

## МАГНИТНАЯ БУРЯ 10-19 МАЯ 2024 Г. И ЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА АТМОСФЕРУ, ИОНОСФЕРУ, РАДИОСВЯЗЬ И НАВИГАЦИЮ

Ю. В. Ясюкевич<sup>1</sup>, Р. В. Васильев<sup>1</sup>, А. В. Рубцов<sup>1</sup>, Е.И. Данильчук<sup>1,2</sup>, С.С. Алсаткин<sup>1</sup>,  
М.Ф. Артамонов<sup>1</sup>, А.Б. Белецкий<sup>1</sup>, А.Ю. Белинская<sup>3</sup>, О.И. Бернгардт<sup>1</sup>,  
А.М. Веснин<sup>1</sup>, Д.А. Ганицкий<sup>1</sup>, Я.И. Егоров<sup>1</sup>, Г.А. Жеребцов<sup>1</sup>, Н.А. Золотухина<sup>1</sup>,  
В.А. Иванова<sup>1</sup>, В.А. Ивонин<sup>1</sup>, Е.С. Исаева<sup>2</sup>, А.Г. Ким<sup>1</sup>, М.В. Кравцова<sup>1</sup>,  
В.И. Куркин<sup>1</sup>, Д.С. Кушнарев<sup>1</sup>, В.П. Лебедев<sup>1</sup>, Р.А. Марчук<sup>1</sup>, А.В. Медведев<sup>1</sup>,  
А.В. Михалев<sup>1</sup>, А.В. Ойнац<sup>1</sup>, С.В. Олемской<sup>1</sup>, А.В. Подлесный<sup>1</sup>, С.В. Подлесный<sup>1</sup>,  
С.Н. Пономарчук<sup>1</sup>, К.Г. Ратовский<sup>1</sup>, В.Е. Сдобнов<sup>1</sup>, А.Г. Сетов<sup>1</sup>, Т.Е. Сыренова<sup>1</sup>,  
В.П. Ташлыков<sup>1</sup>, И.Д. Ткачёв<sup>1</sup>, В.Г. Файнштейн<sup>1</sup>, М.В. Цедрик<sup>1</sup>, С.А. Язев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>3</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН г. Новосибирск, Россия

E-mail: yasukevich@iszf.irk.ru

**Аннотация.** Магнитная буря, произошедшая в мае 2024 г., стала уникальным событием, привлекшим внимание большого числа исследователей со всего мира. В настоящем докладе приведены результаты, полученные колаборацией авторов из ИСЗФ СО РАН, ИГУ и ИНГГ СО РАН, об изменениях в состоянии атмосферы и ионосфера, а также ее воздействии на радиосвязь и характеристики функционирования глобальных навигационных спутниковых систем.

**Ключевые слова:** магнитная буря; атмосфера; ионосфера; май 2024; распространение радиоволн; глобальные навигационные спутниковые системы

## 10-19 MAY 2024 MAGNETIC STORM AND ITS EFFECTS ON THE ATMOSPHERE, IONOSPHERE, RADIO COMMUNICATIONS AND NAVIGATION

Yu.V. Yasyukevich, R.V. Vasiliev, A.V. Rubtsov, E.I. Danilchuk, S.S. Alsatkin, M.F. Artamonov,  
A.B. Beletsky, A.Yu. Belinskaya, O.I. Berngardt, A.M. Vesnin, D.A. Ganitsky, Ya.I. Egorov,  
G.A. Zherebtsov, N.A. Zolotukhina, V.A. Ivanova, V.A. Ivonin, E.S. Isaeva, A.G. Kim,  
M.V. Kravtsova, V.I. Kurkin, D.S. Kushnarev, V.P. Lebedev, R.A. Marchuk, A.V. Medvedev,  
A.V. Mikhalev, A.V. Oinats, S.V. Olemskoy, A.V. Podlesny, S.V. Podlesny, S.N. Ponomarchuk,  
K.G. Ratovsky, V.E. Sdobnov, A.G. Setov, T.E. Syrenova, V.P. Tashlykov, I.D. Tkachev,  
V.G. Fainshtein, M.V. Cedric, S.A. Yazev

**Abstract.** The May 2024 magnetic storm - a unique event - attracted a lot of worldwide attention. This report presents the collaborative results of ISTP SB RAS, ISU and IPGG SB RAS on changes in the state of the atmosphere and ionosphere, as well as its impact on radio communications and the characteristics of the transition to transient satellite systems.

**Keywords:** magnetic storm; atmosphere; May 2024; radio wave propagation; global navigation satellite system

### Введение

Активность на Солнце является ключевым источником возмущений в околоземном космическом пространстве. Эти возмущения затрагивают функционирование технологических систем, включая спутниковые группировки, навигационные системы, системы транспорта, электроэнергетические и иные системы [1]. Магнитная буря в мае 2024 г. впервые за последние 20 лет вошла в ряд экстремальных бурь.

Активная область 13664 9 мая 2024 г. породила четыре вспышки X-класса подряд в течение суток, что является крайне редкой аномалией. Объединенный корональный выброс массы достиг магнитосферы Земли в 16:40 UT 10 мая и привёл к внезапному началу магнитной бури, характеризуемому резким увеличением скорости солнечного ветра с 460 до 690 км/с и динамического давления до 60 нПа. Индекс Dst (рис. 1а) опустился до -422 нТл и достиг

невозмущенного значения  $-30$  нТл только 19 мая. Индекс Кр 11 мая 2024 г. впервые за два последние цикла солнечной активности достиг максимального значения 9 (рис. 1б).

В настоящем докладе представлены результаты исследования взаимосвязи параметров атмосферы и ионосферы во время магнитной бури 10–19 мая 2024 г. Основное внимание уделяется совместным измерениям температуры электронов, ионов и нейтральных частиц, а также профиля электронной концентрации и свечения атмосферы на введенном в эксплуатацию комплексе оптических инструментов в рамках НГК РАН [2] и Иркутском радаре некогерентного рассеяния (ИРНР) на средних широтах. Изучено влияние возмущений в ионосфере на распространение радиоволн с использованием сети наклонного ЛЧМ-зондирования, а также когерентных коротковолновых радаров. Анализ глобальной структуры ионосферных возмущений проведен на основе данных глобальных навигационных спутниковых систем. Более детально с результатами можно ознакомиться в [3, 4].

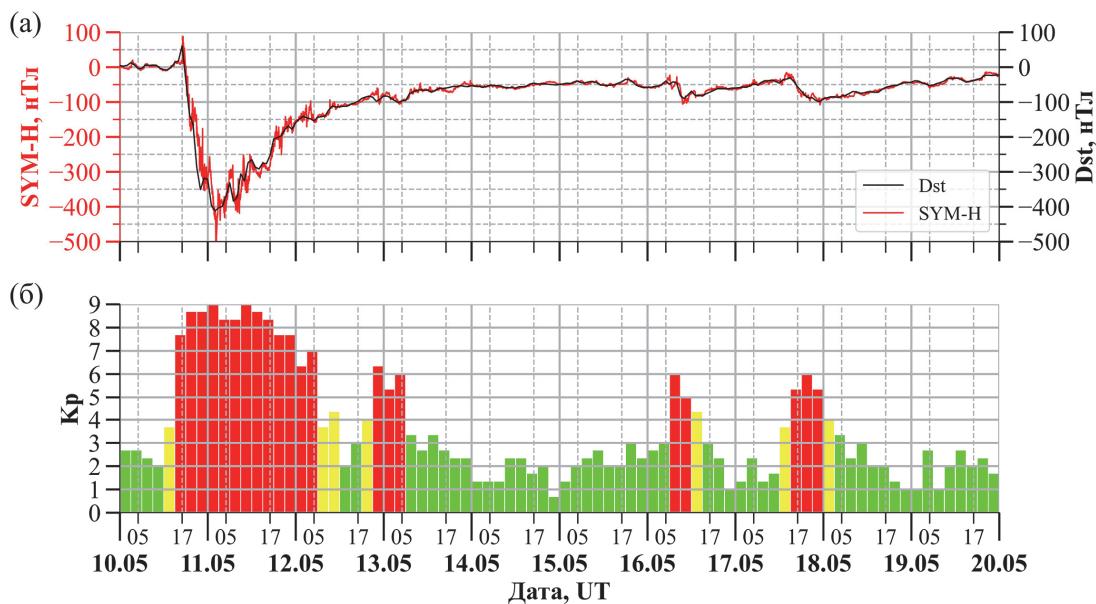


Рис. 1. Динамика геомагнитных индексов во время магнитной бури 10–19 мая 2024 г.

(а) – индексы SYM-H (красная кривая) и Dst (черная кривая), (б) – индекс Кр.

## Воздействие на атмосферу и ионосферу Земли

Данные иркутского радара некогерентного рассеяния (рис. 2) показывают значительное снижение ионизации на средних широтах во время магнитной бури в мае 2024 г. Наибольшее снижение наблюдалось в области F2 ионосферы, что привело к развитию условия G [3]. Такое снижение хорошо коррелирует с увеличением температуры электронов и ионов (по данным ИРНР) и нейтралов по данным интерферометра Фабри-Перо, входящего в НГК РАН (рис. 3).

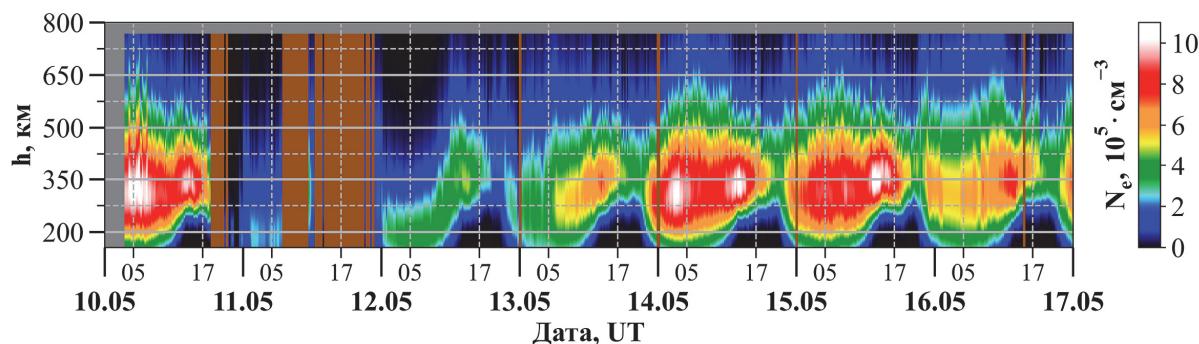


Рис. 2. Динамика профиля электронной концентрации, регистрируемой на Иркутском радаре некогерентного рассеяния 10–16 мая 2024 г.

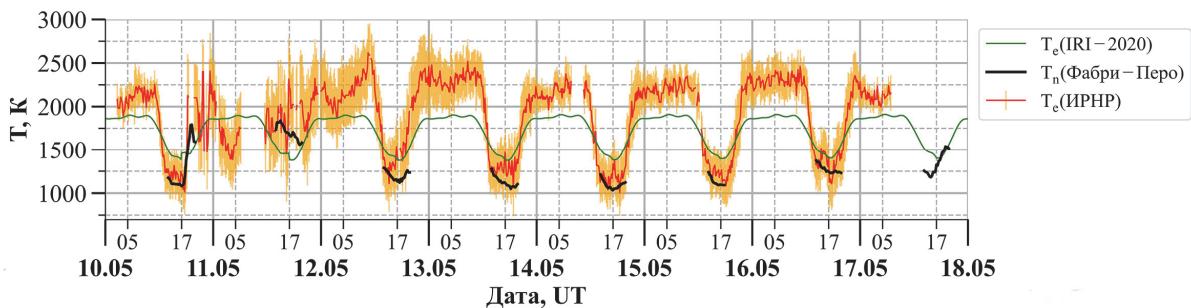


Рис. 3. Температуры электронов по данным ИРНР (красная кривая, оранжевым показан разброс) и нейтралов по данным интерферометра Фабри-Перо (черная кривая). Зеленым показана температура электронов по данным модели IRI-2020

По всей видимости имел место следующий процесс. В главную фазу бури произошел разогрев нижней термосферы на полярных широтах из-за увеличения джоулема нагрева и усиления высыпаний частиц с высокой энергией. Это привело к росту концентрации молекулярного азота и атомарного кислорода в верхней термосфере и переносу разогретых нейтральных частиц с высоких на средние широты, что вызвало там увеличение температуры нейтральной атмосферы. Усиление меридионального ветра в южном направлении во время бури подтверждается измерениями интерферометра Фабри – Перо [3].

#### Условия прохождения радиоволн

Непрерывно действующая сеть ЛЧМ-ионозондов ИСЗФ СО РАН и ИНГГ СО РАН зарегистрировала существенное нарушение условий распространения радиоволн на среднеширотных трассах. Во время главной фазы на трассах Магадан – Торы и Новосибирск – Торы пропал прием всех сигналов, использующих отражение от F2-слоя (рис. 4). Стабильный прием сигнала возобновился 12 мая. Сначала пропадал прием двухскаковых сигналов, а через 5–20 мин – односкачковых. Одновременно с исчезновением сигнала, отраженного от F2-слоя, на трассе Новосибирск – Торы наблюдалось внезапное усиление сигналов с отражением от E-слоя ионосферы. По-видимому, динамика нарушения условий распространения коротковолновых сигналов с отражением от F2-слоя ионосферы связана со смещением главного ионосферного провала в направлении экватора в главную фазу бури.

По измерениям коротковолнового когерентного радара ЕКВ (рабочая частота  $\sim 11$  МГц), после начала главной фазы бури, примерно с 18:00 UT 10 мая до 08:45 12 мая на всех лучах отсутствовал регулярный сигнал, рассеянный от земной поверхности. Как и по данным ионозондов наклонного зондирования, перед этим наблюдалось резкое (двухкратное) увеличение задержки распространения рассеянного сигнала.

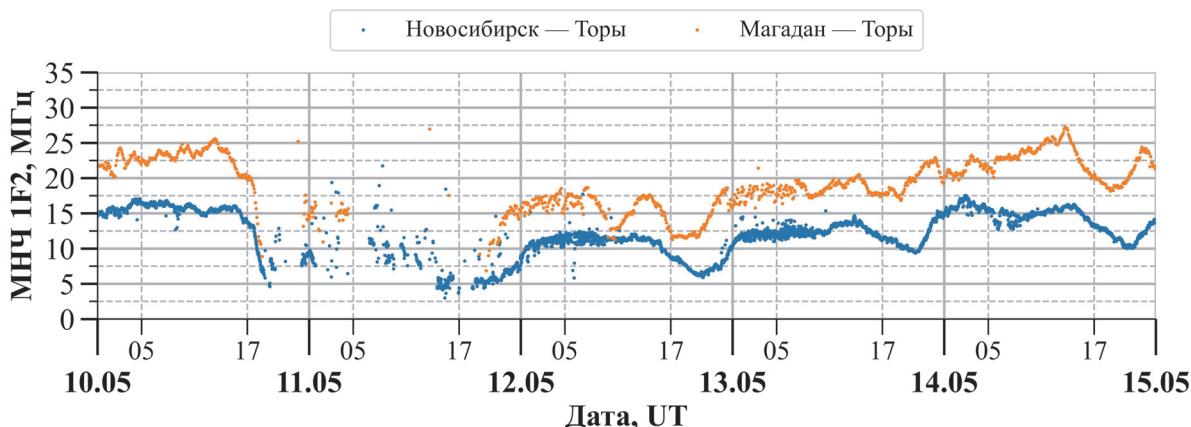


Рис. 4. Минимально наблюдаемая частота односкачкового сигнала, отраженного от F2-слоя ионосферы, на трассах Магадан – Торы (оранжевые точки) и Новосибирск – Торы (синие точки)

### Точность позиционирования глобальных навигационных спутниковых систем

Для изучения глобальной структуры ионосферы мы использовали систему SIMuRG (<https://simurg.iszf.irk.ru>), программное обеспечение GAMP для осуществления высокоточного позиционирования (Precise point positioning) и глобальные ионосферные карты полного электронного содержания [4]. Во время главной фазы бури произошла интенсификация экваториальной аномалии (до 175-200 TECU в гребнях) и расширение аврорального овала в экваториальном направлении. Примерно в 21:00 UT 10 мая область экваториальной аномалии пересекла границу аврорального овала (рис. 5а).

Ошибки позиционирования в 1.5–5 раз превысили фоновые значения. Максимум ошибок концентрировался в узкой области, соотносящейся с границей аврорального овала (рис. 5б). Наибольшее воздействие на ошибки позиционирования наблюдалось в северном полушарии.

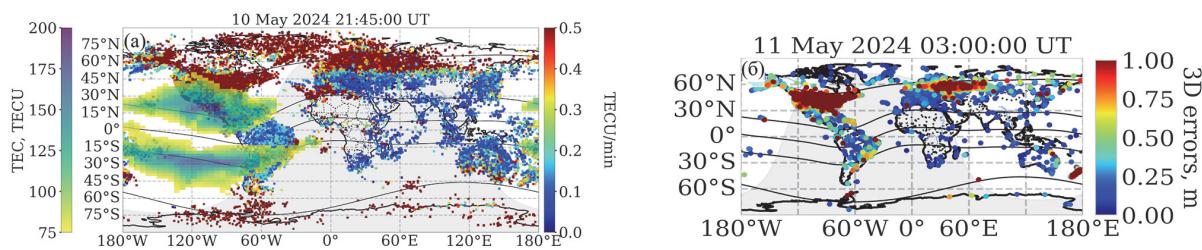


Рис. 5. Глобальные карты ионосферных параметров (а) и точности позиционирования (б). (а) – индекс ROTI (правая шкала) и полное электронное содержание (шкала слева). (б) – трехмерная ошибка кинематического режима Precise point positioning

### Заключение

Магнитная буря, произошедшая в мае 2024 г., оказала значительное влияние на состояние атмосферы и ионосферы, а также системы связи и навигации. Созданный экспериментальный комплекс позволил выявить детали протекания физических процессов во время магнитной бури. Следует отметить, что значимая часть данных находится в открытом доступе с целью интенсификации научных исследований этого уникального события.

### Благодарности

Экспериментальные измерения и их анализ на инструментах НГК РАН и иных инструментах ИСЗФ СО РАН выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ. Ионозондовые измерения в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН и их анализ велись в рамках проекта государственного задания FWZZ-2022-0019. Анализ данных ГНСС и точности позиционирования выполнен за счет Российского научного фонда (грант № 23-17-00157, <https://rscf.ru/project/23-17-00157/>). В работе использованы данные уникальных научных установок «Оптические инструменты» (<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/4138180/>) и Иркутского радара некогерентного рассеяния (<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/77733/>).

### Список литературы

1. Pilipenko V. Space weather impact on ground-based technological systems // Sol.-Terr. Phys. – 2021. – Vol. 7. – № 3. – P. 68–104. – DOI: 10.12737/stp-73202106.
2. Zherebtsov G. Complex of heliogeophysical instruments of new generation // Sol.-Terr. Phys. – 2020. – Vol. 6. – № 2. – P. 3–13. – DOI: 10.12737/stp-62202001.
3. Yasyukevich Y.V., Vasiliev R.V., Rubtsov A.V., Alsatkin S.S., Artamonov M.F., Beletsky A.B., et al. Extreme Magnetic Storm of May 10–19, 2024: Coupling Between Neutral and Charged Components of the Upper Atmosphere and the Effect on Radio Systems // Dokl. Earth Sci. – 2025. – V. 520. – 33. – DOI: 10.1134/S1028334X24604978.
4. Danilchuk E., YasyukevichY., Vesnin A., Klyusilov A., Zhang B. Impact of the May 2024 Extreme Geomagnetic Storm on the Ionosphere and GNSS Positioning // Remote Sensing. – 2025. – V. 17. – 1492. – DOI: 10.3390/rs17091492.