЭС}_{\Delta T}$ — полное электронное содержание до начала возмущения и после его окончания через время ΔT соответственно, получаем, что для дециметрового диапазона прирост ошибки составил ~ 112 м для 28.10.2003 и ~ 12 м для 04.11.2003, а для метрового диапазона на этих же временных интервалах ~ 992 м и 98 м соответственно. Данное обстоятельство требует изменения темпа обновления информации в возмущенные периоды.

В последние десятилетия активно развивается метод прогноза состояния ионосферы с использованием нейронных сетей. Исторически эти работы начинались с попыток создать системы прогноза критической частоты f_oF_2 для одиночной станции [Cander, 1998]. Метод основан на следующем предположении: поскольку нейронная сеть является универсальным интерполятором [Найкин, 1994], она способна обучиться, т. е. найти нелинейные зависимости текущего состояния ионосферы от предыстории характеристик ионосферы и предыстории солнечной и геомагнитной активности и текущих (либо прогнозируемых) их уровней.

Первые работы в этом направлении строились на классических сетях прямого распространения (feed-forward network) и на многослойных перцептронах [Wintoft, Cander, 2000; Nakamura et al., 2009]. В качестве предикторов обычно использовались индексы K_p , A_E , $F10.7$ за предыдущие 24–72 ч. Горизонт прогноза выбирался 1, 6, 12 и 24 ч. Выбор обучающих, тестовых и контрольных множеств данных осуществлялся согласно рекомендациям [Найкин, 1994]. Число слоев выбиралось достаточно произвольно.

Предпринимались попытки строить отдельные сети для каждого месяца, чтобы учесть влияние сезонных изменений параметров термосферы на отклик ионосферы на геомагнитные возмущения. Функции активации выбирались нелинейные, как правило, это были либо сигмоидальные функции, либо функция гиперболического тангенса [Найкин, 1994].

Нейронные сети показали хорошее качество прогноза месячных медианных значений f_oF_2 [Cander, 1988] и удовлетворительное качество прогноза отрицательных ионосферных бурь при часовом горизонте. Прогноз ионосферных бурь с большей заблаговременностью, равно как и прогноз положительных ионосферных бурь, при детальном изучении полученных результатов оказался не таким достоверным [Wintoft, Cander, 2000]. Это является следствием двух независимых проблем. Во-первых, относительный статистический вес геомагнитно-возмущенных дней значительно меньше, чем спокойных. Использование для обучения всего доступного объема экспериментальных данных приводит к переобучению сети на геомагнитно-спокойных периодах и слабо сформированному отклику на геомагнитные возмущения. Вспышечные солнечные события в базу данных обучения не включаются. Во-вторых, использование нелинейных функций активации при формально лучшем качестве сети приводит к проблеме множественных локальных минимумов целевого функционала обучения. Единого надежного метода поиска истинного глобального минимума на сегодня не разработано, а использование ансамбля сетей оставляет открытым вопрос выбора оптимального варианта.

Понимание этих проблем привело к разработке нейронных сетей на основе радиальных базисных элементов [Liu et al., 2009; Huang, 2014]. В отличие от сетей прямого распространения, математическое ядро задачи в этом случае сводится к решению переопределенной системы линейных уравнений. Применение SVD-алгоритмов (Singular Values Decomposition) позволяет строить прогноз состояния ионосферы с ручной регулировкой точности прогноза. Становится возможным получать грубый прогноз, устойчивый к вычислительным ошибкам, и набор (трубку временных траекторий) прогностических кривых с разной степенью детализации и меньшей устойчивостью к вариациям входных данных. Использование найденных в SVD-методе собственных значений позволяет получить грубую вероятностную оценку точности прогнозируемой реализации. Метод показал хорошие результаты при прогнозе ионосферных бурь (по вариациям f_oF_2) и ПЭС.

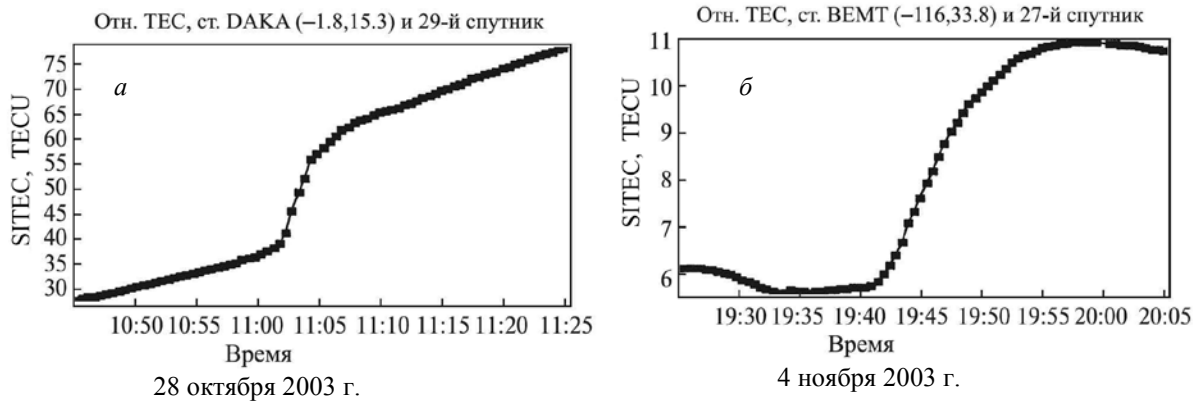


Рис. 2. Изменение ПЭС для пар спутник — приемник GPS в периоды интенсивных солнечных вспышек 28 октября и 4 ноября 2003 г. [Куницын, Падохин, 2007]

В последних исследованиях пытаются использовать весьма перспективные рекуррентные нейронные сети [Boulch et al., 2018]. Дополнительным преимуществом в этом случае становится то, что задача определения границ в прошлое для задания предыстории состояния ионосферы либо геомагнитных параметров возлагается на саму нейронную сеть, благодаря чему устраняется субъективность исследователя в выборе предикторов и проблема соотношения предыстории и горизонта прогноза решается самосогласованно.

Таким образом, большой азимутальный разнос КА ГНСС и достаточно длительное существование этого разноса в секторе обзора РЛС требует поиска дополнительных подходов к решению задачи оперативного учета текущих условий функционирования РЛС.

Косвенный метод. Одним из методов, позволяющих учитывать влияние среды распространения, является метод, основанный на использовании моделей распространения радиоволн на базе геофизических моделей атмосферы и ионосферы Земли. Использование моделей среды позволяет описать условия распространения во всем секторе обзора РЛС и тем самым решить проблему, связанную с его большим размером. Однако в большинстве случаев геофизические модели позволяют оценить среднее состояние среды, которое может существенно отличаться от текущего.

Многочисленные экспериментальные данные показывают, что, например, на средних широтах в абсолютно спокойных гелиогеомагнитных условиях отклонения реальной критической частоты Δf_oF_2 от модельных значений имеют место более чем в 50 % случаев. Сравнение результатов расчетов N_e по модели IRI-2016 с экспериментальными данными, полученными на спутнике DE-2 в диапазоне $h \sim 250\text{--}850$ км на полярных и средних широтах в различных геомагнитных ситуациях, привело к выводу [Ляхов и др., 2019], что только $\sim 30\%$ расчетов укладываются в диапазон $0 \pm 15\%$ инструментальной точности измерений N_e приборами спутника. Приведенные примеры свидетельствуют о том, что модели среды нуждаются в корректировке при использовании их на конкретных РЛС.

В отечественной радиолокации для такой коррекции достаточно широко применяются измеряемые текущие значения ПЭС (см. выше) и значительно реже f_oF_2 [Соколов и др., 2012]. В последнем случае необходимо привлечение дополнительных средств измерения, что представляется экономически неэффективным, а с учетом расположения секторов обзора наиболее важных радиолокационных систем вне территории РФ — и практически невозможным.

Таким образом, при использовании математической модели среды даже в спокойных условиях требуется корректировка по результатам текущих измерений параметров среды (например, ПЭС, f_oF_2 и т. д.). Эффективность комплексного использования рассмотренного подхода иллюстрируется рис. 3 и 4, где представлены графики интегральных функций распределения невязок по дальности и углу места соответственно [Соколов и др., 2012]. Для расчетов использовались измерения углов места и дальностей спутников юстировочного класса с помощью РЛС дециметрового диапазона. Всего было получено около 2000 единичных измерений с 27 по 29 марта 2014 г. Геомагнитная обстановка в указанный период была спокойной, минимальное значение индекса Dst составило -22 нТл.

Эмпирическая функция распределения нормированной невязки по углу места

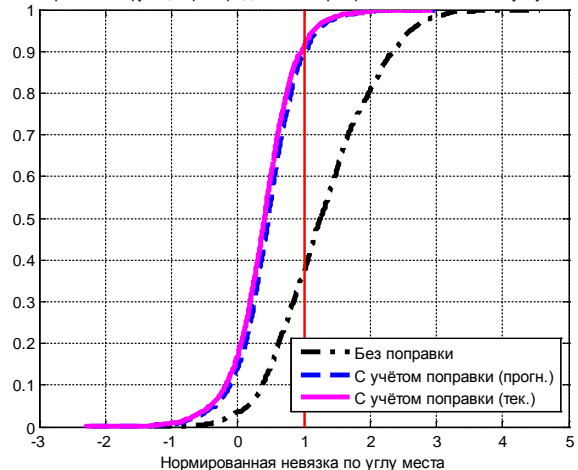


Рис. 3. Эмпирическая функция распределения нормированной невязки по углу места

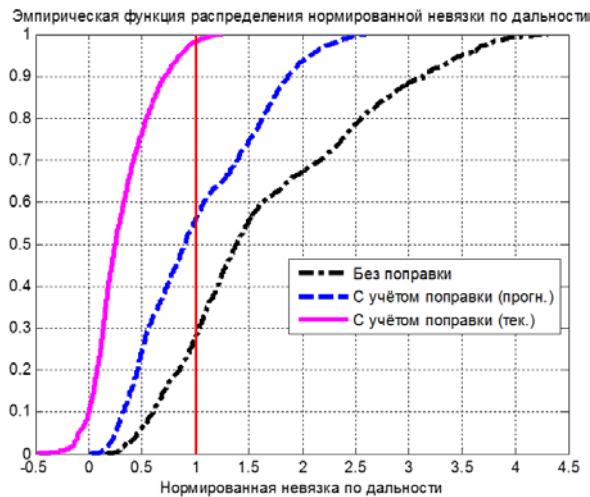


Рис. 4. Эмпирическая функция распределения нормированной невязки по дальности

В первом случае строились интегральные функции распределения невязок без компенсации атмосферных ошибок (на рис. 3 и 4 они обозначены «Без поправки»), т. е. фактически распределения текущих ошибок измерения рассматриваемых параметров.

Во втором случае вводились поправки, рассчитанные по модели ионосферы IRI-2007 с учетом прогнозного значения чисел Вольфа W , но без коррекции модели по данным текущих измерений ПЭС (обозначение «С учетом поправки (прогн.)»).

В третьем случае вводились поправки, рассчитанные по модели ионосферы с учетом ее коррекции по данным текущих измерений наклонного ПЭС (обозначение «С учетом поправки (тек.)»).

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Введение поправок в режиме долгосрочного прогноза позволяет повысить точность единичных измерений. По дальности улучшение (здесь и далее относительно измерений «Без поправки») составляет 47.6 %, по углу места точность единичных измерений повысилась до 65.4 %. Аналогичное уменьшение получено для СКО невязки. По дальности СКО улучшилось на 43.6 %, а по углу места на 37 %.

2. Использование поправок, рассчитанных в режиме оперативного прогноза, позволяет повысить точность единичных измерений РЛС по дальности по сравнению с долгосрочным прогнозом. Итоговое улучшение средней невязки по дальности составило 82 %, а СКО — 70 %.

Примерно аналогичные результаты были получены и для РЛС метрового диапазона.

Несмотря на обнадеживающие выводы, рассмотренный метод имеет существенный недостаток — подгонка модельных ПЭС к экспериментальным с помощью произвольно варьируемых значений W или $F10.7$. Это может привести к абсурдным результатам с физической точки зрения. Например, если в какой-то день реально измеренные $F10.7 = 80$ (низкая солнечная активность), то для согласования расчетов ПЭС с экспериментом требуется $F10.7 \approx 200$. К сожалению, данная ситуация в опубликованных работах не обсуждается. Кроме того, не приводятся

критерии согласия расчетов ПЭС с экспериментальными данными.

ТРЕБОВАНИЯ К МОДЕЛЯМ ИОНОСФЕРЫ

Учитывая задачи, для решения которых предназначаются радиолокационные системы, а также принимая во внимание географическую дислокацию разных РЛС (см. [Аксенов и др., 2017б; https://en.wikipedia.org/wiki/Solid_State_Phased_Array_Radar_System], где схематично показаны Системы предупреждения о ракетном нападении России и США) и некоторые технические характеристики станций (потенциал, длину волны, геометрию секторов обзора, режимы работы и т.п.), сформулируем требования, которым должны отвечать модели ионосферы, используемые на РЛС:

1. *Диапазон высот.* Состояние среды должно описываться по крайней мере до высот 18–20 тыс. км, характерных для ГНСС, а в идеале — вплоть до геостационарных орбит.

2. *Диапазон широт.* Все широты, особенно полярные и средние, наиболее важные для радиолокации РФ и США.

3. *Гелиогеофизические условия.* Все уровни солнечной и магнитной активности, времена суток, сезоны. Принципиальное значение имеет правильная оценка поведения ионосферы на всех высотах во время различных естественных и искусственных возмущений.

4. *Определяемые параметры среды.* Высотное распределение $N_e(h)$, градиенты N_e по широте и долготе, эффективные частоты соударений электронов с нейтральными компонентами $\nu_{en}(h)$ и ионизированными компонентами $\nu_{ei}(h)$, температуры электронов $T_e(h)$, ионов $T_i(h)$, нейтралов $T(h)$, концентрации заряженных и нейтральных компонент.

5. *Ионосферные неоднородности.* В принципе входят в предыдущий пункт, но, ввиду важности учета влияния ионосферных неоднородностей на распространение сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов длин волн, мы вынесли их в отдельный пункт. Такие неоднородности (различного размера) на разных h должны оцениваться с учетом геометрии магнитного поля в районах дислокации РЛС.

6. *Оценка соответствия модели главному свойству ионосферы* как нерегулярной, непрерывно изменяющейся среды.

7. *Оценка возможности решения вероятностных задач.* К ним относятся: вероятности обнаружения космических объектов, наведения, определения параметров области падения объектов и многие другие. Решение таких задач зависит не только от технических характеристик РЛС и объекта наблюдения, но и от состояния среды распространения радиоволн.

8. *Оценка скорости расчета по модели.* Это очень важная характеристика модели, особенно в процессе оперативной коррекции траекторных измерений.

9. *Верификация модели.* Ее необходимо проводить прежде всего по радиофизическим экспериментальным данным, а не только по геофизическим измерениям, как это зачастую делается в настоящее время.

Сделаем ряд замечаний к этим требованиям.

Для ЗГ РЛС верхний диапазон высот, безусловно, должен быть уменьшен примерно до $h \approx 400\text{--}450$ км. В то же время требования к качеству описания ионосферы на меньших высотах возрастают. Особое значение имеет область высот, примыкающая снизу и сверху к максимуму F2-области, высота которого, в свою очередь, зависит от широты и гелиогеофизических условий.

Поскольку улучшение функционирования НГ РЛС связано во многом с корректным определением ПЭС (см. выше), то особое внимание следует обратить на внешнюю ионосферу ($h \geq 500$ км). По расчетам [Яким и др., 2019], вклад ее в ПЭС составляет $\sim 15\text{--}25\%$, что является не столь уж малой величиной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ приводит к следующим основным выводам.

1. Из-за повышения требований к радиолокационным системам учет среды распространения радиоволн становится неотъемлемой частью разработки, испытаний и эксплуатации РЛС.

2. Для односкачковых ЗГ РЛС, работающих в диапазоне коротких радиоволн, возможно использование дополнительных средств диагностики ионосферы по трассам распространения сигналов; для наиболее важных НГ РЛС применение таких средств ограничено или просто невозможно.

3. Необходимо использовать более или менее полные модели ионосферы в зависимости от поставленной цели (оперативная коррекция траекторных измерений, интерпретация экспериментальных радиофизических данных, прогноз функционирования РЛС в зависимости от гелиогеофизических условий и места дислокации станций).

4. Изложенные здесь общие требования к ионосферным моделям являются достаточно жесткими, и их можно рассматривать в качестве некоторых ориентиров, для разработчиков таких моделей.

5. Проблема повышения эффективности функционирования радиолокационных систем путем более корректного учета среды распространения радиоволн остается весьма сложной даже с использованием дополнительных средств диагностики ионосферы.

Авторы благодарны В.В. Яким за помощь в оформлении рукописи статьи. Работа выполнена по госзаданию АААА-А19-1190282790056-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агарышев А.И. Возможности совершенствования прогнозов МПЧ при учете влияния регулярной и случайной неоднородности ионосферы // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 1995. Вып. 103. С. 186–193.

Акимов В.Ф., Калинин Ю.К., Тасенко С.В. Односкачковое распространение радиоволн. Обнинск : ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2014. 260 с.

Акимов В.Ф., Калинин Ю.К. Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов / Под редакцией Боева С.Ф. М.: Техносфера, 2017. 491 с.

Аксенов О.Ю., Беккер С.З., Дюжева М.М. и др. Обоснование необходимости разработки и применения вероятностно-статистических моделей ионосферы в интересах радиолокационных средств РКО // Сб. докладов V Всерос. научно-технич. конф. «РТИ Системы ВКС-2017». 25 мая 2017 г., Москва, Россия. М., 2017а. С. 809–818.

Аксенов О.Ю., Вениаминов С.С., Якубовский С.В. Возможности сплошного поля СПРН по наблюдению космических объектов // Экологический вестник. 2017б. Т. 4, вып. 2. С. 12–19.

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

Благовещенский Д.В., Рогов Д.Д., Улих Т. Вариации горизонтального радиуса корреляции ионосферы во время магнитной суббури // Геомагнетизм и аэронаука. 2013. Т. 53, № 2. С. 176–186. DOI: [10.7868/S001679401302003X](https://doi.org/10.7868/S001679401302003X).

Головин О.В., Простов С.П. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. 354 с.

Ионосферные возмущения и их влияние на радиосвязь. М.: Наука, 1971. 240 с.

Карачевцев А.М. Основные астрометеофизические факторы, определяющие точность координатно-временных измерений средств системы контроля космического пространства. Пути достижения требуемой точности // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 2. С. 34–38.

Козлов С.И., Смирнова Н.В. Методы и средства создания искусственных образований в околоземной среде и оценка характеристик возникающих возмущений. I. Методы и средства создания искусственных возмущений // Космич. исслед. 1992а. Т. 30, № 4. С. 495–523.

Козлов С.И., Смирнова Н.В. Методы и средства создания искусственных образований в околоземной среде и оценка характеристик возникающих возмущений II. Оценка характеристик искусственных возмущений // Космич. исслед. 1992б. Т. 30, № 5. С. 629–683.

Козлов С.И., Власков В.А., Смирнова Н.В. Специализированная аэронавигационная модель для исследования искусственной модификации средней атмосферы и нижней ионосферы. I. Требования к модели и основные принципы ее построения // Космич. исслед. 1988. Т. 26, № 3. С. 738–745.

Козлов С.И., Власков В.А., Смирнова Н.В. Специализированная аэронавигационная модель для исследования искусственной модификации средней атмосферы и нижней ионосферы. II. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными // Космич. исслед. 1990. Т. 28, № 1. С. 77–84.

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

Козлов С.И., Ляхов А.Н., Якубовский С.В., Беккер С.З., Гаврилов Б.Г., Яким В.В. Обоснование требований к моделям ионосферы, используемым в радиолокационных системах дециметрового и метрового диапазона длин волн // Сб. докладов V Всерос. научно-практич. конф. «Проблемы военной геофизики и контроля состояния природной среды» 23–25 мая 2018 г., Санкт-Петербург, Военно-космич. академия им. А.Ф. Можайского. 2018. С. 455–457.

Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. М.: Связь, 1969. 156 с.

Концептуальные подходы к организации воздушно-космической обороны объектов стратегических ядерных сил / При научном руководстве С.В. Ягольникова. Тверь: ПолиПресс, 2017. 88 с.

Куницын В.Е., Падохин А.М. Определение интенсивности ионизирующего излучения солнечных вспышек по данным навигационных систем GPS/ГЛОНАСС // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2007. № 5. С. 68–71.

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

Ляхов А.Н., Козлов С.И., Беккер С.З. Оценка точности расчетов по международной справочной модели ионосферы IRI-2016. I. Концентрации электронов // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59, № 1. С. 50–58. DOI: [10.1134/S0016794019010115](https://doi.org/10.1134/S0016794019010115).

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

Пронин В.Е., Пилипенко В.А., Захаров В.И., Мюрр Д.Л., Мартинес-Беденко В.А. Отклик полного электронного содержания ионосферы на конвективные вихри // Космические исследования. 2019. Т. 57, № 2. С. 1–10

Рекомендации Международного Союза электросвязи. RP.531-10. Женева, 2010. С. 2.

Рябова Н.В. Зондирование естественной и искусственно возмущенной ионосферы линейно-частотно-модулированным сигналом: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Казань, 1994. 172 с.

Рябова Н.В. Радиомониторинг и прогнозирование помехоустойчивых декаметровых радиоканалов: дис. ... докт. физ.-мат. наук. Йошкар-Ола, 2004. 349 с.

Рябова Н.В., Иванов В.А., Урядов В.П., Шумаев В.В. Прогнозирование и экстраполяция параметров КВ-радиоканала по данным наклонного зондирования ионосферы // Радиотехника. 1997. № 7. С. 28–30.

Соколов К.С., Трекин В.В., Оводенко В.Б., Патронова Е.С. Метод оперативного учета влияния среды на траекторные измерения // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 2. С. 17–21.

Фабрицио Д.А. Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение. М.: Техносфера, 2018. 935 с.

Физика ядерного взрыва. М.: Наука; Физматгиз, 1997. Т. 1. 528 с.; Т. 2. 256 с.

Чернов Ю.А. О пространственной корреляции поля коротких волн при наклонном отражении от ионосферы // Известия вузов. Радиофизика. 2002. Т. XLV, № 5. С. 392–402.

Шпынев Б.Г., Черниговская М.А., Куркин В.И. и др. Пространственные вариации параметров ионосферы Северного полушария ионосферы над зимними струйными течениями // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 4. С. 204–215. DOI: [10.21046/2070-7401-2016-13-4-204-215](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-4-204-215).

Щит России. Системы противоракетной обороны. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 502 с.

Яким В.В., Беккер С.З., Козлов С.И., Ляхов А.Н. Сравнение результатов расчетов по модели IRI-2016 и модели ионосферы, представленной в качестве нового государственного стандарта России (ГОСТ 25645.146). Предварительные результаты // Тезисы докладов на 14-й ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 11–15 февраля 2019 г., ИКИ РАН. С. 132.

Ясюкевич Ю.В., Астафьева Э.И., Живетьев И.В., Максиков А.П. Глобальное распределение срывов сопровождения фазы GPS и сбоев измерения полного электронного содержания во время магнитных бурь 15 мая 2005 г. и 20 ноября 2003 г. // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 4. С. 58–65. DOI: [10.12737/13459](https://doi.org/10.12737/13459).

Allen R., Donatelli D., Picardi M. Correction for ionospheric refraction for COBRA DANE. Air Force Surveys in

Geophysics Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, MA, 1977. AFGL-TR-77-0257. 18 p.

Boulch A., Cherrier N., Castaigns T. Ionospheric activity prediction using convolutional recurrent neural networks // arXiv:1810.13273v2[cs.CV]. 6 Nov. 2018. (дата обращения 30 сентября 2019 г.).

Cander L.R. Artificial neural network application in ionosphere studies // Annals of Geophysics. 1998. V. 5–6. P. 757–766. DOI: [10.4401/ag-3817](https://doi.org/10.4401/ag-3817).

Dulong D.D. Reduction of the uncertainty of radar range correction. AFGL-TR-77-0125. 1977. URL: <http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA046166> (дата обращения 30 сентября 2019 г.).

Haykin S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. New York, Macmillan College Publishing Company, 1994. 696 p.

Huang Z., Yuan H. Ionospheric single-station TEC short-term forecast using RBF neural network // Radio Sci. 2014. V. 49. P. 283–292. DOI: [10.1002/2013RS005247](https://doi.org/10.1002/2013RS005247).

Hunt S.M., Close S., Coster A.J., Stevens E., Schuett L.M., Vardaro A. Equatorial atmospheric and ionospheric modeling at Kwajalein Missile Range // Lincoln Laboratory Journal. 2000. V. 12, N. 1. P. 45–64.

Liu D.-D., Yu Tao, Wang J.-S., et al. Using the radial basis function neural network to predict ionospheric critical frequency of F2 layer over Wuhan // Adv. Space Res. 2009. V. 43, iss. 11. P. 1780–1785. DOI: [10.1016/j.asr.2008.05.015](https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.05.015).

Nakamura M.I., Maruyama T., Shidama Y. Using a neural network to make operational forecasts of ionospheric variations and storms at Kokubunji, Japan // J. Nat. Inst. Inform. Commun. Techn. 2009. V. 56, N. 1–4. P. 391–406.

Wintoft P., Cander L.R. Ionospheric foF2 storm forecasting using neural networks // Physics and Chemistry of the Earth. Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science. 2000. V. 25, iss. 4. P. 267–273. DOI: [10.1016/S1464-1917\(00\)00015-5](https://doi.org/10.1016/S1464-1917(00)00015-5).

URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Solid_State_Phased_Array_Radar_System (дата обращения 30 сентября 2019 г.).

REFERENCES

Agaryshev A.I. Opportunities for improving MUF forecasts when taking into account the influence of regular and random ionospheric heterogeneity. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Research on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics]. 1995, iss. 103, pp. 186–193. (In Russian).

Akimov V.F., Kalinin Yu.K., Tassenko S.V. *Odnokachkovoe rasprostraneniye radiovoln* [Single-Hop Radio Wave Propagation]. Obninsk, FSBI “VNIIGMI-WDC”, 2014, 260 p. (In Russian).

Akimov V.F., Kalinin Yu.K. *Vvedenie v proektirovaniye ionosfernykh zagorizontnykh radiolokatorov* [Introduction to the Design of Ionospheric Over-horizon Radars]. Moscow, Technosphere Publ., 2017, 491 p. (In Russian).

Aksenov O.Yu., Becker S.Z., Dyuzheva M.M., Kozlov S.I., Lyakhov A.N., Yakubovsky S.V. Substantiation of the need to develop and apply probabilistic-statistical models of the ionosphere in the interests of radar systems of missile defense. *Sb. dokladov V Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «RTI Sistemy VKS-2017»* [Book of Reports of the V All-Russian Scientific and Technical Conference “RTI Systems VKS-2017”]. May 25, 2017, Moscow, pp. 809–818. (In Russian).

Aksenov O.Yu., Veniaminov S.S., Yakubovsky S.V. Possibilities of the BMEWS radars for detecting space debris. *Ekologicheskii vestnik*. [Ecological Bull.]. 2017, no. 4, iss. 2, pp. 12–19. (In Russian).

Allen R., Donatelli D., Picardi M. *Correction for ionospheric refraction for COBRA DANE*. Air Force Surveys in

Geophysics Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, MA, 1977, AFGL-TR-77-0257, 18 p.

Bekker S.Z., Kozlov S.I., Lyakhov A.N. Issues of modeling the ionosphere for calculating the propagation of radio waves in solving applied problems. *Voprosy oboronnoi tekhniki* [Military Engineering]. Ser. 16. 2013, vol. 3–4, pp. 85–88. (In Russian).

Blagoveshchenskii D.V., Rogov D.D., Ulich T. Variations in the horizontal correlation radius of the ionosphere during a magnetospheric substorm. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013, vol. 53, no. 2, pp. 166–176. DOI: [10.1134/S0016793213020035](https://doi.org/10.1134/S0016793213020035).

Boulch A., Cherrier N., Castaings T. Ionospheric activity prediction using convolutional recurrent neural networks. *arXiv:1810.13273[cs.CV]*. 2018. (accessed September 30, 2019).

Cander L.R. Artificial neural network application in ionosphere studies. *Annals of Geophysics*. 1998, vol. 5–6, pp. 757–766. DOI: [10.4401/ag-3817](https://doi.org/10.4401/ag-3817).

Chernov Yu.A. On the spatial correlation of the field of short waves with oblique reflection from the ionosphere. *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [Radiophysics and Quantum Electronics]. 2002. vol. XLV, no. 5. pp. 932–402. (In Russian).

Dulong D.D. *Reduction of the uncertainty of radar range correction*. AFGL-TR-77-0125. 1977. URL: <http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA046166>. (accessed September 30, 2019).

Ionosfernye vozmushcheniya i ikh vliyanie na radiosvyaz' [Ionospheric Disturbances and Their Impact on Radio Communications]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 240 p. (In Russian).

Fabritsio D.A. *Vysokochastotnyi zagorizontnyi radar: printsipy, obrabotka signalov, prakticheskoe primeneniye* [High-Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing and Practical Application]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2018. 935 p. (In Russian). (English edition: Fabrizio G.A. High-Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing and Practical Application. New York, McGraw-Hill, 2013, 944 p.).

Fizika yadernogo vzryva [Physics of a Nuclear Explosion]. Moscow, Nauka Publ., Fizmatgiz Publ., 1997, vol. 1, 528 p.; vol. 2, 256 p. (In Russian).

Golovin O.V., Prostov S.P. *Sistemy i ustroystva korotkovolnnoi radiosvyazi* [Systems and Devices for Short-Wave Radio Communications]. Moscow, Goryachaya Liniya – Telecom Publ., 2006, 354 p. (In Russian).

Haykin S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. New York, Macmillan College Publishing Company, 1994, 696 p.

Huang Z., Yuan H. Ionospheric single-station TEC short-term forecast using RBF neural network. *Radio Sci*. 2014, vol. 49, pp. 283–292. DOI: [10.1002/2013RS005247](https://doi.org/10.1002/2013RS005247)

Hunt S.M., Close S., Coster A.J., Stevens E., Schuett L.M., Vardaro A. Equatorial atmospheric and ionospheric modeling at Kwajalein Missile Range. *Lincoln Laboratory Journal*. 2000, vol. 12, no. 1, pp. 45–64.

Karachevtsev A.M. Main atmospheric and astrophysical factors determining time and coordinates measurement accuracy of space surveillance system. Ways to achieve desired accuracy. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki* [Telecommunications and Radio Engineering]. 2012, no. 2, pp. 34–38. (In Russian).

Kolosov M.A., Armand N.A., Yakovlev O.I. *Rasprostraneniye radiovoln pri kosmicheskoi svyazi* [Propagation of Radio Waves in Space Communications]. Moscow, Svyaz Publ., 1969, 156 p. (In Russian).

Kontseptualnye podkhody k organizatsii vozdukhno-kosmicheskoi oborony ob'yektov strategicheskikh yadernykh sil [Conceptual Approaches to the Organization of Aerospace Defense of Strategic Nuclear Forces]. Tver, PolyPress Publ., 2017, 88 p. (In Russian).

Kozlov S.I., Smirnova N.V. Methods and means of creating artificial formations in the near-Earth environment and estimation of characteristics of emerging disturbances. I. Methods and means of creating artificial disturbances. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Res.]. 1992a, vol. 30, no. 4, pp. 495–523. (In Russian).

Kozlov S.I., Smirnova N.V. Methods and means of creating artificial formations in the near-Earth environment and estimation of characteristics of emerging disturbances. II. Estimation of characteristics of artificial disturbances. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Res.]. 1992b, vol. 30, no. 5. pp. 629–683. (In Russian).

Kozlov S.I., Vlaskov V.A., Smirnova N.V. Specialized aeronomy model for studying the artificial modification of the middle atmosphere and lower ionosphere. I. Requirements for the model and basic principles of its construction. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Res.]. 1988, vol. 26, no. 3, pp. 738–745. (In Russian).

Kozlov S.I., Vlaskov V.A., Smirnova N.V. Specialized aeronomy model for studying the artificial modification of the middle atmosphere and lower ionosphere. II. Comparison of calculation results with experimental data. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Res.]. 1990, vol. 28, no. 1, pp. 77–84. (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., Lyakhov A.N., Yakubovskiy S.V., Bekker S.Z., Gavrilov B.G., Yakim V.V. Justification of requirements for ionosphere models used in decimeter and meter wavelength radar systems. *Sb. dokladov V Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy voennoi geofiziki i kontrolya sostoyaniya prirodnoi sredy»* [Book of Reports of the V All-Russia Scientific and Practical Conference “Problems of Military Geophysics and Environmental Monitoring”]. May 23–25, 2018. St. Petersburg, pp. 455–457. (In Russian).

Kunitsyn V.E., Padokhin A.M. Determining the intensity of solar flare ionizing radiation from data of the GPS/GLONASS navigation systems. *Moscow University Physics Bulletin*. 2007, vol. 62, iss. 5, pp. 334–337. DOI: [10.3103/S0027134907050165](https://doi.org/10.3103/S0027134907050165).

Kuriksha A.A., Lipkin A.L. Study of the effectiveness of using the IRI model to correct the radar measurements of satellite coordinates. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic Waves and Electronic Systems]. 2013, vol. 18, no. 5, pp. 21–26. (In Russian).

Liu D.-D., Yu Tao, Wang J.-S., Huang C., Wan W.-X. Using the radial basis function neural network to predict ionospheric critical frequency of F2 layer over Wuhan. *Adv. Space Res*. 2009, vol. 43, iss. 11, pp. 1780–1785. DOI: [10.1016/j.asr.2008.05.015](https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.05.015).

Lyakhov A.N., Kozlov S.I., Bekker S.Z. Assessment of the accuracy of calculations using the International Reference Ionosphere Model IRI-2016: I. Electron densities. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2019. vol. 59, no. 1, pp. 45–52. DOI: [10.1134/S0016793219010110](https://doi.org/10.1134/S0016793219010110).

Nakamura M.I., Maruyama T., Shidama Y. Using a neural network to make operational forecasts of ionospheric variations and storms at Kokubunji, Japan. *J. National Inst. Infor. Com. Tech*. 2009, vol. 56, no. 1–4, pp. 391–406.

Moshchnye nadgorizontnye RLS dalnego obnaruzheniya. Razrabotka. Ispytaniya. Funktsionirovaniye [Powerful Over-the-Horizon Early Warning Radars. Development. Tests. Functioning]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2013, 168 p. (In Russian).

Pronin V.E., Pilipenko V.A., Zakharov V.I., Murr D.L., Martines-Bedenko V.A. The response of the full electronic content of the ionosphere to convective vortices. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Res.]. 2019, vol. 57, no. 2, pp. 1–10. (In Russian).

Rekomendatsii Mezhdunarodnogo soyuza elektrosvyazi [Recommendations of the International Telecommunication Union]. RP.531-10. Geneva, 2010, p. 2. (In Russian).

Ryabova N.V. *Zondirovaniye estestvennoi i iskusstvenno-vozmushchennoi ionosfery lineino-chastotno-modulirovannym signalom. Dis. ... kand. fiz.-mat. nauk* [Sounding of a Natural and Artificially Disturbed Ionosphere with a Linear Frequency-Modulated Signal. Thesis for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences]. Kazan, 1994. 172 p. (In Russian).

Ryabova N.V. *Radiomonitoring i prognozirovaniye pomekhoustoichivyykh dekametrovyykh radiokanalov. Dis. ... dokt. fiz.-mat. nauk* [Radio Monitoring and Prediction of Noise-Resistant Decameter Radio Channels. Thesis for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences.]. Yoshkar-Ola, 2004. 349 p. (In Russian).

Ryabova N.V., Ivanov V.A., Uryadov V.P., Shumaev V.V. Prediction and extrapolation of the parameters of the HF radio channel according to oblique sounding of the ionosphere. *Radiotekhnika* [Radio Engineering]. 1997, no. 7, pp. 28–30. (In Russian).

Shpynev B.G., Chernigovskaya M.A., Kurkin V.I., Rytovsky K.G., Belinskaya Yu.A., Stepanov A.E., et al. Spatial variations of the ionosphere parameters over the Northern Hemisphere winter jet streams. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. [Current problems in remote sensing of the Earth from space]. 2016, vol. 13, no. 4, pp. 204–215. DOI: [10.21046/2070-7401-2016-13-4-204-215](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-4-204-215). (In Russian).

Sokolov K.S., Trekin V.V., Ovodenko V.B., Patronova E.S. The method of operational accounting of the influence of the environment on trajectory measurements. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki* [Telecommunications and Radio Engineering]. 2012, no. 2, pp. 17–21. (In Russian).

Shchit Rossii. Sistemy protivoraketnoi oborony. [Shield of Russia. Missile Defense Systems]. Moscow, N.E. Bauman MSTU Publ., 2009. 502 p. (In Russian).

Wintoft P., Cander L.R. Ionospheric foF2 storm forecasting using neural networks. *Physics and Chemistry of the Earth. Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*. 2000, vol. 25, iss. 4, pp. 267–273. DOI: [10.1016/S1464-1917\(00\)00015-5](https://doi.org/10.1016/S1464-1917(00)00015-5).

Yakim V.V., Bekker S.Z., Kozlov S.I., Lyakhov A.N. Comparison of the calculation results according to the IRI-2016 model and the ionosphere model, presented as the new state standard of Russia (GOST 25645.146). Preliminary results. *Tezisy dokladov na 14 ezhegodnoi konferentsii «Fizika plazmy v solnechnoi sisteme»* [Abstracts at the 14th Annual Conference “Plasma Physics in the Solar System”]. February 11–15, 2019, p. 132. (In Russian).

Yasyukevich Yu.V., Astafyeva E.I., Zhiviyev I.V., Maksikov A.P. Global distribution of GPS losses of phase lock and total electron content slips during 2005 May 15 and 2003 November 20 magnetic storms. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2015, vol. 1, no. 4, pp. 58–65. (In Russian). DOI: [10.12737/13459](https://doi.org/10.12737/13459).

URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Solid_State_Phased_Array_Radar_System (accessed September 30, 2019).

Как цитировать эту статью

Аксенов О.Ю., Козлов С.И., Ляхов А.Н., Трекин В.В., Перунов Ю.М., Якубовский С.В. Анализ прикладных моделей ионосферы для расчета распространения радиоволн и возможность их использования в интересах радиолокационных систем. I. Классификация прикладных моделей и основные требования, предъявляемые к ним в интересах радиолокационных средств. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 1. С. 86–96. DOI: [10.12737/szf-61202008](https://doi.org/10.12737/szf-61202008).