

УДК 550.385

## ВОЗМУЩЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И ИОНОСФЕРЫ В ПЕРИОД СИЛЬНОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ 23 АПРЕЛЯ 2023 г.

© 2023 г. Академик РАН В. В. Адушкин<sup>1</sup>, А. А. Спивак<sup>1,\*</sup>, Ю. С. Рыбнов<sup>1</sup>, С. А. Рябова<sup>1</sup>, С. П. Соловьев<sup>1</sup>, А. В. Тихонова<sup>1</sup>

Поступило 07.06.2023 г.  
После доработки 19.06.2023 г.  
Принято к публикации 04.07.2023 г.

Представлены данные инструментальных наблюдений, выполненных в геофизической обсерватории “Михнево” ИДГ РАН, за вариациями магнитного поля и реакцией микробарических колебаний и электрического поля в приземной атмосфере Земли на сильную магнитную бурю 23 апреля 2023 г. ( $K_p = 8$ ). При определении реакции ионосферы на магнитное возмущение в виде изменения критической частоты слоя F2 привлекались результаты ионосферного зондирования, выполненного в IAP (Leibniz-Institut für Atmosphären Physik). Показано, что в периоды максимальных вариаций магнитного поля регистрируются повышенные микробарические вариации и отмечаются повышенные вариации электрического поля. Магнитная буря сопровождалась также изменением критической частоты  $f_0F2$ , а также спектральных характеристик вариаций напряженности электрического поля.

**Ключевые слова:** магнитная буря, акустические колебания, магнитное поле, электрическое поле, критическая частота F2-слоя ионосферы, вариация

**DOI:** 10.31857/S2686739723601230, **EDN:** МОККНН

Геомагнитные возмущения, особенно сильные в виде магнитных бурь, сопровождаются рядом геофизических эффектов, изучение которых представляет особый интерес с точки зрения преобразования и взаимодействия физических полей, а также, что немаловажно, для понимания роли магнитного поля Земли в формировании не только условий среды обитания, но в целом и климата нашей планеты [1, 2].

Необходимо отметить, что магнитные бури проявляются в сейсмическом шуме [3], сопровождаются акустическими эффектами [4, 5] и оказывают прямое влияние на атмосферное электрическое поле, вызывая его повышенные вариации [5–9], и опосредованное влияние на работу GPS [10]. Однако, несмотря на достаточно большой объем наблюдательного материала, окончательного понимания причинно-следственных связей между магнитным возмущением и его эффектами, как и их возможных механизмов, до настоящего времени не существует. Это вызывает интерес к получению новых данных, получаемых в результате инструментальных наблюдений.

Последние годы характеризуются повышением магнитной активности на Земле, что хорошо видно из данных, представленных в табл. 1. Здесь следует добавить, что за пять месяцев 2023 г. (с 1 января по 31 мая) уже произошло 18 магнитных бурь, распределение которых по величине геомагнитной активности приведено ниже:

<i>K<sub>p</sub></i> -индекс:	5	6	7	8
Количество бурь:	11	4	2	1

В настоящем сообщении рассматриваются геофизические эффекты в виде микробарических вариаций в атмосфере Земли, вариации электрического поля и отклик ионосферы на редкое событие: сильную магнитную бурю, произошедшую 23.04.2023 г.

В качестве исходных данных использовались результаты инструментальных наблюдений, выполненных в обсерватории “Михнево” ИДГ РАН (МНВ; GEO: 54.9° с.ш.; 37.7° в.д.). Регистрация локальных геомагнитных вариаций выполнялась в специально оборудованном магнитном павильоне с помощью трехкомпонентного феррозондового магнитометра LEMI-018, электронный блок которого обеспечивает соответствующее преобразование данных, получаемых с феррозондового датчика с частотой дискретизации 1 Гц.

<sup>1</sup>Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия  
\*E-mail: aaspivak100@gmail.com

**Таблица 1.** Количество магнитных бурь за период 2018–2022 гг.

Год	$K_p$ -индекс геомагнитной активности по данным ISGI <sup>1</sup>				$\Sigma$
	5	6	7	8	
2018	19	1	–	–	20
2019	16	2	1	–	19
2020	10	1	–	–	11
2021	23	2	–	–	25
2022	30	8	–	–	38

**Таблица 2.** Планетарный  $K_p$ -индекс геомагнитной активности по данным ISGI

Дата	Время (UTC)							
	0–3	3–6	6–9	9–12	12–15	15–18	18–21	21–24
23.04.2023	2.5	1.5	1.5	3.2	4.5	5	8	7.5
24.04.2023	6.5	8	6.5	5	3.5	2.5	2	3

Вертикальная компонента электрического поля  $E$  регистрировалась измерителем напряженности электрического поля VOLTEK EFM-100 в диапазоне частот 0–10 Гц. Микробарические вариации измерялись с помощью микробарометра МБ-03, обеспечивающего устойчивую регистрацию акустических сигналов амплитудой от 0.01 до 200 Па в диапазоне частот 0.0003–10 Гц. При анализе отклика ионосферы на магнитную бурю в настоящей работе привлекались в виде ионограмм результаты высотно-частотного зондирования, выполненного в IAP (Leibniz-Institut Fur Atmosphären Physik; координаты ионозонда: 52.21° с.ш.; 21.06° в.д.), размещенные в свободном доступе на сайте <https://www.iap-kborn.de>. Выполнялась оценка критической частоты  $f_0F2$  путем ручной обработки ионограмм с интерпретацией по методике URSI [11]. В результате формировался цифровой ряд данных временной вариации критической частоты  $F2$ -слоя  $f_0F2$  с дискретизацией 5 мин.

Магнитная буря магнитудой G4 по шкале NOAA<sup>2</sup> была вызвана мощной солнечной вспышкой интенсивностью M1.7, которая наблюдалась 21.04.2023 г., стала самой мощной в текущем цикле солнечной активности и характеризовалась

высокими значениями планетарного  $K_p$ -индекса геомагнитной активности (табл. 2).

Примерно такое же развитие магнитной бури отмечено в обсерватории MNV (табл. 3), данные которой использованы в настоящей работе.

Как это следует из данных табл. 2, основной магнитной буре предшествовала суббуря, начало которой отмечено примерно в 12:00 UTC. Наибольшей мощности магнитная буря достигла в период с 18:00 до 21:00 UTC 23.04.2023 г., когда  $K_p$ -индекс геомагнитной активности достиг 8, что соответствует уровню G4 (тяжелый геомагнитный шторм). После некоторого спада геомагнитной активности до уровня G3 геомагнитные возмущения вновь достигли уровня G4 в период между 03:00 и 06:00 UTC 24.04.2023 г. Значительные геомагнитные возмущения такого высокого уровня сопровождались возникновением атмосферного оптического явления в виде полярного сияния на широтах московского региона.

Магнитная буря проявилась в приземном слое атмосферы высокими по амплитуде вариациями индукции магнитного поля. В качестве примера на рис. 1 приведены записи компонент индукции магнитного поля  $B_x$  (направление восток–запад),  $B_y$  (направление север–юг) и  $B_z$  (направление вниз), полученные в MNV. Характер магнитного возмущения типичен для магнитной бури. В частности, из данных рис. 1 видно, что внезапное начало магнитной бури (SCI) в виде кратковременного повышения  $B_z$  отмечается в ~18:41 UTC. Ос-

<sup>1</sup> International Service of Geomagnetic Indices ([https://isgi.unis-tria.fr/data\\_download.php](https://isgi.unis-tria.fr/data_download.php))

<sup>2</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration (<https://www.noaa.gov/>)

**Таблица 3.** Стационарный  $K$ -индекс геомагнитной активности по данным обсерватории МНВ

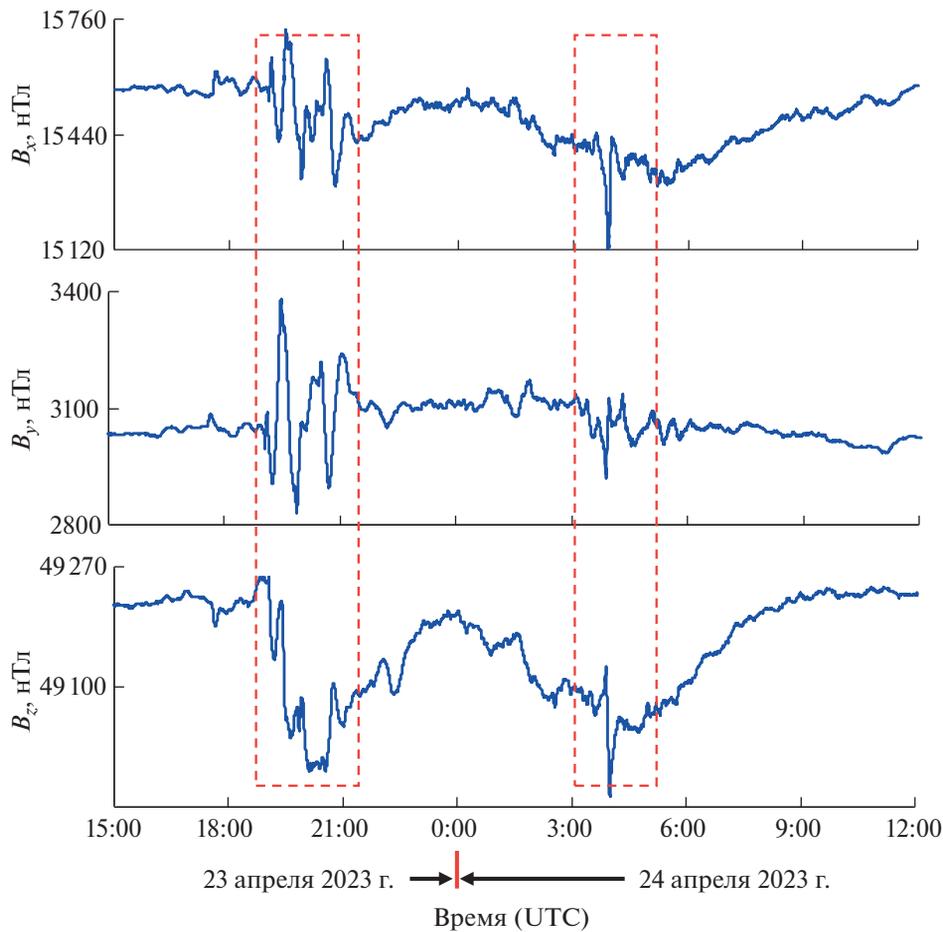
Дата	Время (UTC)							
	0–3	3–6	6–9	9–12	12–15	15–18	18–21	21–24
23.04.2023	1	1	2	3	4	4	8	6
24.04.2023	6	7	4	4	3	3	2	3

новая наиболее сильная фаза развития бури проявилась 23.04.2023 г. в период с ~19:00 до 24:00 UTC в данном случае в виде бухтообразного понижения  $B_z$  на ~230 нТл. При этом вариации горизонтальных компонент  $B_x$  и  $B_y$  в отличие от вариаций  $B_z$  имеют знакопеременный вид (период вариаций ~45 мин) и характеризуются максимальной амплитудой соответственно ~150 и ~330 нТл.

Вторая фаза развития магнитной бури отмечается 24.04.2023 г. в период ~01:40–07:30 UTC 24.04.2023 г. В этом случае вариации всех компо-

нент магнитной индукции менее продолжительны, имеют практически сходный вид и характеризуются максимальными амплитудами ~280 нТл (компонента  $B_x$ ), ~140 нТл (компонента  $B_y$ ) и ~120 нТл (компонента  $B_z$ ).

*Акустический эффект.* Как показано в [4, 12], магнитные бури сопровождаются акустическим эффектом, вызванным движением ионосферных электроструй со сверхзвуковой скоростью. При этом выделяются несколько типов инфразвуковых колебаний: высокочастотные с периодом



**Рис. 1.** Вариации компонент магнитного поля в период магнитной бури 23.04.2023 г.

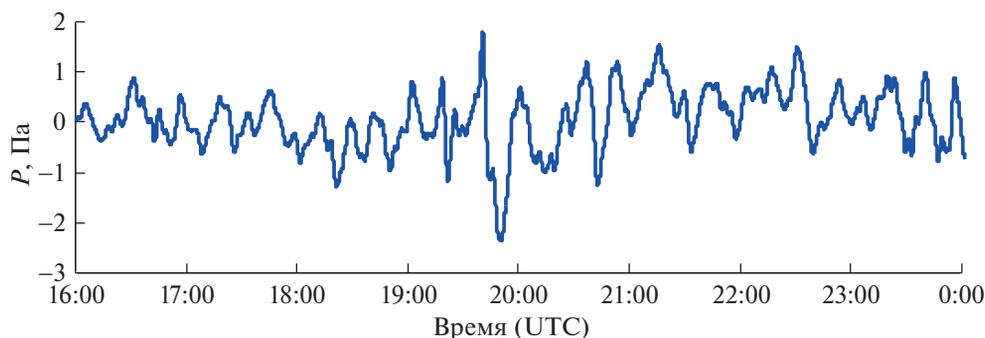


Рис. 2. Микробарические колебания, зарегистрированные в период магнитной бури 23.04.2023 г.

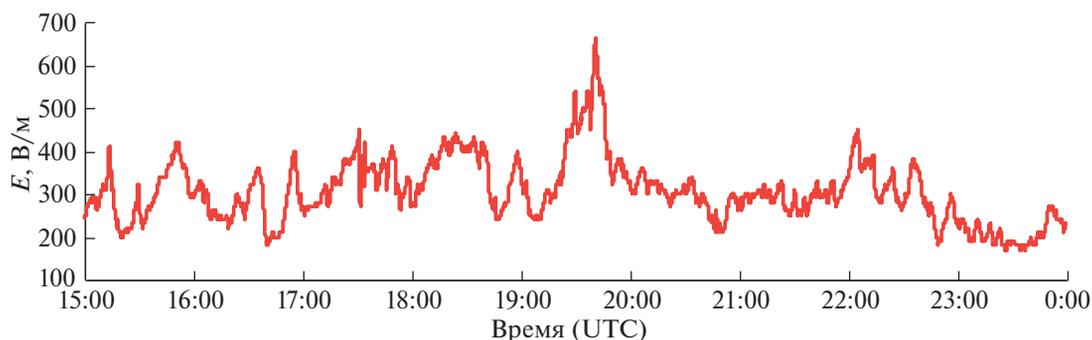


Рис. 3. Вариации электрического поля в период основной фазы магнитной бури 23.04.2023 г.

0.5–1 сек и длительностью до нескольких часов, импульсные длительностью. ~5–15 сек, повторяющиеся в течение ~30–40 мин и квазисинусоидальные колебания с периодом  $\approx 1$ –4 мин и длительностью  $\approx 10$ –30 мин, которые наблюдаются на значительных расстояниях от источника.

В нашем случае основная фаза магнитной бури, сопровождавшаяся на широте МНУ полярным сиянием, вызвала микробарические колебания в виде вариаций амплитуды  $P$  с периодом ~20–25 мин и максимальной амплитудой ~2.5 Па (рис. 2).

Возмущение микробарического фона атмосферы зафиксировано в ~19:40 UTC и продолжалось с небольшой вариацией амплитуды в диапазоне 1.5–2 Па практически в течение всего периода магнитной бури вплоть до 05:00 UTC.

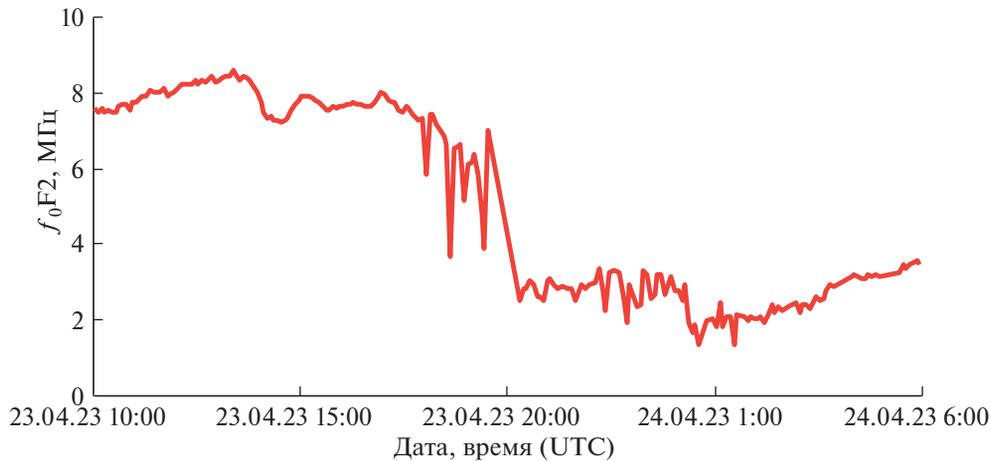
*Электрический эффект.* Результаты инструментальных наблюдений свидетельствуют о том, что магнитная буря 23.04.2023 г. сопровождалась характерными вариациями напряженности электрического поля. Запись вариаций вертикальной компоненты электрического поля  $E$  в период основной фазы магнитной бури приведена на рис. 3.

Как это следует из данных рис. 3, наиболее значимый электрический эффект наблюдался в

период основной фазы возмущения магнитного поля в период с ~19:20–19:30 до ~20:00 UTC. Вызванная вариация электрического поля хорошо проявилась в виде положительной бухты с максимальной амплитудой около 300 В/м относительно тренда.

*Отклик ионосферы.* Результаты анализа временного хода критической частоты  $f_0F2$  по результатам обработки данных IAP представлены на рис. 4. Из рис. 4 следует, что начало вариаций  $f_0F2$  отмечается в ~18:40 UTC, практически непосредственно перед внезапным началом магнитной бури, в виде знакопеременных изменений величины в интервале примерно 3.8–7 МГц. Затем в ~19:30 UTC в течение примерно 40 мин наблюдается резкий спад критической частоты с ~7 до ~2.5 МГц, после чего значения  $f_0F2$  остаются практически постоянными, слабо варьируя в достаточно узком диапазоне значений: 1.3–3.3 МГц.

Обобщая рассмотренные данные, можно констатировать, что основные эффекты, связанные с возмущением электрического и микробарического поля атмосферы, также как и вариации критической частоты  $f_0F2$ , наблюдались в период первой – основной фазы рассматриваемой магнитной бури, а именно 23.04.2023 г. в период при-



**Рис. 4.** Вариация критической частоты  $f_0F_2$  в период магнитной бури 23.04.2023 г. по данным ионосферной станции IAP.

мерно с 19:00 до 20:00 UTC. Вторая фаза магнитной бури, хорошо выраженная в геомагнитных вариациях и зарегистрированная 24.04.2023 г. в районе 04:00 UTC, не проявилась значимо в вариациях электрического и микробарического полей и в вариациях  $f_0F_2$ . На это, по-видимому, следует обратить отдельное внимание при выработке непротиворечивых моделей, описывающих сильные возмущения геофизических полей в периоды интенсивной солнечной активности.

Приведенные данные свидетельствуют о сложном характере физических процессов, сопутствующих сильным магнитным бурям, и, по мнению авторов, могут быть полезными при всестороннем описании геофизических эффектов магнитных бурь, совершенствовании имеющихся и разработке новых моделей этих важных для среды обитания явлений.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках Государственного задания № 122032900185-5 “Проявление процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В.В., Спивак А.А. Воздействие экстремальных природных событий на геофизические поля в среде обитания // *Физика Земли*. 2021. № 5. С. 6–16.
2. Килифарска Н.А., Бахмутов В.Г., Мельник Г.В. Геомагнитное поле — климат: причинно-следственные связи в изменении параметров атмосферы // *Физика Земли*. 2015. № 5. С. 160–178.
3. Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А. Отклик сейсмического фона на геомагнитные вариации // *ДАН*. 2012. Т. 444. № 3. С. 304–308.
4. Wilson Charles R. Infrasonic wave generation by aurora // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1975. V. 37. P. 973–988.
5. Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Рябова С.А., Харламов В.А. Волновые возмущения в приземной атмосфере при магнитных бурях // *Доклады РАН. Науки о Земле*. 2021. Т. 498. № 2. С. 158–162.
6. Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Михновски С., Кубицки М. Эффект магнитных бурь в вариациях атмосферного электрического поля в средних широтах // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2008. Т. 48. № 5. С. 650–659.
7. Смирнов С.Э. Реакция электрического состояния приземной атмосферы на геомагнитную бурю 5 апреля 2010 г. // *ДАН*. 2014. Т. 456. № 3. С. 342–346.
8. Рябова С.А., Спивак А.А. Вариации электрических характеристик приземной атмосферы в периоды магнитных бурь // *Доклады РАН. Науки о Земле*. 2021. Т. 497. № 1. С. 71–77.
9. Olson D.E. The evidence for auroral effects on atmospheric electricity // *Pure Appl. Geophys.* 1971. V. 84. P. 118–138.
10. Спивак А.А., Рябова С.А., Рыбнов Ю.С., Харламов В.А. Ошибки позиционирования GPS в периоды магнитных бурь // *Доклады РАН. Науки о Земле*. 2021. Т. 500. № 2. С. 173–177.
11. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. Под редакцией П.В. Медниковой. М.: Наука, 1977. 342 с.
12. Campbell W.H., Young J.M. Auroral-zone observation of infrasonic pressure waves related to ionospheric disturbances and geomagnetic activity // *J. Geophys. Res.* 1963, V. 68. № 21. P. 5909–5916.

## **DISTURBANCE OF GEOPHYSICAL FIELDS AND IONOSPHERE DURING A STRONG GEOMAGNETIC STORM ON APRIL 23, 2023**

**Academician of the RAS V. V. Adushkin<sup>a</sup>, A. A. Spivak<sup>a,#</sup>, Yu. S. Rybnov<sup>a</sup>, S. A. Riabova<sup>a</sup>,  
S. P. Soloviev<sup>a</sup>, and A. V. Tikhonova<sup>a</sup>**

*<sup>a</sup>Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

*<sup>#</sup>E-mail: aaspivak100@gmail.com*

We present the data of instrumental observations made at the Mikhnevo geophysical observatory of the IDG RAS of magnetic field variations and the response of microbaric oscillations and the electric field in the Earth's surface atmosphere to a strong magnetic storm on April 23, 2023 ( $K_p = 8$ ). When determining the response of the ionosphere to a magnetic disturbance in the form of a change in the critical frequency of the F2 layer, we use the results of ionospheric sounding performed at the IAP (Leibniz-Institut Fur Atmosphären Physik). It is shown that during periods of maximum magnetic field variations, increased microbaric variations are recorded and increased electric field variations are noted. The magnetic storm was also accompanied by a change in the critical frequency  $f_0F_2$ , as well as in the spectral characteristics of variations in the electric field strength.

*Keywords:* magnetic storm, acoustic oscillations, magnetic field, electric field, critical frequency of the F2-layer of the ionosphere, variation