

Ионосферно-термосферные эффекты над Евразией средних и высоких широт в период супербури в мае 2024 г.

М.А. Черниговская¹, Г.А. Жеребцов¹, К.Г. Ратовский¹, А.Г. Сетов¹, Д.С. Хабитуев¹, А.С. Калишин², С.А. Долгачева², А.Е. Степанов³, А.Ю. Белинская⁴, В.В. Бычков⁵, С.А. Григорьева⁶, В.А. Панченко⁷, А.В. Тимченко⁸

¹ Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова 126а
E-mail: cher@iszf.irk.ru

² Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург
199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38, литера А
E-mail: askalishin@aari.ru

³ Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск
677027, г. Якутск, пр. Ленина 31
E-mail: a_e_stepanov@ikfia.sbras.ru

⁴ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск
630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3
E-mail: belinskayaay@ipgg.sbras.ru

⁵ Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка
684034 Камчатский край, Елизовский район, с. Паратунка, ул. Мирная, д. 7
E-mail: vasily.v.bychkov@gmail.com

⁶ Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург
620016, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100
E-mail: ion@arti.igfuran.ru

⁷ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк
108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4
E-mail: ranch@izmiran.ru

⁸ ЗФ Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград
236017, г. Калининград, пр. Победы, 41
E-mail: timchenko.leks@gmail.com

Представлены результаты исследований пространственно-временных вариаций ионосферных и термосферных параметров над регионами Евразии в период экстремальной магнитной бури Дня Победы в мае 2024 г. на основе анализа данных цепей высоко- и среднеширотных ионозондов.

Ключевые слова: средне- и высокоширотная ионосфера, цепи ионозондов, геомагнитная буря, вариации ионосферных параметров

Ionosphere-thermosphere effects over mid-and high-latitude Eurasia during the May 2024 superstorm

М.А. Chernigovskaya¹, G.A. Zherebtsov¹, K.G. Ratovsky¹, A.G. Setov¹, D.S. Khabituev¹, A.S. Kalishin², S.A. Dolgacheva², A.E. Stepanov³, A.Yu. Belinskaya⁴, V.V. Bychkov⁵, S.A. Grigorieva⁶, V.A. Panchenko⁷, A.V. Timchenko⁸

¹ Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk

² Arctic and Antarctic Research Institute, St.Petersburg

³ Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk

⁴ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk

⁵ Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation of the FEB RAS, Paratunka

⁶ Institute of Geophysics UB RAS, Ekaterinburg, Russia

⁷ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Moscow

⁸ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation (Western Branch) RAS, Kaliningrad

The results of studies of the spatiotemporal variations of ionospheric and thermospheric parameters over the regions of Eurasia are studied based on the analysis of data from chains of high- and mid-latitude ionosondes during the extreme Victory Day geomagnetic storm in May 2024.

Keywords: mid- and high-latitude ionosphere, ionosonde chains, geomagnetic storm, variations of ionospheric parameters

Введение

В докладе приводятся результаты исследования ионосферных и термосферных эффектов, обусловленных сильнейшим геомагнитным возмущением 10–11 мая 2024 г. текущего 25-го цикла солнечной активности и текущего столетия – "геомагнитной бури Дня Победы 2024 г.", следуя почину коллег, авторов работы [1].

Геомагнитное событие такой высокой интенсивности, несомненно, вызвало огромный интерес у исследователей атмосферно-ионосферно-магнитосферных связей. Ожидаемыми практическими последствиями воздействия мощнейшего магнитного возмущения на Землю могли быть проблемы с обеспечением надежности радио- и сотовой связи, навигации и локации, с функционированием энергосистем, трубопроводов, железнодорожных путей и линий электропередач, а также с оборудованием космических спутников различного назначения, в том числе с системами обеспечения жизнедеятельности космонавтов, оказавшихся в этот период на орбите. В периоды магнитных бурь в ионосфере развивается целый комплекс сложных процессов (ионосферные бури, отрицательные и положительные), в результате которых существенно изменяются ее параметры [2]. Причиной возмущений в ионосфере Земли в первую очередь является последовательность взаимосвязанных событий, начинающаяся с проявлений повышенной солнечной активности, которые затем влияют на систему солнечный ветер — магнитосфера — ионосфера. В других случаях ионосферные возмущения могут быть вызваны внутренними факторами системы ионосфера—термосфера, которые связаны с процессами в нейтральной атмосфере. В обоих случаях возникают возмущения ионосферной ионизации различной интенсивности, вследствие которых формируются ионосферные неоднородности разных пространственных и временных масштабов.

Первым и наиболее очевидным проявлением воздействия магнитного возмущения на Землю стали практически повсеместные многочисленные случаи визуального наблюдения полярного сияния во время этого события. Эти наблюдения, проводившиеся как с помощью научных оптических инструментов, так и с помощью обычных смартфонов и фотоаппаратов миллионами людей, оказались бесценными для получения данных, характеризующих это исключительное природное событие. Анализ собранных таким образом данных позволил сделать выводы о том, что полярное сияние в основном было видно в регионах с геомагнитными широтами в диапазоне от 60° до 30° N, а в отдельных случаях и на более низких широтах. Такое сильное расширение к экватору области полярных сияний косвенно свидетельствовало о столь же сильном смещении к экватору области субавроральной ионосферы, примыкающей к авроральному овалу со

стороны более низких широт, характерной крупномасштабной пространственной структурной особенностью которой является главный ионосферный провал ионизации.

В настоящем докладе мы продолжаем исследования [3-6] и выполняем по разработанным ранее методикам комплексный анализ пространственно-временных особенностей ионосферных и термосферных неоднородностей над Евразией на основе данных ионозондовых и спутниковых измерений для экстраординарной по интенсивности магнитной бури в мае 2024 г.

Используемые экспериментальные данные

Для анализа пространственно-временных вариаций ионосферных параметров используются данные о среднечасовых (либо часовых — для ионозондов в Новосибирске и Калининграде) значениях критической частоты foF2 слоя F2 ионосферы, полученные с помощью средне- и высокоширотных цепей ионозондов. Высокоширотная цепь состоит из шести ионозондов, расположенных в диапазоне широт $67\text{--}71^\circ\text{ N}$ (геомагнитные широты $58^\circ < \text{GMLat} < 64^\circ\text{ N}$) в долготном секторе $26\text{--}129^\circ\text{ E}$ Евразийского континента (рис. 1, красные метки и подписи; табл. 1).



Рис. 1. Карта расположения цепей высоко- (красные метки) и среднеширотных (белые метки) ионозондов

Таблица 1. Ионозонды высокоширотной цепи

Ионозонд	Ионозонд	Географические координаты		Геомагнитные координаты	
		широта	долгота	широта	долгота
Соданкюля	SO166	67° N	26° E	64° N	118° E
Ловозеро	CADI	68° N	35° E	64° N	126° E
Салехард	CADI	67° N	67° E	59° N	150° E
Норильск	DPS-4	69° N	88° E	60° N	166° E
Жиганск	DPS-4	67° N	123° E	58° N	168° W
Тикси	CADI	71° N	129° E	63° N	165° W

Среднеширотную цепь составляют восемь ионозондов, расположенных в диапазоне широт $52\text{--}62^\circ\text{ N}$ (геомагнитные широты $42^\circ < \text{GMLat} < 54^\circ\text{ N}$) в долготном секторе $13\text{--}158^\circ\text{ E}$ (рис. 1, белые метки и подписи; табл. 2. Временное разрешение экспериментальных данных составляло 15 мин для ионозондов в Паратунке, Якутске, Жиганске, Иркутске, Норильске, Екатеринбурге, Москве, Юлиусру, Соданкюля, полчаса для ионозондов в Тикси, Салехарде, Ловозеро и 1 ч для ионозондов в Новосибирске и Калининграде.

Таблица 2. Ионозонды среднеширотной цепи

Ионозонд	Ионозонд	Географические координаты		Геомагнитные координаты	
		широта	долгота	широта	долгота
Юлиусру	DPS-4D	55° N	13° E	54° N	99° E
Калининград	Парус А	55° N	21° E	53° N	106° E
Москва	DPS-4	56° N	37° E	52° N	122° E
Екатеринбург	Парус 3.0	57° N	60° E	50° N	141° E
Новосибирск	Ионозонд-МС	55° N	83° E	50° N	160° E
Иркутск	DPS-4	52° N	104° E	42° N	177° E
Якутск	DPS-4	62° N	130° E	53° N	163° W
Паратунка	Парус 2.0	53° N	158° E	46° N	138° W

В данной работе использовалась методика подготовки и обработки исходных данных вертикального зондирования, неоднократно ранее применявшаяся при анализе ионосферных возмущений на основе данных радиофизических измерений на средне- и высокоширотной цепях ионозондов [3-7]. Первичные данные измерений ионозондов различных типов приводились к единому формату для их дальнейшей обработки. Для каждого ряда исходных данных вычислялись фоновые величины путем усреднения экспериментальных значений $foF2(t)$ скользящим средним по 27 дням на интервале сглаживания $(t-14, t+14)$ дней до и после каждого текущего часа t суток. Затем из временных рядов часовых исходных данных $foF2(t)$ рассчитывались ряды отклонений от фонового уровня. Относительные отклонения критической частоты — $dfoF2(t)$ (в долях единицы) — рассчитывались как отклонения текущих значений $foF2(t)$ от фонового (усредненного) уровня, отнесенные к усредненному значению.

Как и в предыдущих исследованиях [3-7], для анализа эффектов магнитной бури в вариациях максимума электронной концентрации используется критическая частота $foF2$ слоя F2, которая связана с максимальной электронной концентрацией F-области $NmF2$ формулой $NmF2[m^{-3}] = 1.24 \cdot 10^{10} \cdot (foF2[МГц])^2$.

Для анализа пространственно-временных вариаций состава нейтрального газа на высотах ионосферы использовались спутниковые измерения $[O]/[N_2]$ в столбе атмосферного газа на высотах более ~ 100 км, проводимые оптическим методом с помощью ультрафиолетового УФ-спектрометра GUVI на космическом аппарате TIMED (<http://guvitimed.jhuapl.edu/guvi-gallery13on2>).

Пространственно-временные вариации ионосферных и термосферных параметров над Евразией в период геомагнитной бури Дня Победы в мае 2024 г.

Процессы повышенной активности Солнца, ставшие причинами развития сильнейшего в текущем столетии геомагнитного возмущения 10–12 мая 2024 г. описаны в [7]. На рис. 2 представлены временные вариации индексов геомагнитной и солнечной активности в период развития анализируемой магнитной бури. Магнитная буря началась вечером 10 мая 2024 г. в 17:00 UT (время внезапного начала бури SSC – Sudden Storm Commencement – показано вертикальной штриховой линией с буквой "S"). Очень быстро к 22:00 UT 10 мая интенсивность геомагнитного возмущения достигла класса "великой (great) супербури" (Dst-индекс ниже -350 нТл) по классификации бурь по планетарному индексу Dst [8] и категории G5, экстремальной по классификации NASA на основе Кр-индекса (<https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>). После полуночи с 10 на 11 мая магнитная буря усилилась до максимального уровня и в 2:00UT индекс Dst понизился до -412 нТл (показано вертикальной штриховой линией с буквой "M" на рис. 2), а Кр-индекс достиг значения 9 по данным сайта World Data Center for Geomagnetism, Kyoto (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>). Главная фаза бури длилась ~ 9 часов.

Индекс A_p в максимуме бури поднялся до 400 нТл (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>).

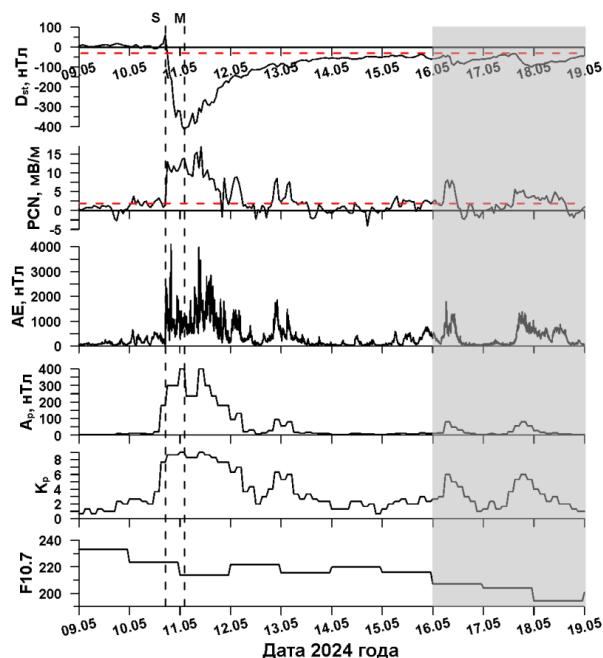


Рис. 2. Вариации индексов геомагнитной и солнечной активности. Пороговые буревые уровни значений Dst и PCN показаны красными горизонтальными штриховыми линиями. Вертикальными штриховыми линиями отмечены момент начала бури (с буквой "S") и момент максимума интенсивности магнитной бури (с буквой "M")

Обращает на себя внимание значительный рост индексов AE до 4098 нТл в 19:48 UT (по данным, предоставленным Отделом Геофизики ААНИИ, Санкт-Петербург) и PCN до 13–14 мВ/м практически сразу после SSC бури с дальнейшим ростом до 14 мВ/м в момент максимума бури (по данным Мирового центра данных по солнечно-земной физике (МЦД по СЗФ), Москва – http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagn_PC_ind.ru.html) (рис. 2). Хорошая корреляция между усилением PCN и AE свидетельствует о том, что межпланетное электрическое поле и динамическое давление солнечного ветра очень геоэффективно воздействовали на магнитосферу и ионосферу Земли в полярном регионе. Дополнительные всплески геомагнитной активности отмечались на восстановительной фазе бури – в 9÷10 UT 11 мая, на сменах суток с 11 на 12 мая и с 12 на 13 мая. Эти усиления геомагнитной возмущенности хорошо видны в вариациях индексов PCN , AE , A_p и K_p и очевидно связаны с приходами на Землю корональных выбросов массы от последовательности солнечных вспышек 9, 10 и 11 мая 2024 г.

Индекс солнечной активности $F10.7$ – поток радиоизлучения $F10.7$ с длиной волны 10.7 см – изменялся от 233 с.е.п. 9.05.2024 г. до 216 с.е.п. 15.05.2024 г. (1 с.е.п. (солнечная единица потока) = 10^{-22} Вт/(м² Гц)) (<http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act/flux10.7/daily/>). Это соответствует фазе роста солнечной активности в текущем 25 цикле солнечной активности, максимум активности которого был зарегистрирован в августе 2024 г.

Пороговые буревые уровни значений $Dst = -30$ нТл [8] и $PCN \sim 2$ мВ/м [9] показаны горизонтальными штриховыми линиями на рис. 2. По этим уровням можно видеть, что восстановительная фаза супербури длилась почти 5 суток до 15 мая 2024 г. (включительно). 16 и 17 мая последовали новые геомагнитные умеренные бури уровня

G2 (показано серой штриховкой на рис. 2), поэтому мы анализировали временной интервал до 15 мая 2024 г., как относящийся к данному геомагнитному возмущению.

Исследование ионосферного отклика на экстремальную по интенсивности магнитную супербурю в мае 2024 г. на основе анализа данных средне- и высокоширотных цепей евразийских ионозондов показало, что практически сразу после наступления внезапного начала бури в 17:00 UT 10 мая 2024 г. по данным всех ионозондов зарегистрировано резкое падение электронной концентрации на высоте максимума F2-слоя независимо от местного времени в пункте измерения (рис. 3).

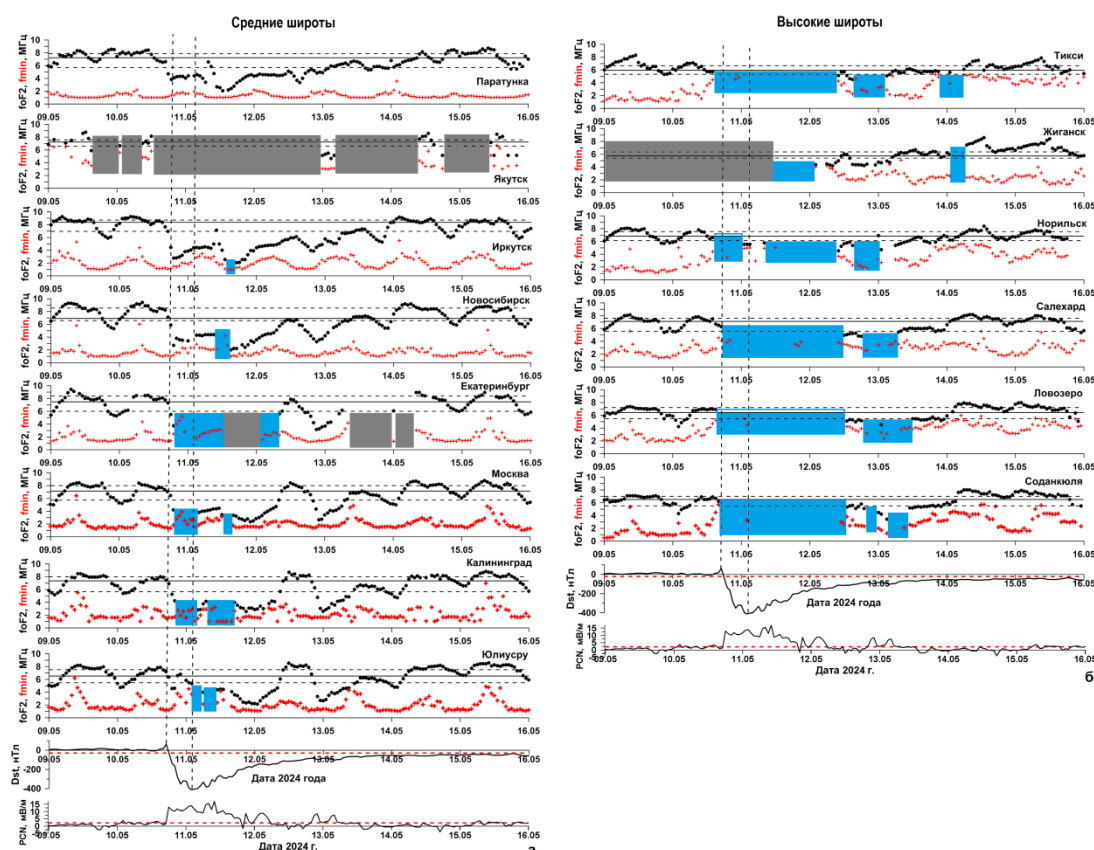


Рис. 3. Вариации foF2 по данным средне- (а) и высокоширотной (б) цепей евразийских ионозондов (горизонтальные сплошные линии – медианы foF2, рассчитанные по 10 спокойным дням, и штриховые линии – уровни нижнего и верхнего квартилей). Вариации foF2 (точки) и fmin (крестики) по данным средне- (в) и высокоширотной (г) цепей евразийских ионозондов. Прямоугольниками голубого цвета показаны периоды блэкаутов в измерениях ионозондов, серого цвета – периоды технических неисправностей.

К моменту достижения максимальной интенсивности бури в 2:00 UT 11 мая 2024 г. (индекс Dst = –412 нТл) foF2 уменьшилась до 2–3 МГц по данным среднеширотных ионозондов в Паратунке, Иркутске, Новосибирске, Москве, Калининграде, Юлиусру; величина относительных отклонений dfoF2 достигла значений –50%÷–70%. О масштабе падения электронной концентрации в ионосфере средних широт над Евразией в период супербури можно наглядно судить по тому факту, что с момента SSC бури в течение всей главной фазы и нескольких суток восстановительной фазы величины foF2 были ниже на 3–5 МГц нижнего квартиля для вариаций в спокойные дни. Беспрецедентным было падение электронной концентрации над азиатской территорией Сибири и Дальнего Востока по данным ионозондов в Иркутске, Паратунке и Новосибирске – с момента SSC

до середины суток 13 мая, т.е. в течение 3 сут. Над европейской территорией средних широт катастрофическое падение электронной концентрации было менее продолжительным – до середины суток 12 мая. Но дополнительный всплеск геомагнитной активности на смене суток 12 и 13 мая вновь привел к существенному падению foF2 13 мая 2024 г. с суточным ходом ниже среднего уровня спокойных условий по данным ионозондов в Москве, Калининграде, Юлиусру, а ионозонд в Екатеринбурге показывал в этот период блэкаут радиосигналов.

Практически все ионозонды высокоширотной цепи (Норильск, Салехард, Ловозеро, Соданкюля) регистрировали блэкаут радиосигналов начиная с периода главной фазы бури (окончание суток 10 мая и начало суток 11 мая 2024 г.) вплоть до вечера 12 мая 2024 г., т.е. более полутора суток. Период блэкаута радиосигналов по данным ионозонда в Тикси был чуть менее продолжительный – до утра 12 мая 2024 г.

На рис. 3 показаны для удобства анализа на одних осях временные вариации критической частоты foF2 и минимальной частоты отражения fmin по данным измерений цепей ионозондов. Из графиков очень наглядно видно, что в моменты существенного роста поглощения в нижней ионосфере и одновременного понижения электронной концентрации на высоте максимума ионизации ионосферы графики вариаций foF2 и fmin стремятся к критическому сближению значений. Затем наступают блэкауты в измерениях ионозондов (показаны голубыми прямоугольниками на графиках). Особенно ярко действие этого механизма видно по данным измерений высокоширотных ионозондов (рис. 3б), поскольку это регион вторжения в ионосферу энергичных частиц из магнитосферы вдоль силовых линий магнитного поля, интенсивной ионизации и нагрева плазмы. Следствием этого является рост поглощения радиоволны в области D ионосферы, пропорционального электронной концентрации и частоте столкновений электронов с нейтральными частицами.

Роль увеличения поглощения радиоволн на высотах нижней ионосферы в формировании блэкаутов зондирующих радиосигналов видна и по данным среднеширотных ионозондов (рис. 3а). Практически мгновенно с началом магнитной бури наблюдался рост fmin по данным всех европейских ионозондов: в Екатеринбурге, Москве, Калининграде, Юлиусру. Следствием этого было отсутствие данных измерений foF2. Самый продолжительный блэкаут зарегистрирован по данным измерений ионозонда в Екатеринбурге.

В периоды дополнительных всплесков геомагнитной активности на восстановительной фазе бури (рис. 2) – в 9÷10 UT 11 мая, на сменах суток с 11 на 12 мая и с 12 на 13 мая – также отмечались кратковременные перебои в работе ионозондов, связанные с ростом поглощения в нижней ионосфере (рис. 3а, б).

Для объяснения пространственно-временных вариаций электронной концентрации ионосферы на высотах F2-области, наблюдавшихся в период супербури в мае 2024 г., на рис. 4 показаны карты долготно-временных вариаций относительных отклонений критической частоты foF2 по данным среднеширотной цепи ионозондов (рис. 4, а) и отношения концентраций [O]/[N₂] в столбе атмосферного газа на высотах термосферы (ионосферы) выше ~100 км для среднеширотного региона Евразии (54°–56° N) (рис. 4, б) по спутниковым измерениям с помощью УФ-спектрометра GUVI/TIMED. Анализ относительных отклонений dfoF2 позволяет очень наглядно оценить степень влияния, вносимого геомагнитным возмущением в период бури, по сравнению с невозмущенным состоянием электронной концентрации в спокойные дни до начала геомагнитного возмущения. Кроме того, такой анализ позволяет исключить возможную неоднозначность определения ионосферного параметра на ионозондах разного типа.

Анализируя долготно-временные вариации dfoF2 в регионе средних широт Восточного полушария по данным измерений ионозондов (см. рис. 4, а) и вариации

нейтрального состава на этих же широтах и долготах (рис. 4, б) по данным спутниковых измерений, можно сделать вывод, что эти параметры показывают при визуальном сравнении очень высокий уровень подобия, что свидетельствует о высокой качественной положительной корреляции.

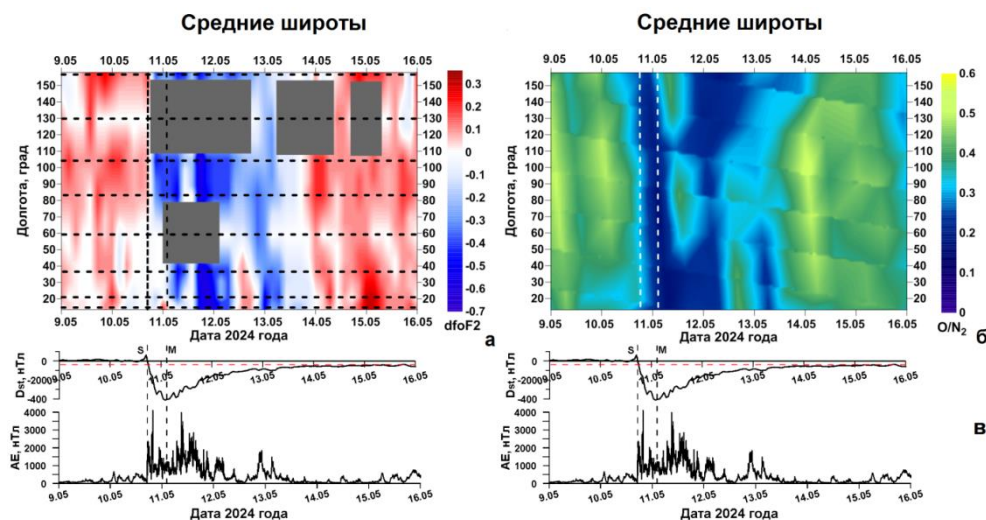


Рис. 4. Долготно-временные вариации $dfoF2$ по данным среднеширотной цепи ионозондов (а) и отношения $[O]/[N_2]$ по измерениям GUVI TIMED для региона средних широт (б) в мае 2024 г. (UT), а также вариации индексов Dst и AE (в)

Долготно-временное распределение $[O]/[N_2]$ детально объясняет описанные ранее особенности отклика ионосферной плазмы на экстремальное геомагнитное возмущение. Прежде всего, наблюдавшееся практически с момента внезапного начала магнитной супербури резкое и сильное понижение $foF2$ в ионосфере средних широт Евразии, которое составляло от 50 до 70% от значений $foF2$ в спокойных условиях. Отрицательная ионосферная буря продолжалась всю главную фазу и более двух суток, до вечера 13 мая 2024 г., на восстановительной фазе магнитной бури. В период отрицательной ионосферной бури значения отношения $[O]/[N_2]$ были очень низкими — $0.1 \div 0.2$, увеличиваясь в некоторые непродолжительные периоды до $0.3 \div 0.4$, практически трое суток — с вечера 10 мая до вечера 13 мая 2024 г.

Зарегистрированные по вариациям индексов PCN, AE, Ap, Kp (см. рис. 2, 4, в) дополнительные всплески геомагнитной активности на восстановительной фазе бури, сопровождавшиеся существенными уменьшениями электронной концентрации в средних широтах по измерениям ионозондов на всех долготах Восточного полушария (см. рис. 3, а, 4, а), отчетливо были связаны с соответствующими периодами низких значений отношения $[O]/[N_2]$ (см. рис. 4, б).

Выводы

Исследование ионосферного отклика на экстремальную по интенсивности магнитную супербурю Дня Победы в мае 2024 г. на основе анализа данных средне- и высокоширотных цепей евразийских ионозондов, позволило сделать следующие выводы.

1. Практически сразу после наступления SSC бури по данным анализа временных вариаций данных всех ионозондов зарегистрировано резкое падение электронной концентрации на высоте максимума F2-слоя независимо от местного времени в пункте измерения.

2. Резкое и сильное снижение foF2 (~ 50-70% от foF2 в спокойных условиях) с момента SSC магнитной бури в течение всей главной фазы и более двух дней восстановительной фазы до вечера 13 мая 2024 г., наблюдавшееся в ионосфере над среднеширотной Евразией (рис. 2,а), было вызвано экстремальным, катастрофическим падением отношения плотностей [O]/[N₂] в термосфере почти на три дня во время супербури в мае 2024 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 25-17-00187) (<https://rscf.ru/project/25-17-00187/>). Результаты получены частично с использованием оборудования ЦКП "Ангара" ИСЗФ СО РАН (<http://ckp-rf.ru/catalog/ckp/3056/>).

Литература

1. Chernyshov A.A., Klimenko M.V., Nosikov I.A., et al. Effects in the upper atmosphere and ionosphere in the subauroral region during Victory Day 2024 Geomagnetic Storm (May 10–12, 2024) // Adv. Space Res. 2025. Vol. 76. Iss. 12. P. 7325–7350. DOI: 10.1016/j.asr.2025.02.015.
2. Buonsanto M.J. Ionospheric storms — a review // Space Sci. Rev. 1999. Vol. 88. P. 563–601.
3. Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Yasyukevich A.S., et al. Longitudinal variations of geomagnetic and ionospheric parameters in the Northern Hemisphere during magnetic storms according to multi-instrument observations // Adv. Space Res. 2021. Vol. 67. No. 2. P. 762–776.
4. Chernigovskaya M.A., Yasyukevich A.S., Khabituev D.S. Iono-spheric longitudinal variability in the Northern Hemisphere during magnetic storms in March 2012 from ionosonde and GPS/GLONASS data // Sol.-Terr. Phys. 2023. Vol. 9. Iss. 4. P. 99–110. DOI: 10.12737/stp-94202313.
5. Chernigovskaya M.A., Setov A.G., Ratovsky K.G., et al. Variability of ionospheric ionization over Eurasia according to data from a high-latitude ionosonde chain during extreme magnetic storms in 2015 // Sol.-Terr. Phys. 2024a. Vol. 10. Iss. 2. P. 34–47. DOI: 10.12737/stp-102202404.
6. Chernigovskaya M.A., Ratovsky K.G., Zherebtsov G.A., et al. Ionospheric response over the high and middle latitude regions of Eurasia according to ionosonde data during the severe magnetic storm in March 2015. Sol.-Terr. Phys. 2024b. Vol. 10. Iss. 4. P. 46–58. DOI: 10.12737/stp-104202406.
7. Chernigovskaya M.A., Zherebtsov G.A., Ratovsky K.G., et al. Ionospheric response to superstorm in May 2024 over mid- and high-latitude Eurasia // Adv. Space Res. 2025. Vol. 76. P. 7351–7374. DOI: 10.1016/j.asr.2025.09.082.
8. Loewe C.A., Prölss G.W. Classification and mean behavior of magnetic storms // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102. No. A7. P. 14,209–14,213.
9. Troshichev O.A., Sormakov D.A. PC index as a proxy of the solar wind energy that entered into the magnetosphere: 3. Development of magnetic storms // J. Atmos. Solar-Terr Phys. 2018. Vol. 180. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.10.012.