



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-54-62>

УДК 621.391.26

СНИЖЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРЫ И МАГНИТОСФЕРЫ

В. М. АРТЕМЬЕВ, П. А. ХМАРСКИЙ, А. О. НАУМОВ

Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Разработана методика, основанная на использовании данных системы мониторинга ионосферы и магнитосферы для снижения систематических ошибок радиолокационных измерений. Проведено сравнение экспериментальных данных мониторинга и расчетов по международной справочной модели ионосферы IRI-2020 для двух сценариев – периода возмущенной (12 сентября 2024 г.) и спокойной (14 сентября 2024 г.) ионосферы. Установлено, что в периоды ионосферных возмущений расчеты IRI-2020 могут занижать систематические погрешности дальности в 1,5–2 раза, особенно для диапазонов VHF и UHF, где погрешности могут достигать 7,0–10,0 и 1,0–1,2 км соответственно при малых углах места. Показано, что погрешности радиальной скорости и угла места также существенно зависят от состояния ионосферы. Продемонстрировано, что использование оперативных данных мониторинга состояния ионосферы обеспечивает существенное повышение точности радиолокационных измерений, особенно для низкочастотных диапазонов и в периоды геофизических возмущений.

Ключевые слова: ионосфера, магнитосфера, систематические погрешности, GPS, электронная концентрация, модель IRI-2020, трехмерная реконструкция, радиолокационная станция.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Авторы выражают признательность специалистам Центра геофизического мониторинга НАН Беларуси и его директору Г. А. Аронову за предоставленные данные мониторинга и анализа геомагнитной обстановки.

Для цитирования. Артемьев, В. М. Снижение погрешности радиолокационных измерений за счет использования данных мониторинга ионосферы и магнитосферы / В. А. Артемьев, П. А. Хмарский, А. О. Наумов // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 54–62. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-54-62>.

REDUCING RADAR MEASUREMENT ERRORS USING IONOSPHERE AND MAGNETOSPHERE MONITORING DATA

VALENTIN M. ARTEMYEV, PETR A. KHMARSKIY, ALEXANDER O. NAUMOV

Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A methodology based on the use of ionospheric and magnetospheric monitoring system data to reduce systematic errors in radar measurements was developed. A comparison between experimental monitoring data and calculations was made using the international reference ionospheric model IRI-2020 for two scenarios: disturbed (September 12, 2024) and quiet (September 14, 2024) ionosphere. It was found that during periods of ionospheric disturbances, model IRI-2020 can understate systematic range errors by 1.5–2 times, especially for VHF and UHF bands, where errors may reach 7.0–10.0 and 1.0–1.2 km respectively at low elevations. It was shown that radial velocity and elevation errors also significantly depend on the ionospheric state. The use of real-time ionospheric monitoring data provides a substantial improvement in the accuracy of radar measurements, particularly for low-frequency bands and during periods of geophysical disturbances.

Keywords: ionosphere, magnetosphere, systematic errors, GPS, electron concentration, IRI-2020 model, three-dimensional reconstruction, radar.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The authors express their gratitude to the specialists of the Geophysical Monitoring Center of the National Academy of Sciences of Belarus and its director, G. A. Aronov, for providing the data for monitoring and analysis of the geomagnetic environment.

For citation. Artemyev V. M., Khmarskiy P. A., Naumov A. O. (2025) Reducing Radar Measurement Errors Using Ionosphere and Magnetosphere Monitoring Data. *Doklady BGUIR*. 23 (4), 54–62. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-54-62> (in Russian).

Введение

Ионосфера оказывает значимое влияние на точность радиолокационных измерений, особенно для наземных радиолокационных станций (РЛС), работающих в диапазонах VHF и UHF и предназначенных для обнаружения, сопровождения искусственных спутников, элементов космического мусора, а также мониторинга ближнего и дальнего космоса [1, 2]. Наиболее существенны возникающие систематические погрешности радиолокационных измерений при работе загоризонтных РЛС (10–40 МГц, дальность более 1000 км) и радиолокаторов с синтезированной апертурой и широкой полосой сигналов (300 МГц и более), где требования к учету параметров среды распространения радиоволн особенно высоки [3, 4]. Актуальность проблемы возрастает в связи с увеличением частоты и интенсивности ионосферных возмущений, связанных, в частности, с одиннадцатилетним пиком цикла солнечной активности [3], а также с ужесточением требований к точности радиолокационных измерений. В настоящее время для компенсации ионосферных ошибок преимущественно применяются данные математических моделей, в том числе международной справочной модели ионосферы IRI-2020 [5], которая является наиболее широко используемым и признанным эмпирическим стандартом описания земной ионосферы. Однако, несмотря на распространенность этих подходов, их точность в современных задачах остается недостаточной, особенно в периоды интенсивных геофизических возмущений и при работе в низкочастотных диапазонах [6, 7]. Для дальнейшего повышения точности применяются двухчастотные измерения, адаптивные алгоритмы, а также используются данные специализированных систем мониторинга ионосферы и магнитосферы [8, 9].

Предметом исследования являлись методы компенсации ионосферных ошибок в задачах радиолокационного измерения с применением данных мониторинга ионосферы и магнитосферы. Гипотеза состоит в том, что учет оперативной информации мониторинга позволит повысить точность радиолокационных измерений по сравнению со справочными моделями, особенно в сложных условиях. Разработана методика компенсации ионосферных погрешностей в РЛС, экспериментально подтверждена ее эффективность, проведено ее сравнение со справочной моделью ионосферы IRI-2020.

Материалы и методики

Ионосфера – это ионизированная часть верхней атмосферы, существенно влияющая на распространение радиоволн: изменяются их траектория, скорость, поляризация и амплитуда, возникают сцинтилляции сигнала. Степень этого влияния определяется частотой радиоволн, временем суток, сезоном, уровнем солнечной активности и геомагнитной обстановкой. Структурно ионосфера состоит из слоев D , E , $F1$ и $F2$, различающихся по высоте и электронной концентрации; днем все слои выражены отчетливо, ночью остается в основном объединенный слой F с максимальной концентрацией электронов в $F2$ (до 10^{12} эл/м³ в средних широтах). Основной физический механизм влияния ионосферы на распространение радиоволн связан с зависимостью коэффициента преломления от концентрации свободных электронов [10, 11]

$$n = \sqrt{1 - 80,8 N_e / f^2},$$

где N_e – концентрация электронов, эл/м³; f – частота электромагнитных колебаний, Гц.

При прохождении радиоволн через ионосферу наблюдаются [10, 11] рефракция (искривление траектории, зависящее от градиента электронной концентрации и частоты), групповые и фазовые задержки (определяются полным электронным содержанием вдоль трассы), частотная дисперсия (искажает закон модуляции сигналов), а также фарадеевское вращение плоскости поляризации под действием геомагнитного поля. Ионосферные неоднородности приводят к нарушению условий когерентного накопления сигналов из-за искажения (изменения) фазового спектра и временной декорреляции, а также возникновению погрешностей измерения дальности, радиальной скорости и угла места наблюдаемых объектов.

Погрешность измерения дальности обусловлена групповой задержкой сигналов в ионосфере и вычисляется согласно выражению [11]

$$\Delta r_{\text{H}} = \frac{40,308}{f^2} \int_0^{r_{\text{n}}} N_3 dr = \frac{40,308}{f^2} \text{TEC}, \quad (1)$$

где ТЕС – полное электронное содержание, определяемое как число электронов в цилиндре с площадью основания 1 м^2 , соединяющем наблюдаемый объект с РЛС.

Кроме того, для загоризонтных РЛС погрешности измерения дальности возникают из-за неточности прогнозирования многоскачкового распространения [4], которые в статье не анализируются.

Погрешность измерения частоты Доплера $F_{\text{д}}$ вызвана отличием фазовой скорости волны в районе цели от скорости света в вакууме, а также рефракцией радиоволны, приводящей к отличию лучевой $v_{\text{л}}$ и радиальной v_r проекций вектора скорости [11]:

$$\Delta F_{\text{D}} = 2v_r 40,308 N_3 / (fc). \quad (2)$$

Погрешность угла места цели (рефракционная ошибка) определяется как разность кажущегося и истинного углов мест (рис. 1) [11]

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{H}}. \quad (3)$$

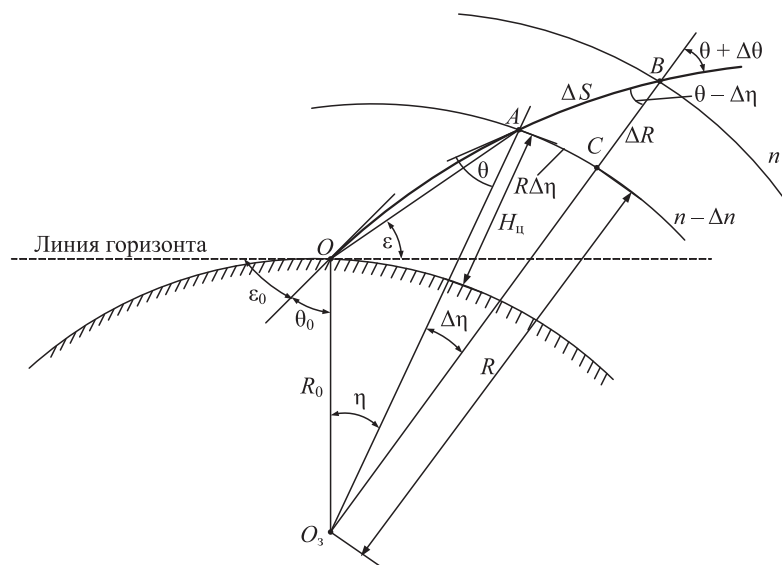


Рис. 1. К определению ошибки измерения угла места
Fig. 1. Definition of elevation measurement error

Из рис. 1 истинный угол места вычисляется как [11]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{н}} = \arcsin(\sin \eta (R_0 + H_{\text{н}}) / r_{\text{н}}) - \frac{\pi}{2}, \quad (4)$$

$$\text{где } r_{\text{и}} = \sqrt{R_0^2 + (R_0 + H_{\text{и}})^2 - 2R_0 + (R_0 + H_{\text{и}})\cos\eta}.$$

Угол η определяется по формуле [11]

$$\eta = \int_{R_0}^{R_0+H_{\text{H}}} R^{-1} \left[\left((nR)/(n_0 R_0) \right)^2 \sec^2 \varepsilon_0 - 1 \right]^{-\frac{1}{2}} dR. \quad (5)$$

Таким образом, неоднородности ионосферы вызывают флуктуации амплитуды и фазы радиосигналов, что требует оперативного контроля ионосферных и магнитосферных параметров и послужило основной причиной разработки системы мониторинга ионосферы и магнитосферы для повышения точности РЛС (рис. 2). В основе системы лежат наблюдения глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и геомагнитные данные (компоненты магнитного поля

Земли). В системе реализованы следующие алгоритмы: вычисления полного (ТЕС) и вертикального (VTEC) электронного содержания [12], трехмерной реконструкции [13], обнаружения и прогноза ионосферных штормов и возмущений магнитосферы [14]. Оценка состояния ионосферы выполняется путем сравнения текущего усредненного значения VTEC с данными многолетних наблюдений согласно методике, описанной в [14]. Результатом работы системы мониторинга являются оценки характеристик ионосферы и магнитосферы (трехмерное распределение электронной концентрации, параметры и взаимосвязь ионосферных и магнитных возмущений), используемые для корректировки систематических ошибок и параметров обработки сигналов в РЛС.

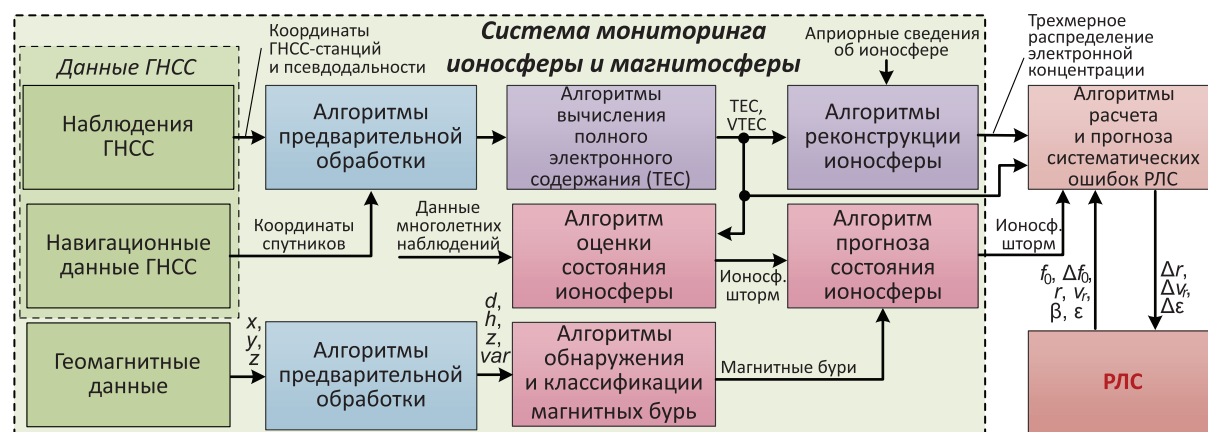


Рис. 2. Система мониторинга ионосферы и магнитосферы для повышения точности радиолокационных станций

Fig. 2. Ionosphere and magnetosphere monitoring system to improve the accuracy of radar stations

В рамках исследования разработана методика снижения погрешностей радиолокационных измерений координат и параметров движения с использованием данных мониторинга ионосферы и магнитосферы, состоящая из шести этапов:

- 1) сбор и предварительная обработка данных от ГНСС и геомагнитных наблюдений: фильтрация и синхронизация навигационных и геофизических параметров;
- 2) вычисление ТЕС на всех трассах «спутник–приемная станция»;
- 3) оценка и прогноз состояния ионосферы и магнитосферы;
- 4) вычисление ионосферных составляющих погрешностей радиолокационных измерений с использованием данных реконструкции ионосферы (выражения (1)–(5));
- 5) используя рассчитанные по данным мониторинга и прогноза ионосферы параметры, выполняется выбор параметров обработки (допустимого времени когерентного накопления), коррекция фазовых искажений спектра широкополосных сигналов и коррекция измеряемых значений дальности, радиальной скорости и угла места путем внесения соответствующих поправок непосредственно в первичные результаты обработки радиолокационных измерений;
- 6) автоматизация учета погрешностей в вычислительном контуре РЛС и анализ эффективности, включая сравнение со стандартными моделями IRI-2020 и ГОСТ 25645.113–84.

Внедрение данной методики обеспечивает динамическую адаптацию радиолокационных систем к ионосферным возмущениям и значительно повышает точность радиолокационных измерений в условиях геофизических возмущений.

Результаты экспериментальных исследований

Для оценки эффективности методики проводился сравнительный анализ (рис. 3) на основе данных мониторинга (спутников GPS и 100 станций Европейской сети непрерывно функционирующих опорных станций) и расчетов по модели IRI-2020. Проанализированы следующие параметры: вертикальный профиль электронной концентрации, ТЕС и распределение VTEC над территорией Европы в результате трехмерной реконструкции ионосферы, а также систематические погрешности радиолокационных измерений дальности, радиальной скорости и угла места в различных радиочастотных диапазонах.

На рис. 3 приведена динамика ионосферно-магнитосферных возмущений в период с 10 по 15 сентября 2024 г. Результаты мониторинга ионосферы (усредненные значения VTEC, рис. 3, а)

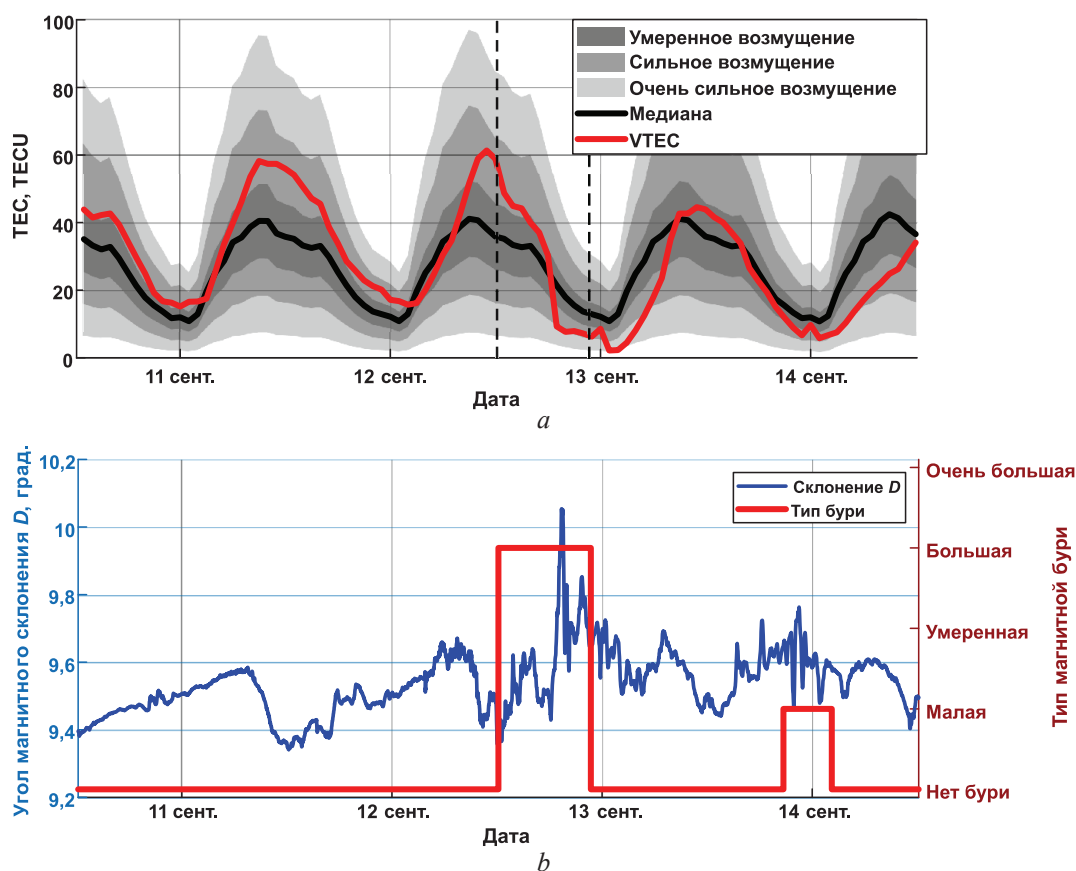


Рис. 3. Результаты мониторинга ионосферно-магнитосферных возмущений в период с 10 по 15 сентября 2024 г.: *a* – ионосферы; *b* – магнитосферы
Fig. 3. Results of monitoring ionospheric-magnetospheric disturbances in the period from September 10 to 15, 2024: *a* – ionosphere; *b* – magnetosphere

позволяют выявить периоды усиленной ионосферной активности. На рис. 3, *b* показаны изменения угла магнитного склонения и результаты обнаружения магнитных бурь. Совмещение данных мониторинга ионосферы и магнитосферы наглядно демонстрирует их взаимосвязь и возможности взаимного прогноза их возмущений.

Данные мониторинга ионосферы и модели IRI-2020 для дней с различной геофизической обстановкой – возмущенный (12 сентября 2024 г., 12⁰⁰) и спокойный (14 сентября 2024 г., 12⁰⁰) периоды – представлены на рис. 4. Для возмущенной ионосферы (рис. 4, *a*) фиксируются выраженные максимумы электронной концентрации на высотах 250–350 км и крупномасштабные неоднородности TEC, что указывает на значительные ионосферные возмущения. Модель IRI-2020 в этот период занижает значения электронной плотности по сравнению с данными мониторинга и показывает меньшую детализацию структуры. В условиях спокойной ионосферы (рис. 4, *b*) профиль ионосферных параметров становится более однородным, различия между экспериментальными и модельными данными уменьшаются. Таким образом, использование оперативных данных мониторинга ионосферы и магнитосферы позволяет точнее определять вариации электронной концентрации и полного электронного содержания, особенно в периоды возмущенной ионосферы, что важно для повышения точности радиолокационных измерений.

На рис. 5 приведен сравнительный анализ систематических погрешностей радиолокационных измерений, рассчитываемых по данным мониторинга ионосферы (сплошные линии) и по модели IRI-2020 (штриховые линии), согласно (1)–(5), для периодов возмущенной (12 сентября 2024 г.) и спокойной (14 сентября 2024 г.) ионосферы в диапазонах VHF, UHF, *L*, *S*, *C* и *X*. При расчете систематических погрешностей дальности считалось, что наблюдаемый объект находится за пределами области максимальной электронной концентрации, а при расчете систематических погрешностей радиальной скорости и угла места – что объект движется со скоростью 600 м/с и находится в области максимальной электронной концентрации.

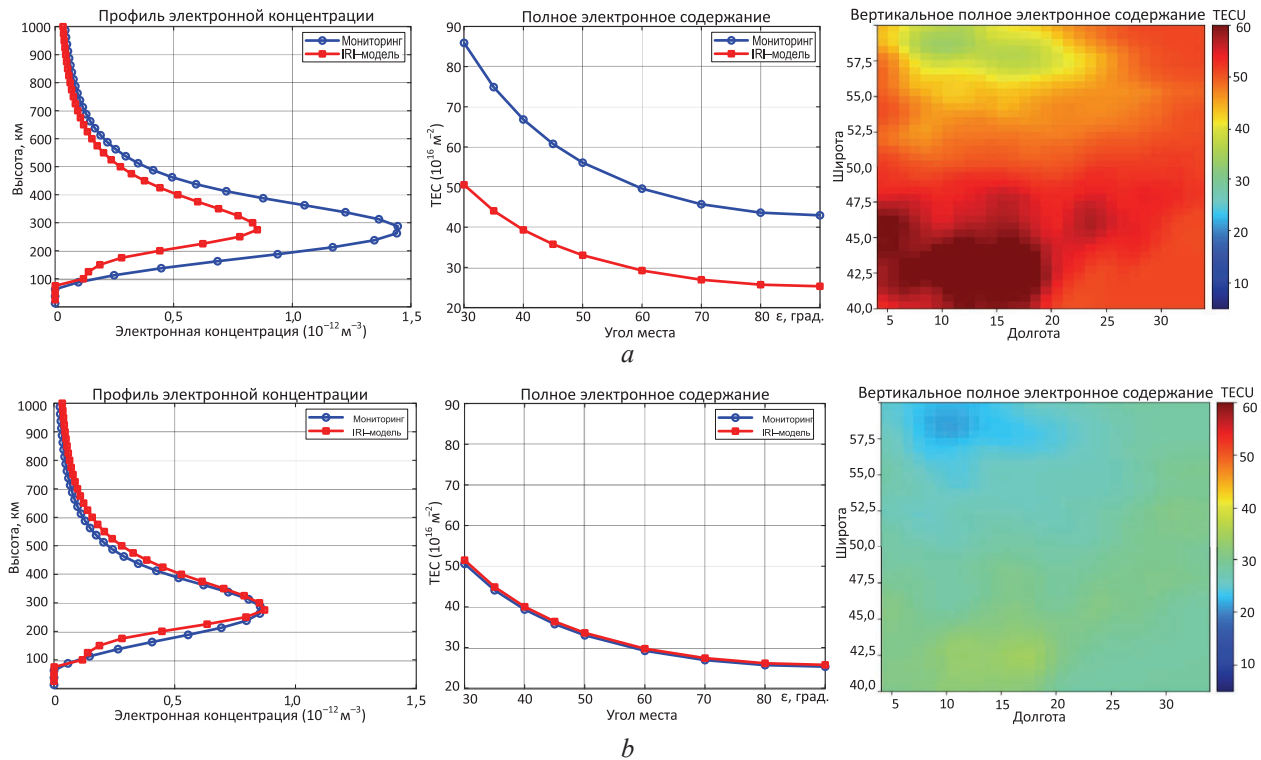


Рис. 4. Сравнительный анализ данных мониторинга и модели IRI-2020 для возмущенной (а, 12 сентября 2024 г., 12⁰⁰) и спокойной (б, 14 сентября 2024 г., 12⁰⁰) ионосферы

Fig. 4. Comparative analysis of monitoring data and the IRI-2020 model for disturbed (а, 12 September 2024, 12⁰⁰) and quiet (б, 14 September 2024, 12⁰⁰) ionosphere

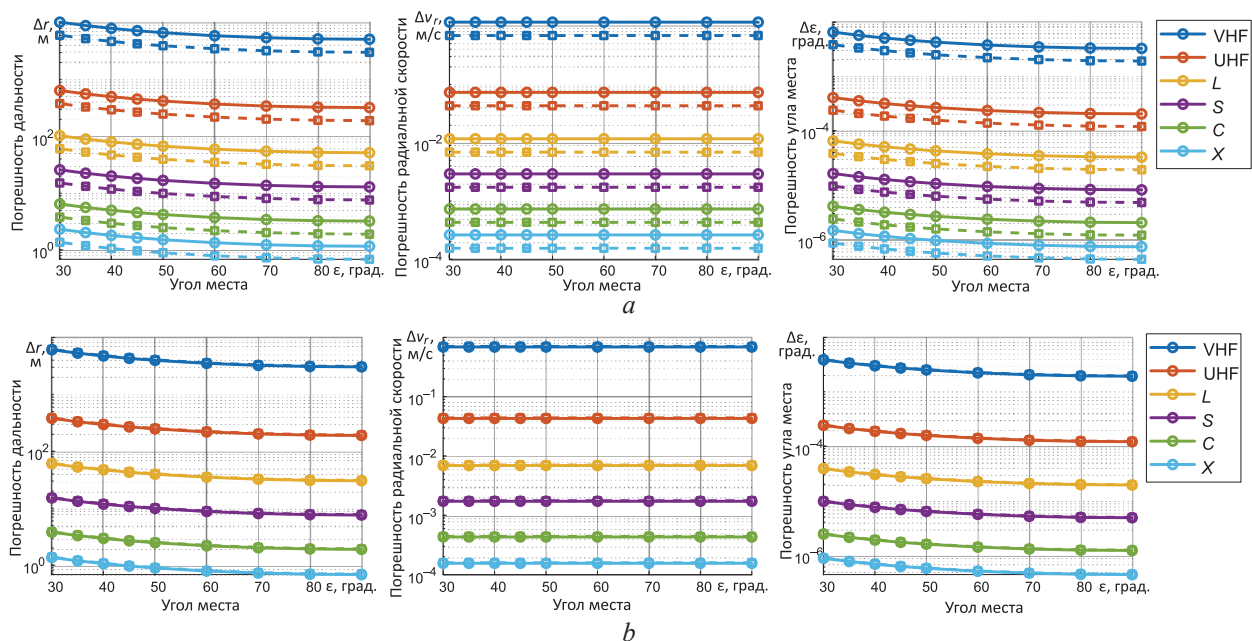


Рис. 5. Систематические погрешности радиолокационных измерений на основе данных мониторинга состояния ионосферы и модели IRI-2020 для различных диапазонов частот в период возмущенной (а) и спокойной (б) ионосферы

Fig. 5. Systematic errors of radar measurements based on ionospheric monitoring data and the IRI-2020 model for different frequency bands during disturbed (а) and quiet (б) ionospheric conditions

В условиях ионосферных возмущений (рис. 5, а) максимальные погрешности дальности в VHF-диапазоне достигают 7000–10 000 м при малых углах места, что на 30–40 % превышает значения по модели IRI-2020. В UHF-диапазоне наблюдаются погрешности до 1200 м, в L – до 200 м, в диапазонах S, C и X – не более 30, 10 и 3 м соответственно. При спокойной

ионосфере (рис. 5, *b*) различия между экспериментальными и модельными данными существенно снижаются, и для всех диапазонов погрешности согласуются с расчетами по IRI-2020. Аналогичная динамика отмечается для погрешностей радиальной скорости и угла места: наиболее значительные расхождения фиксируются в VHF/UHF-диапазонах в возмущенный период, а при спокойной ионосфере показатели мониторинга и модели практически совпадают. Наибольшие расхождения между расчетами по данным мониторинга и модели IRI-2020 проявляются в периоды ионосферных возмущений и существенно влияют на точность радиолокационных измерений в низкочастотных диапазонах и при малых углах места.

Таким образом, использование оперативных данных мониторинга состояния ионосферы обеспечивает существенное повышение точности измерений РЛС большой дальности действия, особенно для низкочастотных диапазонов и в периоды геофизических возмущений, что подтверждает необходимость применения разработанной системы мониторинга для повышения эффективности работы радиолокационных систем различного назначения.

Заключение

1. Разработана методика снижения погрешностей радиолокационных измерений координат и параметров движения, основанная на использовании данных системы мониторинга ионосферы и магнитосферы. Такой подход предусматривает последовательную интеграцию данных глобальной сети приемников навигационных спутниковых систем и геомагнитного мониторинга, трехмерную реконструкцию электронной концентрации, автоматическую коррекцию радиолокационных параметров с учетом реальных пространственно-временных вариаций ионосферы и обеспечивает динамическую адаптацию радиолокационных систем к текущим и прогнозируемым геофизическим условиям, что позволяет существенно повысить точность радиолокационных измерений, особенно в периоды геофизических возмущений.

2. Проведено сравнительное исследование систематических погрешностей радиолокационных измерений при использовании данных мониторинга и расчетов по международной справочной модели ионосферы IRI-2020 для двух сценариев – периода возмущенной (12 сентября 2024 г.) и спокойной (14 сентября 2024 г.) ионосферы. Показано, что в условиях спокойной ионосферы различия между данными мониторинга и модельными расчетами минимальны, что свидетельствует о достаточной точности модели IRI-2020 для невозмущенных условий.

3. Выявлено, что в периоды ионосферных возмущений модельные расчеты по данным IRI-2020 могут занижать систематические погрешности дальности в 1,5–2 раза. Это особенно критично для диапазонов VHF и UHF, где погрешности могут достигать 7,0–10,0 и 1,0–1,2 км соответственно при малых углах места, что обосновывает необходимость выполнять коррекцию радиолокационных измерений с учетом оперативных данных мониторинга.

4. Установлено, что при переходе к более высоким диапазонам частот (S , C , X) систематические погрешности всех типов существенно снижаются и могут быть с достаточной точностью оценены с использованием модельных расчетов даже в периоды возмущений. Выявлена зависимость всех типов погрешностей от угла места цели – наибольшие ошибки наблюдаются при малых углах, что объясняется увеличением пути сигнала через ионосферу.

5. Показано, что погрешности радиальной скорости и угла места также существенно зависят от состояния ионосферы, однако их абсолютные значения (1,0–1,5 м/с для скорости и $0,005^\circ$ – $0,008^\circ$ для угла места в VHF-диапазоне) менее критичны для большинства прикладных задач.

6. Работа выполнена в рамках программы Союзного государства «Разработка базовых элементов орбитальных и наземных средств в интересах создания многоспутниковых группировок мало-размерных космических аппаратов наблюдения земной поверхности и околоземного космического пространства «Комплекс-СГ» на 2023–2026 годы.

Список литературы

1. 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 / В. В. Алпатов [и др.] // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 1. С. 86–96. <https://doi.org/10.12737/szf-61202008>.
2. Козлов, С. И. Основные принципы построения вероятностно-статистических моделей ионосферы для задач распространения радиоволн / С. И. Козлов, А. Н. Ляхов, С. З. Беккер // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54, № 6. С. 817–828. <https://doi.org/10.7868/S0016794014060127>.

3. Ляхов, А. Н. Оценка точности расчетов по международной справочной модели ионосферы IRI-2016. I. Концентрации электронов / А. Н. Ляхов, С. И. Козлов, С. З. Беккер // Геомагнетизм и аэронавигация. 2019. Т. 59, № 1. С. 50–58. <https://doi.org/10.1134/S0016794019010115>.
4. Фабрицио, Дж. А. Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение / Дж. А. Фабрицио. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018.
5. International Reference Ionosphere 2020 – Your Standard Model of the Ionosphere / D. Bilitza [et al.] // Earth and Space Science. 2022. Vol. 9, No 2. <https://doi.org/10.1029/2021EA002043>.
6. Беккер, С. З. Современные модели ионосферы для расчета распространения радиоволн / С. З. Беккер. М.: Радиотехника, 2018.
7. MacDonald, M. Overview of High-Power and Wideband Radar Technology Development at MIT Lincoln Laboratory / M. MacDonald, M. Abouzahra, J. Stambaugh // Remote Sens. 2024. Vol. 16, No 9. <https://doi.org/10.3390/rs16091530>.
8. Акимов, В. Ф. Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов / В. Ф. Акимов, Ю. К. Калинин. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2017.
9. Бова, Ю. И. Моделирование распространения частотно-модулированного излучения в анизотропной ионосферной плазме / Ю. И. Бова, А. С. Крюковский, Д. С. Лукин // Электромагнитные волны и электронные системы. 2017. Т. 22, № 5. С. 4–11.
10. Barton, D. K. Radar Equations for Modern Radar / D. K. Barton. Boston: Artech House, 2013.
11. Ширман, Я. Д. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория / Я. Д. Ширман; 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2007.
12. Determination of Total Electron Content in the Ionosphere Over the Territory of the Republic of Belarus Based on Global Navigation Satellite Systems Data / A. O. Naumov [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series. 2024. Vol. 69, No 1. P. 53–64. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-53-64>.
13. Артемьев, В. М. Алгоритм и методика оптимизации его параметров для трехмерной реконструкции ионосферы / В. М. Артемьев, П. А. Хмарский, А. О. Наумов // Неразрушающий контроль и диагностика. 2024. № 1. С. 42–52.
14. Results of Studies on Processes Occurring in the Ionosphere and Earth's Magnetic Field Over the Territory of the Republic of Belarus for the Year 2023 / A. O. Naumov [et al.] // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2024. Vol. 27, No 3. P. 225–233. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.13960570>.

Поступила 29.05.2025

Принята в печать 18.06.2025

References

1. Alpatov V. V., Bekker S. Z., Kozlov S. I., Lyakhov A. N., Yakim V. V., Yakubovskiy S. V. (2020) Analysis of Applied Ionospheric Models for Radio Wave Propagation Calculations and Possibilities of Their Use in the Interests of Radar Systems. I. Classification of Applied Models and Basic Requirements for Radar Systems. *Solar-Terrestrial Physics*. 6 (1), 86–96. <https://doi.org/10.12737/szf-61202008> (in Russian).
2. Kozlov S. I., Lyakhov A. N., Bekker S. Z. (2014) Basic Principles of Probabilistic and Statistical Ionospheric Models for Radio Wave Propagation. *Geomagnetism and Aeronomy*. 54 (6), 817–828. <https://doi.org/10.7868/S0016794014060127> (in Russian).
3. Lyakhov A. N., Kozlov S. I., Bekker S. Z. (2019) Accuracy Assessment of International Ionospheric Reference Model IRI-2016. I. Electron Concentrations. *Geomagnetism and Aeronomy*. 59 (1), 50–58. <https://doi.org/10.1134/S0016794019010115> (in Russian).
4. Fabrizio G. A. (2018) *High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications*. Moscow, TEKHNO SFERA.
5. Bilitza D., Huang X., Reinisch B. W., Benson R. F., Hills H. K., Schar W. S. (2022) International Reference Ionosphere 2020 – Your Standard Model of the Ionosphere. *Earth and Space Science*. 9 (2). <https://doi.org/10.1029/2021EA002043>.
6. Bekker S. Z. (2018) *Modern Ionospheric Models for Calculating Radio Wave Propagation*. Moscow, Radiotekhnika (in Russian).
7. MacDonald M., Abouzahra M., Stambaugh J. (2024) Overview of High-Power and Wideband Radar Technology Development at MIT Lincoln Laboratory. *Remote Sens*. 16 (9). <https://doi.org/10.3390/rs16091530>.
8. Akimov V. F., Kalinin Yu. K. (2017) *Introduction to the Design of Ionospheric Over-the-Horizon Radars*. Moscow, TEKHNO SFERA (in Russian).
9. Bova Yu. I., Kryukovskiy A. S., Lukin D. S. (2017) Modeling the Propagation of Frequency-Modulated Radiation in Anisotropic Ionospheric Plasma. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. 22 (5), 4–11 (in Russian).
10. Barton D. K. (2013) *Radar Equations for Modern Radar*. Boston, Artech House.

11. Shirman Ya. D. (ed.) (2007) *Radioelectronic Systems. Foundations and Theory*. Moscow, Radiotekhnika (in Russian).
12. Naumov A. O., Khmarsky P. A., Byshnev N. I., Piatrouski M. A. (2024) Determination of Total Electron Content in the Ionosphere Over the Territory of the Republic of Belarus Based on Global Navigation Satellite Systems Data. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*. 69 (1), 53–64. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-53-64>.
13. Artemyev V. M., Khmarsky P. A., Naumov A. O. (2024) Algorithm and Methodology for Optimization of Parameters for Three-Dimensional Ionosphere Reconstruction. *Nondestructive Testing and Diagnostics*. (1), 42–52 (in Russian).
14. Naumov A. O., Khmarskiy P. A., Aronov G. A., Kotov D. S. (2024) Results of Studies on Processes Occurring in the Ionosphere and Earth's Magnetic Field Over the Territory of the Republic of Belarus for the Year 2023. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. 27 (3), 225–233. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.13960570>.

Received: 29 May 2025

Accepted: 18 June 2025

Вклад авторов

Артемиев В. М. обосновал концепцию исследования, сформулировал идею, цели и задачи исследования. Хмарский П. А. предложил методику снижения погрешностей радиолокационных измерений, выполнил моделирование, обобщил и интерпретировал результаты, подготовил текст рукописи.

Наумов А. О. собрал и систематизировал данные, редактировал текст рукописи, подготовил графические материалы.

Authors' contribution

Artemyev V. M. substantiated the concept of the study, formulated the idea, goals and objectives of the study. Khmarskiy P. A. proposed the methodology for reducing radar measurement errors, performed modeling, summarized and interpreted the results, and prepared the manuscript.

Naumov A. O. collected and systematized the data, redacted the manuscript, and prepared graphic materials.

Сведения об авторах

Артемиев В. М., чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф, гл. науч. сотр., Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ИПФ НАН Беларуси)

Хмарский П. А., канд. техн. наук, доц., вед. науч. сотр., ИПФ НАН Беларуси

Наумов А. О., канд. физ.-мат. наук, зав. лаб. радиотомографии, ИПФ НАН Беларуси

Information about the authors

Artemyev V. M., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Chief Researcher, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (IAP NAS of Belarus)

Khmarskiy P. A., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Leading Researcher, IAP NAS of Belarus

Naumov A. O., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Head of the Laboratory of Radiotomography, IAP NAS of Belarus

Адрес для корреспонденции

220072, Республика Беларусь,
Минск, ул. Академическая, 16
Институт прикладной физики
Национальной академии наук Беларуси
Тел.: +375 17 300-73-98
E-mail: pierre2009@mail.ru
Хмарский Петр Александрович

Address for correspondence

220072, Republic of Belarus,
Minsk, Akademicheskaya St., 16
Institute of Applied Physics
of the National Academy of Sciences of Belarus
Tel.: +375 17 300-73-98
E-mail: pierre2009@mail.ru
Khmarskiy Petr Aleksandrovich