

**ТЕРМОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ СУПЕРБУРЬ
В МАЕ 2024 Г. И ОКТЯБРЕ–НОЯБРЕ 2003 Г. В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ
И ИОНОСФЕРНЫЙ ОТКЛИК НА НИХ**

**THERMOSPHERIC EFFECTS DURING THE MAGNETIC SUPERSTORMS
IN MAY 2024 AND OCTOBER–NOVEMBER 2003 IN THE NORTHERN HEMISPHERE
AND THE IONOSPHERIC RESPONSE TO THEM**

М.А. Черниговская 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, cher@iszf.irk.ru*

Д.С. Хабитуев 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, Khabituev@iszf.irk.ru*

А.Г. Сетов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, setov@iszf.irk.ru*

К.Г. Ратовский 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ratovsky@iszf.irk.ru*

А.С. Калишин 

*Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия, askalishin@aari.ru*

С.А. Долгачева 

*Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия, dolgacheva@aari.ru*

А.Е. Степанов 

*Институт космических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, a_e_stepanov@ikfia.sbras.ru*

А.Ю. Белинская 

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН,
Новосибирск, Россия, belinskayaay@ipgg.sbras.ru*

В.В. Бычков

*Институт космических исследований
и распространения радиоволн ДВО РАН,
Паратунка, Россия, vasily.v.bychkov@gmail.com*

С.А. Григорьева

*Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН,
Екатеринбург, Россия, ion@arti.igfuran.ru*

В.А. Панченко

*Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Троицк, Россия, panch@izmiran.ru*

А.В. Тимченко 

*Калининградский филиал Института земного
магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН,
Калининград, Россия, timchenko.leks@gmail.com*

M.A. Chernigovskaya

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, cher@iszf.irk.ru*

D.S. Khabituev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, Khabituev@iszf.irk.ru*

A.G. Setov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, setov@iszf.irk.ru*

K.G. Ratovsky

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ratovsky@iszf.irk.ru*

A.S. Kalishin

*Arctic and Antarctic Research Institute,
Saint Petersburg, Russia, askalishin@aari.ru*

S.A. Dolgacheva

*Arctic and Antarctic Research Institute,
Saint Petersburg, Russia, dolgacheva@aari.ru*

A.E. Stepanov

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, a_e_stepanov@ikfia.sbras.ru*

A.Yu. Belinskaya

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics
SB RAS,
Novosibirsk, Russia, belinskayaay@ipgg.sbras.ru*

V.V. Bychkov

*Institute of Cosmophysical Research
and Radio Wave Propagation FEB RAS,
Paratunka, Russia, vasily.v.bychkov@gmail.com*

S.A. Grigorieva

*Institute of Geophysics UB RAS,
Ekaterinburg, Russia, ion@arti.igfuran.ru*

V.A. Panchenko

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere,
and Radio Wave Propagation RAS,
Moscow, Troitsk, Russia, panch@izmiran.ru*

A.V. Timchenko

*West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism,
Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,
Kaliningrad, Russia, timchenko.leks@gmail.com*

Аннотация. Исследованы пространственно-временные вариации ионосферных параметров над регионами Евразии в период экстремальной магнитной бури в мае 2024 г. на основе анализа данных цепей высоко- и среднеширотных ионозондов. Анализ ионосферных

Abstract. We study the spatiotemporal variations of ionospheric parameters over the regions of Eurasia by analyzing data from chains of high- and mid-latitude ionosondes during the extreme magnetic storm in May 2024. The analysis of ionospheric parameters allowed us to note

параметров позволил отметить сильные широтные и долготные различия в вариациях анализируемых параметров в спокойных условиях до начала магнитной бури и во время ее развития. Практически сразу после 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. Ионозонды высокоширотной цепи показывали полное отсутствие данных (блэкаут радиосигналов) на главной и ранней восстановительной фазах бури вплоть до вечера 12 мая 2024 г., т. е. более полутора суток. Дополнительные всплески геомагнитной активности на восстановительной фазе бури также сопровождалась существенными продолжительными уменьшениями электронной концентрации по измерениям ионозондов на всех долготах Евразии. Восстановление ионизации ионосферы началось 14–15 мая на всех долготах средне- и высокоширотного региона Евразии. Длительное, охватывающее огромную территорию среднеширотной Евразии отрицательное возмущение электронной концентрации было вызвано чрезвычайным, катастрофическим падением отношения $[O]/[N_2]$, зарегистрированным по данным инструмента GUVI на спутнике TIMED, практически в течение трех суток в период супербури. Реакция состава термосферного нейтрального газа на процессы, развивавшиеся в высоких широтах Северного полушария 10–15 мая 2024 г., была глобальной, с проникновением термосферного возмущения практически на всех долготах вплоть до приэкваториальных широт ($\sim 10^\circ N$) и с очень низким значениями отношения $[O]/[N_2] \sim 0.1 \div 0.4$. Выявлены существенные различия в пространственно-временных вариациях состава термосферного нейтрального газа в периоды самых экстремальных геомагнитных бурь текущего 21-го столетия — в мае 2024 г. и октябре–ноябре 2003 г. Магнитная супербуря в мае 2024 г. характеризовалась намного большей геоэффективностью, чем супербури в октябре–ноябре 2003 г., и реакция ионосферы на нее существенно различалась на разных долготах и широтах Северного полушария.

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

strong latitudinal and longitudinal differences in variations of the analyzed parameters under quiet conditions before the onset of the magnetic storm and during its development. Almost immediately after the onset of the storm at 17:00 UT on May 10, 2024, according to data from all ionosondes, a sharp drop in the electron density at the height of the F2-layer maximum was recorded, regardless of the local time at the measurement point. Ionosondes of the high-latitude chain showed a complete absence of data (radio signal blackout) during the main and early recovery phases of the storm until the evening of May 12, 2024, i.e. more than one and a half days. Additional bursts of geomagnetic activity during the recovery phase of the storm were also accompanied by significant and prolonged decreases in the electron density according to ionosonde measurements at all longitudes of Eurasia. The recovery of ionospheric ionization began on May 14–15 at all longitudes of the mid- and high-latitude regions of Eurasia. A long-term negative disturbance of electron density covering a huge territory of mid-latitude Eurasia was caused by an extraordinary, catastrophic drop in the $[O]/[N_2]$ ratio according to satellite measurements of GUVI TIMED during the superstorm for almost three days. The response of the thermospheric composition of neutral gas to the processes developing at high latitudes of the Northern Hemisphere on May 10–15, 2024 was global, with penetration of the thermospheric disturbance at almost all longitudes up to the equatorial latitudes ($\sim 10^\circ N$) and with very low values of the $[O]/[N_2]$ ratio $\sim 0.1 \div 0.4$. Significant differences in the spatiotemporal variations of the thermospheric composition of neutral gas were revealed during the most extreme geomagnetic storms of the current 21st century — in May 2024 and October–November 2003 (Halloween storms). The magnetic superstorm in May 2024 was much more geoeffective than the superstorms in October–November 2003, and caused a significantly different ionospheric response at different longitudes and latitudes of the Northern Hemisphere.

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

ВВЕДЕНИЕ

В статье приводятся результаты исследования термосферных и ионосферных эффектов, обусловленных сильнейшим ($Dst = -406$ нТл) геомагнитным возмущением 10–11 мая 2024 г. текущего 25-го цикла солнечной активности и текущего столетия. Следуя почину коллег, авторов работы [Chernyshov et al., 2025], мы будем называть это выдающее событие в солнечно-земной физике «геомагнитной бурей Дня Победы 2024 г.», поскольку солнечные вспышки, которые привели к значительным возмущениям ионосферы Земли, произошли 8–9 мая 2024 г. Это частая

практика — называть такие экстремальные геомагнитные бури в честь дней, когда произошли, к примеру, солнечные вспышки, корональные выбросы массы или наблюдался максимальный эффект в ионосфере (например, буря на Хэллоуин 2003 г., геомагнитная буря в день Святого Патрика 2015 г. и т. д.). «День Победы — праздник, который отмечает победу Советского Союза над нацистской Германией 8 мая (9 мая по московскому времени) в 1945 г. Многие страны также отмечали 8 или 9 мая День Победы или День Европы. «После огромных человеческих потерь во время войны по всему миру День

Победы стал поводом для всемирного празднования» [Chernyshov et al., 2025].

За всю историю наблюдений самой сильной была магнитная буря 2 сентября 1859 г. (Carrington Event — событие Кэррингтона) с оценочными значениями Dst от -850 до -1760 нТл. Самая интенсивная геомагнитная буря прошлого столетия наблюдалась 13–15 мая 1921 г. (расчетное значение $Dst = -907 \pm 132$ нТл). Такие низкие значения Dst -индекса делают эти два события крупнейшими событиями современности.

С момента начала расчета индекса Dst в 1957 г. [Sugiura, Kamei, 1991] самым сильным было геомагнитное возмущение 13 марта 1989 г. (Quebec Event — Квебекское событие) с минимальным значением $Dst = -589$ нТл. В период с 1957 г. до окончания 20 столетия только три магнитные бури (13 сентября 1957 г., 11 февраля 1958 г., 15–16 июля 1959 г.) имели сопоставимые минимальные значения Dst . Геомагнитная буря 11 февраля 1958 г., которая сопровождалась знаменитым планетарным среднеширотным сиянием, характеризовалась минимальным значением Dst -индекса -426 нТл.

Самыми сильными в первые два десятилетия XXI в. были магнитные бури, наблюдавшиеся осенью 2003 г., 29–31 октября ($Dst = -401$ нТл) (Halloween storm — буря на Хэллоуин) и 20 ноября ($Dst = -472$ нТл), и относившиеся к супербурям уровня G5 [Gopalswamy et al., 2005].

Таким образом, магнитная буря в мае 2024 г. стоит в ряду самых сильных магнитных бурь за всю историю наблюдений. Геомагнитное событие такой высокой интенсивности, несомненно, вызвало огромный интерес у исследователей атмосферно-ионосферно-магнитосферных связей. Ожидаемыми последствиями воздействия мощнейшего магнитного возмущения на Землю могли быть проблемы с обеспечением надежности радио- и сотовой связи, навигации и локации (ухудшение работы GPS и высокочастотной связи может привести к дезориентации транспортных средств — судов, самолетов и др.), с функционированием энергосистем. В зону воздействия геомагнитной бури входят трубопроводы, железнодорожные пути и линии электропередач. Губительно влияют потоки высокоэнергетических частиц солнечного ветра и излучения подвергается оборудование космических спутников различного назначения, в том числе системы обеспечения жизнедеятельности космонавтов, оказавшихся на орбите в период гелиогеомагнитного возмущения. В качестве свежего примера можно привести ситуацию с умеренной магнитной бурей класса G2 2–3 февраля 2022 г., после которой фактически были выведены из строя 40 из 49 запущенных за несколько дней до этого спутников Starlink [Berger et al., 2023].

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 по-

лучения данных, характеризующих это исключительное природное событие. Кроме того, близость события к летнему солнцестоянию в Северном полушарии означала, что многие оптические приборы не работали из-за отсутствия подходящих неосвещенных (темных) условий [Grandin et al., 2024; Hayakawa et al., 2025]. Были сформированы сводные отчеты почти семи сотен гражданских ученых из более чем 30 стран. На основе анализа собранных данных сделаны 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. Это было значительно ближе к экватору, чем прогнозировалось моделями овалов полярных сияний, к примеру моделью OVATION Prime model [Newell et al., 2014; Grandin et al., 2024].

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 субавроральной ионосферы является главный ионосферный провал (ГИП) ионизации. Минимум ГИП расположен не более чем на 5° экваториальнее границы аврорального овала [Rodger et al., 1992; Aladjev et al., 2001; Карпачев, 2003; Деминов, Шубин, 2018; Karpatchev, 2021].

Кроме практического интереса, обусловленного влиянием геомагнитных возмущений высшего уровня интенсивности на условия жизнедеятельности и состояние здоровья человека, такого класса события вызывают огромный интерес с научной точки зрения. В периоды магнитных бурь в ионосфере развивается целый комплекс сложных процессов (ионосферные бури, отрицательные и положительные), в результате которых существенно изменяются ее параметры [Matsushita, 1959; Pröls, 1995; Rishbeth, 1998; Buonsanto, 1999; Mikhailov, 2000]. Причиной возмущений в ионосфере Земли в первую очередь является последовательность взаимосвязанных событий, начинающаяся с проявления 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. Развитие отрицательных и положительных эффектов ионосферных бурь сильно зависит от местного времени, сезона, географического региона [Pröls, 1995; Rishbeth, 1998; Buonsanto, 1999; Mendillo, 2006; Burešová et al., 2007; Ratovsky et al., 2020].

Высыпания высокоэнергетических заряженных частиц из магнитосферы в ионосферу, интенсивные электрические поля и токи являются одними из основных механизмов формирования различных струк-

турных образований и неоднородностей в крупномасштабной структуре высокоширотной ионосферы в периоды повышенной геомагнитной активности. Усиление токов в западном направлении в области высоких широт в периоды магнитных бурь индуцирует движение нейтрального газа на высотах термосферы (ветры), которые перераспределяют нейтральный состав атмосферы по большей части региона высоких широт и части региона средних широт. Процессы в нейтральной атмосфере являются неотъемлемой частью сложной последовательности электродинамических и химических процессов, развивающихся в системе ионосфера—термосфера в периоды гелиогеомагнитной активности. Выше уровня турбопаузы (около 120 км) начинается диффузионное разделение атмосферных газов. Чем выше, тем большее количество кислорода находится в атомарном состоянии. На высотах 200–300 км и выше преобладающим становится атомарный кислород, который как более легкий газ подвержен более сильному переносу по сравнению с молекулярным азотом. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению отношения $[O]/[N_2]$ на высотах верхней атмосферы и, как следствие, к отрицательным возмущениям электронной концентрации в F-области ионосферы [Danilov, 2003; Laštovička, 2002; Liou et al., 2005; Pröls, Werner, 2002].

В работах [Chernigovskaya et al., 2021; Черниговская и др., 2023, 2024а, б] были выполнены комплексные исследования пространственно-временных вариаций геомагнитных, ионосферных и атмосферных параметров в области средних и высоких широт Северного полушария в период экстремальных магнитных бурь в марте и июне 2015 г. и серии магнитных бурь в марте 2012 г. и октябре 2016 г. Для анализа использовались данные вертикального зондирования о концентрации электронов в ионосфере, полученные с помощью ионозондов евразийских высоко- и среднеширотных цепей; данные о полном электронном содержании (ПЭС), полученные по измерениям на цепях высоко- и среднеширотных двухчастотных фазовых приемников GPS/ГЛОНАСС, а также спутниковые данные об отношении концентраций $[O]/[N_2]$ в столбе термосферного газа выше 100 км ультрафиолетового (УФ) спектрометра GUVI (Global Ultraviolet Imager) TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics). Совместный анализ данных наземных и спутниковых радиофизических и спектрометрических измерений позволил получить очень интересные результаты, свидетельствующие о наличии существенных долготных и широтных различий ионосферных параметров, связанных с образованием обширных областей термосферного газа с пониженным отношением $[O]/[N_2]$. Эти возмущенные активные области нейтрального газа, охватывающие не только высокие, но и средние широты, формируются в нижней термосфере полярных широт в ночном секторе при протекании сильной западной электроструи на главной фазе магнитной бури и имеют волнообразную про-

странственную структуру. За счет высокой частоты столкновений молекулярных ионов и нейтралов такая волна приобретает большие масштаб и импульс и перемещается в западном направлении на большие расстояния. После окончания магнитной бури и «выключения» магнитосферного источника возмущения в авроральных широтах области термосферного газа с пониженным отношением $[O]/[N_2]$ еще нескольких суток продолжают по инерции движение на запад, вызывая вариации концентрации электронов вдоль траектории распространения. Таким образом, эффект ионосферной бури может продолжаться еще несколько дней после окончания магнитной бури, поскольку возмущения состава нейтрального газа, запущенные в процессе развития магнитной бури и приводящие в итоге к вариациям электронной концентрации в ионосфере, все еще продолжают.

В настоящей работе мы продолжаем наши исследования и выполняем по разработанным ранее методикам комплексный анализ пространственно-временных особенностей ионосферных неоднородностей над Евразией на основе данных ионозондовых измерений для экстраординарной по интенсивности магнитной бури в мае 2024 г. Актуальным и интересным является проведенный в настоящем исследовании сравнительный анализ характера отклика состава нейтрального термосферного газа на самые интенсивные геомагнитные возмущения текущего 21-го столетия, а также ионосферных эффектов, наблюдавшихся в электронной концентрации в периоды супербури 2024 и 2003 гг.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для анализа пространственно-временных вариаций ионосферных параметров в период экстремального геомагнитного возмущения в мае 2024 г. используются данные о среднечасовых (либо часовых — для ионозондов в Новосибирске и Калининграде) значениях критической частоты f_oF_2 слоя F2 ионосферы, полученные с помощью средне- и высокоширотных цепей ионозондов. Высокоширотная цепь состоит из шести ионозондов, расположенных в диапазоне широт $67\text{--}71^\circ$ N (геомагнитные широты $58^\circ < GMlat < 64^\circ$ N) в долготном секторе $26\text{--}129^\circ$ E Евразийского континента (рис. 1, красные метки; табл. 1). Цепь составляют ионозонды российских научных организаций: DPS-4 (ИСЗФ СО РАН, ИКФИА СО РАН) в пунктах «Норильск», «Жиганск» [Reinisch et al., 1997] и CADI (АНИИ Росгидромета) в пунктах «Ловозеро», «Салехард», «Тикси» [MacDougall et al., 1995; Выставной и др., 2013; Калишин и др., 2020]. Используются также данные ионозонда SO166 (Alpha Wolf) [Enell et al., 2016] в Геофизической обсерватории «Соданколя» (Финляндия).

Среднеширотную цепь составляют восемь ионозондов, расположенных в диапазоне широт $52\text{--}62^\circ$ N

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

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



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

(геомагнитные широты $42^\circ < \text{GMlat} < 54^\circ \text{ N}$) в долготном секторе $13\text{--}158^\circ \text{ E}$ (см. рис. 1, белые метки и подписи; табл. 2): четыре цифровых ионозонда DPS-4 различных модификаций (ИКФИА СО РАН, Якутск; ИСЗФ СО РАН, Иркутск; ИЗМИРАН, Москва; Институт атмосферной физики, Юлиусру, Германия) [Reinisch et al., 1997], три ионозонда «Парус» различных модификаций (ИКИР ДВО РАН, Паратунка; ИГФ УрО РАН, Екатеринбург; 3Ф ИЗМИРАН, Калининград) [Krasheninnikov et al., 2010] и «Ионозонд-МС» (Новосибирск) [Подлесный и др., 2013].

По взаимному договору участников исследования все ионограммы за анализируемые даты обрабатывались вручную, чтобы избежать ошибок, возможных

при автоматической обработке. Данные измерений ионозондов в Юлиусру [<https://giro.uml.edu/didbase/scaled.php>] и Соданкюля [<https://www.sgo.fi/Data/Ionosonde/ionData.php>], взятые с сайтов, представлены в вариантах автоматической обработки без ручной проверки. 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.

В данной работе использовалась методика подготовки и обработки исходных данных вертикального зондирования, разработанная и проанализированная ранее в работе [Shrynev et al., 2018]. Эта методика неоднократно использовалась при анализе ионосферных возмущений на основе данных радиофизических измерений на средне- и высокоширотных цепях ионозондов [Chernigovskaya et al., 2021; Черниговская и др., 2023, 2024a, 6]. Первичные данные ионозондов различных типов приводились к единому формату для их дальнейшей обработки. Для каждого ряда исходных данных вычислялись фоновые величины путем усреднения экспериментальных значений $f_oF_2(t)$ 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 $f_oF_2(t)$ рассчитывались ряды отклонений от фонового уровня. Относительные отклонения критической частоты — $df_oF_2(t)$ (в долях единицы) — рассчитывались как отклонения текущих значений $f_oF_2(t)$ от фонового (усредненного) уровня, отнесенные к усредненному значению.

В анализируемый период магнитной бури с 9 по 15 мая 2024 г. были периоды отсутствия данных измерений по техническим причинам: в Екатерин-

бурге (с 14:00 UT 11 мая до 02:30 UT 12 мая 2024 г.; с 09:45 UT 13 мая до 08:15 UT 14 мая 2024 г.); в Салехарде (с 11 до 13 UT 15 мая 2024 г.); в Жиганске (до 11 мая 2024 г.). В Якутске отмечалась крайне нестабильная работа ионозонда DPS-4, поэтому данные измерений весьма фрагментарны.

Как и в предыдущих исследованиях по данным измерений среднеширотной цепи ионозондов [Chernigovskaya et al., 2021; Черниговская и др., 2024а, б], для анализа эффектов магнитной бури в вариациях максимума электронной концентрации используется критическая частота f_oF2 [МГц] слоя F2, которая связана с максимальной электронной концентрацией F-области N_mF2 [м⁻³] формулой [Поляков и др., 1968]

$$N_mF2 = 1.24 \times 10^{10} \times (f_oF2)^2.$$

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 УФ-спектрометра GUVI на космическом аппарате TIMED [Christensen et al., 2003; <http://guvitimed.jhuapl.edu/guvi-gallery3on2>].

ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОЙ БУРИ В МАЕ 2024 Г.

Причиной развития сильнейшего в текущем столетии геомагнитного возмущения 10–12 мая 2024 г. стала повышенная активность Солнца после длительного периода низкой активности. С 8 по 11 мая 2024 г. на Солнце произошли несколько мощных солнечных вспышек в активной области 3664: 8 мая 2024 г. — вспышка класса X1.0 и несколько вспышек класса M; 9 мая — вспышки классов X2.25 и X1.12; 10 мая — вспышка класса X3.98; 11 мая в 01:23 UTC — еще одна вспышка класса X магнитудой 5.4–5.7 [SWPC PRF 2541, 2024]. С 10 по 12 мая 2024 г. по меньшей мере семь корональных выбросов массы (CMEs — coronal mass ejections), связанных с вышеупомянутыми солнечными вспышками [SWPC PRF 2541, 2024], достигли Земли и вызвали продолжительную сильнейшую геомагнитную бурю. Прохождение межпланетной ударной волны наблюдалось 10.05.2024 в 16:39 UTC. Оставшуюся часть суток 10 мая B_z -компонента межпланетного магнитного поля (ММП) была направлена к югу и временами опускалась до –50 нТл. Скорость солнечного ветра с приходом ударной волны возросла с 450 до 700 км/с, достигнув максимального значения около 1000 км/с 12 мая в 00:57 UTC [SWPC PRF 2541, 2024].

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 (Sudden Storm Commencement, SSC) показано на рисунке верти-

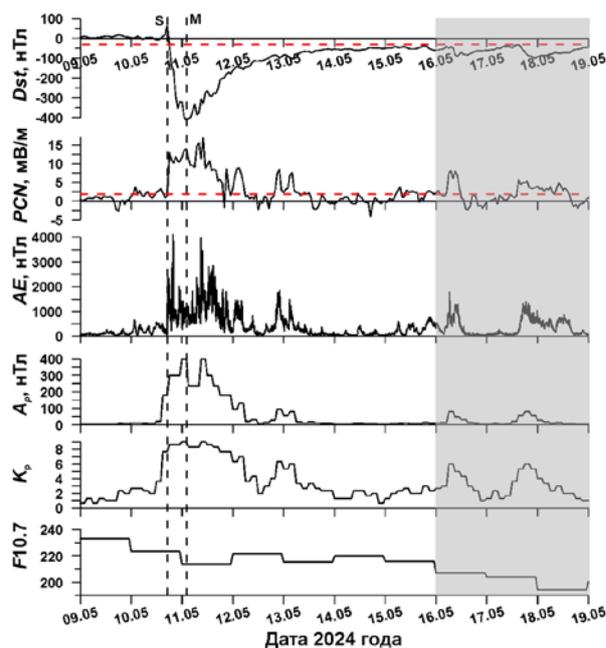


Рис. 2. Вариации индексов геомагнитной и солнечной активности. Пороговые буревые уровни значений Dst и PCN показаны красными горизонтальными штриховыми линиями. Вертикальными штриховыми линиями отмечены момент начала бури (с буквой «S») и момент максимума интенсивности магнитной бури (с буквой «M»)

кальной штриховой линией с буквой «S». К 21:00 UT интенсивность геомагнитного возмущения достигла экстремального уровня (Dst -индекс от –200 до –350 нТл по классификации бурь [Loewe, Pröls, 1997]) и категории G4 ($K_p=8$ по классификации NASA [<https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>]), а через час, в 22:00 UT, буря достигла класса «великая (great), супербуря» (Dst -индекс ниже –350 нТл) и категории G5, экстремальной (см. графики Dst и K_p на рис. 2). После полуночи с 10 на 11 мая магнитная буря усилилась до максимального уровня и в 02:00 UT индекс Dst понизился до –412 нТл (показано вертикальной штриховой линией с буквой «M» на рис. 2) по данным сайта World Data Center for Geomagnetism (WDC), Kyoto [<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>]. K_p -индекс достиг 9, индекс A_p в максимуме бури поднялся до 400 нТл. Главная фаза бури длилась ~9 ч. Уместно упомянуть, что позже, в 2025 г., на сайте WDC, Kyoto, значение индекса Dst было уточнено и исправлено на –406 нТл.

Поскольку в данной работе мы анализируем геомагнитные эффекты средне- и высокоширотной ионосферы, дополнительно к геомагнитным индексам Dst , K_p , A_p мы используем индексы геомагнитной активности в полярной шапке AE и PCN (см. рис. 2). AE характеризует магнитную возмущенность, обусловленную усилением протекающих вдоль границы аврорального овала токов в ионосфере (восточного и западного полярных электроджетов). Унифицированный PC -индекс характеризует величину геоэффективного межпланетного электрического поля, воздействующего на магнитосферу, а также ди-

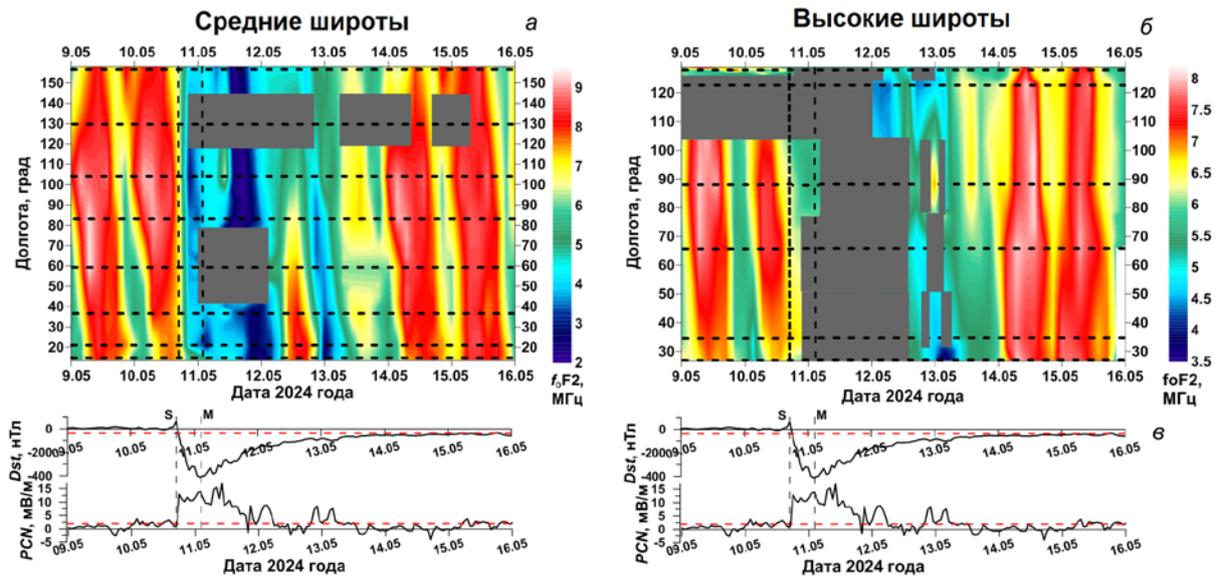


Рис. 3. Долготно-временные (UT) вариации критической частоты f_oF2 по данным средне- (а) и высокоширотной (б) цепей ионозондов, а также вариации индексов Dst и PCN (в)

намическое давление солнечного ветра [Troshichev, Sormakov, 2018].

Обращает на себя внимание (см. рис. 2) значительный рост AE -индекса до 4098 нТл в 19:48 UT (по данным, представленным Отделом геофизики ААНИИ, Санкт-Петербург) и PCN -индекса до 13–14 мВ/м практически сразу после SSC в 17:00 UT с дальнейшим ростом до 14 мВ/м в момент максимума бури (по данным Мирового центра данных по солнечно-земной физике, Москва [http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagn_PC_ind.ru.html]). Существенный рост индекса PCN указывает на усиление солнечно-ветровых драйверов бури [Troshichev, Sormakov, 2018; Калишин и др., 2020]. Хорошая корреляция между усилениями PCN и AE свидетельствует о том, что межпланетное электрическое поле и динамическое давление солнечного ветра с высокой геоэффективностью воздействовали на ионосферу и магнитосферу в полярном регионе. Это привело к существенному усилению протекающих вдоль границы аврорального овала токов в ионосфере — восточно-полярного электроджета ($AE > 0$).

Дополнительные всплески геомагнитной активности отмечались на восстановительной фазе бури: в 9±10 UT 11 мая, при смене суток по мировому времени 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 CMEs от последовательности солнечных вспышек 9, 10 и 11 мая 2024 г. [SWPC PRF 2541, 2024]. В вариациях Dst -индекса усиления в эти периоды не были отмечены, что, возможно, связано с геометрией потоков солнечного ветра. Поворот активной области 3664 от линии Солнце–Земля после 9 мая [SWPC PRF 2541, 2024] направил новые выбросы корональной массы в сторону от Земли, и они лишь по касательной заделали земную магнитосферу.

Индекс солнечной активности $F10.7$ (поток радиоизлучения с длиной волны 10.7 см (2800 МГц))

изменялся от 233 с.е.п. 09.05.2024 до 216 с.е.п. 15 мая 2024 г. (1 с.е.п. (солнечная единица потока) = 10^{-22} Ватт·м⁻²·Гц⁻¹) [<http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act/flux10.7/daily/>]. Это соответствовало фазе роста солнечной активности в текущем 25-м цикле, максимум которой был достигнут в августе 2024 г.

Пороговые буревые уровни значений $Dst = -30$ нТл [Loewe, Prölss, 1997] и $PCN \sim 2$ мВ/м [Troshichev, Sormakov, 2018] показаны горизонтальными штриховыми линиями на рис. 2. По этим уровням можно видеть, что восстановительная фаза супербури длилась почти пять 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.

ДОЛГОТНО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ f_oF2 ВЫСОКО- И СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ НАД ЕВРАЗИЕЙ В ПЕРИОД ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ ДНЯ ПОБЕДЫ 2024 Г.

Рисунок 3 показывает долготно-временные вариации критической частоты f_oF2 по данным измерений средне- (рис. 3, а) и высокоширотной (рис. 3, б) цепей ионозондов для периода 9–15 мая 2024 г. Горизонтальные штриховые линии на картах рис. 3, а, б показывают долготы расположения ионозондов высоко- (см. рис. 1, табл. 1) и среднеширотной (см. рис. 1, табл. 2) цепей с запада Евразии на восток (соответственно, снизу вверх). Серыми прямоугольниками отмечены периоды отсутствия данных по техническим причинам или вследствие блэкаутов (blackout — отключение, затухание) радиосигналов ионозондов. На нижних панелях (рис. 3, в) показаны вариации индексов Dst и PCN в период магнитной бури. Красные

горизонтальные штриховые линии обозначают пороговые уровни $Dst \leq -30$ нТл и $PCN \geq 2$ мВ/м, начиная с которых условия геомагнитной возмущенности относят к буревым. Вертикальными штриховыми линиями на верхних и нижних панелях показаны моменты SSC (обозначен буквой «S») и максимальной интенсивности бури (обозначен буквой «M»).

При сравнении f_oF2 (соответственно, и N_mF2) над Евразией в средних (рис. 3, а) и высоких (рис. 3, б) широтах прежде всего обращают на себя внимание различия в общем уровне f_oF2 и величине размаха суточных вариаций в спокойных условиях (до начала бури). Это связано с различной сезонной освещенностью высоких и средних широт. Высокоширотные ионозонды в Соданкюля, Салехарде, Жиганске расположены на широте Северного полярного круга (66.6° N), выше которой бывает полярный день или полярная ночь. Для высокоширотных ионозондов анализируемый период 9–15 мая 2024 г. ближе по условиям освещенности к летнему сезону, чем к равноденственному. На высотах ионосферы Солнце в летний период практически не заходит, что ведет к ослаблению выраженности перехода регулярных вариаций ионосферных параметров ото дня к ночи. Соответственно, суточный ход f_oF2 выражен гораздо слабее, чем в условиях равноденствия. Для средних широт f_oF2 изменялась от 6–7 до 9 МГц (см. рис. 3, а), для высоких широт — от 6 до 8 МГц (см. рис. 3, б).

Изменчивость f_oF2 вследствие роста магнитной возмущенности (в условиях развития ионосферной бури) в высокоширотной ионосфере также меньше, чем в средних широтах, даже в случае такой экстремальной по интенсивности магнитной бури. Подобные эффекты в ионосфере на разных широтах отмечались в работах [Araujo-Pradere et al., 2005; Chernigovskaya et al., 2021; Черниговская и др., 2024a, б]. В работе [Araujo-Pradere et al., 2005] на основе большого массива данных наблюдений 75 ионозондов, охватывающих широкий диапазон геомагнитных широт и включающих 43 буревых интервала, выполнен статистический анализ изменчивости f_oF2 в зависимости от местного времени, широты, сезона и геомагнитной активности. Согласно выводам авторов, неожиданным результатом стало то, что в высоких широтах во все времена года изменчивость f_oF2 имела тенденцию к уменьшению с ростом возмущенности, вероятно, из-за увеличения высоты подъема нейтральных молекулярных компонентов и более сильного химического контроля ионосферы. В отличие от высоких широт, в средних и низких широтах изменчивость f_oF2 имела тенденцию к увеличению с ростом геомагнитной активности зимой и в дни равноденствия и оставалась довольно постоянной летом.

Практически сразу после SSC вечером 10 мая 2024 г. в 17:00 UT по данным измерений всех ионозондов, независимо от местного времени в пункте измерения, зарегистрировано резкое падение электронной концентрации N_mF2 (соответственно, и f_oF2) на высоте максимума F2-слоя, которое продолжа-

лось всю главную фазу бури (см. рис. 3, а, б). К моменту максимальной интенсивности бури в 02:00 UT 11 мая 2024 г. ($Dst = -412$ нТл, вертикальная штриховая линия с буквой «M» на рис. 3, в) f_oF2 уменьшилась до 2–3 МГц по данным среднеширотных ионозондов в Паратунке, Иркутске, Новосибирске, Москве, Калининграде, Юлиусру (см. рис. 3, а). Ионозонд DPS-4 в Якутске с наступлением геомагнитной бури работал очень нестабильно (см. рис. 3, а). Ионозонд в Екатеринбурге на этапе достижения максимальной интенсивности магнитной бури показывал полное отсутствие данных (так называемый блэкаут). Затем последовали технические проблемы в работе ионозонда «Парус-3.0» в Екатеринбурге (с 14:00 UT 11 мая до 2:30 UT 12 мая 2024 г.) (см. рис. 3, а).

Ионограммы практически всех высокоширотных ионозондов (за исключением ионозонда DPS-4 в Норильске) показывали полное отсутствие радиосигналов всю главную фазу магнитной бури (см. рис. 3, б). Вскоре после максимума интенсивности бури наблюдался блэкаут и по данным норильского ионозонда. Напомним, что ионозонд DPS-4 в Жиганске не работал по техническим причинам до 11 мая 2024 г.

Дополнительный всплеск геомагнитной активности в период смены суток с 11 на 12 мая, зарегистрированный на восстановительной фазе бури в вариациях индексов PCN , AE , A_p , K_p (см. рис. 2 и 3, в), также сопровождался существенным уменьшением электронной концентрации в средних широтах по измерениям ионозондов на всех долготах Восточного полушария — над Паратункой, Иркутском, Новосибирском, Москвой, Калининградом, Юлиусру, за исключением Якутска и Екатеринбурга, где имелись технические проблемы в работе ионозондов. Это было даже более продолжительное отрицательное ионосферное возмущение, чем наблюдавшееся на главной фазе магнитной бури, — с полудня 11 мая примерно до 06 UT 12 мая. Зарегистрировано падение критической частоты f_oF2 до 2–3 МГц (см. рис. 3, а), т. е. до значений, наблюдавшихся на главной фазе супербури 10–11 мая 2024 г.

После этого, согласно данным ионозондов в Екатеринбурге (f_oF2 до ~ 7 МГц), в Москве, Калининграде, Юлиусру (f_oF2 до ~ 8 МГц), в околополуденные часы 12 мая 2024 г. в условиях местного дня над среднеширотным регионом Восточной и Западной Европы произошло временное восстановление электронной концентрации до уровня невозмущенных условий 9–10 мая 2024 г. (см. рис. 3, а). Однако регионы Восточной Сибири и Дальнего Востока Евразии, где были вечерние и ночные условия, продолжали оставаться в фазе отрицательной ионосферной бури ($f_oF2 \sim 4-5$ МГц, рис. 3, а).

Еще один всплеск геомагнитной возмущенности был зарегистрирован в период смены суток с 12 на 13 мая 2024 г. (индексы PCN , AE , A_p , K_p на рис. 2 и 3, в). Индекс Dst геомагнитной активности к этому времени уже поднялся до значений -98 нТл (в 22 UT 12 мая). Это усиление геомагнитной возмущенности, связанное с приходом на Землю очередного выброса

корональной массы от последовательности солнечных вспышек 9–11 мая 2024 г., вновь привело к резкому падению восстановившейся в дневные часы 12 мая 2024 г. электронной концентрации. На несколько часов в начале суток 13 мая 2024 г. над долготами Европы (по данным ионозондов в Юлиусру, Калининграде, Москве, Екатеринбурге) и Западной Сибири (по данным ионозонда в Новосибирске) f_oF2 понизилась до $\sim 2\text{--}3$ МГц (см. рис. 3, а). На долготах среднеширотной Восточной Сибири и Дальнего Востока эффект отрицательной ионосферной бури наблюдался всю главную фазу бури в первые часы 11 мая 2024 г. и затем на восстановительной фазе остаток суток 11 мая, 12 мая и первую половину 13 мая, т. е. двое с половиной суток (см. рис. 3, а).

При обсуждении отрицательного отклика в среднеширотной ионосфере в периоды геомагнитных возмущений следует обязательно принимать во внимание хорошо известный эффект расширения и смещения из полярных регионов к югу провалов ионосферной ионизации и других структур высокоширотной ионосферы. Границы ГИП и других ионосферных провалов ионизации (кольцевого, высокоширотного и др.), а также зоны высыпания частиц смещаются в средние широты, возрастают градиенты электронной концентрации на их границах, формируются спорадические ионосферные слои. Среднеширотные ионозонды в такие периоды регистрируют ионограммы субаврорального типа [Мамруков и др., 2000]. Очевидно, что в период анализируемой магнитной бури ГИП сместился значительно южнее геомагнитных широт $42^\circ < \text{GMlat} < 54^\circ \text{ N}$, на которых расположены ионозонды среднеширотной евразийской цепи [Danilchuk et al., 2025; Пономарчук и др., 2025]. Это подтверждается многочисленными визуальными наблюдениями полярных сияний в регионах, расположенных существенно южнее этих широт [Grandin et al., 2024].

Со второй половины 13 мая на всех долготах среднеширотного региона Евразии начался рост электронной концентрации до предбурового уровня ($f_oF2 \sim 7$ МГц). В конце восстановительной фазы магнитной бури 14–15 мая 2024 г. отмечались повышенные значения электронной концентрации в среднеширотной ионосфере над Евразией (см. рис. 3, а). Подобный рост электронной концентрации можно отнести к эффекту ионосферного последействия [Klimenko et al., 2018; Ратовский и др., 2018].

Численные расчеты с помощью модели ГСМ ТИП (Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы) [Namgaladze et al., 1988; Klimenko et al., 2018], а также статистический анализ данных среднеширотных ионозондов в Иркутске и Калининграде [Ратовский и др., 2018] показали, что причиной положительных возмущений электронной концентрации, наблюдавшихся в дневное время через несколько дней после начала восстановительной фазы магнитной бури, может быть увеличение концентрации атомарного кислорода за счет его переноса от экваториальных широт к средним на поздней восстановительной фазе [Klimenko et al., 2018]. В свою очередь, этот перенос

обусловлен дополнительным градиентом давления нейтрального газа от низких широт к высоким, возникающим в результате появления избыточной плотности нейтрального газа на низких широтах в главную фазу геомагнитной бури за счет переноса кислорода от авроральных широт в сторону экватора. Значения электронной концентрации при этом могут превышать уровень спокойных дней до начала магнитного возмущения. Авторы сравнивают возмущение $[O]/[N_2]$, равно как и возмущение электронной концентрации, с колебанием маятника, который переходит из отрицательной фазы в положительную в течение нескольких дней после начала фазы восстановления бури.

Ионозонды высокоширотной цепи (Норильск, Салехард, Ловозеро, Соданкюля) показывали полное отсутствие данных (блэкаут радиосигналов), начиная с последних часов 10 мая и первых часов 11 мая 2024 г. (главная фаза бури) вплоть до вечера 12 мая 2024 г. (восстановительная фаза), т. е. более полутора суток (см. рис. 3, б). Период блэкаута радиосигналов по данным ионозонда в Тикси был чуть менее продолжительным, до утра 12 мая 2024 г. Заработавший в начале суток 12 мая 2024 г. ионозонд в Жиганске показал очень низкие по сравнению со спокойными днями до бури значения f_oF2 — $3.5 \div 4$ МГц. Столь продолжительный период блэкаута радиосигналов включал периоды дополнительных всплесков геомагнитной активности, наблюдавшихся по вариациям индексов PCN , AE , A_p , K_p (см. рис. 2 и 3, в) с предполуденных часов 11 мая примерно до 06 UT 12 мая 2024 г. Блэкауты радиосигналов по данным ионозондов могут быть вызваны как сильным падением электронной концентрации в F-области ионосферы, так и аномальным увеличением поглощения радиоволн на высотах нижней ионосферы.

Вечером 12 мая 2024 г. все ионозонды высокоширотной цепи начали фиксировать низкие значения электронной концентрации ($f_oF2 \sim 4 \div 5$ МГц; см. рис. 3, б). Еще один всплеск геомагнитной возмущенности на восстановительной фазе магнитной бури в период смены суток с 12 на 13 мая 2024 г. (индексы PCN , AE , A_p , K_p на рис. 2 и 3, в) на несколько часов вновь привел к блэкауту радиосигналов ионозондов в Тикси, Норильске, Салехарде, Ловозеро (см. рис. 3, б), за исключением ионозондов в Жиганске и Соданкюля. Если над Западной Европой по данным ионозонда в Соданкюля наблюдалась очень низкая электронная концентрация ($f_oF2 \sim 3.5 \div 4$ МГц) (см. рис. 3, б), то на долготе высокоширотной Восточной Сибири ионозонд в Норильске показал возросшие значения электронной концентрации ($f_oF2 \sim 6.5 \div 7$ МГц; см. рис. 3, б). Вспомним, что в этот временной период электронная концентрация в долготном секторе средних широт Западной Сибири, Восточной и Западной Европы (см. рис. 3, а) была также ниже, чем на долготах Восточной Сибири и Дальнего Востока. В целом эффект отрицательной ионосферной бури наблюдался над высокоширотным регионом Евразии, так же как над регионом средних широт, в течение двух с половиной суток — с начала 11 мая до первой половины 13 мая

включительно (см. рис. 3, б), т. е. всю главную фазу и часть восстановительной фазы магнитной супербури.

Со второй половины 13 мая на долготах Восточной Сибири и Дальнего Востока высокоширотного региона Евразии началось восстановление электронной концентрации ($f_oF2 \sim 6 \div 6.5$ МГц). В долготном секторе Западной Сибири, Восточной и Западной Европы (см. рис. 3, б) электронная концентрация была ниже ($f_oF2 \sim 5 \div 6$ МГц). Возможно, это различие связано с разницей в местном солнечном времени, поскольку в восточном долготном секторе местный день начинается раньше, чем в западном.

В конце восстановительной фазы магнитной бури 14–15 мая 2024 г. на всех долготах высокоширотного региона Евразии начался рост электронной концентрации до предбуревого уровня ($f_oF2 \sim 6.5 \div 7.5$ МГц) (см. рис. 3, б). Отмечался период повышенной электронной концентрации в высокоширотной ионосфере (см. рис. 3, б), когда в ночное время не наблюдалось уменьшения электронной концентрации до значений в невозмущенных условиях до наступления супербури. Размах суточных вариаций f_oF2 составлял всего ~ 1 МГц (с 6.5 до 7.5 МГц), тогда как до SSC суточная вариация f_oF2 составляла ~ 2.5 МГц (с 5 до 7.5 МГц; см. рис. 3, б). Таким образом, на всех долготах Евразии в области высоких широт (см. рис. 3, б), так же как и в средних широтах (см. рис. 3, а), ярко проявился эффект ионосферного последствия [Klimenko et al., 2018; Ратовский и др., 2018], причем рост электронной концентрации над высокоширотным регионом выражался ярче, чем над среднеширотным, что является необычным и очень интересным. Здесь возникает вопрос о механизме этого явления. При эффекте ионосферного последствия магнитной бури, как полагают авторы [Klimenko et al., 2018; Ратовский и др., 2018], возрастание электронной концентрации должно происходить раньше и быть более выраженным в средних широтах, чем в высоких. Анализ же пространственно-временных вариаций f_oF2 по данным измерений высоко- и среднеширотной евразийских цепей ионозондов (см. рис. 3, а, б) показывает, что возрастание электронной концентрации началось с 14 мая 2024 г. практически одновременно в областях средних (см. рис. 3, а) и высоких (см. рис. 3, б) широт. Возможно, здесь сыграли роль вариации термодинамических параметров и состава термосферного газа непосредственно над высокоширотным регионом Евразии в восстановительную фазу магнитной бури.

Необходимо учитывать, что полное отсутствие на ионограммах высокоширотных ионозондов следов отражений радиосигналов (блэкаут) в главную и восстановительную фазы магнитной бури является результатом совместного действия механизмов падения электронной концентрации на высотах верхней ионосферы (отрицательные ионосферные бури, являющиеся доминирующей характеристикой ионосферного отклика на усиление геомагнитной активности) и аномального увеличения поглощения радиоволн на высотах нижней ионосферы. Известно,

что поглощение радиоволны в ионосфере пропорционально электронной концентрации и частоте столкновений электронов с нейтральными частицами. Во время геомагнитных возмущений оба эти параметра бывают очень велики на высотах нижней ионосферы (области D и E) в результате вторжения в ионосферу высоких широт энергичных частиц из магнитосферы вдоль силовых линий магнитного поля, интенсивной ионизации и нагрева плазмы. Распространению радиоволн до высоты максимума ионизации F2-слоя ионосферы могут препятствовать возникающие на высотах E-области (90–140 км) спорадические слои E_s. В высоких и средних широтах, особенно во время магнитных возмущений, эти слои появляются достаточно часто. Вследствие этого радиоволны средних и высоких частот, используемые при вертикальном зондировании, полностью поглощаются в нижних слоях ионосферы. Поэтому для более детального анализа ионосферных эффектов магнитных бурь необходимо рассматривать дополнительно вариации параметра f_{min} , характеризующего поглощение радиоволн на высотах нижней ионосферы в области D, а также параметр f_oE_s , характеризующий образование на высотах области E ионосферы экранирующих радиосигналы спорадических слоев. Подробный анализ вариаций этих параметров ионосферы по данным измерений евразийских цепей ионозондов в период супербури в мае 2024 г. представлен в работе [Черниговская и др., 2026].

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ [O]/[N₂] В СТОЛБЕ АТМОСФЕРНОГО ГАЗА НА ВЫСОТАХ ТЕРМОСФЕРЫ В ПЕРИОД ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ ДНЯ ПОБЕДЫ 2024 Г.

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 f_oF2 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 [Christensen et al., 2003]. Анализ относительных отклонений df_oF2 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 (момент SSC показан вертикальной штриховой линией на карте распределения и обозначен буквой «S» на рис. 4, в). Кроме того, такой анализ позволяет исключить возможную неоднозначность определения ионосферного параметра на ионозондах разного типа.

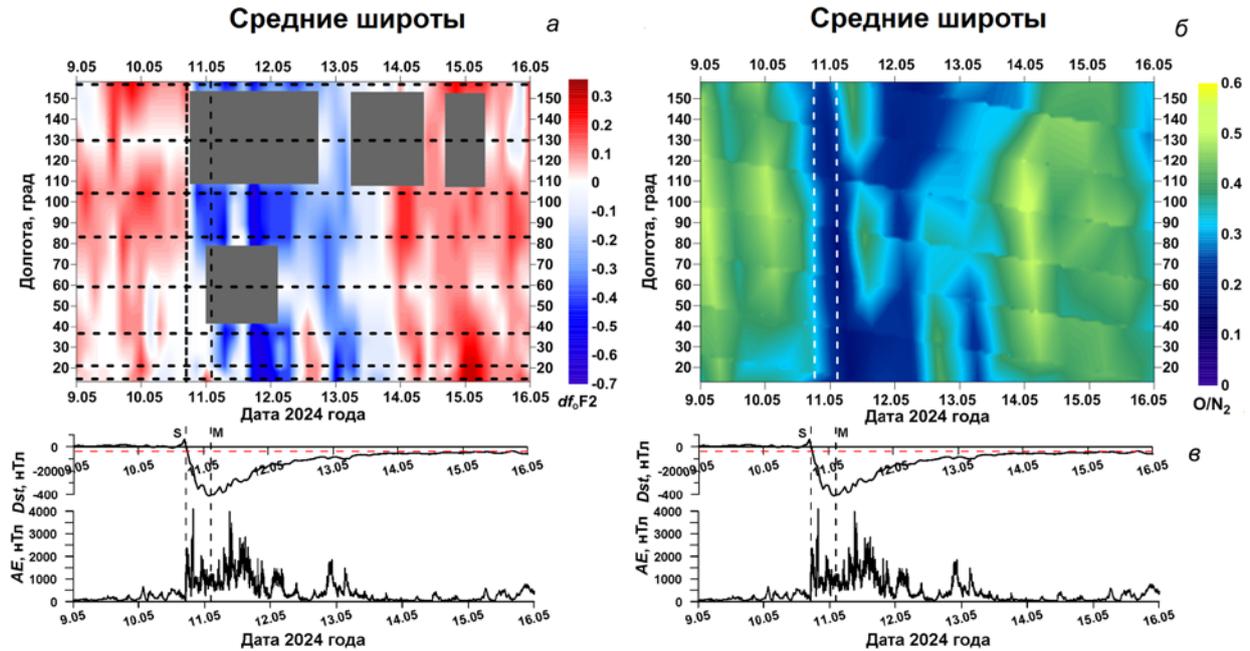


Рис. 4. Долготно-временные вариации df_{F2} по данным среднеширотной цепи ионозондов (а) и отношения $[O]/[N_2]$ по измерениям GUVI TIMED для региона средних широт (б) в мае 2024 г. (UT), а также вариации индексов Dst и AE (в)

К сожалению, спутниковые данные отношения $[O]/[N_2]$ для высокоширотного региона Евразии (60° – 65° N) отсутствуют, вероятно, в связи с особенностями наклона орбиты спутника TIMED либо с техническими проблемами измерений. Физический параметр $[O]/[N_2]$ является хорошим индикатором отрицательных фаз ионосферных бурь [Pröls, Werner, 2002; Laštovička, 2002; Danilov, 2003; Liou et al., 2005]. Следствием понижения $[O]/[N_2]$ в термосферном газе является уменьшение электронной концентрации в данной области и, соответственно, развитие отрицательной ионосферной бури.

Сложные и интенсивные электродинамические процессы, протекавшие в условиях супербури в полярных широтах (см. вариации индекса AE на рис. 4, в), привели к очень сильному уменьшению $[O]/[N_2]$ на высотах термосферы над всеми долготами среднеширотного региона Евразии в диапазоне 54° – 56° N (рис. 4, б), совпадающем с расположением ионозондов среднеширотной цепи. Анализируя долготно-временные вариации df_{F2} в регионе средних широт Восточного полушария по данным измерений с помощью 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. Долготно-временное распределение $[O]/[N_2]$ детально объясняет описанные ранее особенности отклика ионосферной плазмы на экстремальное геомагнитное возмущение. Во-первых, наблюдавшееся практически с момента внезапного начала магнитной супербури резкое и сильное понижение f_oF2 в ионосфере средних широт Евразии, которое составляло от 50 до 70 % от значений f_oF2 в спокойных условиях при сглаживании скользящим

средним по 27 дням. 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.

После завершения главной фазы бури над регионом Дальнего Востока (долготы 120° – 150° E) в условиях местного дня 11 мая 2024 г. образовалась область повышенного отношения $[O]/[N_2]$ до значений $0.3 \div 0.4$. Эта область медленно перемещалась к западу в направлении Восточной и далее Западной Сибири (долготы 50° – 100° E) в дневное местное время 11 мая 2024 г. Такое перемещение области повышенного (или пониженного) отношения $[O]/[N_2]$ к западу, обусловленное усилением нейтрального ветра в результате разогрева нейтрального газа на высотах нижней термосферы на главной фазе бури, подобно перемещению волнообразного возмущения молекулярного газа. О подобных перемещающихся к западу волнообразных возмущениях термосферного молекулярного газа сообщалось в работе [Chernigovskaya et al., 2021], в которой анализировался отклик ионосферы на экстремальную магнитную бурю св. Патрика в марте 2015 г.

Зарегистрированные по вариациям индексов PCN , AE , A_p , K_p (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). Это

было продолжительное отрицательное ионосферное возмущение — с полудня 11 мая примерно до 06 UT 12 мая. Зарегистрировано падение критической частоты f_oF2 до 2–3 МГц (см. рис. 3, *a*) и относительных отклонений df_oF2 до $-0.5 \div -0.7$ (см. рис. 4, *a*) над Паратункой, Иркутском, Новосибирском, Москвой, Калининградом, Юлиусру, за исключением Якутска и Екатеринбурга, где имелись технические проблемы в работе ионозондов. Отмечалось снижение электронной концентрации до значений, наблюдавшихся на главной фазе супербури 10–11 мая 2024 г.

После этого в условиях местного дня 12 мая 2024 г. над среднеширотными регионами Западной Европы (по данным ионозондов в Юлиусру и Калининграде) и Восточной Европы (по данным ионозондов в Москве и Екатеринбурге) произошло временное увеличение электронной концентрации до уровня невозмущенных условий 9–10 мая 2024 г. (f_oF2 до ~8 МГц, см. рис. 3, *a*, df_oF2 до $0.1 \div 0.3$, см. рис. 4, *a*). Это локальное, в ограниченном долготном секторе увеличение электронной концентрации отчетливо связано с увеличением в этом же широтно-долготном регионе значений отношения $[O]/[N_2]$ в условиях местного дня (см. рис. 4, *b*). По-видимому, изменения в составе нейтральной термосферы на высотах более 100 км могли быть связаны с уменьшением силы протекающих вдоль границы аврорального овала токов в ионосфере (восточного и западного полярных электроджетов), показателем изменчивости которых являются вариации AE -индекса (см. рис. 2). Но регионы Восточной Сибири и Дальнего Востока Евразии, где были вечерние и ночные условия, продолжали оставаться в фазе отрицательной ионосферной бури: $f_oF2 \sim 4\text{--}5$ МГц (см. рис. 3, *a*) и df_oF2 до $-0.3 \div -0.5$ (см. рис. 4, *a*).

Еще один всплеск геомагнитной возмущенности был зарегистрирован в период смены суток с 12 на 13 мая 2024 г. (см. PCN , AE , A_p , K_p на рис. 2 и 4, *e*), когда индекс Dst уже поднялся до значений -98 нТл (в 22 UT 12 мая). Это усиление геомагнитной возмущенности, связанное с приходом на Землю очередного выброса корональной массы от последовательности солнечных вспышек 9–11 мая 2024 г., вновь привело к резкому падению восстановившейся в дневные часы 12 мая 2024 г. электронной концентрации над европейской территорией (см. рис. 3, *a*, рис. 4, *a*). Примерно полсуток, до полудня 13 мая 2024 г., над долготами Европы (по данным ионозондов в Юлиусру, Калининграде, Москве, Екатеринбурге) и Западной Сибири (по данным ионозонда в Новосибирске) наблюдалось понижение f_oF2 до ~2–3 МГц (см. рис. 3, *a*) и df_oF2 до $-0.4 \div -0.6$ (см. рис. 4, *a*). Это уменьшение электронной концентрации на высотах F2-слоя ионосферы было вызвано очередным понижением значений отношения $[O]/[N_2]$ (см. рис. 4, *b*) над всеми долготами среднеширотного региона Евразии. Рекордно низкие значения отношения $[O]/[N_2]$ были зарегистрированы в долготных секторах среднеширотной Западной и Восточной Европы, а также над регионом Дальнего Востока.

На долготах среднеширотной Восточной Сибири и Дальнего Востока эффект отрицательной ионосферной бури наблюдался всю главную фазу бури в первые часы 11 мая 2024 г. и затем остаток суток 11 мая, 12 мая и первой половины 13 мая, т. е. в течение двух с половиной суток на восстановительной фазе магнитной бури (см. рис. 3, *a*). Значения df_oF2 варьировали на разных долготах до -0.2 до -0.5 (см. рис. 4, *a*). Столь длительное, охватывающее огромную азиатскую территорию отрицательное возмущение электронной концентрации было вызвано чрезвычайным, катастрофическим падением отношения $[O]/[N_2]$ в период супербури практически в течение трех суток (см. рис. 4, *b*), зарегистрированным по спутниковым измерениям GUVI/TIMED.

Затем со второй половины 13 мая 2024 г. на всех долготах среднеширотного региона Евразии начался рост электронной концентрации до предбуревого уровня $df_oF2 \sim 0 \div 0.3$ (см. рис. 4, *a*). Повышение электронной концентрации было связано с увеличением отношения $[O]/[N_2]$ над всем среднеширотным регионом Евразии (см. рис. 4, *b*).

На рис. 5 показана последовательность карт глобального пространственного распределения $[O]/[N_2]$ в Северном полушарии на высотах термосферы более ~100 км для каждого дня с 10 по 15 мая 2024 г. [<http://guvitimed.jhuapl.edu/guvi-gallery13on2>], которая позволяет наглядно проследить динамику и трансформацию крупномасштабных областей пониженного отношения $[O]/[N_2]$ ото дня ко дню. Из карт видно, что с началом супербури вечером 10 мая (по UT) 2024 г. на главной фазе бури 10–11 мая и затем на восстановительной фазе бури до окончания суток 11 мая территорию Северного полушария от высоких до приэкваториальных широт накрыла гигантская область очень низкого отношения $[O]/[N_2]$ ($\sim 0.1 \div 0.4$) на высотах более ~100 км. Области экстремального проникновения термосферного газа с низкими значениями $[O]/[N_2]$ к экватору (широты менее 10° N) 11 мая располагались над акваториями Тихого и Атлантического океанов, а 12 мая 2024 г. сместились к западу, покрыв территории Дальнего Востока Евразии и Северной Америки. В долготных секторах Северного полушария, охватывающих Евразию и акваторию Атлантического океана, граница низких значений $[O]/[N_2]$ поднялась до $30^\circ \div 40^\circ$ N. Над центральной акваторией Тихого океана граница низких значений отношения $[O]/[N_2]$ оставалась на широтах $\sim 25^\circ$ N (т. е. на широте Северного тропика). К 13 мая 2024 г. граница области низких значений $[O]/[N_2]$ оставалась практически для всех долгот на широте $\sim 30^\circ$ N. Только над территорией Африканского континента область пониженных значений $[O]/[N_2]$ имела выступ до $\sim 25^\circ$ N. Здесь уместно вспомнить, что 12–13 мая 2024 г. были зарегистрированы всплески геомагнитной активности, возможно вызвавшие вариации пространственного распределения значений отношения $[O]/[N_2]$.

Четырнадцатого мая 2024 г. можно отметить постепенное возрастание значений $[O]/[N_2]$ (до $0.5 \div 0.7$)

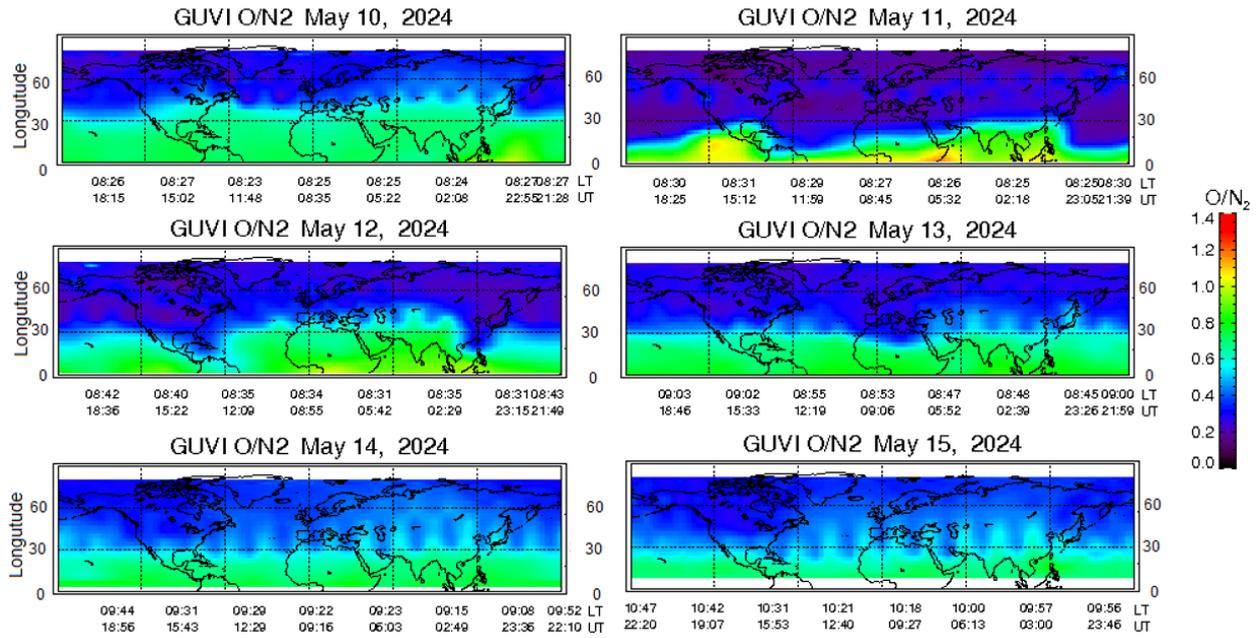


Рис. 5. Глобальное пространственное распределение отношения концентрации $[O]/[N_2]$ в Северном полушарии на высотах термосферы более ~ 100 км по измерениям GUVI/TIMED для каждого дня с 10 по 15 мая 2024 г.

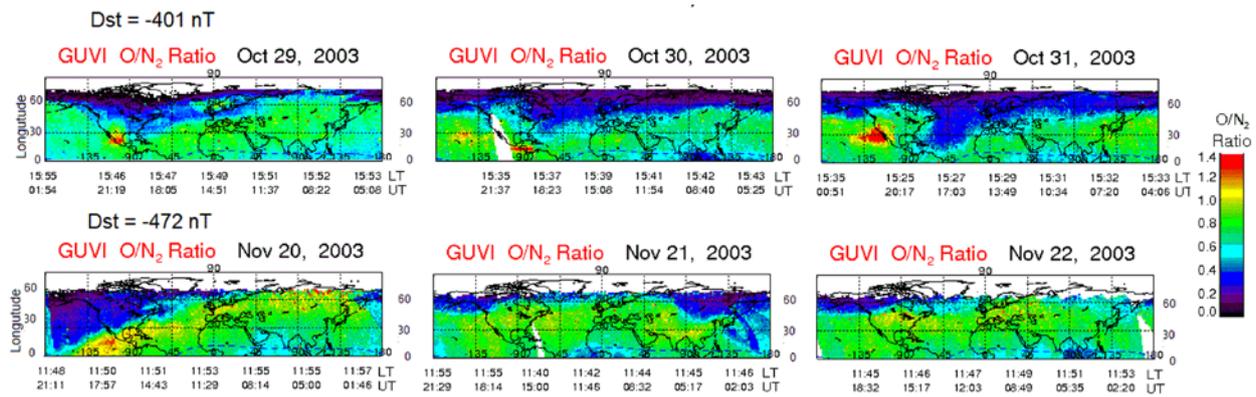


Рис. 6. Глобальные пространственные распределения отношения концентрации $[O]/[N_2]$ на высотах термосферы выше ~ 100 км в Северном полушарии по измерениям GUVI/TIMED для 29–31 октября (верхние панели) и 20–22 ноября (нижние панели) 2003 г. в периоды супербурь

над областями средних широт Евразии, которое отразилось в возрастании электронной концентрации на высоте F2-области ионосферы 14–15 мая 2024 г., зарегистрированном по данным среднеширотных ионозондов (рис. 4, а).

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ $[O]/[N_2]$ В СТОЛБЕ АТМОСФЕРНОГО ГАЗА НА ВЫСОТАХ ТЕРМОСФЕРЫ В ПЕРИОД СУПЕРБУРЬ В ОКТЯБРЕ–НОЯБРЕ 2003 Г.

Представляет большой интерес сравнение интенсивности отклика термосферного состава нейтрального газа в периоды самых сильных геомагнитных событий текущего столетия. Данные измерений отношения $[O]/[N_2]$ GUVI/TIMED для термосферных высот выше 100 км публикуются на сайте

[<https://guvitimed.jhuapl.edu/guvi>] с конца февраля 2002 г. Таким образом, мы имеем возможность сравнить пространственно-временные вариации отношения $[O]/[N_2]$ в течение магнитной бури в мае 2024 г. (рис. 5), анализируемой в настоящей работе, и в течение самых сильных магнитных бурь двух первых десятилетий XXI в., наблюдавшихся осенью 2003 г. (рис. 6): 29–31 октября (буря на Хэллоин) с $Dst = -401$ нТл (верхние панели) и 20 ноября с $Dst = -472$ нТл (нижние панели) [Gopalswamy et al., 2005]. Эти магнитные бури относились к классу супербурь по планетарному индексу Dst [Loewe, Prölss, 1997] и к категории G5, экстремальных по классификации NASA на основе K_p -индекса [<https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>].

Сравнение пространственных распределений отношения $[O]/[N_2]$ на высотах термосферы выше ~ 100 км в Северном полушарии по данным GUVI/TIMED в периоды супербурь в октябре и но-

ябре 2003 г. (см. рис. 6) и в период майской супербури 2024 г. (см. рис. 5) показывает, что реакция состава термосферного нейтрального газа на процессы, развивавшиеся в высоких широтах Северного полушария 10–15 мая 2024 г., была более глобальной, с проникновением термосферного возмущения практически на всех долготах вплоть до приэкваториальных широт ($\sim 10^\circ \text{N}$) и с очень низким значением отношения $[\text{O}]/[\text{N}_2] \sim 0.1 \div 0.4$.

Во время супербури 29–31 октября 2003 г., когда Dst -индекс понизился до -401 нТл, основная область пониженного отношения $[\text{O}]/[\text{N}_2]$ сформировалась над акваторией Атлантического океана и восточного побережья Северной Америки (верхние панели рис. 6). Над этим долготным регионом граница области пониженного отношения $[\text{O}]/[\text{N}_2]$ опустилась до широт порядка 30°N 20–30 октября и еще ниже, до широт $\sim 20^\circ \text{N}$, 31 октября 2003 г. На других долготах Северного полушария область низких значений $[\text{O}]/[\text{N}_2]$ достигала средних широт $50^\circ - 60^\circ \text{N}$.

Во время супербури 20 ноября 2003 г., когда Dst -индекс понизился до -472 нТл, реакция термосферного газа на разных долготах Северного полушария также не была глобальной. Расширение области существенно пониженного отношения $[\text{O}]/[\text{N}_2]$ вплоть до приэкваториальных широт отмечено по данным GUVI/TIMED только для долготного региона западной акватории Тихого океана и территории Северной Америки на широтах более 30°N (нижние панели рис. 6). На следующий день 21 ноября 2003 г. область низких значений $[\text{O}]/[\text{N}_2]$ сместилась на запад и располагалась над восточной акваторией Тихого океана и над территориями Дальнего Востока и Восточной Сибири.

В связи с такими сильными различиями в пространственно-временных вариациях термосферного состава в периоды самых экстремальных геомагнитных бурь текущего 21-го столетия (рис. 5, 6) интересно сравнить ионосферную реакцию на разных долготах и широтах Северного полушария на столь интенсивные геомагнитные возмущения. К сожалению, мы не имеем данных измерений евразийских цепей ионозондов в периоды магнитных супербурь в октябре–ноябре 2003 г., поэтому мы воспользуемся результатами исследований ионосферной реакции, опубликованными нашими коллегами в научной периодике.

В работе [Blanch et al., 2005] проанализированы ионосферные эффекты для супербурь в октябре–ноябре 2003 г. по данным европейских ионозондов в Чилтоне (51.5°N , 359.4°E), Пругонице (50.0°N , 14.6°E) и Эль Ареносильо (37.1°N , 353.3°E), а также по данным GPS-приемников. Авторы отмечают, что, несмотря на чрезвычайно высокую скорость солнечного ветра 29–30 октября 2003 г. (1850 км/с), относительно низкая плотность протонов привела к умеренному динамическому давлению солнечного ветра, которое пропорционально скорости и плотности плазмы солнечного ветра. Умеренное динамическое давление солнечного ветра вместе с крат-

ковременной отрицательной компонентой B_z ММП стало причиной того, что событие октября 2003 г., вопреки ожиданиям, не было необычайно геоэффективным. Более интенсивная по Dst -индексу (-470 нТл) геомагнитная буря 20 ноября 2003 г. стала более значительным событием по воздействию на ионосферу Земли в европейском среднеширотном секторе, хотя для этого события скорость солнечного ветра была намного меньше скорости для октябрьской бури и составляла всего 750 км/с. Авторы отмечают, что в период ноябрьской супербури 2003 г. зарегистрированы два ионосферных эффекта: 1) наличие хорошо развитых аномальных буревых слоев E_s , наблюдавшихся на широтах вплоть до 37°N ; 2) образование двух тонких отдельных широтных поясов пониженной (отрицательный эффект в диапазоне $55-45^\circ \text{N}$) и повышенной (положительный эффект в диапазоне $45-30^\circ \text{N}$) электронной концентрации в европейском вечернем секторе на главной фазе бури (Blanch et al., 2005).

В работе [Kane, 2005] для супербури октября 2003 г. проанализирован глобальный ионосферный отклик по данным 83 ионозондов с сайта NGDC SPIDR [<http://spidr2.ngdc.noaa.gov/spidr/>]. Выявлены провалы в электронной концентрации (отрицательные ионосферные бури) на высоких северных и южных широтах. На северных средних и низких широтах в пространственном распределении электронной концентрации наблюдались очень сильные положительные эффекты 29 октября 2003 г., за которыми последовали отрицательные эффекты на следующий день. Во время супербури ноября 2003 г. провалы в электронной концентрации в высоких северных широтах не наблюдались в утренние и вечерние часы, но наблюдались в ночные часы. Для средних и низких широт на некоторых долготах наблюдались сильные отрицательные эффекты ранним утром, как и ожидалось, но некоторые долготы характеризовались сильными положительными эффектами в полдень и вечерние часы. Таким образом, было много отклонений от модельных прогностических оценок. Отклонения были нерегулярными, что указывает на значительные локальные ионосферные эффекты, наложенные на общие закономерности. Озадачивающей особенностью было наличие сильных положительных эффектов в течение 24 ч до начала шторма.

В работе [Uma et al., 2012] с использованием параметров ионосферы, полученных с помощью ионозондов и глобальных ионосферных карт полного содержания электронов (GIMs TEC), измеренного наземными GPS-приемниками, а также данных измерения плотности электронов *in situ* зондом Planar Langmuir на борту спутника CHAMP выполнено исследование роли электрического поля (измеренного косвенно) и термосферного ветра (из эмпирической модели возмущенного ветра) в реакции ионосферы над японским и индийским долготными секторами во время геомагнитной супербури 20 ноября 2003 г. Обнаружено существенное расширение и усиление экваториальной аномалии ионизации

на главной фазе бури, что, как полагают авторы, было вызвано электрическими полями быстрого проникновения (PPEFs), часто наблюдаемыми в экваториальных широтах. Кроме того, связанный с бурей термосферный ветер в направлении экватора (со средней скоростью ~ 230 м/с) на восстановительной фазе бури привел к подъему действующей высоты F-слоя ($h'F$) ионосферы с постоянной задержкой по времени, начавшемуся со средних широт и распространившемуся затем на низкие и экваториальные.

Отрицательный эффект ионосферной бури обнаружен по данным измерений f_oF2 средне- и низкоширотными ионозондами WKA (45.21°N, 141.11° E), KOV (35.41° N, 139.291° E) и YAG (31.21° N, 130.371° E). В то же время данные приэкваториального ионозонда WTR (17.71° N, 83.31° E) показали положительный эффект ионосферной бури, а данные еще более близкого к экватору ионозонда TRV (8.51° N, 771° E) — вновь отрицательный эффект в электронной концентрации на высоте F2-слоя ионосферы на главной фазе геомагнитной бури 20 ноября 2003 г. [Uma et al., 2012]. GIMs TEC, которые также довольно хорошо отражали эти долготно-широтные особенности реакции ионосферы, показали широтное расширение (только до $\sim 25^\circ$ N) и усиление (на ~ 80 – 100 TECU) экваториальной аномалии ионизации. Установлено присутствие электрического поля быстрого проникновения в обоих долготных секторах на главной фазе супербури, что подтверждается данными наземных магнитометров.

Даже приведенный краткий обзор результатов анализа ионосферных эффектов супербурь в октябре–ноябре 2003 г. показывает существенные различия в реакции ионосферы на экстремальные геомагнитные возмущения в октябре–ноябре 2003 г. и мае 2024 г.: ионосферный отклик в Северном полушарии на геомагнитные бури в октябре–ноябре 2003 г. не был столь единообразным и глобальным, как отклик на бурю в мае 2024 г.

ОБСУЖДЕНИЕ

Первое, что может влиять на характер развития магнитных бурь, а затем и на эффекты в ионосфере, связанные с геомагнитными возмущениями, — это всегда индивидуальные особенности проявления солнечной активности, условий в солнечном ветре (скорость, давление) и поведения геомагнитных индексов в периоды развития магнитных бурь. Они всегда различны, и это необходимо иметь в виду. В данном исследовании мы не рассматривали детально этот вопрос, поскольку анализ проводился с другой целью.

Ионосферные бури в октябре–ноябре 2003 г. в разных широтных и долготных областях происходили по различным сценариям — со сменой первичного положительного эффекта ионосферной бури на отрицательный (в средних широтах Европы), с только отрицательным или с только положительным эффектом (в высоких и низких широтах Евразии). Реакция ионосферы на бурю в мае 2024 г. характеризовалась отрицательным эффектом на всех долготах Евразии с высоких до приэкваториальных широт.

Причина разной реакции ионосферы заключается в физических механизмах, роль которых стала преобладающей в периоды рассматриваемых событий. В период супербурь в октябре–ноябре 2003 г. существенную роль играли электрические поля быстрого проникновения (prompt penetration electric fields, PPEFs), образующие гигантский плазменный фонтан (дневной ионосферный суперфонтан), который переносит плазму из приэкваториальной области на большие высоты и в более высокие широты [Tsurutani et al., 2004; Astafyeva, 2009]. PPEFs ответственны за положительные фазы ионосферных бурь, наблюдаемых в низких и средне-низких широтах [Данилов, 2013]. Положительные ионосферные бури обусловлены также усилением направленных к экватору нейтральных ветров, возникающих в результате поступления энергии в авроральные широты в период магнитной бури [Prölss, 1995]. Когда происходят положительные ионосферные бури, эффекты нейтральных ветров преобладают над изменением химического состава в средних широтах. Это явно и отчетливо видно из сравнения пространственно-временных распределений отношения $[O]/[N_2]$ для магнитных бурь в октябре–ноябре 2003 г. (рис. 6) и в мае 2024 г. (см. рис. 5).

Отрицательные ионосферные бури являются доминирующей характеристикой ионосферного отклика на усиление геомагнитной активности и, как правило, связаны со смещением области ГИП к экватору [Prölss, 1995; Rishbeth, 1998]. Seaton [1956] впервые предположил, что уменьшение электронной плотности может быть связано с вариациями состава термосферного нейтрального газа. Усиление авроральной электроструи в западном направлении в области высоких широт индуцирует нейтральные ветры, которые перераспределяют нейтральный состав атмосферы по большей части региона высоких широт и части региона средних широт. Кислород как более легкий газ по сравнению с азотом подвержен более сильному переносу. Это приводит к уменьшению $[O]/[N_2]$ на высотах верхней атмосферы и, как следствие, к отрицательным возмущениям электронной концентрации в F-области ионосферы [Mayr, Volland, 1972; Laštovička, 2002; Prölss, Werner, 2002; Danilov, 2003; Liou et al., 2005; Klimenko et al., 2011]. Именно преобладающее действие этого механизма мы видим в условиях развития майской бури 2024 г.

Сравнивая существенно разные отклики ионосферы на магнитные супербури примерно одного класса интенсивности октября–ноября 2003 г. и мая 2024 г., можно предположить, что в этом сыграли роль сезонные различия сценариев развития ионосферных эффектов в периоды геомагнитных возмущений. Сценарий развития ионосферного отклика со сменой положительной ионосферной бури на отрицательную (как для событий супербурь в октябре–ноябре 2003 г.) часто наблюдается для периодов равноденствия [Burešová et al., 2007; Ratovsky et al., 2020]. Подобный сценарий ионосферного отклика над средними и высокими широтами Евразии в периоды равноденствия был характерен для экстремальной, самой сильной по интенсивности магнит-

ной бури прошлого 24-го цикла солнечной активности в марте 2015 г. [Chernigovskaya et al., 2021; Черниговская и др., 2024a], а также для сильных магнитных бурь в марте 2012 г. [Черниговская и др., 2023] и в октябре 2016 г. [Черниговская и др., 2024б].

Ионосферный отклик на магнитную бурю в мае 2024 г., по-видимому, развивался по летнему сценарию, когда эффект отрицательной ионосферной бури является преобладающим [Burešová et al., 2007; Ratovsky et al., 2020]. Такая же реакция ионосферы в форме отрицательной ионосферной бури была зарегистрирована евразийскими высоко- и среднеширотными ионозондами на экстремальное геомагнитное возмущение в июне 2015 г. [Chernigovskaya et al., 2021; Черниговская и др., 2024a].

Измерения параметров ионосферной плазмы с помощью Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР, 53° N, 103° E) и ионозонда вертикального зондирования DPS-4 (52° N, 104° E) проводились с 10 по 16 мая 2024 г. Было отчетливо видно многократное уменьшение электронной концентрации в F2-слое (250–300 км). Одиннадцатого мая, когда интенсивность бури была максимальной, зарегистрировано практически пятикратное уменьшение электронной концентрации в F2-слое в дневное время относительно периода до бури. Наблюдалось также повышение высоты максимума электронной концентрации (до 400 км) в период смены суток 10 и 11 мая и снижение высоты максимума (ниже 200 км) днем 11 и 12 мая [Ясюкевич и др., 2025]. Аналогичные эффекты наблюдались в американском секторе [Themens et al., 2024]. Эффекты в высокоширотной ионосфере в период геомагнитной бури 10–11 мая 2024 г. исследовались на основе анализа вариаций ПЭС совместно с данными радара некогерентного рассеяния и ионозондов. На начальной фазе магнитной бури наблюдался значительный подъем плазмы. Высота максимума ионизации увеличилась на 150–300 км, достигнув 630 км. Сильное нагревание и изменение состава высокоширотной термосферы привели к полному отсутствию слоя F2 11 мая 2024 г. [Themens et al., 2024].

В работе [Chernyshov et al., 2025] представлен подробный комплексный анализ воздействия магнитной бури Дня Победы 2024 г. на субавроральную и среднеширотную ионосферу (в частности, над регионом Калининградской области России) с использованием различных инструментов и методов наблюдений. Исследование основано на данных спутниковых систем (Swarm, DMSP, TIMED), наземных магнитометров, ионозондов, ОНЧ-приемников, приемников ГНСС и камер всего неба. Данные прибора SSUSI на спутнике DMSP и камеры всего неба на научной станции «Ладушкин» в Калининградской области отслеживали изменения границы аврорального овала во время интенсивной геомагнитной активности. Во время бури над Калининградской областью, вероятно, наблюдались такие явления, как дуги STEVE и SAR. Таким образом, Калининград

находился внутри аврорального овала, что является крайне редким событием. Авроральная область возрастания индекса ROTI смещалась к широте 45°/40° N на главной фазе бури. Изменения в верхних слоях атмосферы: пиковые значения скорости охлаждения оксида азота NO, вариации ПЭС и отношения [O]/[N₂], — по мнению авторов, указывают на значительное воздействие на термосферу и ионосферу, подтверждая теорию термосферно-ионосферных бурь. Снижение отношения [O]/[N₂] (до трех раз) и ПЭС (до двух раз) указывает на продолжительное влияние геомагнитной активности на структуру верхних слоев атмосферы. Данные ионозонда в Калининграде и характеристики распространения ОНЧ-сигналов подтвердили значительные изменения в ионосфере в ночь с 10 на 11 мая 2024 года, указывающие на то, что такие мощные геомагнитные бури могут приводить к сбоям и отказам в радиосвязи.

Kwak et al. [2024] во время магнитной бури в мае 2024 г. наблюдали значительные возмущения в верхних слоях атмосферы как в глобальном, так и в локальном масштабе над дальневосточным сектором Азии, используя данные космических и наземных наблюдений. По наземным наблюдениям отмечены значительные эффекты отрицательной ионосферной бури в восточноазиатском секторе, включая Корейский полуостров, которые связаны с нагревом термосферы и со снижением отношения [O]/[N₂] в высокоширотных регионах. С помощью магнитометров над восточноазиатским долготным регионом наблюдались сильные вариации компонент приземного геомагнитного поля, связанные с реакцией на электрические поля быстрого проникновения во время магнитной бури.

Srogli et al. [2024] исследовали ионосферные и геомагнитные эффекты в период майской магнитной супербури 2024 г. над средиземноморским сектором, уделив особое внимание Италии. Для анализа использовались сети приемников GNSS, ионозондов и магнитометров в регионе Средиземноморья, что способствовало детальному анализу вариаций, вызванных бурей. Обсерватории, расположенные в Италии, зарегистрировали максимальные изменения компонент геомагнитного поля около 600 нТл. Наиболее заметным ионосферным эффектом после начала магнитного возмущения стало значительное снижение электронной плотности 11 мая, что привело к выраженной отрицательной ионосферной буре, зарегистрированной по вариациям как f_oF_2 , так и ПЭС. Авторы связывают зарегистрированные эффекты с уменьшением отношения [O]/[N₂] в термосферном газе. Эффект отрицательной ионосферной бури был зафиксирован также 13 мая 2024 г.

В работе [Vojiłova et al., 2024] детально исследована временная эволюция пространственных неоднородностей, связанных с реакцией ионосферы на геомагнитную бурю 10–11 мая 2024 г. Для анализа использовались ионосферные аномалии, представленные положительными и отрицательными относительными отклонениями глобальных данных

ПЭС, вариации которых были изучены в зависимости от магнитной широты, местного времени и поведения параметров геомагнитной активности во время рассматриваемого события. Особое внимание уделено анализу наблюдавшихся различий реакции ионосферы низких, средних и высоких широт в Северном и Южном полушариях с учетом известных механизмов влияния геомагнитной бури на электронную плотность. В Северном полушарии в начале магнитной бури проявилась почти мгновенная отрицательная реакция электронной плотности (при летних условиях), область которой распространилась до 30°N и постепенно ослабевала к концу 11 мая 2024 г. В Южном полушарии (при зимних условиях) на широтах южнее 50°S в начале магнитной бури образовалась область с преобладающей положительной реакцией электронной плотности, которая после полуночи 11 мая перешла в отрицательную. Зарегистрированный симметричный ионосферный отклик в регионах от экватора до широт 40°N и 40°S авторы объяснили расширением сильной экваториальной ионосферной аномалии, сформировавшейся на главной фазе магнитной бури. Интересным результатом этого исследования является выявление долготной структуры отрицательного ионосферного отклика в средних широтах. Она возникла в результате суперпозиции структуры отрицательной ионосферной аномалии, связанной с распространением нагретого воздуха из полярного овала в низкие широты, и структуры положительной ионосферной аномалии, вызванной эффектом возмущенного экваториального динамо. Подобная суперпозиция могла привести к разной реакции среднеширотной ионосферы в различных долготных секторах.

Подобная особенность отклика ионосферы средних широт в магнитовозмущенный период, т. е. переключение между положительной и отрицательной фазами ионосферной бури, отмечалась в работах [Nabarulema et al., 2016; Черниговская и др., 2023] для различных долготных областей региона средних широт Северного полушария во время серии магнитных бурь в марте 2012 г. Смена эффектов ионосферной бури в анализируемый период связывалась авторами с суперпозицией в регионе средних широт конкурирующих процессов, влияющих на ионизацию ионосферы, источники которых находятся в авроральной ионосфере (серия интенсивных событий солнечной активности, приведших к геомагнитным бурям 7, 9, 12, 15 марта 2012 г. и к существенной возмущенности атмосферы и ионосферы высоких широт), а также в экваториальной ионосфере (эффект суперфонтана в приэкваториальных широтах 7–10 марта 2012 г.).

В работе [Пономарчук и др., 2025] исследованы эффекты экстремальной магнитной бури 10–13 мая 2024 г. в Азиатском регионе России на основе анализа данных вертикального и наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом. Выявлены особенности динамики ионосферы, вызванные магнитной бурей: длительное отрицательное ионосферное возмущение, проявившееся в значительном уменьшении критических частот слоя F2

и максимальных наблюдаемых частот радиотрасс; экранировка отражений от F-области ионосферы E_s-слоем и увеличенное поглощение КВ-сигналов. Установлена связь вариаций ионосферных параметров и максимальных наблюдаемых частот модов распространения КВ-радиоволн с пространственным положением ГИП и экваториальной границы зоны диффузных высипаний электронов. Согласно результатам моделирования инвариантной широты дна ГИП по модели [Деминов, Шубин, 2018], ионозонды в Новосибирске и Иркутске 10–13 мая 2024 г. находились на широтах южнее полярной стенки или дна ГИП в вечернем и ночном секторах местного времени. Это подтверждается результатами восстановления местоположения полярного овала по спутниковым данным DMSP SSUSI [https://ssusi.jhuapl.edu/gal_edr_aur_cs].

ВЫВОДЫ

Исследование ионосферного отклика на экстремальную по интенсивности геомагнитную бурю Дня Победы 2024 г. на основе анализа данных средне- и высокоширотных евразийских цепей ионозондов, а также спутниковых измерений GUVI/TIMED отношения $[O]/[N_2]$ в столбе термосферного газа на высотах более ~ 100 км позволило сделать следующие выводы:

1. При сравнении долготно-временных распределений f_oF_2 (соответственно, и N_mF_2) для регионов средних и высоких широт Евразии прежде всего обращают на себя внимание различия в общем уровне f_oF_2 и величине размаха суточных вариаций в спокойных условиях 9–10 мая 2024 г. до начала магнитной бури. Это связано с различием условий сезонной освещенности высоких и средних широт Северного полушария.

2. Практически сразу после SSC вечером 10 мая 2024 г. в 17:00 UT по картам долготно-временных распределений измерений всех ионозондов зарегистрировано резкое падение электронной концентрации на высоте максимума F2-слоя независимо от местного времени в пункте измерения. К моменту достижения бурей максимальной интенсивности в 02:00 UT 11 мая 2024 г. (индекс $Dst = -412$ нТл) f_oF_2 уменьшилась до 2–3 МГц по данным среднеширотных ионозондов в Паратунке, Иркутске, Новосибирске, Москве, Калининграде, Юлиусру; относительные отклонения df_oF_2 достигли $-0.5 \div -0.7$. Ионозонд DPS-4 в Якутске с наступлением геомагнитной бури работал очень нестабильно. Ионозонд в Екатеринбургe на этапе максимальной интенсивности магнитной бури показывал полное отсутствие данных (блэкаут радиосигналов), затем последовали технические проблемы в его в работе до 02:30 UT 12 мая 2024 г. Практически все ионозонды высокоширотной цепи (Норильск, Салехард, Ловозеро, Соданкюля) регистрировали блэкаут радиосигналов, начиная с периода смены суток с 10 на 11 мая (главная фаза бури), вплоть до вечера 12 мая 2024 г. (восстановительная фаза), т. е. более полутора суток. Период блэкаута радиосигналов по данным ионозонда в Тикси был чуть менее продолжительным — до утра 12 мая 2024 г.

Таким образом, в регионах высоких и средних широт на главной и восстановительной фазах магнитной бури отмечены сильные эффекты отрицательной ионосферной бури.

3. С ростом магнитной возмущенности (в условиях развития ионосферной бури) изменчивость f_oF2 в высокоширотной ионосфере меньше, чем в средних широтах, даже в случае такой экстремальной по интенсивности магнитной бури.

4. В период анализируемой магнитной бури ГИП и другие ионосферные провалы ионизации (кольцевой, высокоширотный и др.), а также зоны высыпания частиц (авроральный овал) сместились значительно южнее диапазона широт расположения ионозондов среднеширотной евразийской цепи (геомагнитные широты $42^\circ < \text{GMIlat} < 54^\circ \text{ N}$).

5. Дополнительные всплески геомагнитной активности на восстановительной фазе бури в отдельные интервалы времени 11–13 мая 2024 г. также сопровождались существенными и продолжительными уменьшениями электронной концентрации в средних широтах, которые сравнимы с наблюдавшимися на главной фазе супербури в 10–11 мая 2024 г. (f_oF2 до 2–3 МГц и относительные отклонения df_oF2 до $-0.5 \div -0.7$). Эти уменьшения наблюдались по данным ионозондов на всех долготах Восточного полушария — над Паратункой, Иркутском, Новосибирском, Москвой, Калининградом, Юлиусру.

Всплеск геомагнитной возмущенности в период смены суток с 12 на 13 мая 2024 г. вновь привел на несколько часов к блэкауту радиосигналов ионозондов в Тикси, Новосибирске, Салехарде, Ловозеро, как и на главной фазе магнитной бури.

6. Восстановление электронной концентрации ионосферы началось со второй половины суток 13 мая, 14–15 мая на всех долготах средне- и высокоширотного региона Евразии.

7. На завершающем этапе восстановительной фазы магнитной бури со второй половины суток 14 мая и 15 мая 2024 г. произошла смена эффекта ионосферной бури с отрицательного на положительный. Отмечен период повышенной электронной концентрации в средне- и высокоширотной ионосфере над Евразией со значениями f_oF2 , превышающими уровень спокойных дней до начала магнитного возмущения 9–10 мая 2024 г., — эффект ионосферного последствия. Факт наблюдения этого эффекта в регионе высоких широт является необычным и очень интересным. Анализ пространственно-временных вариаций f_oF2 по данным измерений высоко- и среднеширотной евразийских цепей ионозондов показал, что возрастание электронной концентрации началось 14 мая 2024 г. практически одновременно в области средних и высоких широт. При этом в высоких широтах над регионом Европы в ночь с 14 на 15 мая 2024 г. относительные вариации df_oF2 были даже больше (~ 0.4), чем в средних широтах (~ 0.3), по сравнению с их величинами в спокойные дни 9–10 мая 2024 г. до начала магнитной бури.

8. Долготно-временное распределение отношения концентраций $[\text{O}]/[\text{N}_2]$ в столбе атмосферного

газа на высотах термосферы (ионосферы) выше ~ 100 км для среднеширотного региона Евразии ($54^\circ\text{--}56^\circ \text{ N}$), полученное по спутниковым измерениям УФ-спектрометра GUVI/TIMED, детально объяснило особенности отклика ионосферной плазмы на экстремальное геомагнитное возмущение, выявленные по данным среднеширотной цепи ионозондов. Резкое и сильное понижение f_oF2 ($\sim 50\text{--}70\%$ от значений f_oF2 в спокойных условиях) в ионосфере средних широт Евразии началось практически с момента внезапного начала магнитной супербури и продолжалось всю главную фазу и в течение более двух суток до вечера 13 мая 2024 г. на восстановительной фазе магнитной бури. Столь длительное, охватывающее огромную территорию среднеширотной Евразии отрицательное возмущение электронной концентрации было вызвано чрезвычайным, катастрофическим падением отношения $[\text{O}]/[\text{N}_2]$ в период супербури практически в течение трех суток.

9. Представляет большой научный интерес и является актуальным сравнение интенсивности отклика термосферного состава нейтрального газа в периоды самых сильных геомагнитных событий текущего 21-го столетия: магнитной супербури в мае 2024 г. ($Dst = -412$ нТл), анализируемой в настоящей работе, и магнитных супербурь осенью 2003 г.: 29–31 октября ($Dst = -401$ нТл) и 20 ноября ($Dst = -472$ нТл). Сравнение проводилось на основе данных спутниковых измерений GUVI/TIMED отношения $[\text{O}]/[\text{N}_2]$ для термосферных высот более 100 км [<https://guvitimed.jhuapl.edu/guvi>]. Реакция термосферного состава нейтрального газа на процессы, развивавшиеся в высоких широтах Северного полушария 10–15 мая 2024 г., была более глобальной, с проникновением термосферного возмущения практически на всех долготах вплоть до приэкваториальных широт ($\sim 10^\circ \text{ N}$) и с очень низким значениями отношения $[\text{O}]/[\text{N}_2] \sim 0.1 \div 0.4$.

Во время супербурь в октябре–ноябре 2003 г. области пониженного отношения $[\text{O}]/[\text{N}_2]$ в Северном полушарии не имели глобального долготного охвата и располагались 30–31 октября 2003 г. над долготным сектором акватории Атлантического океана и восточного побережья Северной Америки и 20 ноября 2003 г. над долготным сектором акватории Тихого океана, над территорией Северной Америки, к 21 ноября область низких значений отношения $[\text{O}]/[\text{N}_2]$ сместилась на запад и располагалась над восточной акваторией Тихого океана и над территориями Дальнего Востока и Восточной Сибири. Над этими долготными регионами граница области пониженного отношения $[\text{O}]/[\text{N}_2]$ опускалась до широт $\sim 20\text{--}30^\circ \text{ N}$. На других долготах граница низкого отношения $[\text{O}]/[\text{N}_2]$ находилась в средних широтах в диапазоне $50\text{--}60^\circ \text{ N}$.

В связи с такими сильными различиями в пространственно-временных вариациях термосферного состава нейтрального газа в периоды самых экстремальных геомагнитных бурь текущего 21-го столетия можно сделать заключение о существенно отличии

чающейся ионосферной реакции на разных долготах и широтах Северного полушария на столь интенсивные геомагнитные возмущения. Магнитная супербури в мае 2024 г. была намного более геоэффективной, чем супербури в октябре–ноябре 2003 г.

10. В связи с наблюдаемыми различиями ионосферной реакции на геомагнитные возмущения экстремальной интенсивности в трех циклах солнечной активности (23-го, 24-го и текущего 25-го цикла) следует отметить роль сезонных факторов в формировании отклика ионосферы. Ионосферный отклик на магнитную бурю в мае 2024 г. развивался по летнему сценарию, когда эффект отрицательной ионосферной бури является преобладающим. Такая же реакция ионосферы в форме отрицательной ионосферной бури была зарегистрирована этими же цепями ионизации на экстремальную геомагнитную бурю в июне 2015 г. Смена эффекта положительной ионосферной бури на отрицательную (как для супербури в октябре–ноябре 2003 г. и для самой сильной по интенсивности магнитной бури прошлого 24-го солнечного цикла в марте 2015 г.) является часто встречающейся для периодов равноденствия.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 25-17-00187 [<https://rscf.ru/project/25-17-00187/>]. Работы по проведению наблюдений и первичной обработке данных выполнены при поддержке Минобрнауки России. Результаты получены частично с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» (ИСЗФ СО РАН) [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>]. Работы по проведению наблюдений и первичной обработке данных частично выполнены при поддержке Минобрнауки РФ (проект FWZZ-2022-0019); в рамках государственного задания (номер госрегистрации 122011700182-1); в рамках п. 6.2. плана НИТР Росгидромета «Развитие методов и средств наземного мониторинга геофизической обстановки над территорией Арктики». Данные ионизации в Соданкюля, Пругонице и Юлиусру были получены из Центра данных по солнечно-земной физике, Великобритания (UK Solar System Data Centre) [<https://www.ukssdc.ac.uk>]. Данные GUVI/TIMED, использовавшиеся в данной работе, предоставлены при поддержке программы NASA MO&DA. Инструмент GUVI разработан и собран корпорацией Aerospace Corporation и Университетом Джона Хопкинса (The Aerospace Corporation and The Johns Hopkins University). Научный руководитель — Ларри Дж. Пакстон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Выставной В.М., Макарова Л.Н., Широков А.В., Егорова Л.В. Исследования высокоширотной ионосферы методом вертикального зондирования с использованием современного цифрового ионизационного прибора CADI. *Гелиогеофизические исследования*. 2013, вып. 4, с. 1–10.

Данилов А.Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения (обзор). *Гелиогеофизические исследования*. 2013, вып. 5, с. 1–33.

Деминов М.Г., Шубин В.Н. Эмпирическая модель положения главного ионосферного провала. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018, т. 58, № 3, с. 366–373. DOI: 10.7868/S0016794018030070.

Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Трошичев О.А., Франк-Каменецкий А.В. ФГБУ «ААНИИ». Геофизические исследования в высоких широтах. *Вестник РФФИ. Антарктида и Арктика: Полярные исследования*. 2020, № 3-4 (107-108), с. 60–74. DOI: 10.22204/2410-4639-2020-106-107-3-4-60-78.

Карпачев А.Т. Зависимость формы ГИП от долготы, высоты, сезона, местного времени, солнечной и магнитной активности. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2003, т. 43, № 2, с. 256–269.

Мамруков А.П., Халипов В.Л., Филиппов Л.Д. и др. Геофизическая информация по наклонным радиоотражениям в высоких широтах и их классификация. *Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000, вып. 111, с. 14–27.

Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И. и др. Многофункциональный ЛЧМ-ионизационный прибор для мониторинга ионосферы. *Гелиогеофизические исследования*. 2013, вып. 4, с. 24–31.

Поляков В.М., Щепкин Л.А., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д. *Ионосферные процессы*. Новосибирск: Наука, 1968, 535 с.

Пономарчук С.Н., Золотухина Н.А., Куркин В.И. и др. Эффекты магнитной бури 10–13 мая 2024 г. в Азиатском регионе России по данным зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 4, с. 17–32. DOI: 10.12737/szf-114202504 / Ponomarchuk S.N., Zolotukhina N.A., Kurkin V.I., et al. The effects of magnetic storm on May 10–13, 2024 in the Asian region on Russia from ionospheric sounding with a continuous chirp signal. *Sol.-Terr. Phys.* 2025, vol. 11, iss. 4, pp. 14–28. DOI: 10.12737/stp-114202504.

Ратовский К.Г., Клименко М.В., Клименко В.В. и др. Эффекты последствий геомагнитных бурь: статистический анализ и теоретическое объяснение. *Солнечно-земная физика*. 2018, т. 4, № 4, с. 32–42. DOI: 10.12737/szf-44201804 / Ratosky K.G., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Chirik N.V., et al. Aftereffects of geomagnetic storms: statistical analysis and theoretical explanation. *Sol.-Terr. Phys.* 2018, vol. 4, iss. 4, pp. 26–32. DOI: 10.12737/stp-44201804.

Черниговская М.А., Ясюкевич А.С., Хабитуев Д.С. Долготная изменчивость ионосферы Северного полушария во время магнитных бурь в марте 2012 г. по данным ионизационных и GPS/ГЛОНАСС. *Солнечно-земная физика*. 2023, т. 9, № 4, с. 108–112. DOI: 10.12737/szf-94202313 / Chernigovskaya M.A., Yasyukevich A.S., Khabituev D.S. Ionospheric 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, pp. 99–110. DOI: 10.12737/stp-94202313.

Черниговская М.А., Сетов А.Г., Ратовский К.Г. и др. Изменчивость ионизации ионосферы над Евразией по данным цепи высокоширотных ионизационных приборов во время экстремальных магнитных бурь 2015 г. *Солнечно-земная физика*. 2024а, т. 10, № 2, с. 38–52. DOI: 10.12737/szf-102202404 / Chernigovskaya M.A., Setov A.G., Ratosky 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.* 2024а, vol. 10, iss. 2, pp. 34–47. DOI: 10.12737/stp-102202404.

Черниговская М.А., Ратовский К.Г., Жеребцов Г.А. и др. Отклик ионосферы над регионами высоких и средних широт Евразии по данным ионизационных приборов во время экстремальной магнитной бури в марте 2015 г. *Солнечно-земная физика*. 2024б, т. 10, № 4, с. 51–64. DOI: 10.12737/szf-104202406 / Chernigovskaya M.A., Ratosky 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.* 2024б, vol. 10, iss. 4, pp. 46–58. DOI: 10.12737/stp-104202406.

- Черниговская М.А., Ратовский К.Г., Сетов А.Г. и др. Пространственно-временная изменчивость параметров ионосферы над Евразией средних и высоких широт в период супербури в мае 2024 г. *Геомагнетизм и аэронаука*. 2026. (в печати).
- Ясюкевич Ю.В., Васильев Р.В., Рубцов А.В. и др. Экстремальная магнитная буря 10–19 мая 2024 г.: взаимодействие нейтральной и заряженной компонент верхней атмосферы и воздействие на радиотехнические системы. *Доклады академии наук. Науки о Земле*. 2025, т. 521, № 1, с. 122–134. DOI: [10.1134/S1028334X24604978](https://doi.org/10.1134/S1028334X24604978).
- Aladjev G.A., Evstafiev O.V., Mingalev V.S., et al. Interpretation of ionospheric F-region structures in the vicinity of ionization trough observed by satellite radio tomography. *Ann. Geophys.* 2001, vol. 19, pp. 25–36.
- Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Bilitza D. Characteristics of the ionospheric variability as a function of season, latitude, local time, and geomagnetic activity. *Radio Sci.* 2005, vol. 40, RS5009. DOI: [10.1029/2004RS003179](https://doi.org/10.1029/2004RS003179).
- Astafyeva E.I. Dayside ionospheric uplift during strong geomagnetic storms as detected by the CHAMP, SAC-C, TOPEX and Jason-1 satellites. *Adv. Space Res.* 2009, vol. 43, pp. 1749–1756. DOI: [10.1016/j.asr.2008.09.036](https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.09.036).
- Berger T.E., Dominique M., Lucas G., et al. The thermosphere is a drag: the 2022 Starlink incident and the threat of geomagnetic storms to low earth orbit space operations. *Space Weather*. 2023, vol. 21, iss. 3, pp. 1–15. DOI: [10.1029/2022SW003330](https://doi.org/10.1029/2022SW003330).
- Blanch E., Altadill D., Boška J., et al. November 2003 event: effects on the Earth's ionosphere observed from ground-based ionosonde and GPS data. *Ann. Geophys.* 2005, vol. 23, iss. 9, pp. 3027–3034.
- Bojilova R., Mukhtarov P., Pancheva D. Global ionospheric response during extreme geomagnetic storm in May 2024. *Remote Sens.* 2024, vol. 16, iss. 21, 4046. DOI: [10.3390/rs16214046](https://doi.org/10.3390/rs16214046).
- Buonsanto M.J. Ionospheric storms — a review. *Space Sci. Rev.* 1999, vol. 88, pp. 563–601. DOI: [10.1023/A:1005107532631](https://doi.org/10.1023/A:1005107532631).
- Burešová D., Laštovička J., de Franceschi G. Manifestation of strong geomagnetic storms in the ionosphere above Europe. *Space Weather*. Springer, 2007, pp. 185–202. DOI: [10.1007/1-4020-5446-7_17](https://doi.org/10.1007/1-4020-5446-7_17).
- 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, iss. 2, pp. 762–776. DOI: [10.1016/j.asr.2020.10.028](https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.028).
- 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, pp. 7325–7350. DOI: [10.1016/j.asr.2025.02.015](https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.02.015).
- Christensen A.B., Paxton L.J., Avery S., et al. Initial observations with the Global Ultraviolet Imager (GUVI) on the NASA TIMED satellite mission. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, iss. A12, 1451. DOI: [10.1029/2003JA009918](https://doi.org/10.1029/2003JA009918).
- Danilchuk E., Yasyukevich Y., Vesnin A., et al. Impact of the May 2024 Extreme Geomagnetic Storm on the Ionosphere and GNSS Positioning. *Remote Sens.* 2025, vol. 17, 1492. DOI: [10.3390/rs17091492](https://doi.org/10.3390/rs17091492).
- Danilov A.D. Long-term trends of f_oF2 independent on geomagnetic activity. *Ann. Geophys.* 2003, vol. 21, iss. 5, pp. 1167–1176. DOI: [10.5194/angeo-21-1167-2003](https://doi.org/10.5194/angeo-21-1167-2003).
- Enell C.-F., Kozlovsky A., Turunen T., et al. Comparison between manual scaling and Autoscala automatic scaling applied to Sodankylä Geophysical Observatory ionograms. *Geosci. Instrum. Method. Data System*. 2016, vol. 5, pp. 53–64. DOI: [10.5194/gi-5-53-2016](https://doi.org/10.5194/gi-5-53-2016).
- Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G., et al. Solar source of the largest geomagnetic storm of cycle 23. *Geophys. Res. Lett.* 2005, vol. 32, iss. 12, L12S09. DOI: [10.1029/2004GL021639](https://doi.org/10.1029/2004GL021639).
- Grandin M., Bruus E., Ledvina V.E., et al. The geomagnetic superstorm of 10 May 2024: Citizen science observations. *EGUsphere* [preprint]. 2024. DOI: [10.5194/egusphere-2024-2174](https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-2174).
- Habarulema J.B., Katamzi Z.T., Yizengaw E., et al. Simultaneous storm time equatorward and poleward large-scale TIDs on a global scale. *Geophys. Res. Lett.* 2016, vol. 43, pp. 6678–6686. DOI: [10.1002/2016GL069740](https://doi.org/10.1002/2016GL069740).
- Hayakawa H., Ebihara Y., Mishev A., et al. The solar and geomagnetic storms in May 2024: A flash data report. *Astrophys. J.* 2025, vol. 979, 49. DOI: [10.3847/1538-4357/ad9335](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad9335).
- Kane R.P. Ionospheric f_oF2 anomalies during some intense geomagnetic storms. *Ann. Geophys.* 2005, vol. 23, pp. 2487–2499. DOI: [10.5194/angeo-23-2487-2005](https://doi.org/10.5194/angeo-23-2487-2005).
- Karpachev A. Sub-auroral, mid-latitude, and low-latitude troughs during severe geomagnetic storms. *Remote Sens.* 2021, vol. 13, no. 3, 534. DOI: [10.3390/rs13030534.2021](https://doi.org/10.3390/rs13030534.2021).
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., et al. Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and low-latitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005. *Radio Sci.* 2011, vol. 46, RS0D03. DOI: [10.1029/2010RS004590](https://doi.org/10.1029/2010RS004590).
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V., et al. Disturbances of the thermosphere-ionosphere-plasmasphere system and auroral electrojet at 30° E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 180, pp. 78–92. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.12.017](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.12.017).
- Krashennikov I., Pezzopane M., Scotto C. Application of Autoscala to ionograms recorded by the AIS-Parus ionosonde. *Computers and Geosciences*. 2010, vol. 36, pp. 628–635. DOI: [10.1016/j.cageo.2009.09.013](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2009.09.013).
- Kwak Y.S., Kim J.H., Kim S., et al. Observational Overview of the May 2024 G5-Level Geomagnetic Storm: From Solar Eruptions to Terrestrial Consequences. *J. Astron. Space Sci.* 2024, vol. 41, iss. 3, pp. 171–194. DOI: [10.5140/JASS.2024.41.3.171](https://doi.org/10.5140/JASS.2024.41.3.171).
- Laštovička J. Monitoring and forecasting of ionospheric space weather effects of geomagnetic storms. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002, vol. 64, pp. 697–705. DOI: [10.1016/S1364-6826\(02\)00031-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00031-7).
- Liou K., Newell P.T., Anderson B.J., et al. Neutral composition effects on ionospheric storms at middle and low latitudes. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, A05309. DOI: [10.1029/2004JA010840](https://doi.org/10.1029/2004JA010840).
- Loewe C.A., Prölss G.W. Classification and mean behavior of magnetic storms. *J. Geophys. Res.* 1997, vol. 102, iss. A7, pp. 14,209–14,213.
- MacDougall J.W., Grant I.F., Shen X. The Canadian Advanced Digital Ionosonde: Design and results. *Ionosonde Networks and Stations. WDC a for Solar-Terrestrial Physics Report UAG-104*. Boulder, 1995, pp. 21–27.
- Matsushita S. A study of the morphology of ionospheric storms. *J. Geophys. Res.* 1959, vol. 64, iss. 3, pp. 305–321. DOI: [10.1029/JZ064i003p00305](https://doi.org/10.1029/JZ064i003p00305).
- Mayr H.G., Volland H. Magnetic storm effects in the neutral composition. *Planet. Space Sci.* 1972, vol. 20, pp. 379–393. DOI: [10.1016/0032-0633\(72\)90036-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(72)90036-0).

- Mendillo M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content. *Rev. Geophys.* 2006, vol. 44, RG4001. DOI: [10.1029/2005RG000193](https://doi.org/10.1029/2005RG000193).
- Mikhailov A.V. Ionospheric F2-layer storms. *Física de la Tierra.* 2000, vol. 12, pp. 223–262.
- Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., et al. Global model of the thermosphere–ionosphere–protonosphere system. *PAGEOPH.* 1988, vol. 127, no. 2/3, pp. 219–254. DOI: [10.1007/BF00879812](https://doi.org/10.1007/BF00879812).
- Newell P.T., Liou K., Zhang Y., et al. OVATION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels. *Space Weather.* 2014, vol. 12, pp. 368–379. DOI: [10.1002/2014SW001056](https://doi.org/10.1002/2014SW001056).
- Prölss G.W. Ionospheric F-region storms. *Handbook of atmospheric electrodynamics.* CRC Press, Boca Raton, 1995, vol. 2, ch. 8, pp. 195–248.
- Prölss G.W., Werner S. Vibrationally excited nitrogen and oxygen and the origin of negative ionospheric storms. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, A2, 1016. DOI: [10.1029/2001JA900126](https://doi.org/10.1029/2001JA900126).
- Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Yasyukevich Y.V., et al. Statistical analysis and interpretation of high-, mid- and low-latitude responses in regional electron content to geomagnetic storms. *Atmosphere.* 2020, vol. 11, iss. 12, 1308. DOI: [10.3390/atmos11121308](https://doi.org/10.3390/atmos11121308).
- Reinisch B.W., Haines D.M., Bibl K., et al. Ionospheric sounding support of over-the-horizon radar. *Radio Sci.* 1997, vol. 32, iss. 4, pp. 1681–1694. DOI: [10.1029/97RS00841](https://doi.org/10.1029/97RS00841).
- Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1998, vol. 60, pp. 1385–1402. DOI: [10.1016/S1364-6826\(98\)00062-5](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(98)00062-5).
- Rodger A.S., Moffett R.J., Quegan S. The role of ion drift in the formation of ionisation troughs in the mid- and high-latitude ionosphere — a review. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1992, vol. 54, pp. 1–30. DOI: [10.1016/0021-9169\(92\)90082-V](https://doi.org/10.1016/0021-9169(92)90082-V).
- Seaton M.J. A possible explanation of the drop in F-region critical densities accompanying major ionospheric storms. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1956, vol. 8, pp. 122–124. DOI: [10.1016/0021-9169\(56\)90102-7](https://doi.org/10.1016/0021-9169(56)90102-7).
- Shpynev B.G., Zolotukhina N.A., Polekh N.M., et al. The ionosphere response to severe geomagnetic storm in March 2015 on the base of the data from Eurasian high-middle latitudes ionosonde chain. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 180, pp. 93–105. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.10.014](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.10.014).
- Spogli L., Alberti T., Bagiacchi P., et al. The effects of the May 2024 Mother's Day superstorm over the Mediterranean sector: from data to public communication. *Ann. Geophys.* 2024, vol. 67, iss. 2, PA218. DOI: [10.4401/ag-9117](https://doi.org/10.4401/ag-9117).
- Sugiura M., Kamei T. *Equatorial Dst index 1957–1986. IAGA bull. 40.* Saint-Maur-des-Fosses: ISGI Publication Office, 1991. 14 p.
- SWPC PRF 2541, 13 May 2024 – *The NOAA SWPC (Space Weather Prediction Center) PRF (Preliminary Report and Forecast) 2541* issued on 13 May 2024. <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse> (дата обращения 3 октября 2025 г.).
- Themens D.R., Elvidge S., McCaffrey A., et al. The high latitude ionospheric response to the major May 2024 geomagnetic storm: A synoptic view. *Geophys. Res. Lett.* 2024, vol. 51, iss. 19, e2024GL111677. DOI: [10.1029/2024GL111677](https://doi.org/10.1029/2024GL111677).
- 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, pp. 60–77. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.10.012](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.10.012).
- Tsurutani B., Mannucci A., Iijima B., et al. Global dayside ionospheric uplift and enhancement associated with interplanetary electric fields. *J. Geophys. Res.* 2004, vol. 109, A08302. DOI: [10.1029/2003JA010342](https://doi.org/10.1029/2003JA010342).
- Uma G., Brahmanandam P.S., Kakinami Y., et al. Ionospheric responses to two large geomagnetic storms over Japanese and Indian longitude sectors. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2012, vol. 74, pp. 94–110. DOI: [10.1016/j.jastp.2011.10.001](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.10.001). URL: <https://giro.uml.edu/didbase/scaled.php> (дата обращения 3 октября 2025 г.). URL: <https://www.sgo.fi/Data/Ionosonde/ionData.php> (дата обращения 3 октября 2025 г.). URL: <http://guvitimed.jhuapl.edu/guvi-gallery13on2> (дата обращения 3 октября 2025 г.). URL: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation> (дата обращения 3 октября 2025 г.). URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html> (дата обращения 3 октября 2025 г.). URL: http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagn_PC_ind.ru.html (дата обращения 3 октября 2025 г.). URL: <http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act/flux10.7/daily/> (дата обращения 3 октября 2025 г.). URL: <https://guvitimed.jhuapl.edu/guvi/> (дата обращения 3 октября 2025 г.). URL: <http://spidr2.ngdc.noaa.gov/spidr/> (дата обращения 30 мая 2025 г.). URL: https://ssusi.jhuapl.edu/gal_edr-aur_cs (дата обращения 30 мая 2025 г.). URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 3 октября 2025 г.). URL: <https://www.ukssdc.ac.uk> (дата обращения 3 октября 2025 г.). URL: <https://rscf.ru/project/25-17-00187/> (дата обращения 3 октября 2025 г.).

Как цитировать эту статью:

Черниговская М.А., Хабитуев Д.С., Сетов А.Г., Ратовский К.Г., Калишин А.С., Долгачева С.А., Степанов А.Е., Белинская А.Ю., Бычков В.В., Григорьева С.А., Панченко В.А., Тимченко А.В. Термосферные эффекты во время магнитных супербури в мае 2024 г. и октябре–ноябре 2003 г. в Северном полушарии и ионосферный отклик на них. *Солнечно-земная физика.* 2026, т. 12, № 1, с. 74–94. <https://doi.org/10.12737/szf-121202609>.