Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 225–228.

УДК 550.388.2
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-225
ORCID: 0009-0007-7370-3419

ГЕОМАГНИТНАЯ БУРЯ 12 НОЯБРЯ 2025 Г.: ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ИОНОСФЕРУ И GPS-ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ

Е.И. Данильчук[1], Ю.В. Ясюкевич[1, 2], А.А. Чернышов[3], А.М. Падохин[4, 5], К.Г. Ратовский[2], А.М. Веснин[2]

[1] Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия, danilchuk.k@mail.ru
[2]Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия
[3]Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия
[4]Московский государственный университет, Москва, Россия
[5]Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, Москва, Россия

THE 12 NOVEMBER 2025 GEOMAGNETIC STORM: EFFECTS ON THE IONOSPHERE AND GPS POSITIONING

E.I. Danilchuk[1], Yu.V. Yasyukevich[1, 2], A.A. Chernyshov[3], A.M. Padokhin[4, 5], K.G. Ratovsky[2], A.M. Vesnin[2]

[1] Irkutsk State University, Irkutsk, Russia, danilchuk.k@mail.ru
[2]Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Irkutsk, Russia
[3]Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[4]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
[5]Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Аннотация. Геомагнитная буря G4-класса 12–13 ноября 2025 г., третья по интенсивности в 25-м солнечном цикле, была вызвана процессами в активной области на Солнце NOAA 14274. Индекс *Dst* достиг −217 нТл (индекс *SYM-H* достиг −254 нТл), максимальный индекс *Kp* составил 9–. Для всестороннего анализа причин геомагнитной бури и последствий ее воздействия на околоземное космическое пространство мы использовали мультиинструментальный набор данных (спутниковые миссии, сети ГНСС-приемников, ионозонд, оптические приборы, высокочастотные радары и мониторы космических лучей). Анализ показал значительные глобальные ионосферные возмущения. Авроральный овал расширился в сторону экватора (до ~35° с.ш. в американском секторе). Гребни экваториальной аномалии усилились до 175 TECU и сместились к полюсу. Ошибки высокоточного GPS-позиционирования увеличились до 2–3 м в высоких широтах. Полученные результаты показывают сложную цепочку процессов от солнечной активности до геомагнитных и ионосферных возмущений, подчеркивая риски для спутниковых систем навигации и связи.

Ключевые слова: геомагнитная буря, ионосфера, ошибки позиционирования.

Abstract. The 12 November 2025 G4 geomagnetic storm, the third most intense one of solar cycle 25, was caused by processes in the solar active region NOAA 14274. The Dst index reached −217 nT (the SYM-H index reached −254 nT) and the maximum Kp index was 9–. To comprehensively analyze the causes of the storm and its complex effects on near-Earth space, we used a multi-instrumental data set (satellite missions ACE, SDO, PROBA2, GNSS networks, ionosonde, optical instruments, high-frequency radars and cosmic ray monitors). The auroral oval expanded equatorward (down to ~35° N in America). The equatorial anomaly crests intensified up to 175 TECU, and shifted poleward. GPS positioning errors in PPP mode increased up to 2–3 m at high latitudes. The results underscore the complex chain of processes from solar activity to geomagnetic and ionospheric responses, highlighting the risks to satellite-based navigation and communication systems.

Keywords: geomagnetic storm, ionosphere, positioning errors.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее значимых факторов космической погоды являются геомагнитные бури. Во время геомагнитных бурь в результате сложных процессов взаимодействия в цепочке «атмосфера — ионосфера — магнитосфера» происходит усиление и расширение аврорального овала, изменение электронной концентрации в ионосфере, а также возникновение ионосферных неоднородностей различного масштаба [Брюнелли, Намгаладзе, 1988]. Ионосферные возмущения, возникающие во время геомагнитных бурь, оказывают существенное влияние на качество работы технических систем.

В то же время очень сильные (класс G4, $Kp = 8–8.667$, $Dst < –200$ нТл) и экстремальные (класс G5, $Kp = 9$, $Dst < –350$ нТл) геомагнитные бури происходят редко, что не позволяет строить удовлетворительные прогнозы последствий таких опасных явлений. Поэтому каждая новая очень сильная или экстремальная буря представляет особый интерес. 12 ноября 2025 г. было зарегистрировано сильное геомагнитное возмущение: планетарный индекс возмущенности геомагнитного поля *Kp* достиг 9–, что соответствует очень сильной геомагнитной буре класса G4.

В настоящем исследовании анализируется воздействие геомагнитной бури G4-класса 12 ноября 2025 г. на ионосферу и точность работы глобальных навигационных спутниковых систем (как примера критической технологической инфраструктуры).

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) используются не только для определения точных координат приемного устройства, но и для изучения влияния различных факторов космической погоды.

Для изучения влияния геомагнитных бурь на ионосферу широко используется индекс *ROTI* [Pi et al., 1997], который характеризует мелкомасштабные ионосферные неоднородности и/или быстрые вариации полного электронного содержания (ПЭС) и определяется как стандартное отклонение скорости изменения ПЭС за интервал времени на основе измерений двухчастотных данных ГНСС.

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 MosGIM [Padokhin et al., 2022], разработанные в Московском госуниверситете. Карты MosGIM имеют временное разрешение 1 ч и охватывают весь земной шар с пространственным разрешением 2.5° по широте и 5° по долготе.

Координаты приемников рассчитывались с помощью программного обеспечения с открытым исходным кодом GAMP (GNSS Analysis software for Multi-constellation and multi-frequency Precise positioning) [Zhou et al., 2018]. Полная ошибка позиционирования была рассчитана как разница между исходным и мгновенным положением

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

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

Для обработки и визуализации данных использовался онлайн-сервис SIMuRG [Yasyukevich et al., 2020]. В работе использовались данные Международной сети приемников ГНСС, Федерального центра навигационных данных и сети базовых станций EFT-CORS.

ГЕОМАГНИТНЫЕ УСЛОВИЯ

Основной причиной возмущений в околоземном космическом пространстве в ноябре 2025 г. стала серия солнечных вспышек M- и X-классов в крупной активной области NOAA 14274. Мощные солнечные вспышки X-класса, зарегистрированные 9–11 ноября 2025 г., сопровождались корональными выбросами массы вблизи центрального меридиана. Межпланетные корональные выбросы массы, ассоциированные со вспышками класса X1.7, X1.2, X5.1, были зарегистрированы в точке Лагранжа L1 в 22:15 UT и 23:38 UT 11 ноября и в 18:53 UT 12 ноября.

Индекс *Kp* достиг значений 9– в период 0–6 UT 12 ноября (рис. 1), что позволяет классифицировать данное событие как геомагнитную бурю G4-класса. Индекс *SYM-H* сначала увеличился до +92 нТл вследствие сжатия магнитосферы, а затем уменьшился до –256 нТл, в то время как индекс *Dst* достиг –217 нТл в 05:00 UT 12 ноября.

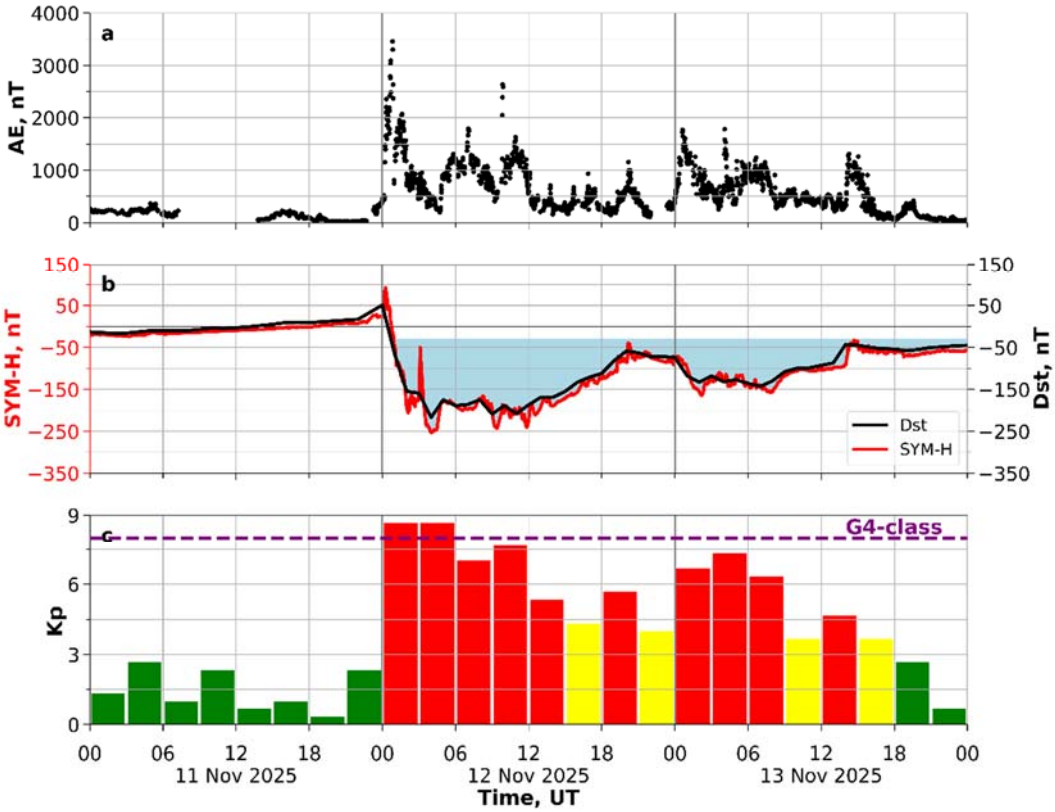

Рис. 1. Геомагнитные условия 11–12 ноября 2025 г.: *AE*-индекс (*a*), индексы *Dst*, *SYM-H* (*b*) и *Kp* (*c*)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для всестороннего анализа причин геомагнитной бури и последствий ее воздействия на околоземное космическое пространство был использован мультиинструментальный набор данных, включающий данные спутниковых миссий, сетей ГНСС, ионозонда, оптических приборов, высокочастотных радаров и мониторов космических лучей. Проведенный анализ показал значительные глобальные ионосферные возмущения [Yasyukevich et al., 2026].

С момента начала главной фазы геомагнитной бури (00:00 UT 12 ноября 2025 г.) в полярных областях обоих полушариях наблюдается постепенное увеличение значений индекса *ROTI* (рис. 2) и расширение границ областей с повышенными значениями данного индекса. Данные области повышенных значений *ROTI* соответствуют положению аврорального овала, который расширился до ~35°N в американском секторе и ~45° N в европейском секторе. Индекс *ROTI* достиг 1.5–2 TECU/мин.

В экваториальной области был зарегистрирован экваториальный плазменный суперпузырь, который на главной фазе практически достиг границы аврорального овала. Данное явление сильнее проявляется в американском секторе Северного полушария. В европейско-азиатском секторе эффект был слабее, хотя наблюдалось развитие экваториальных пузырей, что является нетипичным явлением для данного локального время.

На главной фазе геомагнитной бури наблюдались смещение к полюсам гребней экваториальной аномалии на 8–10° и их усиление до 170–180 TECU. На границе аврорального овала на главной фазе геомагнитной бури зафиксирована область повышенной ионизации, достигавшая широт 40–45° N в американском секторе и 50–55° N в европейско-азиатском секторе. ПЭС увеличилось до 60–70 TEC в Западном полушарии и до 40–50 TEC в Восточном полушарии.

Изменения, происходящие в ионосфере во время геомагнитной бури, оказывают влияние на точность GPS-позиционирования (рис. 3). После 02:00 UT 12 ноября 2025 г. ошибки позиционирования увеличились как в американском, так и в европейско-азиатском секторах на высоких широтах (около 60° с.ш.). В этих регионах погрешности определения местоположения превышали 1 м, а в отдельных случаях достигали 2–3 м.

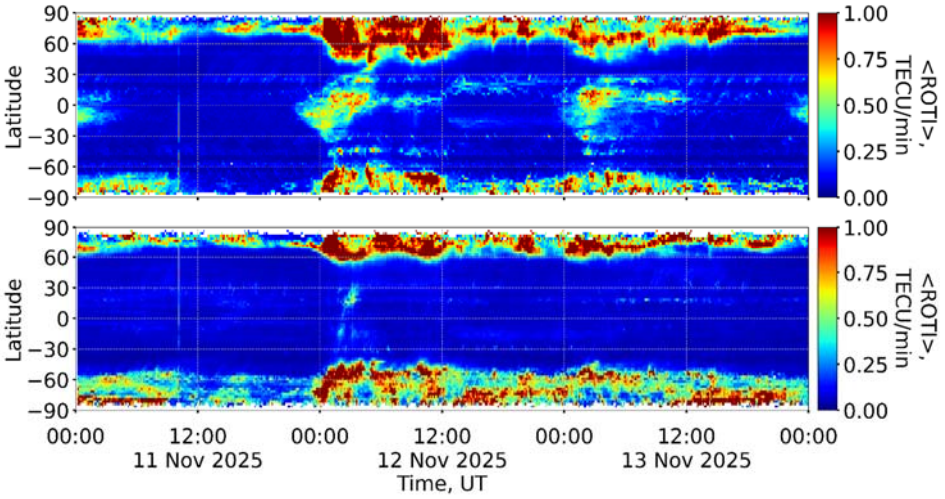

Рис. 2. Кеограмма индекса *ROTI* в американском (верхняя панель) и европейско-азиатском (нижняя панель) секторах в период с 11 по 13 ноября 2025 г.

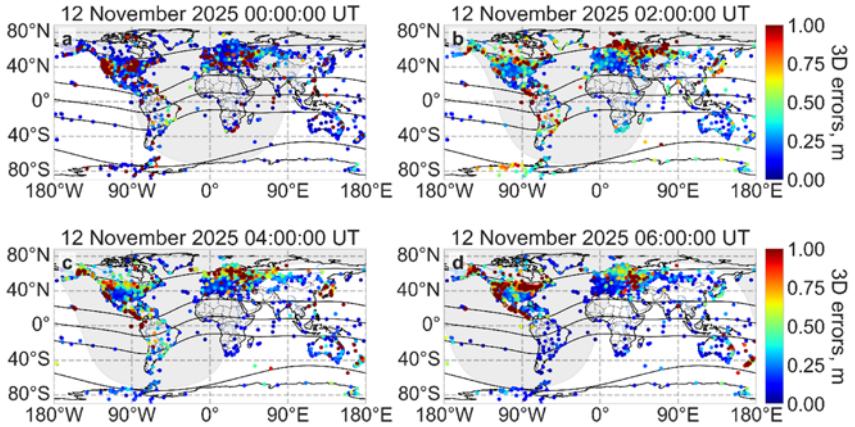

Рис. 3. Ошибки позиционирования на главной фазе геомагнитной бури 12 ноября 2025 г. в 00:00 UT (*a*), 02:00 UT (*b*), 04:00 UT (*c*) и во время восстановительной фазы в 06:00 UT (*d*). Черными линиями обозначены геомагнитный экватор и геомагнитные параллели (±15° N, ±60° S)

В период с 02:00 по 04:00 UT увеличившиеся ошибки позиционирования постепенно смещались в сторону средних широт (до 40–45° N). Это смещение коррелировало с расширением границ аврорального овала и с повышенной ионизацией. Повышенные ошибки позиционирования также наблюдались вблизи экватора в американском секторе, что коррелировало с движением экваториального плазменного пузыря в данном регионе. После 06:00 UT 12 ноября 2025 г. позиционирования начали уменьшаться.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследовано воздействие геомагнитной бури G4-класса 12 ноября 2025 г. на околоземное космическое пространство и точность GPS-позиционирования [Yasyukevich et al., 2026]. Данная геомагнитная буря является третьей по интенсивности в 25-м солнечном цикле после экстремальной геомагнитной бури в мае 2024 г. и очень сильной геомагнитной бури в октябре 2024 г.

Показано, что авроральный овал расширился в направлении экватора, достигнув ~35° N в американском секторе. Зарегистрированный экваториальный плазменный суперпузырь практически достиг границы аврорального овала. Гребни экваториальной аномалии усилились до 175 TECU и сместились к полюсу. Кроме того, ошибки высокоточного GPS-позиционирования увеличились до 2–3 м в высоких широтах и в регионах, где наблюдался суперпузырь. Полученные результаты демонстрируют сложную цепочку процессов от солнечной активности до геомагнитных и ионосферных возмущений, подчеркивая риски для спутниковых систем навигации и связи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 526 с.

Padokhin A.M., Andreeva E.S., Nazarenko M.O., Kalashnikova S.A. Phase-Difference Approach for GNSS Global Ionospheric Total Electron Content Mapping // Radiophys. Quantum Electron. 2022. V. 65. P. 481–495. DOI: 10.1007/s11141-023-10230-6.

Pi X., Mannucci A.J., Lindqwister U.J., Ho C.M. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24. P. 2283–2286. DOI: 10.1029/97GL02273.

Yasyukevich Y., Danilchuk E., Beletsky A., et al. The 12 November 2025 Ugly Duckling Geomagnetic Storm: From the Sun to the Earth // Sensors. 2026. V. 26. P. 1490. DOI: 10.3390/s26051490.

Yasyukevich Y.V., Kiselev A.V., Zhivetiev I.V., et al. SIMuRG: System for Ionosphere Monitoring and Research from GNSS // GPS Solutions. 2020. V. 24. P. 69. DOI: 10.1007/s10291-020-00983-2.

Zhou F., Dong D., Li W., et al. GAMP: An open-source software of multi-GNSS precise point positioning using undifferenced and uncombined observations // GPS Solutions. 2018. Vol. 22. P. 33. DOI: 10.1007/s10291-018-0699-9.