

ИОНОСФЕРНЫЙ ОТКЛИК И ВЫСОКОТОЧНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ВО ВРЕМЯ ГЛАВНОЙ ФАЗЫ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ В МАЕ 2024 ГОДА

Е. И. Данильчук^{1,2}, Ю. В. Ясюкевич¹, А. М. Веснин¹, А. В. Клюсилов¹, В. Zhang³

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126 А

E-mail: danilchuk.k@mail.ru, yasukevich@iszf.irk.ru, artem_vesnin@iszf.irk.ru,
av_klyusilov@mail.iszf.irk.ru

²Иркутский государственный университет, 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1

³Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077

E-mail: b.zhang@whigg.ac.cn

Аннотация. Мы исследовали влияние главной фазы экстремальной геомагнитной бури в мае 2024 года на ионосферу и качество высокоточного GPS-позиционирования. Во время главной фазы геомагнитной бури границы аврорального овала расширились до низких широт. В то же время гребни экваториальной аномалии усилились и сместились в сторону полюсов. Эти процессы привели к уникальному явлению – пересечению границы аврорального овала и экваториальной аномалии в Северной Америке. Кроме того, геомагнитная буря существенно повлияла на точность позиционирования, создав угрозу для навигации. Значения ошибок позиционирования увеличились в 1,5-5 раз в области аврорального овала.

Ключевые слова: геомагнитная буря, ионосфера, ошибки позиционирования, ГНСС

IONOSPHERIC RESPONSE AND GPS PRECISE POINT POSITIONING ERRORS DURING THE MAIN PHASE OF THE MAY 2024 EXTREME GEOMAGNETIC STORM

E.I. Danilchuk, Yu.V. Yasyukevich, A.M. Vesnin, A.V. Klyusilov, B. Zhang

Abstract. We analyzed the effects of the main phase of the May 2024 extreme geomagnetic storm on the ionosphere and GPS kinematic precise point positioning. During the main phase of the geomagnetic storm, the auroral oval boundaries expanded to low latitudes. At the same time, the equatorial anomaly crests intensified considerably and shifted poleward. These processes have led to a unique phenomenon – the intersection of the auroral oval boundary and the equatorial anomaly in North America. In addition, the geomagnetic storm significantly affected the accuracy of positioning. Positioning errors increased 1.5–5 times at the boundary of the auroral oval. The geomagnetic storm significantly affected the positioning and the ionosphere, threatening various applications based on navigation and communication.

Keywords: geomagnetic storm, ionosphere, positioning errors, GNSS

Введение

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) используются не только для определения точных координат приемного устройства, но и для изучения влияния различных факторов космической погоды. Одним из наиболее значимых факторов космической погоды является геомагнитная буря. Во время геомагнитных бурь в результате сложных процессов взаимодействия в цепочке «атмосфера – ионосфера – магнитосфера» происходит изменение концентрации электронов в ионосфере, расширение границ аврорального овала и ионосферных аномалий, а также появление ионосферных неоднородностей электронной концентрации различных масштабов [1]. Ионосферные возмущения, возникающие во время геомагнитных бурь, оказывают значительное влияние на точность позиционирования, которая также зависит от интенсивности геомагнитной бури.

В то же время экстремальные геомагнитные бури происходят достаточно редко. Например, в 23-м цикле произошло только 2 бури, когда Кр индекс достиг 9, а в 24-м цикле таких событий не было. Малая статистика и существенные отличия экстремальных бурь не позволяют строить удовлетворительные прогнозы воздействия таких редких, но опасных воздействий. Поэтому каждая новая экстремальная буря представляет огромный интерес. В данной работе

исследуется влияние главной фазы экстремальной геомагнитной бури в мае 2024 г. на ионосферу и качество высокоточного GPS-позиционирования.

Данные и методика обработки

ГНСС позволяют исследовать околоземное космическое пространство, в частности ионосферу, с высоким времененным (непрерывные 24-часовые измерения) и пространственным разрешением (достаточно плотная сеть глобальных и региональных приемников).

Для изучения влияния геомагнитных бурь на ионосферу широко используется индекс ROTI, который характеризует мелкомасштабные ионосферные неоднородности и/или быстрые вариации полного электронного содержания (ПЭС) и определяется как стандартное отклонение скорости изменения ПЭС (ΔI) за интервал времени (Δt) на основе измерений двухчастотных данных ГНСС [2]:

$$ROTI = \sqrt{\left\langle \left(\frac{\Delta I}{\Delta t} \right)^2 \right\rangle - \left\langle \frac{\Delta I}{\Delta t} \right\rangle^2}. \quad (1)$$

Глобальные ионосферные карты могут использоваться для изучения экваториальных аномалий ионосферы, которые образуют максимумы электронной концентрации, расположенные по обе стороны от геомагнитного экватора. В данном исследовании использовались карты UQRG, которые разработаны научным центром Universitat Politècnica de Catalunya. Карты UQRG имеют временное разрешение 15 минут и охватывают весь земной шар с пространственным разрешением 2.5° по широте и 5° по долготе [3].

Координаты приемников рассчитывались в режиме точного позиционирования (kinematic PPP) с помощью программного обеспечения с открытым исходным кодом GAMP (GNSS Analysis software for Multi-constellation and multi-frequency Precise positioning) [4]. Полная ошибка позиционирования была рассчитана как разница между исходным и мгновенным положением

$$\sigma = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}, \quad (2)$$

где ΔX , ΔY , ΔZ – отклонение измеряемой координаты от 23-часового медианного значения в трёх направлениях.

Для обработки и визуализации данных использовался онлайн-сервис SIMuRG (<https://simurg.space/>) [5]. В работе использовались данные Международной сети приемников ГНСС, федерального центра навигационных данных и сети базовых станций CORS.

Геомагнитные условия

Геомагнитная буря в мае 2024 является мощной геомагнитной бури 25-го солнечного цикла. В период 8-9 мая 2024 г. были зарегистрированы четыре солнечные вспышки X-класса, которые вызвали несколько корональных выбросов массы в сторону Земли. Объединенный корональный выброс массы достиг магнитосфера Земли в 16:40 UT 10 мая 2024 г.

Начальная фаза геомагнитной бури продолжалась ~2 часа и характеризовалась увеличением индекса Dst до 62 нТл в 17:00 UT 10 мая 2024 г. (индекс Sym-H увеличился до 88 нТл в 17:15 UT 10 мая 2024 г.). Далее последовало резкое падение индекса Dst до значения -412 нТл в 03:00 UT 11 мая 2024 г. (индекс Sym-H уменьшился до -518 нТл в 02:15 UT 10 мая 2024 г.). Фаза восстановления геомагнитной бури до 19 мая 2024 г. Индекс Kp во время главной фазы геомагнитной бури и в начале фазы восстановления изменился в пределах 8,333 – 9,000. При этом максимально значение 9 было достигнуто в периоды 00-03 UT и 09-12 UT 11 мая 2024 г. (рис. 1).

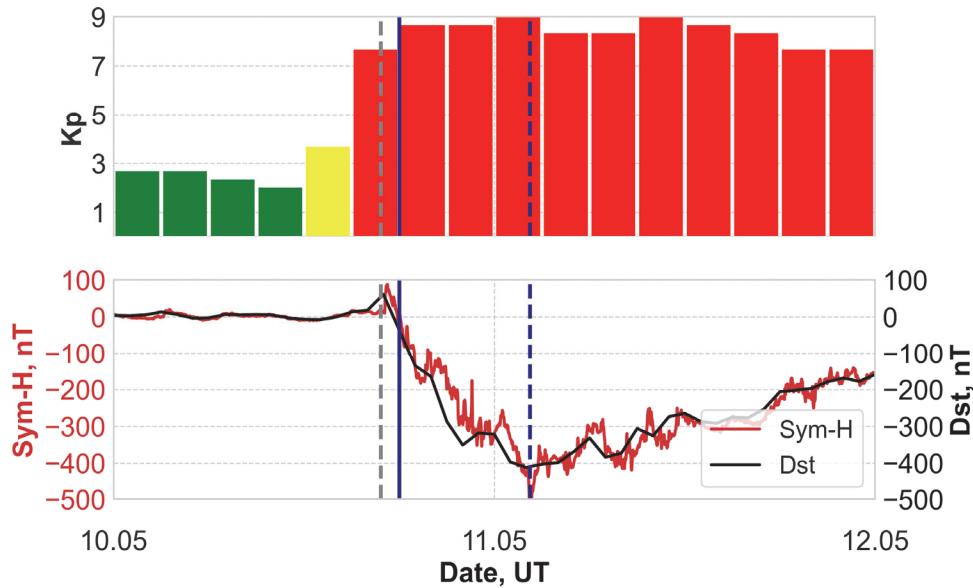


Рис. 1. Геомагнитные условия 10-11 мая 2024 г.: Кр индекс (верхняя панель) и Dst и SYM-h индексы (нижняя панель). Вертикальные линии обозначают внезапное начало геомагнитной бури в 16:40 UT (серая пунктирная линия), начало главной фазы в 18:00 UT (синяя сплошная линия) и начало фазы восстановления в 02:15 UT (синяя пунктирная линия).

Экспериментальные результаты

Геомагнитная буря в мае 2024 г. оказала влияние не только на положение аврорального овала и интенсивность мелкомасштабных неоднородностей внутри него, но и на положение гребней экваториальной аномалии [6].

С момента начала главной фазы геомагнитной бури (18:00 UT 10 мая 2024 г.) наблюдалось существенное повышение индекса ROTI более 0,75 TECU/мин в высоких широтах. Во время главной фазы бури произошло расширение границ аврорального овала до 30° с.ш. и 60° ю.ш. в американском секторе и до 45° с.ш. и 40° ю.ш. в европейско-азиатском секторе. Максимальное расширение овала наблюдалось в 02:30 UT 11 мая 2024 г., когда максимальные значения индекса ROTI составляли более 2 TECU/мин и наблюдались вдоль геомагнитной широты 40°.

Во время главной фазы геомагнитной бури гребни экваториальной аномалии значительно усилились и сместились к полюсу. Экваториальная аномалия расширилась примерно до 50° с.ш. и 55° ю.ш. с 21:00 UT по 22:30 UT 10 мая 2024 г. В этот период максимальные значения ПЭС достигали 175-200 TEC в районе геомагнитных широт ~20° в обоих полушариях.

Таким образом, во время главной фазы геомагнитной бури наблюдалось редкое явление, которое может произойти только во время экстремальных геомагнитных бурь – пересечение границ аврорального овала и области экваториальной аномалии (обычно их разделяют средние широты). Максимальное пересечение этих областей наблюдалось в 21:45 UT 10 мая 2024 г.

Кроме изменений в ионосфере геомагнитная буря привела к ухудшению точности позиционирования. После начала главной фазы геомагнитной бури (после 18:30 UT 10 мая 2024 г.) в высоколатитарных регионах значения ошибок позиционирования резко выросли. В отдельных случаях ошибки позиционирования превышали 1,5 м. Области повышенных значений ошибок позиционирования постепенно сместились в средние широты, что соответствует смещению границ аврорального овала. На границе аврорального овала значения ошибок позиционирования увеличились в 1,5-5 раз.

В конце главной фазы геомагнитной бури наблюдаются увеличенные ошибки позиционирования (более 1-1,5 м) в Северной Америке и в Европе на границе аврорального овала. На рисунке 2 представлены индекс ROTI, глобальные ионосферные карты и карты ошибок позиционирования во время главной фазы геомагнитной бури.

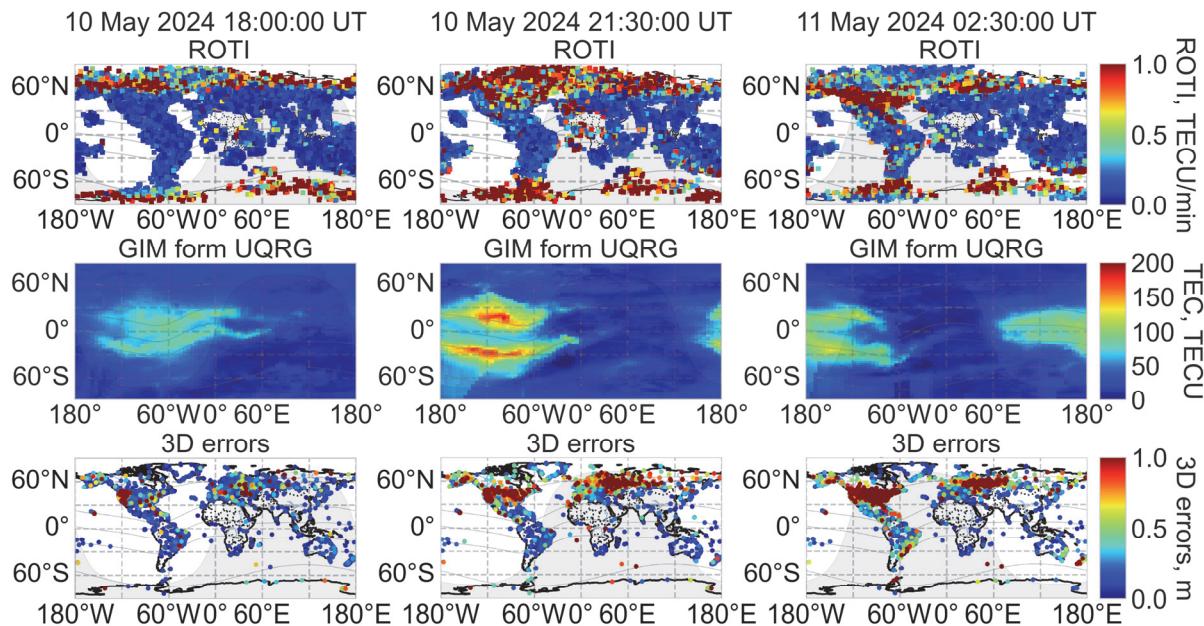


Рис. 2. Карты ROTI (верхняя панель), глобальные ионосферные карты (средняя панель) и карты ошибок позиционирования (нижняя панель) во время главной фазы геомагнитной бури.

Заключение

Мы исследовали динамику ионосферы и качество высокоточного GPS-позиционирования во время главной фазы геомагнитной бури в мае 2024 г. Эта буря стала мощной бурей после геомагнитной бури 20 ноября 2003 г.

Показано, что наблюдается расширение границ аврорального овала до 30° с.ш. и 60° ю.ш. в американском секторе и до 45° с.ш. и 40° ю.ш. в европейско-азиатском секторе. В то же время гребни экваториальной аномалии сместились в сторону полюсов. Эти процессы привели к уникальному явлению – пересечению границы аврорального овала и экваториальной аномалии в Северной Америке. Кроме того, наблюдается увеличение ошибок позиционирования в 1,5–5 раз в области аврорального овала.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00157, <https://rscf.ru/project/23-17-00157/>.

Список литературы

1. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 526 с.
2. Pi X., Mannucci A.J., Lindqwister U.J., Ho C.M. Monitoring of Global Ionospheric Irregularities Using the Worldwide GPS Network // Geophysical Research Letters. – 1997. – Vol. 24. – P. 2283–2286. <https://doi.org/10.1029/97GL02273>.
3. Roma-Dollase D., Hernández-Pajares M., Krakiwsky A. et al. Consistency of Seven Different GNSS Global Ionospheric Mapping Techniques during One Solar Cycle // Journal of Geodesy. – 2018. – Vol. 92. – P. 691–706. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1088-9>.
4. Zhou F., Dong D., Li W., Wickert J., Schuh H. GAMP: An Open-Source Software of Multi-GNSS Precise Point Positioning Using Undifferenced and Uncombined Observations // GPS Solutions. – 2018. – Vol. 22. – P. 33. <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0699-9>.
5. Yasyukevich Y.V., Kiselev A.V., Zhivetiev I.V., Edemskiy I.K., Syrovatskii S.V., Maletskii B.M., Vesnin A.M. SIMuRG: System for Ionosphere Monitoring and Research from GNSS // GPS Solutions. – 2020. – Vol. 24. – P. 69. <https://doi.org/10.1007/s10291-020-00983-2>.
6. Danilchuk E., Yasyukevich Y., Vesnin A., Klyusilov A., Zhang B. Impact of the May 2024 Extreme Geomagnetic Storm on the Ionosphere and GNSS Positioning // Remote Sensing. – 2025. – Vol. 17. – P. 1492. <https://doi.org/10.3390/rs17091492>.