

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ
INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-79-88>
УДК 528.88:550.388.2



Оригинальная статья

В. М. Артемьев, А. О. Наумов, П. А. Хмарский*

*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь*

**ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ТРЕХМЕРНОГО
РАДИОТОМОГРАФИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПОЛЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ
ЭЛЕКТРОНОВ В ИОНОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ ЕВРОПЕЙСКОЙ СЕТИ
НЕПРЕРЫВНО ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ ОПОРНЫХ СТАНЦИЙ EPN**

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований и верификации программных средств трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере над территорией Европы. В качестве входных данных использовались результаты измерений 100 станций (из них 10 на территории Беларуси) Европейской сети непрерывно функционирующих опорных станций EPN (EUREF Permanent Network) и навигационные данные высокоорбитальных навигационных спутников в формате RINEX. Разработанные программные средства реализуют полный цикл обработки данных, включая структурирование первичной информации, предварительную обработку с отбраковкой аномальных значений, вычисление полного электронного содержания и трехмерную реконструкцию ионосферы. Продемонстрированы примеры вычисления полного электронного содержания над Республикой Беларусь от различных наземных станций (Брест, Новополоцк, Витебск) в разные моменты времени для 11 мая 2024 г., когда магнитосфера Земли пережила сильнейшее возмущение в текущем столетии. Приведены результаты трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере с временным разрешением 15 мин, включая визуализацию сечений реконструируемой области в плоскости с постоянной широтой 50°, в плоскости с постоянной долготой 19°, а также суммарное вертикальное полное электронное содержание, полученное суммированием реконструированного поля по вертикальным столбцам. Экспериментально подтверждена эффективность разработанных алгоритмов в условиях сильных геомагнитных возмущений. Полученные результаты целесообразно использовать при мониторинге ионосферы с целью обеспечения надежной работы радиосистем, обнаружения ионосферных аномалий естественного и искусственного происхождения, а также прогнозирования природных явлений на их основе.

Ключевые слова: ионосфера, радиотомография, полное электронное содержание, вертикальное электронное содержание, глобальная спутниковая навигационная система, EPN, EUREF, навигационный сигнал

Благодарности: работа выполнена в рамках Программы Союзного государства «Разработка базовых элементов орбитальных и наземных средств в интересах создания многоспутниковых группировок малоразмерных космических аппаратов наблюдения земной поверхности и околоземного космического пространства «Комплекс-СГ»» на 2023–2026 годы, мероприятие 3.3.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Артемьев Валентин Михайлович* – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института прикладной физики Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0009-0007-6246-992X>. E-mail: artemiev@iaph.bas-net.by; *Наумов Александр Олегович* – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Института прикладной физики Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0002-4624-9261>. E-mail: naumov@iaph.bas-net.by; *Хмарский Петр Александрович* – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, докторант Института прикладной физики Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0003-3404-3917>. E-mail: pierre2009@mail.ru

Вклад авторов: *Артемьев Валентин Михайлович* – обоснование концепции исследования, формулирование идеи, исследовательских целей и задач, разработка методологии и модели исследования; *Наумов Александр Олегович* – сбор и систематизация данных, компьютерное и математическое моделирование, проведение сравнительного анализа, написание текста рукописи; *Хмарский Петр Александрович* – обобщение и интерпретация результатов исследования, редактирования текста рукописи, работа с графическими материалами.

Для цитирования: 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 // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 79–88. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-79-88>

Поступила в редакцию: 30.01.2025

Утверждена к публикации: 06.03.2025

Подписана в печать: 12.03.2025

Original article

Valentin M. Artemiev, Alexander O. Naumov, Petr A. Khmarskiy*

*Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
16, Akademicheskaya St., 220072, Minsk, Republic of Belarus*

VERIFICATION OF SOFTWARE FOR THREE-DIMENSIONAL RADIO TOMOGRAPHIC MONITORING OF ELECTRON DENSITY IN THE IONOSPHERE BASED ON DATA FROM THE EUREF PERMANENT NETWORK

Abstract. This paper presents the results of experimental studies and verification of software tools for three-dimensional radiotomographic monitoring of electron concentration fields in the ionosphere over Europe. The input data comprised measurements from 100 stations (including 10 in Belarus) of the EUREF Permanent Network (EPN) and navigation data from high-orbit navigation satellites in RINEX format. The developed software implements a complete data processing cycle, including primary information structuring, preliminary processing with anomalous value filtering, total electron content calculation, and three-dimensional ionosphere reconstruction. Examples of total electron content calculations over the Republic of Belarus from various ground stations (Brest, Novopolotsk, Vitebsk) are demonstrated for different time points on May 11, 2024, when Earth's magnetosphere experienced the strongest disturbance of the current century. The results of three-dimensional radiotomographic monitoring of electron concentration fields in the ionosphere with 15-minute temporal resolution are presented, including visualization of reconstructed region cross-sections at constant latitude 50°, constant longitude 19°, and the total vertical electron content obtained by summing the reconstructed field along vertical columns. The effectiveness of the developed algorithms under strong geomagnetic disturbance conditions has been experimentally confirmed. The obtained results are suitable for ionospheric monitoring to ensure reliable radio system operation, detection of natural and artificial ionospheric anomalies, and prediction of natural phenomena based on these observations.

Keywords: ionosphere, radio tomography, total electron content, vertical electron content, global satellite navigation system, EPN, EUREF, navigation signal

Acknowledgements: this work was carried out within the framework of Activity 3.3 of the Union State Program “Development of basic elements of orbital and ground facilities for creating multi-satellite constellations of small spacecraft for Earth surface and near-Earth space observation «Complex-SG»” for 2023–2026.

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Valentin M. Artemiev* – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Chief Researcher at Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0009-0007-6246-992X>. E-mail: artemiev@iaph.bas-net.by; *Alexander O. Naumov* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory at Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-4624-9261>. E-mail: naumov@iaph.bas-net.by; *Petr A. Khmarskiy* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, Doctoral Candidate at Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0003-3404-3917>. E-mail: pierre2009@mail.ru

Contribution of the authors: *Valentin M. Artemiev* – substantiation of the research concept, formulation of the idea, research goals and objectives, development of research methodology and model; *Alexander O. Naumov* – data collection and systematization, computer and mathematical modeling, comparative analysis, manuscript writing; *Petr A. Khmarskiy* – generalization and interpretation of research results, manuscript editing, work with graphic materials.

For citation: Artemiev V. M., Naumov A. O., Khmarskiy P. A. Verification of software for three-dimensional radio tomographic monitoring of electron density in the ionosphere based on data from the EUREF Permanent Network. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 68, no. 3, pp. 79–88. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-79-88>

Received: 30.01.2025

Approved for publication: 06.03.2025

Signed to the press: 12.03.2025

Введение. В современных условиях развития космических и наземных радиотехнических систем критически важной становится задача оперативного мониторинга состояния ионосферы Земли [1]. Это обусловлено тем, что ионосферные возмущения оказывают существенное влияние на распространение радиоволн, что напрямую затрагивает работу систем спутниковой навигации, радиосвязи и радиолокации [2]. Особую значимость данная проблема приобретает в текущий период максимума солнечной активности, характеризующийся повышенной частотой возникновения геомагнитных бурь и ионосферных возмущений [3–5]. Разработка эффективных методов и инструментов для непрерывного контроля параметров ионосферы позволяет не только своевременно выявлять аномалии различного происхождения, но и обеспечивать необходимую точность и надежность работы современных радиотехнических систем [2]. При этом использование данных существующих сетей наземных станций глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) открывает новые возможности для создания систем оперативного мониторинга состояния ионосферы с высоким пространственно-временным разрешением [2, 6–10].

Одним из наиболее эффективных методов исследования ионосферы в настоящее время является радиотомография с использованием сигналов ГНСС [1, 4, 6–11]. Особую роль в изучении ионосферы играет Европейская сеть непрерывно функционирующих опорных станций (EUREF Permanent Network, EPN), которая включает более 300 постоянно действующих ГНСС-станций, распределенных по всей территории Европы [12]. Каждая станция EPN оснащена высокоточным геодезическим оборудованием и работает в непрерывном режиме, гарантируя круглосуточный сбор данных в течение всего года. Высокая плотность размещения на местности станций EPN обеспечивает отличное пространственное покрытие, которое позволяет строить детальные карты ионосферных параметров с хорошим разрешением, а непрерывные измерения с высокой частотой сбора данных дают возможность отслеживать быстропротекающие ионосферные процессы.

В рамках проводимых исследований авторами были разработаны программные средства трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере по радиосигналам от высокоорбитальных навигационных спутниковых систем [2, 11, 13–15].

Настоящая статья посвящена верификации разработанных программных средств и представлению результатов экспериментальных исследований трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере по данным наземной системы EPN, в том числе в условиях сильных геомагнитных возмущений.

Описание входных данных и общие сведения о системе EPN. Система EPN представляет собой европейскую наземную референсную структуру и сеть постоянно действующих ГНСС-станций [12]. Она является реализацией европейской системы координат ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) и играет ключевую роль в геодезических измерениях на территории Европы. Вся информация со всех действующих станций собирается и обрабатывается централизованной системой, что обеспечивает единый стандарт качества данных. Важным преимуществом EPN является открытый доступ к данным ее станций с возможностью проведения научных исследований и верификации разработанных программных средств.

В контексте радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере сеть EPN предоставляет первичные данные, к которым относятся фазовые измерения на частотах L1 и L2, кодовые измерения P1 и P2, доплеровские измерения и показатели отношения сигнал/шум [12]. На основе этих данных можно вычислять производные параметры, включающие полное электронное содержание (Total Electron Content, TEC), вертикальное электронное содержание (Vertical Total Electron Content, VTEC), градиенты электронной концентрации и сцинтилляционные индексы.

Использование данных EPN для исследования ионосферы обладает значительными преимуществами. Высокая плотность размещения станций в Европе обеспечивает отличное пространственное покрытие, что позволяет строить детальные карты ионосферных параметров с хорошим разрешением. Непрерывные измерения с высокой частотой сбора данных (до 1 Гц) дают возможность отслеживать быстропротекающие ионосферные процессы [12]. Качество получаемых данных гарантируется использованием стандартизированного оборудования, едиными протоколами измерений и постоянным контролем качества, включая регулярную калибровку приемников.

В области исследований ионосферы данные EPN активно применяются для изучения различных явлений [12, 16, 17]: регулярных вариаций, включающих суточные изменения, сезонных вариаций и широтных зависимостей параметров ионосферы. Особое внимание уделяется анализу возмущений, таких как ионосферные бури, перемещающиеся ионосферные возмущения и локальные аномалии. Практическое применение этих исследований включает прогнозирование состояния ионосферы, коррекцию навигационных решений и оценку влияния ионосферных условий на качество радиосвязи. Данные EPN в открытом доступе представлены в нескольких стандартных форматах RINEX (Receiver Independent Exchange Format) и SINEX (Solution Independent Exchange Format) [18]. Доступ к данным осуществляется через FTP-серверы, веб-порталы и специализированные центры обработки данных, что обеспечивает удобство работы для исследователей.

Методика обработки данных мониторинга ионосферы по данным сети EPN. В ходе экспериментальных исследований разработанных программных средств трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере по данным космических аппаратов использовались данные 100 (из них 10 непосредственно на территории Республики Беларусь) станций сети EPN (рис. 1).



Рис. 1. Схема размещения станций сети EPN, данные которых использовались для экспериментальных исследований и верификации программных средств трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере

Fig. 1. Layout of EPN stations whose data were used for experimental studies and verification of software for three-dimensional radio tomographic monitoring of electron concentration fields in the ionosphere

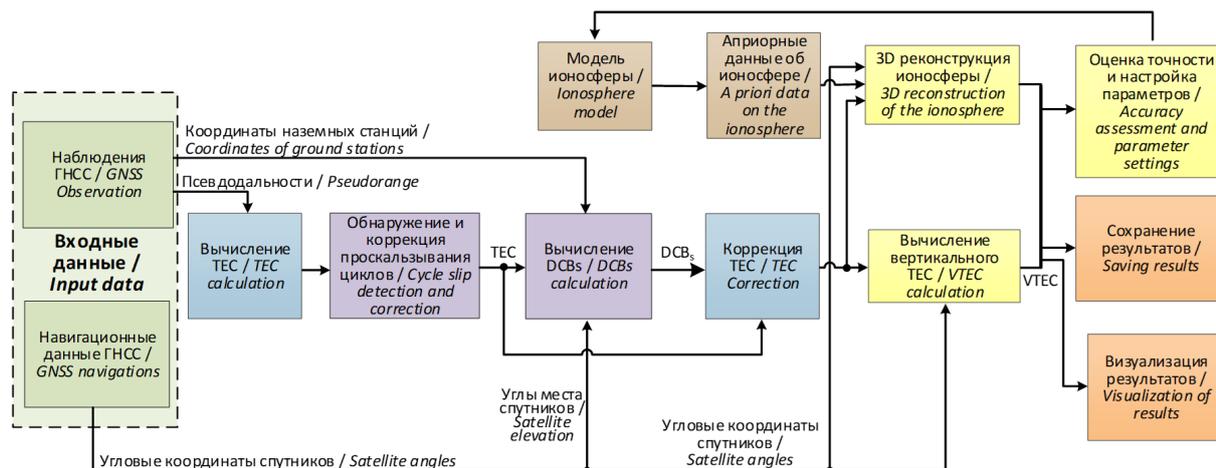


Рис. 2. Структура радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере

Fig. 2. Structure of radio tomographic monitoring of electron concentration fields in the ionosphere

Обработка данных программными средствами включала в себя следующие основные этапы: чтение и структурирование данных; предварительная обработка данных; вычисление полного электронного содержания в ионосфере; 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.

В ходе *первого этапа* обрабатывались данные GPS в формате RINEX, для которого был реализован соответствующий алгоритм для извлечения, преобразования и структурирования необходимой информации. На *втором этапе* (предварительной обработки) выполнялась отбраковка аномальных значений. Для некоторых приемных станций наблюдались аномальные значения и существенные пропуски в данных ГНСС. Такие зашумленные и искаженные данные исключались из последующей обработки. Для обнаружения аномалий данных использовалось скользящее окно с вычислением математического ожидания и линейной интерполяцией удаленных аномальных значений. При обнаружении аномалий крайне важно исключить только аппаратные и искусственно созданные помехи, к которым не относят геомагнитные бури и ионосферные штормы. Поэтому на этапе предварительной обработки привлекались экспертные оценки специалистов.

Вычисление полного электронного содержания в ионосфере (TEC) в ходе *третьего этапа* проводилось согласно алгоритмам и методикам, описанным в [6, 3, 11, 14, 15]. Особенности данных алгоритмов: использование двухчастотных сигналов 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. *Этапы 4 и 5* (трехмерная реконструкция и отображение и анализ полученных результатов реконструкции) реализовывались с использованием алгоритмов, описанных в [13, 19]. Алгоритм трехмерной реконструкции ионосферы основывается на использовании модифицированного метода Ландвебера и отличается установкой параметров релаксации и начальных значений в соответствии с уравнением Чепмена и экспоненциальным распределением, 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.

Результаты испытаний разработанных алгоритмов трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере по данным сети EPN. На рис. 3 приведены результаты расчета полного электронного содержания по данным спутников GPS и наземных станций системы EPN, размещенных на территории Беларуси, 11 мая 2024 г.,

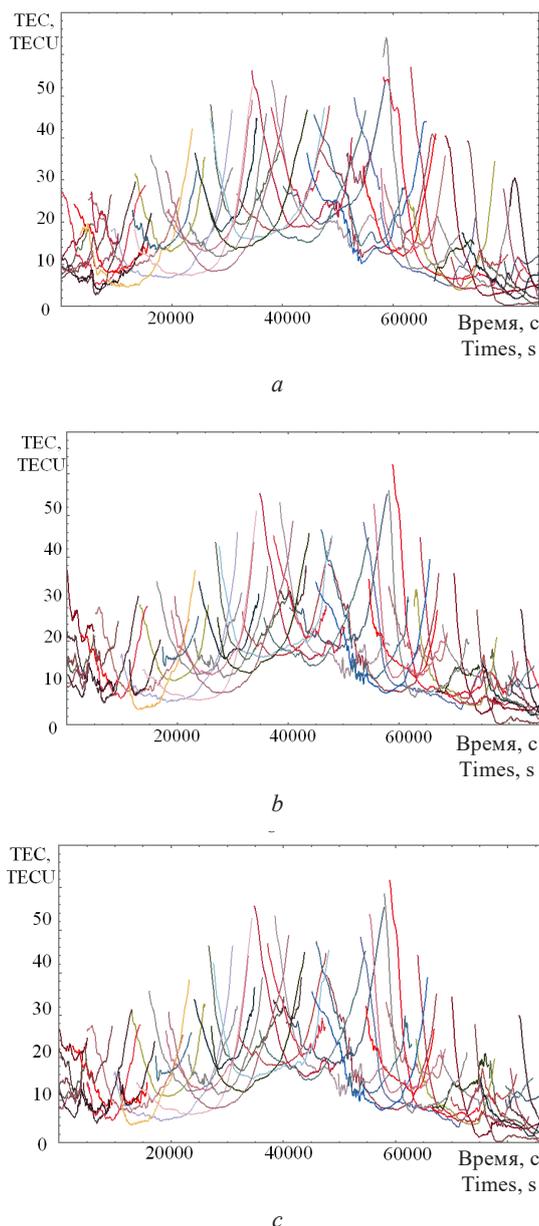


Рис. 3. Результаты расчета полного электронного содержания за 11 мая 2024 г. по данным спутников GPS (различными цветами показаны значения для разных спутников) и наземных станций системы EPN, размещенных на территории Беларуси: Брест (а), Новополоцк (b), Витебск (с)

Fig. 3. Results of total electron content calculations for May 11, 2024 based on GPS satellites data (values for different satellites are shown in different colors) and EPN system ground stations located in Belarus: Brest (a), Novopolotsk (b), Vitebsk (c)

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.

На рис. 4 приведены примеры работы алгоритма реконструкции полей концентрации электронов в ионосфере над территорией Европы во время геомагнитной бури 11 мая 2024 г.

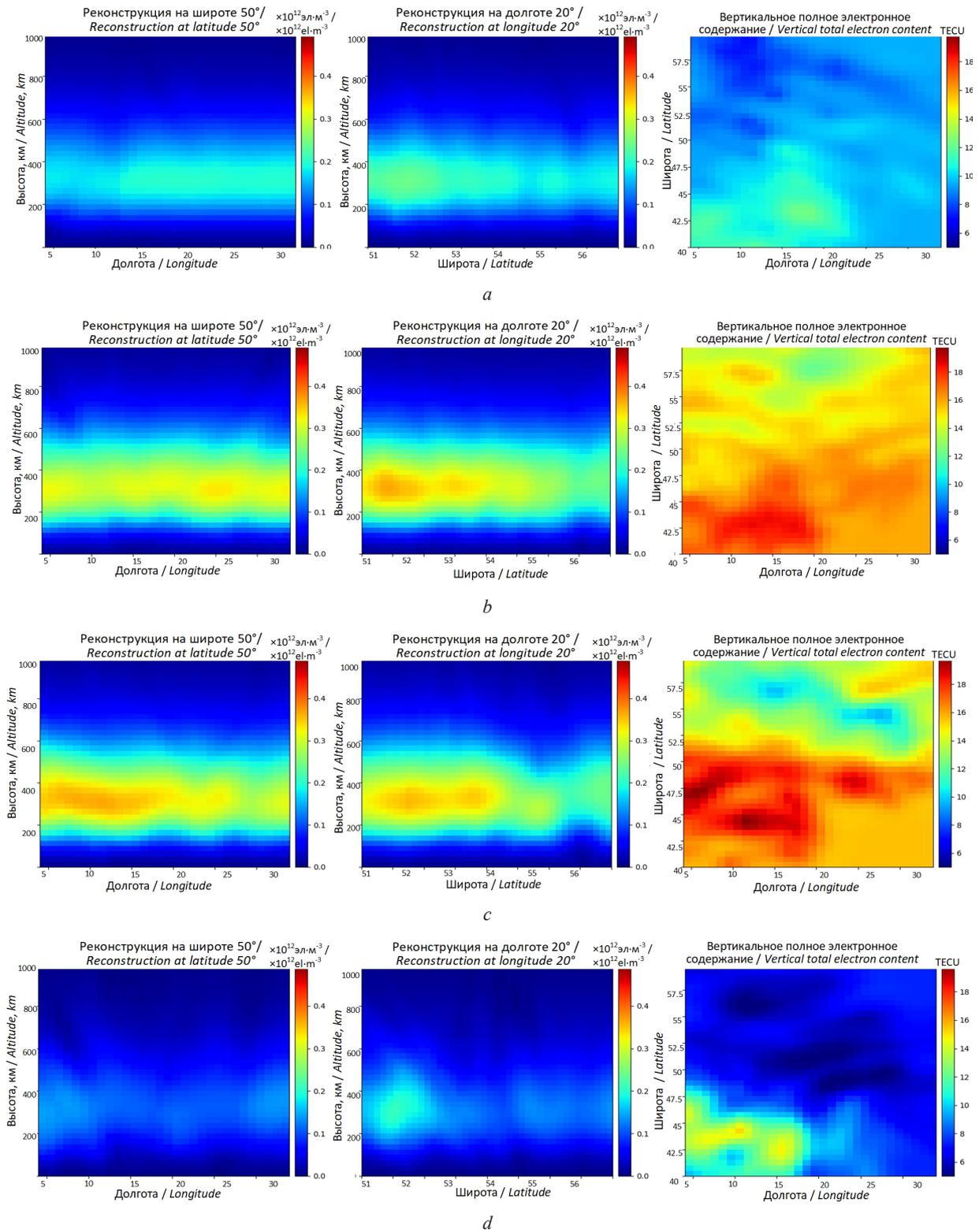


Рис. 4. Пример реконструкции распределения концентрации электронов в различные моменты времени 11 мая 2024 г. по данным спутников GPS и 100 станций EPN над территорией Европы: 08:00:00 (a); 12:00:00 (b); 16:00:00 (c); 20:00:00 (d)

Fig. 4. Example of electron concentration distribution reconstruction at different time points on May 11, 2024, based on GPS satellites data and 100 EPN stations over the territory of Europe: 08:00:00 (a); 12:00:00 (b); 16:00:00 (c); 20:00:00 (d)

для моментов 8:00, 12:00, 16:00, 20:00 UTC. Трехмерная реконструкция осуществлялась по результатам полного электронного содержания 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 как называемый ионосферный шторм, который наиболее сильно проявляется в 12:00 и 16:00 UTC.

Верификация разработанных программных средств трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере по данным EPN заключалась в проверке устойчивости алгоритмов радиотомографии при различных уровнях зашумленности входных данных, а также в тестировании на модельных примерах с известным распределением электронной концентрации.

Проведенные экспериментальные исследования разработанных программных средств трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере по данным сети EPN позволили получить ряд важных результатов.

1. Подтверждена работоспособность разработанных алгоритмов в условиях реальных измерений, в том числе при наличии сильных геомагнитных возмущений, что было продемонстрировано на примере данных за 11 мая 2024 г., когда магнитосфера Земли испытала сильнейшее возмущение в текущем столетии.

2. Разработанная методика обработки данных, включающая этапы структурирования, предварительной обработки, вычисления полного электронного содержания и трехмерной реконструкции, показала свою эффективность при работе с большими массивами данных от 100 станций сети EPN.

3. Полученные результаты реконструкции демонстрируют способность алгоритмов детально отслеживать динамику ионосферных процессов, включая формирование и развитие неоднородностей во время ионосферных штормов, что особенно четко проявилось в периоды максимального развития возмущений (12:00 и 16:00 UTC).

4. Визуализация результатов в различных сечениях доказала возможность получения детальной трехмерной картины распределения электронной концентрации в ионосфере.

Таким образом, экспериментальные исследования подтвердили практическую применимость и эффективность разработанных алгоритмов для решения задач радиотомографического мониторинга ионосферы в реальных условиях, включая периоды сильных геомагнитных возмущений.

Заключение. Представлены результаты экспериментальных исследований и верификации программных средств трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере по данным европейской наземной системы EPN.

Основные результаты работы:

1. Разработаны и верифицированы программные средства, реализующие полный цикл обработки данных, включая: структурирование первичной информации; предварительную обработку с отбраковкой аномальных значений; вычисление полного электронного содержания; трехмерную реконструкцию ионосферы.

2. Экспериментально подтверждена эффективность разработанных алгоритмов в условиях сильных геомагнитных возмущений, что продемонстрировано на примере данных за 11 мая 2024 г. во время мощнейшей геомагнитной бури текущего столетия.

3. Показана возможность успешной реконструкции трехмерного распределения электронной концентрации в ионосфере с временным разрешением 15 мин на основе данных 100 станций сети EPN, включая 10 станций на территории Беларуси.

4. Реализована визуализация результатов в различных сечениях: в плоскостях постоянной широты и долготы; в виде суммарного вертикального полного электронного содержания.

5. Проведенная всесторонняя верификация программных средств трехмерного радиотомографического мониторинга полей концентрации электронов в ионосфере доказала достоверность получаемых результатов реконструкции; устойчивость алгоритмов к различным видам помех; корректность работы всех программных модулей в различных режимах.

6. Подтверждена способность алгоритмов детально отслеживать динамику ионосферных процессов, включая формирование и развитие неоднородностей во время ионосферных штормов.

Полученные результаты целесообразно использовать при мониторинге ионосферы для обеспечения надежной работы радиосистем; обнаружения ионосферных аномалий естественного и искусственного происхождения; прогнозирования природных явлений; повышения точности работы систем спутниковой навигации; улучшения качества радиосвязи в условиях геомагнитных возмущений.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на совершенствование алгоритмов реконструкции и расширение функциональных возможностей разработанных программных средств.

Список использованных источников

1. Куницын, В. Е. Радиотомография ионосферы / В. Е. Куницын, Е. Д. Терещенко, Е. С. Андреева. – М.: Физматлит, 2007. – 693 с.
2. Hofmann-Wellenhof, B. GNSS – Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo, and More / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Wasle. – Springer, 2008. – xxix, 516 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1>
3. 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. Khmarski, G. A. Aronov, D. S. Kotov // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2024. – Vol. 27, № 3. – P. 225–233. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13960570>
4. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena / E. L. Afraimovich, E. I. Astafyeva, V. V. Demyanov [et al.] // Journal of Space Weather and Space Climate. – 2013. – Iss. 3. – Art. ID A27. <https://doi.org/10.1051/swsc/2013049>
5. Geomagnetic storms, super-storms, and their impacts on GPS-based navigation systems / E. Astafyeva, Yu. Yasyukevich, A. Maksikov, I. Zhivetiev // Space Weather. – 2014. – Vol. 12, Iss. 7. – P. 508–525. <https://doi.org/10.1002/2014SW001072>
6. Артемьев, В. М. Радиотомография поля концентрации электронов в ионосфере на основе фильтра Калмана / В. М. Артемьев, А. О. Наумов // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2012. – № 2. – С. 86–92.
7. Способ оценивания спутниковой системы GPS / И. В. Белоконов, А. М. Крот, С. В. Козлов [и др.] // Информатика. – 2023. – Т. 20, № 2. – С. 7–27. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-2-7-27>
8. Method and Results of Real Time Modeling of Ionosphere Radiotomography on the Basis of the Kalman Filter Theory / V. M. Artemiev, A. O. Naumov, V. L. Stepanov, N. I. Murashko // Journal of Automation and Information Sciences. – 2008. – Vol. 40, № 2. – P. 52–62. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v40.i2.50>
9. Yasyukevich, Yu. V. Advances in GNSS Positioning and GNSS Remote Sensing / Yu. V. Yasyukevich, B. Zhang, V. R. Devanaboyina // Sensors. – 2024. – Vol. 24, № 4. – Art. ID 1200. <https://doi.org/10.3390/s24041200>
10. 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. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.12.006>
11. Определение концентрации электронов в ионосфере над территорией Республики Беларусь по данным глобальных навигационных спутниковых систем (на англ. яз.) / А. О. Наумов, П. А. Хмарский, Н. И. Бышнев, Н. А. Петровский // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2024. – Т. 69, № 1. – С. 53–64. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-53-64>
12. GNSS metadata and data validation in the EUREF Permanent Network / C. Bruyninx, J. Legrand, A. Fabian, E. Pottiaux // GPS Solutions. – 2019. – Vol. 23. – Art. ID 106. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0880-9>
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. Methods and software for calculating total electronic content based on GNSS data / A. Naumov, P. Khmarskiy, N. Byshniou, M. Piatrouski // 7th Advanced Engineering Days, 1–2 July. 2023. Mersin, Türkiye. – 2023. – P. 158–160.
15. 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.
16. Regional integration of long-term national dense GNSS network solutions / A. Kenyeres, J. G. Bellet, C. Bruyninx [et al.] // GPS Solutions. – 2019. – Vol. 23, Iss. 4. – Art. ID 122. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0902-7>
17. EUREF's contribution to national, European and Global Geodetic Infrastructures / J. Ihde, H. Habrich, M. Sacher [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. – (Series: International Association of Geodesy Symposia; Vol. 139). https://doi.org/10.1007/978-3-642-37222-3_24

18. Ignacio, R. RINEX. The Receiver Independent Exchange Format Version 4.00. – Darmstadt: IGS/RTCM RINEX WG, 2021. – 120 p.

19. Khmarski, P. A. Algorithms for Three-Dimensional Reconstruction of Electron Concentration Fields in the Ionosphere using Data from the Global Navigation Satellite System / P. A. Khmarski, A. O. Naumov // 31st Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2024), 27–29 May 2024, Saint Petersburg, Russia: [Proceedings]. – St. Petersburg: State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, 2024. – P. 185–188. – URL: <http://www.elektropribor.spb.ru/upload/medialibrary/8cc/31-ICINS-2024-all.pdf> (date of access 21.01.2025).

References

1. Kunitsyn V. E., Tereshchenko E. D., Andreyeva E. S. *Ionospheric Radiotomography*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 693 p. (in Russian).
2. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. *GNSS – Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo, and More*. Springer, 2008. xxix, 516 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1>
3. Naumov A. O., Khmarski P. A., Aronov G. A., Kotov D. S. 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*, 2024, vol. 27, no. 3, pp. 225–233. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13960570>
4. Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Demyanov V. V., Edemskiy I. K., Gavriyuk N. S., Ishin A. B., Kosogorov E. A. [et al.]. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2013, iss. 3, art. ID A27. <https://doi.org/10.1051/swsc/2013049>
5. Astafyeva E., Yasyukevich Yu., Maksikov A., Zhivetiev I. Geomagnetic storms, super-storms, and their impacts on GPS-based navigation systems. *Space Weather*, 2014, vol. 12, iss. 7, pp. 508–525. <https://doi.org/10.1002/2014SW001072>
6. Artemyev V. M., Naumov A. O. Radiotomography of the electron concentration field in the ionosphere based on the Kalman filter. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2012, no. 2, pp. 86–92 (in Russian).
7. Belokonov I. V., Krot A. M., Kozlov S. V., Kaplarchuk E. A., Savinykh I. E., Shapkin A. S. A method for estimating the total electron content in the ionosphere based on the retransmission of signals from the global navigation satellite system GPS. *Informatika = Informatics*, 2023, vol. 20, no. 2, pp. 7–27 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-2-7-27>
8. Artemiev V. M., Naumov A. O., Stepanov V. L., Murashko N. I. Method and Results of Real Time Modeling of Ionosphere Radiotomography on the Basis of the Kalman Filter Theory. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2008, vol. 40, no. 2, pp. 52–62. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v40.i2.50>
9. Yasyukevich Y. V., Zhang B., Devanaboyina V. R. Advances in GNSS Positioning and GNSS Remote Sensing. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 4, art. ID 1200. <https://doi.org/10.3390/s24041200>
10. Yasyukevich Yu. V., Mylnikova A. A., Polyakova A. S. Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data. *Results in Physics*, 2015, vol. 5, pp. 32–33. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.12.006>
11. Naumov A. O., Khmarskiy P. A., Byshnev N. I., Piatrouski M. A. Determination of total electron content in the ionosphere over the territory of the Republic of Belarus based on global navigation satellite systems data. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 1, pp. 53–64. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-53-6>
12. Bruyninx C., Legrand J., Fabian A., Pottiaux E. GNSS metadata and data validation in the EUREF Permanent Network. *GPS Solutions*, 2019, vol. 23, art. ID 106. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0880-9>
13. Artemyev V. M., Khmarskiy P. A., Naumov A. O. Algorithm and methodology for optimizing its parameters for three-dimensional reconstruction of the ionosphere. *Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika [Non-Destructive Testing and Diagnostics]*, 2024, no. 1, pp. 42–52 (in Russian).
14. Naumov A., Khmarskiy P., Byshniou N., Piatrouski M. Methods and software for calculating total electronic content based on GNSS data. 7th *Advanced Engineering Days, 1–2 July. 2023. Mersin, Türkiye*. 2023. P. 158–160.
15. Naumov A., Khmarskiy P., Byshnev N., Piatrouski M. Methods and software for estimation of total electron content in ionosphere using GNSS observations. *Engineering Applications*, 2023, vol. 2, no. 3, pp. 243–253.
16. Kenyeres A., Bellet J. G., Bruyninx C., Caporali A., Doncker F. de, Droscak B., Duret A. [et al.]. Regional integration of long-term national dense GNSS network solutions. *GPS Solutions*, 2019, vol. 23, iss. 4, art. ID 122. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0902-7>
17. Ihde J., Habrich H., Sacher M., Söhne W., Altamimi Z., Brockmann E., Bruyninx C. [et al.]. EUREF's contribution to national, European and Global Geodetic Infrastructures. Rizos C., Willis P. (eds.). *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet: Proceedings of the IAG General Assembly, Melbourne, Australia, June 28 – July 2, 2011. International Association of Geodesy Symposia : Vol. 139*. Springer, 2014, pp. 189–196. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37222-3_24
18. Ignacio R. RINEX. The Receiver Independent Exchange Format Version 4.00. Darmstadt, IGS/RTCM RINEX WG, 2021. 120 p.
19. Khmarski P. A., Naumov A. O. Algorithms for Three-Dimensional Reconstruction of Electron Concentration Fields in the Ionosphere using Data from the Global Navigation Satellite System. 31st *Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2024), 27–29 May 2024, Saint Petersburg, Russia: [Proceedings]*. St. Petersburg, State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, pp. 185–188. Available at: <http://www.elektropribor.spb.ru/upload/medialibrary/8cc/31-ICINS-2024-all.pdf> (accessed 21 January 2025).