

УДК 004.422.8:523.4-853-047.36

ИНФОРМАЦИОННЫЕ РАДИОТЕХНОЛОГИИ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРЫ ПО СИГНАЛАМ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

П.А. ХМАРСКИЙ^{1,2}, В.М. АРТЕМЬЕВ¹, А.О. НАУМОВ¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Беларусь)

²Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси
(г. Минск, Беларусь)

E-mail: p.khmarskij@bsuir.by

Аннотация. Рассмотрены информационные радиотехнологии томографического мониторинга ионосферы по сигналам спутниковых систем. Описан разработанный программно-алгоритмический комплекс мониторинга ионосферы, обеспечивающий автоматизированный сбор, фильтрацию, обработку и визуализацию данных глобальных навигационных спутниковых систем, низкоорбитальных спутников и наземных ионозондов. Показано, что интеграция разнородных спутниковых, наземных и геомагнитных наблюдений повышает точность, устойчивость и оперативность выявления ионосферных возмущений, включая периоды экстремальных геофизических явлений. Отдельное внимание уделено применению результатов анализа и прогнозирования ионосферы и магнитосферы для снижения систематических погрешностей радиолокационных измерений координат и параметров движения воздушных и космических объектов.

Abstract. Information radio technologies for tomographic monitoring of the ionosphere using signals from satellite systems are considered. A software and algorithmic complex for three-dimensional reconstruction of electron density in the ionosphere is described, providing automated collection, filtering, processing, and visualization of data from global navigation satellite systems, low-orbit satellites, and ground-based ionosondes. It is shown that the integration of heterogeneous satellite, ground-based, and geomagnetic observations improve the accuracy, robustness, and operational efficiency of detecting ionospheric disturbances, including periods of extreme geophysical events. Special attention is paid to the application of ionosphere and magnetosphere analysis and forecasting results to reduce systematic errors in radar measurements of the coordinates and motion parameters of airborne and space objects.

Введение

Надежная работа радиосистем связи, навигации и локации невозможна без регулярного и достоверного мониторинга состояния околоземного космического пространства, поскольку ионосферные возмущения существенно влияют на их функционирование. Для обеспечения устойчивой работы таких систем актуальным является внедрение автоматизированных средств мониторинга ионосферных возмущений на основе данных спутниковых систем [1-5]. В рамках научно-технической программы Союзного государства «Комплекс-СГ» (2023–2026 гг., мероприятие 3.3) сотрудниками лаборатории СВЧ-электроники и радиотомографии Института прикладной физики Национальной академии наук (НАН) Беларуси на основе опыта научной школы члена-корреспондента НАН Беларуси, профессора, доктора технических наук В.М. Артемьева разработан программно-алгоритмический комплекс для радиотомографического анализа и мониторинга состояния ионосферы [6, 7]. Такой комплекс позволяет объективно отслеживать динамику ионосферы, выявлять аномалии, связанные с геофизическими событиями, включая магнитные бури и землетрясения, что важно для информационной, навигационной и радиолокационной инфраструктуры. Система обеспечивает трехмерный мониторинг поля концентрации электронов с использованием 10–100 приемных станций и одновременным анализом сигналов 5–20 спутников с точностью реконструкции до 10 %, пространственным разрешением не хуже 20 км и временным разрешением до 1 мин [6]. Это позволяет непрерывно контролировать изменения ионосферной плазмы, особенно в периоды экстремальных геофизических явлений.

В статье представлен опыт создания, развития и апробации программно-алгоритмического комплекса радиотомографического мониторинга ионосферы, анализа и обработки получаемых данных, а также перспективы дальнейшего совершенствования информационных радиотехнологий томографического мониторинга ионосферы по сигналам спутниковых систем.

Исходные данные, постановка задачи и методология радиотомографического мониторинга

Исходными данными для трехмерного мониторинга поля концентрации электронов в ионосфере служат измерения параметров сигналов от высокоорбитальных и низкоорбитальных аппаратов, принятых наземными станциями [6], а также данные наземных ионозондов. Интеграция этих разнородных источников обеспечивает высокую плотность трасс, улучшает территориальное покрытие и разрешающую способность мониторинга. Каждая приемная станция регистрирует сигналы от нескольких спутников, формируя широкую зону наблюдений и предоставляя информацию о полном электронном содержании (Total electron content – TEC) вдоль линий спутник-приемник (рис.1).

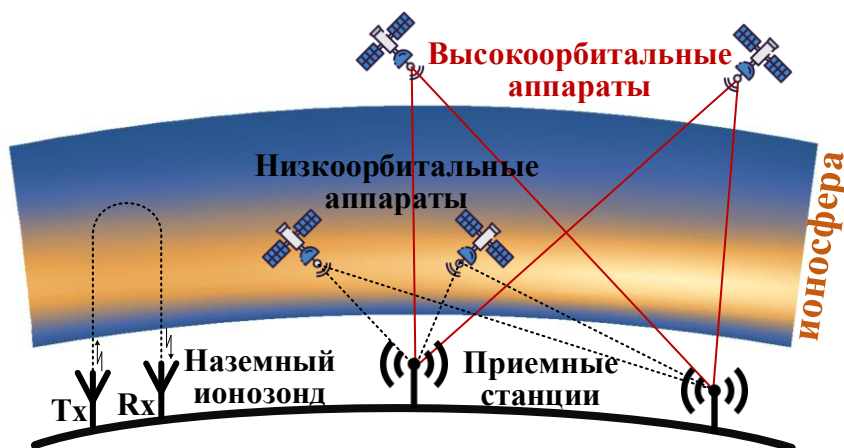


Рис. 1. Принцип радиотомографии ионосферы

Задача исследований заключалась в восстановлении динамического трехмерного распределения концентрации электронов по измерениям TEC. Решение требует использования регуляризационных методов и априорных сведений о среде, а также автоматизации процессов предварительной обработки и реконструкции больших массивов данных.

Программные средства, их верификация и экспериментальные результаты

Обработка данных томографического мониторинга ионосферы программными средствами включала в себя следующие основные этапы [7, 8]: чтение и структурирование данных; предварительная обработка данных; вычисление TEC; трехмерная реконструкция ионосферы; отображение и анализ полученных результатов обработки. Структурная схема радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере, реализующая перечисленные этапы, приведена на рис. 2.

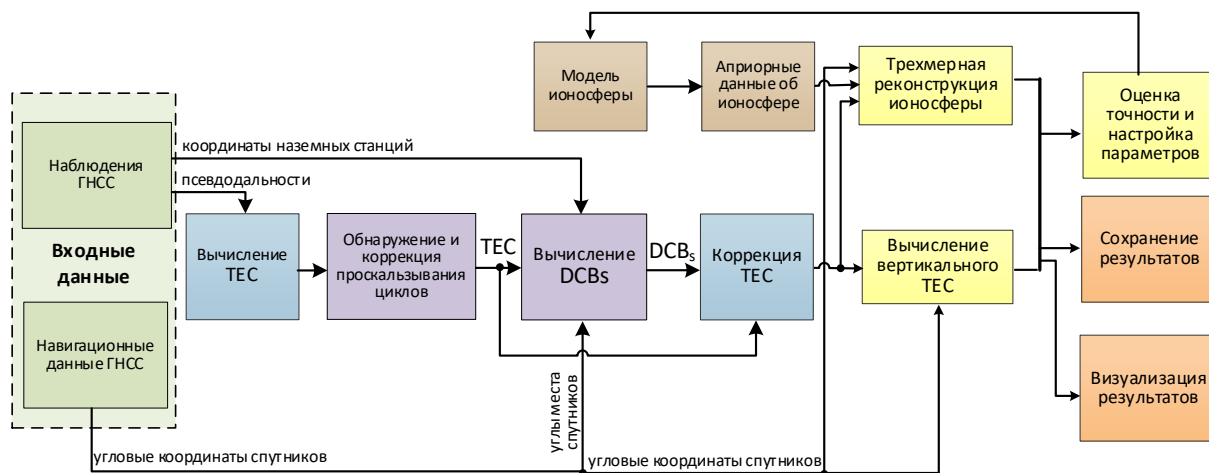


Рис. 2. Структура радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере

Вычисление TEC проводилось согласно разработанным алгоритмам и методикам, описанным в [7, 9]. Особенности данных алгоритмов: использование двухчастотных сигналов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС); комбинация измерений по фазовым и кодовым задержкам; решение задач коррекции проскальзывания цикла навигационного сигнала и определения дифференциальных кодовых задержек радионавигационных сигналов для последующей корректировки значений TEC.

На рис. 3 приведены результаты расчета TEC по данным спутников GPS и двух наземных станций (Брест и Новополоцк) Европейской сети непрерывно функционирующих опорных станций (EUREF Permanent Network, EPN [10]) 11 мая 2024 г., когда магнитосфера Земли пережила сильнейшее возмущение в текущем столетии (Sunspot region AR13664. URL: <https://www.spaceweatherlive.com/en/solar-activity/region/13664.html>). Причиной таких возмущений стала повышенная активность Солнца – корональные выбросы массы 7–9 мая 2024 г. Графики на рис. 3 наглядно демонстрируют суточную динамику изменения TEC во время мощной геомагнитной бури. Особенно заметны резкие колебания значений в дневное время (между 10:00 и 16:00 UTC), что характерно для периодов сильных ионосферных возмущений. Максимальные значения TEC наблюдаются в полуденные часы, что соответствует периоду максимальной солнечной ионизации. Сравнительный анализ данных с множества подобных станций позволяет отследить пространственное распределение возмущений над территорией страны [8, 11].

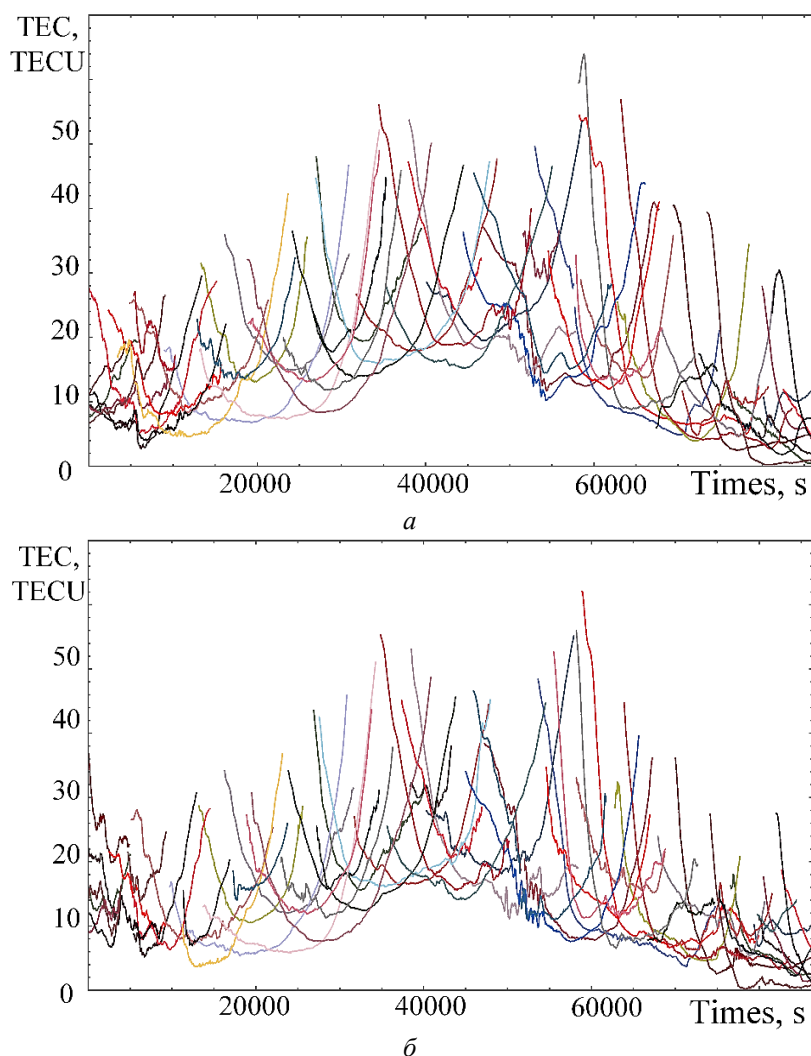
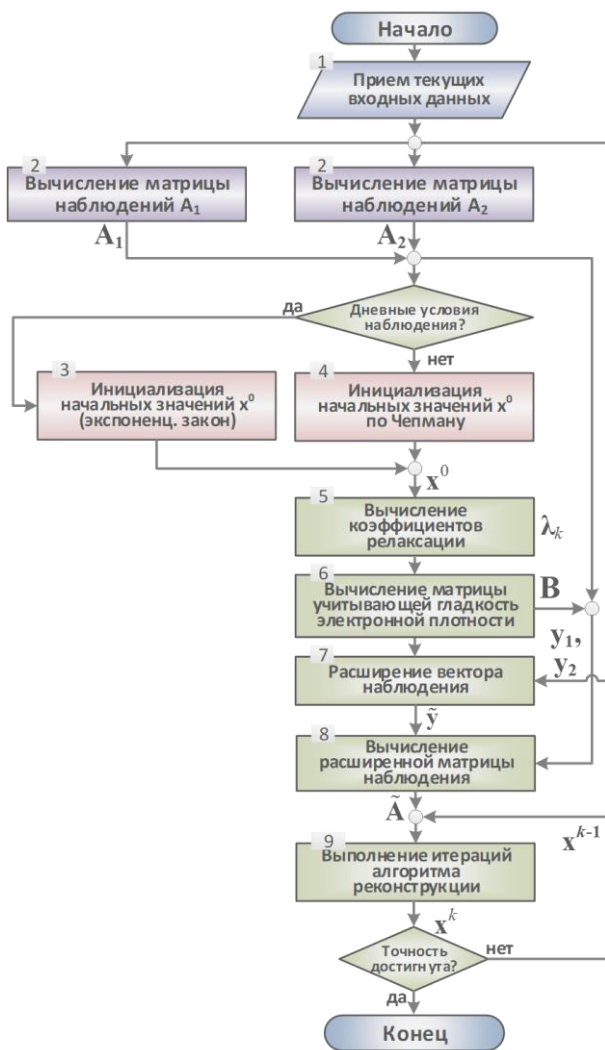
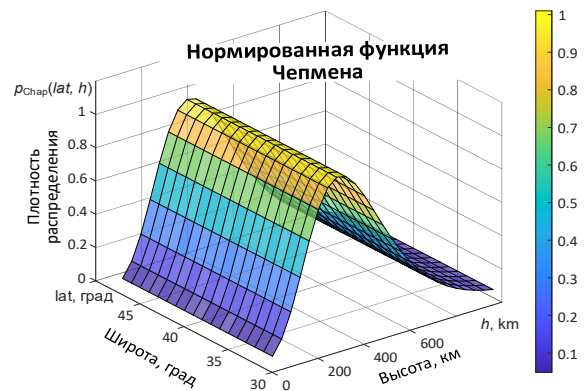


Рис. 3. Результаты расчета полного электронного содержания за 11 мая 2024 г. по данным спутников GPS (различными цветами показаны значения для разных спутников) и наземных станций системы EPN, размещенных в Бресте (а) и Новополоцке (б),

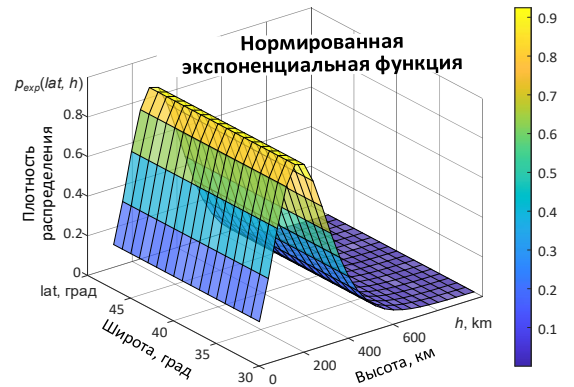
Трехмерная реконструкция ионосферы реализовывались с использованием алгоритмов, описанных в [12–15] и основанных на использовании модифицированного метода Ландвебера (рис.4а), отличающихся установкой параметров релаксации и начальных значений в соответствии с уравнением Чепмена (рис.4б) и экспоненциальным распределением (рис.4в), ограничением на гладкость на основе девятиточечной конечно-разностной аппроксимации оператора Лапласа второго порядка, а также введением весовых коэффициентов, обеспечивающих учет влияния ограничений и начальных значений. Разработанные алгоритмы трехмерной реконструкции ионосферы характеризуются высокой скоростью сходимости и относительно низкой вычислительной сложностью, что позволяет применять их в системах реального времени [13]. В зависимости от входных данных алгоритмы реконструкции имеют следующие модификации [6]: на основе данных GPS; с учетом данных низкоорбитальных космических аппаратов; с учетом данных наземных ионозондов.



а



б



в

Рис. 4. Алгоритм трехмерной реконструкции ионосферы с учетом ее гладкости и априорных сведений: а – блок-схема; б – функция Чепмена; в – экспоненциальная функция

На рис. 5 приведены примеры работы разработанного алгоритма реконструкции полей концентрации электронов в ионосфере над территорией Европы во время геомагнитной бури 11 мая 2024 г.

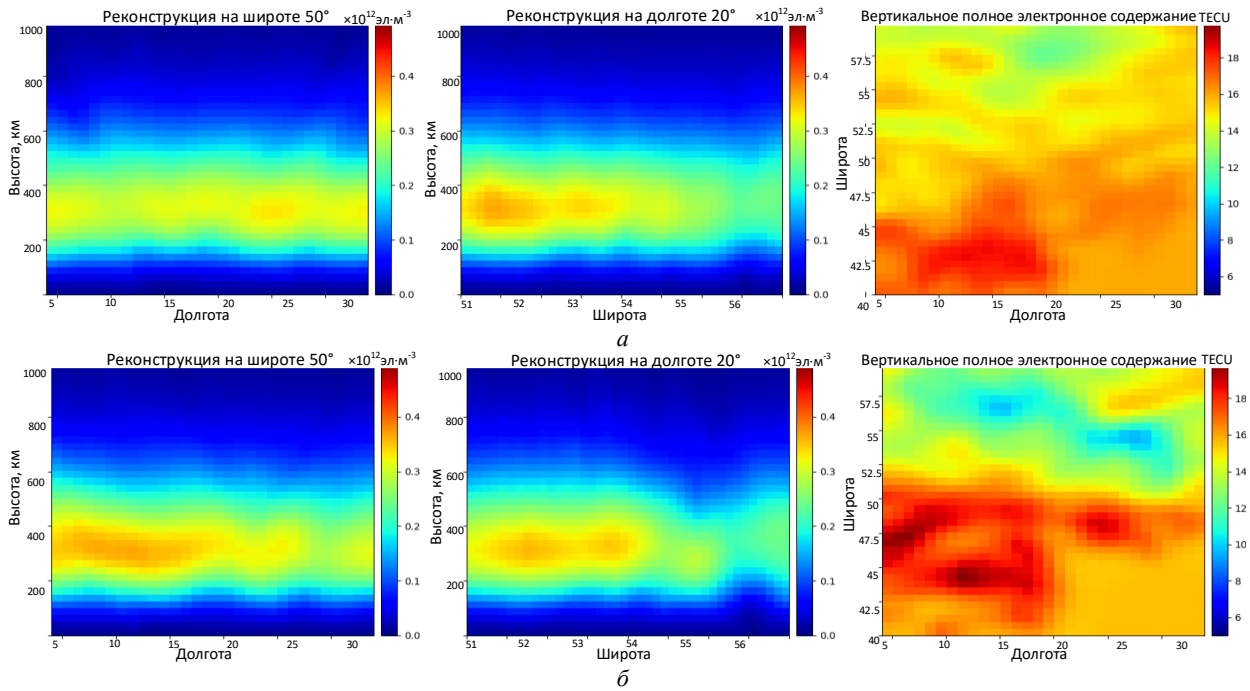


Рис. 5. Пример реконструкции распределения концентрации электронов в различные моменты времени 11 мая 2024 г. по данным спутников GPS и 100 станций EPN над территорией Европы: а - 12:00:00; б - 16:00:00

Приведенные на рис.5 результаты трехмерной реконструкции получены по результатам расчета ТЕС для 100 наземных станций EPN. Для обеспечения необходимого объема данных шаг дискретизации по времени выбирался равным 15 мин. Общее число трехмерных вокселей, на которые разбивалась ионосфера, равнялось 48 000 (число вокселей по широте, долготе и высоте – 40, 30 и 40 соответственно). Также на рис. 4 показаны примеры сечений реконструируемой области в двух плоскостях (в плоскости с постоянной широтой 50°, в плоскости с постоянной долготой 20°), а также суммарное вертикальное полное электронное содержание, полученное суммированием реконструированного поля по вертикальным столбцам. В реконструированных распределениях хорошо виден характерный максимум электронной концентрации на высотах 300–400 км, что соответствует теоретическим представлениям о структуре ионосферы. Видно, в ионосфере возникают неоднородности – так называемый ионосферный шторм, который наиболее сильно проявляется между 12:00 и 16:00 UTC.

Система анализа и прогнозирования ионосферы и магнитосферы для снижения ионосферных погрешностей радиолокационного измерения координат и параметров движения воздушных и космических объектов

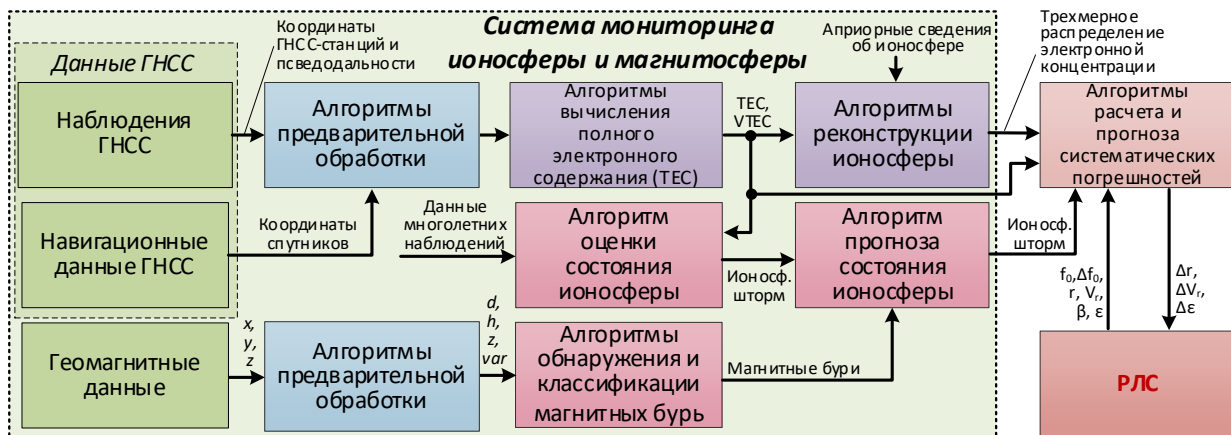


Рис. 6. Система мониторинга ионосферы и магнитосферы для повышения точности РЛС

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 [16]. Наиболее существенны возникающие систематические погрешности радиолокационных измерений при работе загоризонтных РЛС (10–40 МГц, дальности свыше 1000 км) и радиолокаторов с синтезированной апертурой и широкой полосой сигналов (300 МГц и выше), где требования к учету параметров среды распространения радиоволн особенно высоки [16]. В рамках проводимых исследований была разработана методика, использующая данные системы мониторинга ионосферы и магнитосферы (рис. 6), результаты трехмерной реконструкции электронной концентрации и позволяющая проводить автоматическую коррекцию радиолокационных параметров с учетом пространственно-временных вариаций ионосферы [16, 17]. Методика включает шесть этапов [6]: сбор данных от спутниковой системы точного позиционирования Республики Беларусь или станций EPN и геофизической обсерватории Плещеницы, расчет полного электронного содержания по данным ГНСС с обработкой кодовых и фазовых псевдодальностей, оценку состояния магнитосферы/ионосферы с обнаружением геомагнитных бурь и трехмерной реконструкцией концентрации электронов, вычисление ионосферных погрешностей РЛС, адаптацию параметров работы и автоматизацию учета погрешностей.

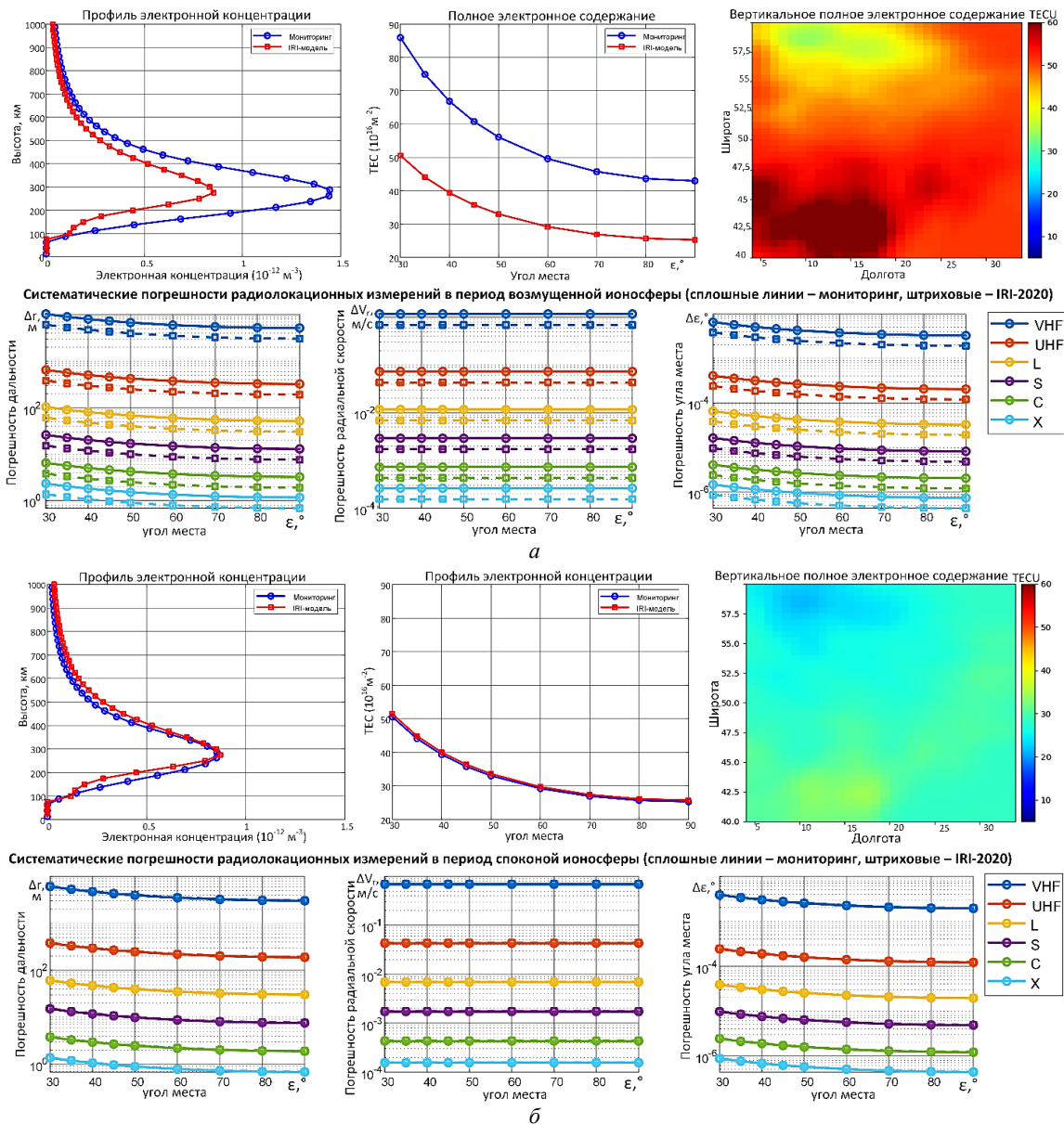


Рис. 7. Данные мониторинга и модели IRI-2020: профили ионосферы и погрешности РЛС для возмущенного (а) и спокойного (б) состояния

Сравнительное исследование для возмущенной (12.09.2024) и спокойной (14.09.2024) ионосферы показало (рис. 7): в условиях повышенной активности данные мониторинга выявляют существенно более высокие значения электронной плотности на высотах 250-350 км по сравнению со справочной моделью ионосферы IRI-2020 [18]; при спокойном состоянии различия между экспериментальными и модельными профилями уменьшаются. Сравнение систематических погрешностей (рис. 4) показало, что при ионосферных возмущениях модель IRI-2020 занижает погрешности дальности в 1,5–2 раза, особенно критично для VHF (до 7–10 км) и UHF (до 1–1,2 км) диапазонов [16]. В высокочастотных диапазонах (S, C, X) погрешности, рассчитанные при помощи модели IRI-2020, существенно снижаются. Максимальные погрешности наблюдаются при малых углах места. Наибольшие различия между данными мониторинга и модельными расчетами в периоды возмущений обосновывают необходимость использования оперативных данных для коррекции радиолокационных измерений [16].

Заключение

В результате проделанной работы в рамках проекта программы Союзного государства «Комплекс-СТ» был создан и успешно апробирован программно-алгоритмический комплекс трехмерного радиотомографического мониторинга ионосферы. Решен ряд технологических и методических задач: обеспечена интеграция данных различных спутниковых и наземных источников, реализованы эффективные алгоритмы реконструкции, автоматизированы этапы обработки и визуализации результатов. Проведенная валидация подтвердила высокую точность, устойчивость и универсальность разработанных технологий, что открывает широкие перспективы их применения для мониторинга ионосферных возмущений и поддержки современных задач спутниковой связи, навигации и прогноза экстремальных геофизических явлений. Сформирована и экспериментально обоснована методика снижения ионосферных систематических погрешностей радиолокационных измерений координат и параметров движения воздушных и космических объектов, основанная на интеграции оперативных данных мониторинга ионосферы и магнитосферы, получаемых по спутниковым и геомагнитным наблюдениям. Разработанные процедуры внесения коррекций в измеряемые параметры дальности, радиальной скорости и угла места обеспечивают динамическую адаптацию радиолокационных систем контроля к текущим и прогнозируемым геофизическим условиям.

Список использованных источников

1. Куницын, В. Е. Радиотомография ионосферы / В. Е. Куницын, Е. Д. Терещенко, Е. С. Андреева. М.: Физматлит, 2007. 693 с.
2. Yasyukevich, Yu. V. Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data / Yu. V. Yasyukevich, A. A. Mylnikova, A. S. Polyakova // Results in Physics. 2015. Vol. 5. P. 32–33.
3. Способ оценивания полного электронного содержания в ионосфере на основе ретрансляции сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS / И. В. Белоконов [и др.] // Информатика. 2023. Т. 20. № 2. С. 7–27.
4. Обработка ретранслированных навигационных сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS в задаче оценивания полного электронного содержания в ионосфере / Е. А. Каплярчук [и др.] // Информатика. 2023. Т. 20. № 3. С. 21–36.
5. Каплярчук, Е. А. Оценивание орбитальных параметров наноспутника при измерении полного электронного содержания в ионосфере на основе ретрансляции навигационных сигналов GPS / Е. А. Каплярчук, С. В. Козлов, А. С. Шапкин // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22. № 5. С. 62–70.
6. Артемьев В. М., Наумов А. О., Хмарский П. А. // Девятый Белорусский космический конгресс: материалы конгр. Минск, 21–23 октября 2025 г. Т. 1. С. 54–57.
7. Naumov, A. Methods and software for estimation of total electron content in ionosphere using GNSS observations / A. Naumov, P. Khmarskiy, N. Byshnev, M. Piatrouski // Engineering Applications. 2023. Vol. 2. № 3. P. 243–253.
8. Артемьев, В. М. Верификация программных средств трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере по данным Европейской сети непрерывно функционирующих опорных станций EPN / В. М. Артемьев, А. О. Наумов, П. А. Хмарский // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. физ.-тэхн. навук. 2025. Т. 70. № 1. С. 79–88.
9. Naumov, A. O. 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, P. A. Khmarskiy, N. I. Byshnev, M. A.

«ИНФОРМАЦИОННЫЕ РАДИОСИСТЕМЫ И РАДИОТЕХНОЛОГИИ 2026»

Международная научно-техническая конференция, 9-10 июня 2026 г., Минск, Республика Беларусь

Piatrowski // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series. 2024. Vol. 69. № 1. P. 53–64.

10. EUREF's contribution to national, European and Global Geodetic Infrastructures / J. Ihde [et al.] // Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet: Proceedings of the IAG General Assembly. Melbourne, Australia, June 28–July 2, 2011 / eds.: C. Rizos, P. Willis. Springer, 2014. P. 189–196.

11. Naumov, A. O. 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, P. A. Khmarskiy, G. A. Aronov, D. S. Kotov // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2024. Vol. 27. № 3. P. 225–233.

12. 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.

13. Artemiev, V. M. Algorithm for Three-Dimensional Ionospheric Radio Tomography Based on GNSS Data / V. M. Artemiev, P. A. Khmarski, A. O. Naumov // Gyroscopy and Navigation. Springer. 2025. Vol. 16. № 2. P. 183–194.

14. Khmarski P. A., Naumov A. O. // ICINS-2024: proc. of the 31st Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems. Saint Petersburg, 27–29 May 2024. P. 185–188.

15. Artemiev V. M., Naumov A. O., Khmarskiy P. A. // Foundations & Advances in Nonlinear Science and Advances in Nonlinear Photonics: programme & book of abstracts of the XXII Intern. conf. and VII Intern. Symp. Minsk, 23–27 Sept. 2024 / Belarusian State University; ed.: A. L. Tolstik, G. G. Krylov. P. 18.

16. Артемьев, В. М. Снижение погрешности радиолокационных измерений за счет использования данных мониторинга ионосферы и магнитосферы / В. М. Артемьев, П. А. Хмарский, А. О. Наумов // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23. № 4. С. 54–62.

17. Хмарский, П. А., Наумов А. О. // XVIII Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ–2025): материалы мультиконференции. Тула, 15–20 сентября 2025 г. Т. 3. С. 247–250.

18. International Reference Ionosphere [Electronic resource].
URL: https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php. Date of access: 07.06.2023.