

УДК: 550.388.2

DOI: 10.26907/rwp29.2025.147-150

## ОТКЛИК ДАННЫХ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА МАГНИТНУЮ БУРЮ 10–11 МАЯ 2024

О.А. Мальцева, Т.В. Никитенко

НИИ физики Южного федерального университета, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Ставки, 194  
E-mail: oamaltseva@sfedu.ru, niki-ta1952@mail.ru

**Аннотация.** Исследования такого редкого и мощного возмущения имеют много аспектов и много публикаций, посвященных результатам наблюдений. В данной работе представлен отклик на майское возмущение вблизи 4 меридианов по данным 30 ионосферных станций. Целью было получить ответы на вопросы: 1) корректны ли измерения ионозондов в период этого возмущения, 2) соответствует ли эмпирическая модель IRI-Plas экспериментальным данным. Результаты сводятся к следующему: 1) на большинстве станций отсутствуют измерения от начала главной фазы до середины фазы восстановления, на станциях, где измерения были доступны, наблюдались низкие значения ( $foF2 \sim 2$  МГц,  $hmF2 < 200$  км). 2) Сравнение метрик MAE, RMSE, MAPE для 4 меридианов показало, что для  $foF2$  наиболее близкие значения к эксперименту обеспечивает модель IRI-Plas, адаптированная к экспериментальным значениям TEC, для  $hmF2$  намного лучшие результаты, чем модель, обеспечиваются медианами. Существует определенная зависимость как от широты, так и от меридиана.

**Ключевые слова:** магнитная буря мая 2024, ионосфера, вертикальное зондирование, модель IRI-Plas, полное электронное содержание

## RESPONSE OF VERTICAL SOUNDING DATA TO THE MAGNETIC STORM OF MAY 10-11, 2024

О.А. Maltseva, Т.В. Nikitenko

**Abstract.** The studies of such a rare and powerful disturbance have many aspects and many publications devoted to the observation results. This paper presents the response to the May disturbance near 4 meridians based on data from 30 ionospheric stations. The goal was to obtain answers to the questions: 1) are the ionosonde measurements correct during this disturbance, 2) does the empirical model IRI-Plas correspond to the experimental data. The results are as follows: 1) at most stations there are no measurements from the beginning of the main phase to the middle of the phase recovery, at the stations where measurements were available, low values were observed ( $foF2 \sim 2$  MHz,  $hmF2 < 200$  km). 2) Comparison of the MAE, RMSE, MAPE metrics for 4 meridians showed that for  $foF2$  the closest values to the experiment are provided by the IRI-Plas model, adapted to the observational TEC values, for  $hmF2$  much better results than the model are provided by the medians. There is a certain dependence on latitude and meridian.

**Keywords:** May 2024 storm, Ionosphere, Vertical Sounding, IRI-Plas Model, Total Electron Content

### Введение

Магнитная буря 10–12 мая сразу вызвала большой интерес и поток публикаций, первая из которых относились к наблюдениям авроры на очень низких широтах [1–2]. В статье [3] дается детальное описание этого возмущения по данным различных экспериментов. В статье [4] с использованием данных спутников проанализированы процессы в магнитосфере, в привязке к поведению геомагнитных индексов. Во многих работах используются данные GNSS, низкоорбитальных спутников, реже данные вертикального зондирования. В статье [5] для китайских станций приведены суточные зависимости  $foF2$  и  $hmF2$  для 7 ионозондов в диапазоне широт от  $25.6^\circ$  до  $52.0^\circ$  и долгот от  $77^\circ$  до  $122.5^\circ$ , а также данные спутников FY-3 и COSMIC-2 за период 10–13 мая с детальным анализом для станции Wuhan с добавлением данных модели TIEGCM. Особенно интересны результаты сравнения спутниковых N(h)-профилей для спокойных и возмущенных условий. Эта работа подчеркнула важность получения региональной информации, потому что наблюдались различия между западными и восточными частями выделенной области. Перечислены 7 основных особенностей отклика ионосферы, свойственных суперштормам, с указанием на то, что суперштормы, возможно, не включают все упомянутые характеристики, но они будут включать некоторые из них. В работе [6], посвященной двум мощным магнитным бурям (1–11 мая 2024 и 7–11 октября 2024), также использовались данные ионозондов: три в Европе и по одному в Южной Корее и Северной

Америке. Наблюдали пробелы в данных, для которых указали несколько причин: рассеяние следа слоя F, присутствие слоя Es, поглощение в области D. Большое внимание уделили плазмосферной части ТЕС.

**Целью работы** является количественное исследование отклика ионосферы на майскую магнитную бурю 2024 по данным глобальной сети ионозондов.

**Решаемой задачей** является оценка точности определения критической частоты  $foF2$  и высоты максимума  $hmF2$  с помощью модели IRI-Plas.

Для этого использовались частоты  $foF2$  и высоты  $hmF2$  для 30 ионосферных станций, для которых на сайте (<https://giro.uml.edu/ionoweb/>) были доступны данные без очень больших пробелов. Эти данные были разбиты на группы, привязанные к 4 меридианам: 1)  $15^\circ$  E- $20^\circ$  E, 10 станций, 2)  $\sim 125^\circ$  E, 8 станций, 3)  $190^\circ$  E, 6 станций, 4)  $270^\circ$  E, 6 станций. Значения полного электронного содержания ТЕС, необходимые для адаптации модели IRI-Plas, рассчитывались с использованием файлов IONEX глобальных карт JPL GIM, доступных на сайте (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex>). Значения различных параметров модели IRI-Plas рассчитывались online на сайте (<http://www.ionolab.org/index.php?language=en>). Геомагнитные индексы были доступны на сайте OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>). Для сравнения модельных и экспериментальных значений параметров использовались следующие статистические характеристики: MAE, RMSE, MAPE за месяц или 4 дня с 9 по 12 мая 2024.

## Результаты

На рис. 1 приведено изменение геомагнитных индексов в период возмущения 9–12 мая 2024.

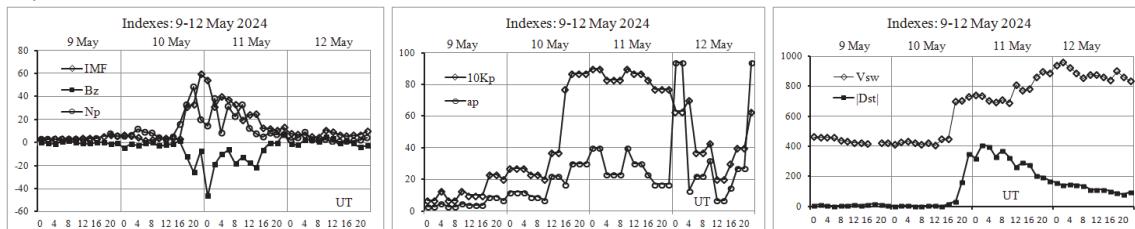


Рис. 1. Поведение геомагнитных индексов в период 9–12 мая 2024

Видно, что 9 мая условия близки к спокойному состоянию, магнитная буря началась 10 мая скачком скорости солнечного ветра  $V_{sw}$  с 449 км/с в UT16 до 697 км/с в UT18. Почти одновременно в UT20 южная компонента  $B_z$  достигла первого минимума -25.9 нТ, плотность протонов достигла максимума  $48.1 \text{ cm}^{-3}$ . В UT22 межпланетное магнитное поле достигло максимума 59.5 нТ. 11 мая в UT00  $B_z$  достигла второго минимума -46.5 нТ, в UT02 Dst индекс достиг минимума -412 нТ и началась фаза восстановления.

Все станции распределены по некоторым меридианам, вдоль которых расположены ионозонды. На большинстве ионозондов в дни МБ измерения  $foF2$  и  $hmF2$  отсутствовали, но на каждом меридиане есть одна станция, на которой были полные измерения и по ним можно отследить особенности отклика ионосферы. Для европейских меридианов это - Ascension island, для юго-восточного – Awase, для меридиана  $190^\circ$  E – Lualualei, для  $270^\circ$  E – Wallops. Соответствующие графики приведены на рис. 2 для  $foF2$  и  $hmF2$ . Для каждого параметра даны экспериментальные значения (иконка obs), значения для исходной модели IRI-Plas (иконка Plas(init)), для модели IRI-Plas, адаптированной к экспериментальным значениям ТЕС (иконка Plas(adapt)) и медиана (med). Значения для медиан приводятся, чтобы был виден характер возмущения.

Для станции Ascension максимальной  $foF2$  10.05 (17.375 MHz) в UT20 соответствует минимальная  $hmF2$  (290.7 km). Максимальной  $hmF2$  (528.8 km) в 06UT 11.05 соответствует минимальная  $foF2$  (5.775 MHz), которая тем не менее больше медианы, т.е. изменения происходили в противофазе. Для станции Awase минимальные  $foF2$  наблюдались 10.05 в UT20 (3.9 MHz) и 11.05 в UT20 (3.1 MHz). Максимальные  $hmF2$  наблюдались 10.05 в UT20 (548.3 km), 11.05 в UT08 (573 km), 11.05 в UT14 (528.7 km). 11.05 в UT20  $hmF2$  составила 281.1 km, т.е. изменения происходили в фазе. Для станции Lualualei максимальные  $hmF2$  наблюдались 11.05 в UT08 (641.5 km) в то время, когда  $foF2$  с начала магнитной бури и в течение всей фазы

восстановления проявила отрицательное возмущение. Для станции Wallops значения foF2 для обеих моделей оказались близки к эксперименту во время четкого отрицательного возмущения и наблюдались самые низкие значения hmF2.

Видно, что отклик параметров зависит от меридиана и можно выделить особенности в нескольких точках: 1) 10 мая, UT20 – начало реакции ионосфера после SSC и скачка Vsw, 2) 11 мая, UT02 – минимум Dst, конец главной фазы, 3) 11 мая, UT20 – после второго небольшого скачка Vsw, 4) 12 мая, UT08 – момент глубокой фазы восстановления. Также можно визуально увидеть соответствие модели с экспериментом. Количественно это соответствие представлено в таблице 1 с метриками MAE, RMSE, MAPE для 4 меридианов.

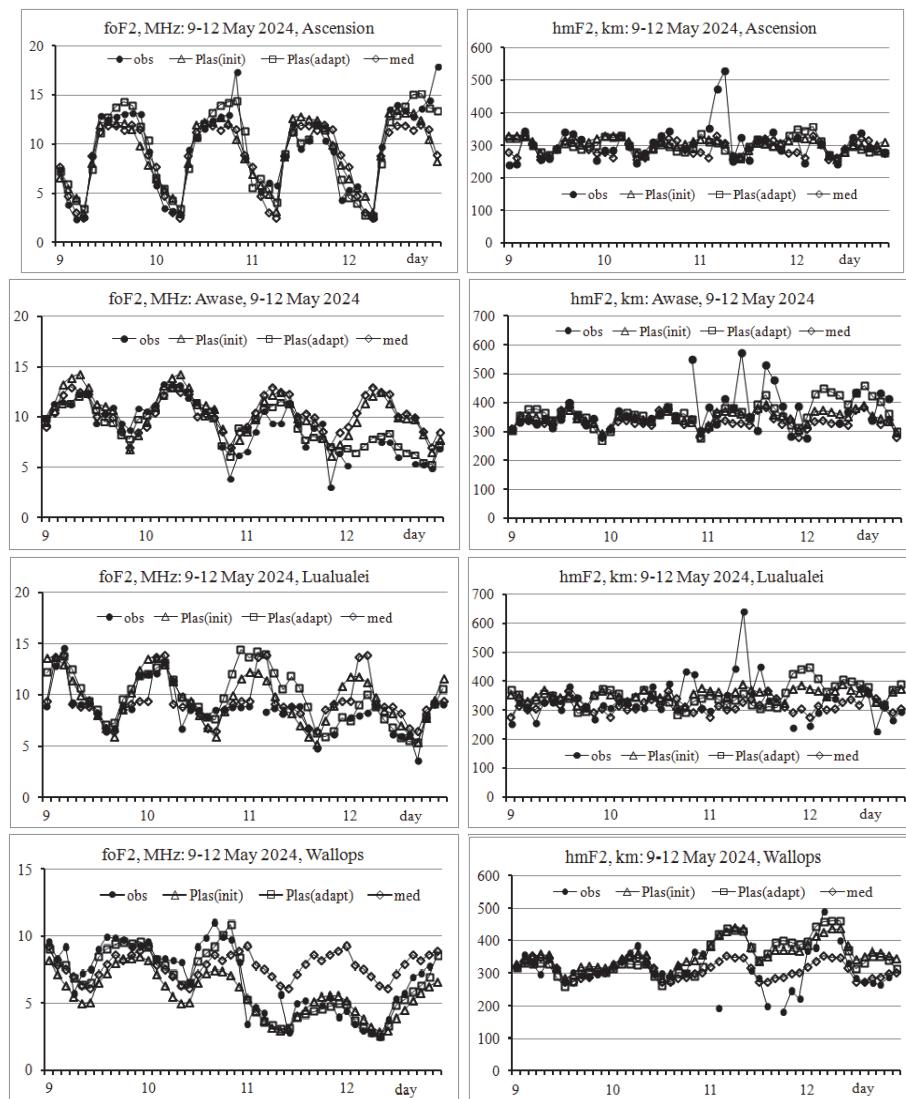


Рис. 2. Примеры полной информации для каждого меридиона

Таблица 1. Статистика точности определения параметров

MAE	foF2			hmF2			
	Long	init	adapt	med	init	adapt	med
15		1.17	<b>0.77</b>	1.14	46.67	43.19	<b>30.13</b>
125		1.49	<b>1.16</b>	1.54	25.20	<b>19.62</b>	26.90
190		1.15	1.21	<b>0.85</b>	48.00	47.83	<b>34.27</b>
270		1.81	<b>1.13</b>	1.88	48.22	48.25	<b>34.30</b>

Продолжение табл. 1

RMSE	foF2			hmF2			
	Long	init	adapt	med	init	adapt	med
15	1.55	<b>1.01</b>	1.74	64.21	60.89	<b>49.27</b>	
125	2.05	<b>1.61</b>	2.19	44.64	48.06	<b>38.57</b>	
190	1.47	1.52	<b>1.21</b>	63.77	64.65	<b>50.59</b>	
270	2.38	<b>1.66</b>	2.53	70.47	71.87	<b>52.16</b>	

MAPE	foF2			hmF2			
	Long	init	adapt	med	init	adapt	med
15	21.29	<b>13.88</b>	24.01	19.92	18.87	<b>15.10</b>	
125	25.20	<b>19.62</b>	26.90	14.12	15.24	<b>12.09</b>	
190	21.50	23.29	<b>16.68</b>	20.61	20.77	<b>15.99</b>	
270	31.97	<b>21.91</b>	34.54	22.81	23.25	<b>16.91</b>	

Можно отметить большие относительные отклонения  $\delta$ foF2 от 126.5% для Ascension и 63.44% – для Wallops вблизи UT00-04 11 мая. То же и в другие выделенные моменты.

### Заключение

Из множества аспектов изучения магнитной бури 10–12 мая 2024 в данной работе оценена точность определения параметров ионосферы с использованием модели IRI-Plas в период возмущения в глобальном масштабе. Получено, что в периоды вне возмущений обе модели IRI-Plas (исходная и адаптированная к значениям TEC(obs)) обеспечивают высокую точность для foF2 и hmF2. В периоды возмущений для foF2 наибольшую точность обеспечивает адаптированная модель за исключением меридиана 190° Е. Для hmF2 обе модели показали наихудшую точность по сравнению с месячной медианой с определенной зависимостью от меридиана.

### Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание Г3110/23-10-ИФ).

### Список литературы

- Spogli L., Alberti T., Bagiacchi P., Cafarella L., Cesaroni C. et al.: The effects of the May 2024 Mother's Day superstorm over the Mediterranean sector: from data to public communication // Annals of Geophysics. 2024. – V. 67. – N2. PA218. DOI:1044.01/ag-9117.
- Gonzalez-Esparza J.A., Sanchez-Garcia E., Sergeeva M., Corona-Romero P., Gonzalez-Mendez L.X. et al.: The Mother's Day geomagnetic storm on May 10, 2024: Aurora Observations and Low Latitude Space Weather Effects in Mexico // Space Weather. 2024. – V. 22. – e2024SW004111. <https://doi.org/10.1029/2024SW004111>.
- Hajra R., Tsurutani B.T., Lakhina G.S., Lu Q., Du A. Interplanetary Causes and Impacts of the 2024 May Superstorm on the Geosphere: // An Overview Accepted for publication in The Astrophysical Journal. – 2024. <https://arxiv.org/abs/2408.14799>.
- Hayakawa H., Ebihara Y., Mishev A. et al. The Solar and Geomagnetic Storms in May 2024: A Flash Data // The Astrophysical Journal. – 2025. – V. 979:49. – P. 1–26. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad9335>.
- Guo X., Zhao B., Yu T., Hao, H., Sun W., Wang G., et al. (2024). East–west difference in the ionospheric response during the recovery phase of May 2024 super geomagnetic storm over the East Asian // Journal of Geophysical Research: Space Physics, 129, e2024JA033170. <https://doi.org/10.1029/2024JA033170>.
- Pierrard V.; Verhulst, T.G.W.; Chevalier J.-M.; Bergeot N.; Winant A. Effects of the Geomagnetic Superstorms of 10–11 May 2024 and 7–11 October 2024 on the Ionosphere and Plasmasphere Atmosphere 2025, 16, 299. <https://doi.org/10.3390/atmos16030299>.