
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ НА ПАРАМЕТРЫ СЛОЯ F2 ИОНОСФЕРЫ В ТЕЧЕНИЕ 24-ГО ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

STUDYING THE INFLUENCE OF GEOMAGNETIC STORMS ON PARAMETERS OF THE IONOSPHERIC F2 LAYER DURING SOLAR ACTIVITY CYCLE 24

К.А. Сидоренко

*Институт радиофизики и физической электроники
ОНЦ СО РАН,*

Омск, Россия, sidorenko.klim@yandex.ru

А.А. Васенина

*Институт радиофизики и физической электроники
ОНЦ СО РАН,*

Омск, Россия, vas.al.an@rambler.ru

K.A. Sidorenko

*Institute of Radiophysics and Physical Electronics
Omsk Scientific Center SB RAS,*

Omsk, Russia, sidorenko.klim@yandex.ru

A.A. Vasenina

*Institute of Radiophysics and Physical Electronics
Omsk Scientific Center SB RAS,*

Omsk, Russia, vas.al.an@rambler.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования поведения параметров ионосферного слоя F2, таких как критическая частота f_oF2 и высота максимума слоя h_mF2 , в условиях геомагнитных бурь различной силы. В исследованиях на основе баз данных DIDBase использовались измерения вертикального зондирования и Dst -индекса, вычисляемого Мировым центром данных по геомагнетизму. Рассмотрена методика определения наличия геомагнитной бури с использованием временных рядов Dst . Выявлены и проанализированы основные закономерности изменений f_oF2 и h_mF2 для различных географических широт, сезонов и интенсивностей бурь. Полученные результаты могут быть полезны для прогнозирования и моделирования ионосферных условий, что имеет важное значение для различных приложений, включая спутниковую связь, системы глобального позиционирования и коротковолновую связь.

Ключевые слова: критическая частота слоя F2 ионосферы, высота максимума слоя F2, геомагнитная активность, Dst -индекс.

Abstract. This paper presents the results of a study on the behavior of parameters of the ionospheric F2 layer, such as the critical frequency (f_oF2) and the peak height of the layer (h_mF2), under geomagnetic storms of varying intensities. The study is based on vertical sounding measurements from the DIDBase database and the Dst index calculated by the World Data Center for Geomagnetism. We examine a methodology for identifying the presence of a geomagnetic storm using Dst -index time series. The main patterns of f_oF2 and h_mF2 variations for different geographic latitudes, seasons, and storm intensities are identified and analyzed. The obtained results can be useful for forecasting and modeling ionospheric conditions, which is of great importance for various applications, including satellite communications, global positioning systems, and shortwave radio communications.

Keywords: F2-layer critical frequency, F2-layer peak height, geomagnetic activity, Dst index.

ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитные бури, возникающие из-за сложного взаимодействия солнечного ветра с магнитным полем Земли, являются одними из самых динамичных и энергоёмких процессов в солнечно-земной системе. Когда поток заряженных частиц солнечного ветра проходит через магнитосферу, это вызывает значительные изменения в электронной структуре ионосферы, особенно в слое F2, что приводит к флуктуациям его критической частоты f_oF2 и высоты максимума электронной концентрации h_mF2 [Forbes et al., 2000; Araujo-Pradere et al., 2005].

Изменения электронной концентрации, f_oF2 и h_mF2 непосредственно влияют на условия прохождения радиоволн через ионосферу. В процессе развития геомагнитных бурь наблюдается как расширение

диапазона допустимых частот для коротковолновых радиосигналов, так и его критическое сужение. Сдвиг высоты h_mF2 указывает на изменение отражающей границы, что может приводить к непредсказуемым изменениям траекторий распространения сигнала и, как следствие, негативно сказываться на надёжности радиосвязи [Брюнелли, Намгаладзе, 1988; Danilov, 2001; Ратовский и др., 2018; Danilov, Konstantinova, 2020].

Ряд работ по исследованию влияния геомагнитных бурь на состояние ионосферы посвящен анализу изменения параметров над определенными территориями [Berényi et al., 2018, 2023; Agowolo et al., 2021] в выбранные периоды местного времени [Solomon et al., 2013; Kumar, Kumar, 2014] и при определенных уровнях бурь [Chen et al., 2022]. При организации

систем связи, особенно коротковолнового диапазона, необходимо учитывать глобальные изменения f_oF2 и h_mF2 . Для всесторонней оценки влияния геомагнитных бурь на работу радиосистем проведен детальный анализ поведения параметров слоя F2 в течение 24-го цикла солнечной активности (СА) с 2009 по 2019 г. Исследование изменений f_oF2 в сочетании с динамикой h_mF2 позволяет не только проследить реакции ионосферы на внешние космические возмущения, но и выявить корреляционные зависимости между интенсивностью бурь и изменениями структуры ионосферы. Эти данные играют ключевую роль как в оптимизации режимов работы радиосвязи, так и в моделировании процессов, связанных с СА. Кроме того, результаты данного исследования будут применены для повышения точности нейросетевых моделей прогнозирования ионосферных параметров, разработанных ранее [Sidorenko et al., 2023].

1. АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

В качестве количественной меры интенсивности геомагнитной бури выбран Dst -индекс, который отражает изменения магнитного поля Земли, вызванные кольцевыми токами в магнитосфере во время бурь. Данные по Dst были получены из архива Мирового центра данных по геомагнетизму в Киото (World Data Center for Geomagnetism, Kyoto) [<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/index.html>].

Определение наличия геомагнитной бури основано на анализе временных рядов Dst . В предложенном подходе использовалось пороговое значение $Dst = -30$ нТл: все последовательные измерения, соответствующие условию $Dst < -30$ нТл, рассматривались как потенциальные кандидаты для классификации в качестве геомагнитной бури [Данилов, 2013]. Кроме того, был применен критерий минимальной продолжительности непрерывного превышения порога, равный 5 ч, что позволило исключить случайные шумы и кратковременные колебания, не имеющие значительного физического значения для процесса формирования бури.

Поскольку магнитная буря может протекать в виде нескольких близко расположенных фазовых интервалов, следующий этап методики включает объединение таких интервалов. Если интервалы были разделены временными промежутками меньше 10 ч, происходила их агрегация в единое событие. Такой подход отражает физическую реальность, где одно буревое событие может иметь сложную структуру с переходными этапами между основными фазами бури. При выборе временных интервалов опирались на средние значения главной фазы бури, которая составляет примерно 5–10 ч [Акасофу, Чепмен, 1975].

Для детальной характеристики магнитной бури применялось расширение интервалов идентифицированных событий за счет включения предварительных и последующих спокойных периодов (рис. 1). Такой комплексный подход обеспечивает не только качественную идентификацию геомагнитных бурь, но и детальное понимание их влияния на параметры ионосферы.

На рис. 1 показаны изменения Dst (а) и f_oF2 (б) с 00:00 UT 11 апреля по 23:00 UT 18 апреля 2012 г. с использованием данных ионозонда PA836 (34.8° N, 120.5° W). Оранжевым цветом выделен период магнитной бури, который длится с 10:00 UT 14 апреля по 22:00 UT 15 апреля 2012 г.

В соответствии с принятой международной классификацией слабые бури характеризуются значениями $Dst > -50$ нТл, умеренные — -50 – -100 нТл, сильные — -100 – -200 нТл и экстремальные — $Dst < -200$ нТл [Данилов, 2013]. На рис. 2 показано распределение геомагнитных бурь в 24-м цикле СА с января 2009 г. по декабрь 2019 г.

С учетом принятой классификации на основе обработанных данных 2009–2019 гг. было выявлено 211 геомагнитных бурь: 71 слабая, 118 умеренных, 20 сильных и 2 экстремальных.

Для получения данных измерений f_oF2 и h_mF2 в периоды геомагнитных бурь и в спокойные дни использовалась база данных цифровых ионограмм DIDBase (Digital Ionogram Database) [<https://giro.uml.edu/didbase/>]. При статистическом анализе применялись данные только тех ионозондов, которые стабильно работали все время рассматриваемой геомагнитной бури. В исследованиях использовались измерения 43 ионозондов. Ниже приведены их названия, коды URSI (в скобках) и географические координаты.

На высоких широтах 7 ионозондов: Nord Greenland (NDA81) — 81.4° N, 17.5° W; Thule/Qaanaaq (THJ77) — 77.5° N, 69.2° W; Tromsø (TR169) — 69.6° N, 19.2° E; Norilsk (NO369) — 69.2° N, 88.0° E; Sondrestrom (SMJ67) — 67.0° N, 50.9° W; College AK (CO764) — 64.9° N, 148.0° W; Yakutsk (YA462) — 62.0° N, 129.6° E.

На средних широтах 24 ионозонда: King Salmon (KS759) — 58.4° N, 156.4° W; Moscow (MO155) — 55.5° N, 37.3° E; Juliusruh (JR055) — 54.6° N, 13.4° E; Goose Bay (GSJ53) — 53.3° N, 60.3° W; Irkutsk (IR352) — 52.4° N, 104.3° E; Fairford (FF051) — 51.7° N, 1.5° W; Chilton (RL052) — 51.5° N, 0.6° W; Dourbes (DB049) — 50.1° N, 4.6° E; Pruhonice (PQ052) — 50.0° N, 14.6° E; Millstone Hill (MHJ45) — 42.6° N, 71.5° W; Rome (RO041) — 41.9° N, 12.5° E; Roquetes (EB040) — 40.8° N, 0.5° E; San Vito (VT139) — 40.6° N, 17.8° E; Boulder (BC840) — 40.0° N, 105.3° W; Athens (AT138) — 38.0° N, 23.5° E; Wallops Is (WP937) — 37.9° N, 75.5° W; El Arenosillo (EA036) — 37.1° N, 6.7° W; Nicosia (NI135) — 35.0° N, 33.2° E; Port Arguello (PA836) — 34.8° N, 120.5° W; Eglin AFB (EG931) — 30.5° N, 86.5° W; Austin (AU930) — 30.4° N, 97.7° W; Port Stanley (PSJ5J) — 51.6° S, 57.9° W; Grahamstown (GR13L) — 33.3° S, 26.5° E; Hermanus (HE13N) — 34.4° S, 19.2° E.

На низких широтах 12 ионозондов: Ramey (PRJ18) — 18.5° N, 67.1° W; Kwajalein (KJ609) — 9.0° N, 167.2° E; Boa Vista (BVJ03) — 2.8° N, 60.7° W; Saoluis (SAA0K) — 2.6° S, 44.2° W; Ascension Island (AS00Q) — 8.0° S, 14.4° W; Fortaleza (FZA0M) — 3.9° S, 38.4° W; Jicamarca (JI91J) — 12.0° S, 76.8° W; Campo Grande (CGK21) — 20.5° S, 55.0° W; Learmonth (LM42B) — 21.8° S, 114.1° E; Madimbo (MU12K) — 22.4° S, 30.9° E; Cachoeira Paulista (CAJ2M) — 22.7° S, 45.0° W; Louisvale (LV12P) — 28.5° S, 21.2° E.

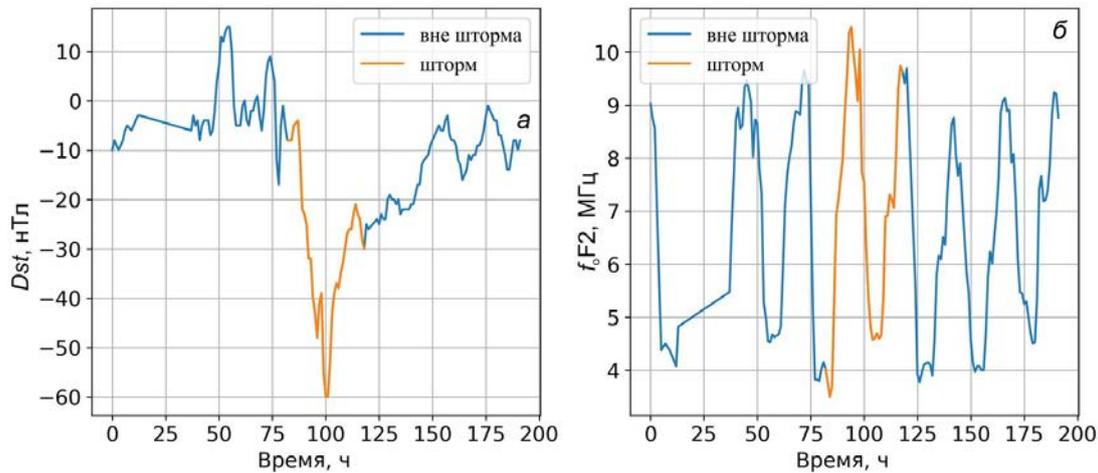


Рис. 1. Dst-индекс (а) и f_oF2 (б) в период геомагнитной бури

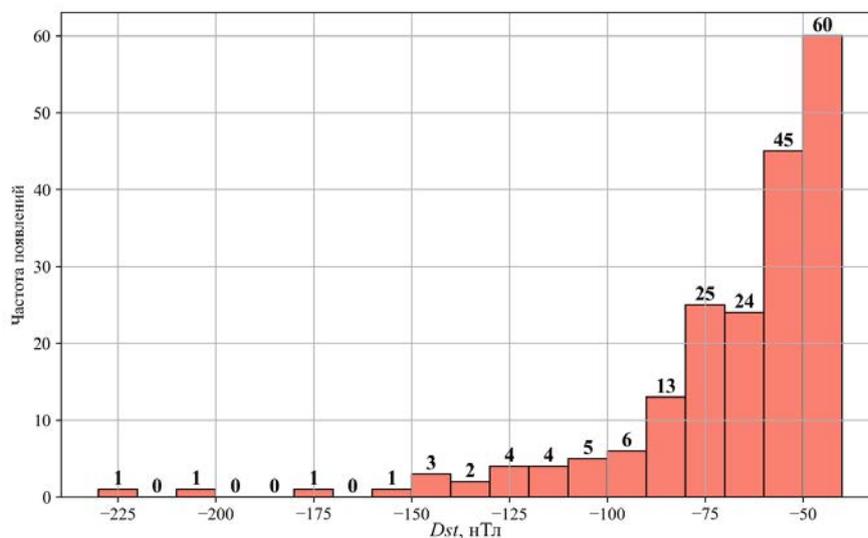


Рис. 2. Распределение геомагнитных бурь

2. АНАЛИЗ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для оценки реакции f_oF2 и h_mF2 на геомагнитные бури вычислялись относительные изменения суточного пика f_oF2 и h_mF2 в процентах:

$$\Delta f_oF2 = (f_oF2_{\text{storm}} - f_oF2_{\text{baseline}}) / f_oF2_{\text{baseline}}, \quad (1)$$

$$\Delta h_mF2 = (h_mF2_{\text{storm}} - h_mF2_{\text{baseline}}) / h_mF2_{\text{baseline}}, \quad (2)$$

где f_oF2_{storm} , h_mF2_{storm} — максимальные суточные значения в период геомагнитной бури; f_oF2_{baseline} , h_mF2_{baseline} — средние величины максимальных суточных значений в спокойный период длительностью три дня до и три дня после геомагнитной бури.

Результаты показаны на рис. 3–6. Для визуализации распределения данных использовался график «ящик с усами». Основные элементы данного графика включают сам ящик, который охватывает интерквартильный диапазон — разницу между первым и третьим квартилями (разброс центральных 50 % данных); усы, представляющие линии, выходящие из ящика и демонстрирующие: диапазон данных 5 перцентилей (нижний ус) и 95 перцентилей (верх-

ний ус); выбросы — точки данных, находящиеся за пределами усов, указывающие на разброс крайних 5 % данных. Внутри ящика отображается линия, обозначающая медиану. При группировке по широтам использовалось следующее деление: высокие широты $|\varphi| > 60^\circ$, средние широты $30^\circ < |\varphi| < 60^\circ$ и низкие широты $|\varphi| < 30^\circ$, где φ — географическая широта.

На рис. 3 показаны средние значения относительного отклонения критической частоты $\langle \Delta f_oF2 \rangle$ в зависимости от времени года в период геомагнитных бурь для различных широт. Видно, что для средних широт характерно увеличение критической частоты в этот период: фиксируются положительные изменения медианного значения среднего относительного отклонения критической частоты $M \langle \Delta f_oF2 \rangle$.

Наибольший эффект наблюдается зимой, когда $M \langle \Delta f_oF2 \rangle$ достигает +6.0 %, тогда как весной он составляет +3.6 %. Схожая тенденция отмечается и для низких широт: наибольший эффект наблюдается зимой — +6.6 %, весной — +4.0 %. Для высоких широт возрастание f_oF2 зафиксировано только в зимний период (до +2.4 %), в то время как весной, летом и осенью наблюдается тенденция к снижению f_oF2 — от -7.4 до -10.8 %.

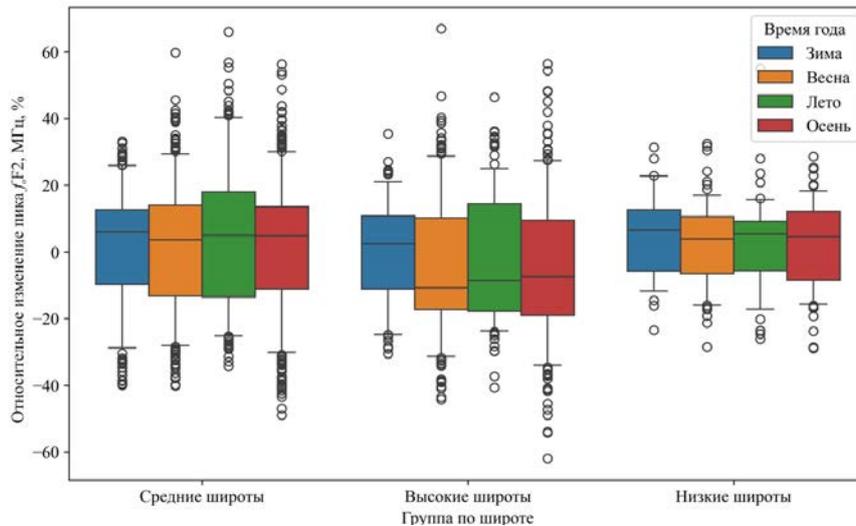


Рис. 3. Изменения $\langle \Delta f_0 F_2 \rangle$ в зависимости от времени года в период геомагнитных бурь для различных широт

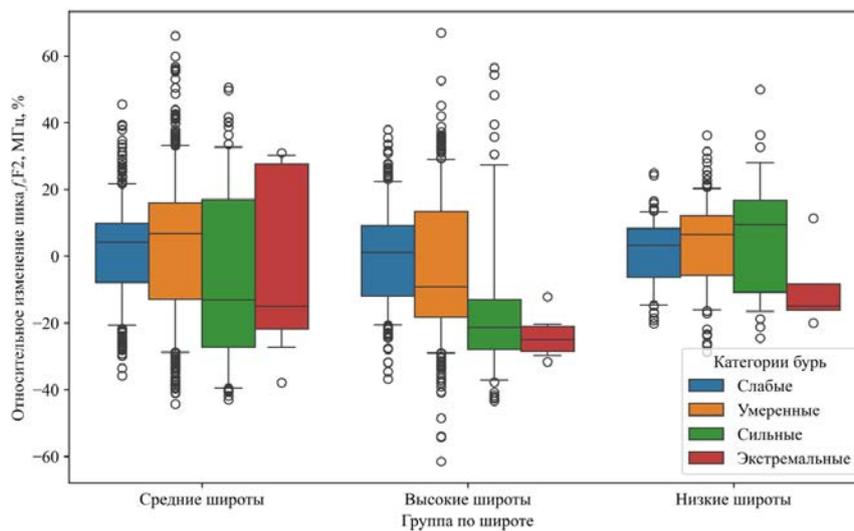


Рис. 4. Изменения $\langle \Delta f_0 F_2 \rangle$ в зависимости от интенсивности геомагнитных бурь для различных широт

На рис. 4 показаны изменения $\langle \Delta f_0 F_2 \rangle$ в зависимости от интенсивности геомагнитной бури.

На высоких широтах при слабых геомагнитных бурях наблюдается незначительный положительный эффект $M\langle \Delta f_0 F_2 \rangle$, составляющий +1.2 %. Однако при умеренных геомагнитных бурях $M\langle \Delta f_0 F_2 \rangle$ снижается до -9.2 %. При сильных бурях эффект усиливается, достигая -21.4 %, а экстремальные возмущения приводят к еще более значительному падению до -25.0 %. Это явление физически объясняется изменением состава нейтральной атмосферы, в частности уменьшением отношения концентраций атомарного кислорода и азота [Данилов, 2013; Ратовский и др., 2018; Черниговская и др., 2024].

На средних широтах при слабых и умеренных геомагнитных бурях наблюдается положительный эффект $M\langle \Delta f_0 F_2 \rangle$, составляющий +4.2 и +6.8 % соответственно. Увеличение $f_0 F_2$ обусловлено появлением дополнительного ветра, способствующего улучшению ионизации верхних слоев ионосферы [Данилов, 2013; Ратовский и др., 2018; Danilov, Konstantinova, 2020]. Однако при сильных и экстремальных бурях

эффект переходит в отрицательный, достигая -13.2 и -15.0 %. Следует отметить, что статистическая надежность данных для экстремальных бурь ограничена небольшой выборкой.

На низких широтах геомагнитные бури (от слабых до сильных) приводят к положительному изменению $M\langle \Delta f_0 F_2 \rangle$: от +3.2 % для слабых до +9.5 % для сильных. Положительный эффект обусловлен усилением экваториального фонтанного эффекта и возмущающими электрическими полями, способствующими подъему слоя F2 на высоту с меньшей скоростью рекомбинации [Danilov, Konstantinova, 2020; Черниговская и др., 2024]. Однако при экстремальных бурях наблюдается инверсия этого эффекта: $M\langle \Delta f_0 F_2 \rangle$ достигает -15.0 %, что может указывать на нарушение нормальной динамики ионосферы. В частности, в период сильнейшей геомагнитной бури 24-го цикла в марте 2015 г. была зафиксирована смена положительного эффекта на отрицательный на главной фазе магнитной бури, которая продолжилась всю восстановительную фазу [Черниговская и др., 2024]. Ввиду малого количества экстремальных бурь

Таблица 1

Статистические данные $\langle \Delta f_oF2 \rangle$

$\langle \Delta f_oF2 \rangle$, %	Средние широты				Высокие широты				Низкие широты			
	M	σ	max	min	M	σ	max	min	M	σ	max	min
Время года												
зима	6.0	16.4	33.2	-39.9	2.4	14.8	35.4	-30.5	6.6	11.5	31.4	-23.4
весна	3.6	18.0	59.8	-40.1	-10.8	19.1	66.9	-44.3	4.0	11.5	32.5	-28.4
лето	5.0	20.5	66.0	-34.2	-8.6	18.4	46.4	-40.6	5.4	13.0	55.0	-26.1
осень	4.9	18.3	56.3	-48.9	-7.4	19.8	56.4	-61.9	4.6	12.2	28.6	-28.9
Интенсивность магнитной бури												
слабые	4.2	13.1	45.5	-35.8	1.2	13.7	37.9	-36.9	3.2	9.3	24.9	-20.2
умерен.	6.8	19.6	66.0	-44.3	-9.2	19.9	66.9	-61.5	6.5	12.0	36.2	-28.9
сильные	-13.2	25.1	50.5	-43.0	-21.4	21.2	56.4	-43.4	9.4	17.2	50.0	-24.5
экстрем.	-15.0	26.2	30.9	-37.9	-25.0	6.0	-12.2	-31.7	-15.0	14.2	11.3	-20.1

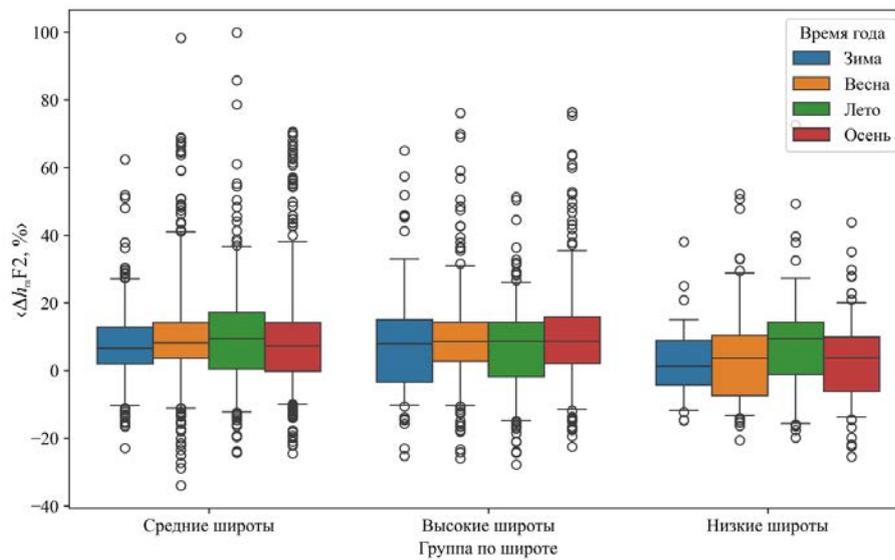


Рис. 5. Изменения $\langle \Delta h_mF2 \rangle$ в зависимости от времени года в период геомагнитных бурь для различных широт

нет возможности набрать статистические данные с учетом особенностей для различных времен года.

Для более удобного анализа поведения ионосферы в табл. 1 даны значения $M\langle \Delta f_oF2 \rangle$, стандартного отклонения $\sigma\langle \Delta f_oF2 \rangle$, а также максимальные и минимальные значения $\max\langle \Delta f_oF2 \rangle$ и $\min\langle \Delta f_oF2 \rangle$ соответственно.

Значительное стандартное отклонение $\sigma\langle \Delta f_oF2 \rangle$ от ~9 до ~26 % указывает на вариативность отдельных геомагнитных событий. Это свидетельствует о том, что индивидуальные события могут значительно отличаться по интенсивности и продолжительности воздействия на f_oF2 , что требует дополнительного анализа интенсивности бурь.

Далее перейдем к анализу зависимости средних значений относительного отклонения $\langle \Delta h_mF2 \rangle$. На рис. 5 показаны средние значения относительного отклонения $\langle \Delta h_mF2 \rangle$, сгруппированные по широте и времени года.

Видно, что для всех широт характерно увеличение h_mF2 в период геомагнитных бурь: фиксируются положительные изменения $M\langle \Delta h_mF2 \rangle$. Для средних и высоких широт $M\langle \Delta h_mF2 \rangle$ варьирует от +6.6 до +9.5 %. В то же время для низких широт такой высокий уровень наблюдается только в летний период; зимой, весной и осенью $M\langle \Delta h_mF2 \rangle$ изменяется от +1.3 до +3.7 %.

Исходя из полученных данных (рис. 6), видно, что с усилением магнитного возмущения происходит заметное повышение h_mF2 , особенно при сильных бурях. На средних и низких широтах экстремальные бури вызывают значительное поднятие слоя, на высоких широтах при экстремальных бурях наблюдается некоторое снижение по сравнению со случаем сильных бурь.

Начальные значения h_mF2 задаются сезонным фоном, который определяется температурой и составом термосферы: летом эта величина выше, зимой ниже. На сезонный уровень накладываются эффекты, вызванные геомагнитными бурями (прямое воздействие полей и динамика термосферы), которые создают дополнительный подъем [Данилов, 2013; Ратовский и др., 2018; Danilov, Konstantinova, 2020]. Наиболее заметны эти эффекты в средних широтах и на экваторе.

Совместное действие сезонности и геомагнитных возмущений определяет наблюдаемые изменения h_mF2 : сочетание летнего периода и сильной бури приводит к общему подъему $M\langle \Delta h_mF2 \rangle$ до 20–30 %, в то время как зимой даже при сильных бурях подъем составляет только 5–10 %.

Для удобства в табл. 2 даны $M\langle \Delta h_mF2 \rangle$, $\sigma\langle \Delta h_mF2 \rangle$ а также $\max\langle \Delta h_mF2 \rangle$ и $\min\langle \Delta h_mF2 \rangle$.

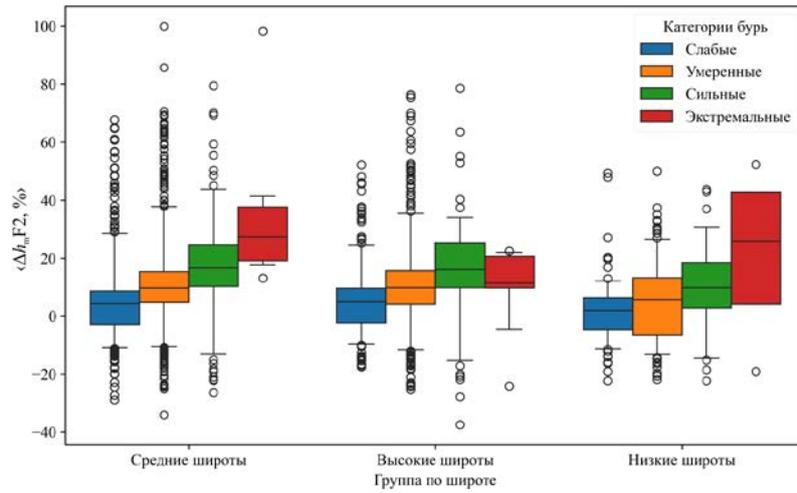


Рис. 6. Изменения $\langle \Delta h_m F2 \rangle$ в зависимости от интенсивности геомагнитных бурь для различных широт

Таблица 2

Статистические данные $\langle \Delta h_m F2 \rangle$

$\langle \Delta h_m F2 \rangle$, %	Средние широты				Высокие широты				Низкие широты			
	M	σ	max	min	M	σ	max	min	M	σ	max	min
Время года												
зима	6.6	12.1	62.4	-22.9	7.8	15.3	65.0	-25.2	1.3	10.1	38.0	-14.8
весна	8.2	15.6	98.3	-34.0	8.5	13.9	76.1	-26.0	3.6	14.1	52.2	-20.6
лето	9.5	16.5	99.9	-24.3	8.6	13.0	51.2	-27.8	9.5	14.6	72.6	-19.9
осень	7.2	15.4	70.6	-24.5	8.6	15.8	76.4	-22.5	3.7	11.8	43.8	-25.5
Интенсивность магнитной бури												
слабые	4.3	12.9	67.7	-28.9	5.0	10.9	52.1	-17.6	1.8	9.9	49.3	-22.4
умерен.	9.6	14.8	99.9	-34.0	9.8	15.2	76.4	-25.2	5.6	13.8	72.6	-21.9
сильные	16.7	17.1	79.4	-26.4	16.2	17.6	78.6	-37.5	9.7	15.3	43.8	-22.3
экстрем.	27.3	21.0	98.3	13.1	11.4	15.4	22.5	-24.2	25.7	31.7	52.2	-19.1

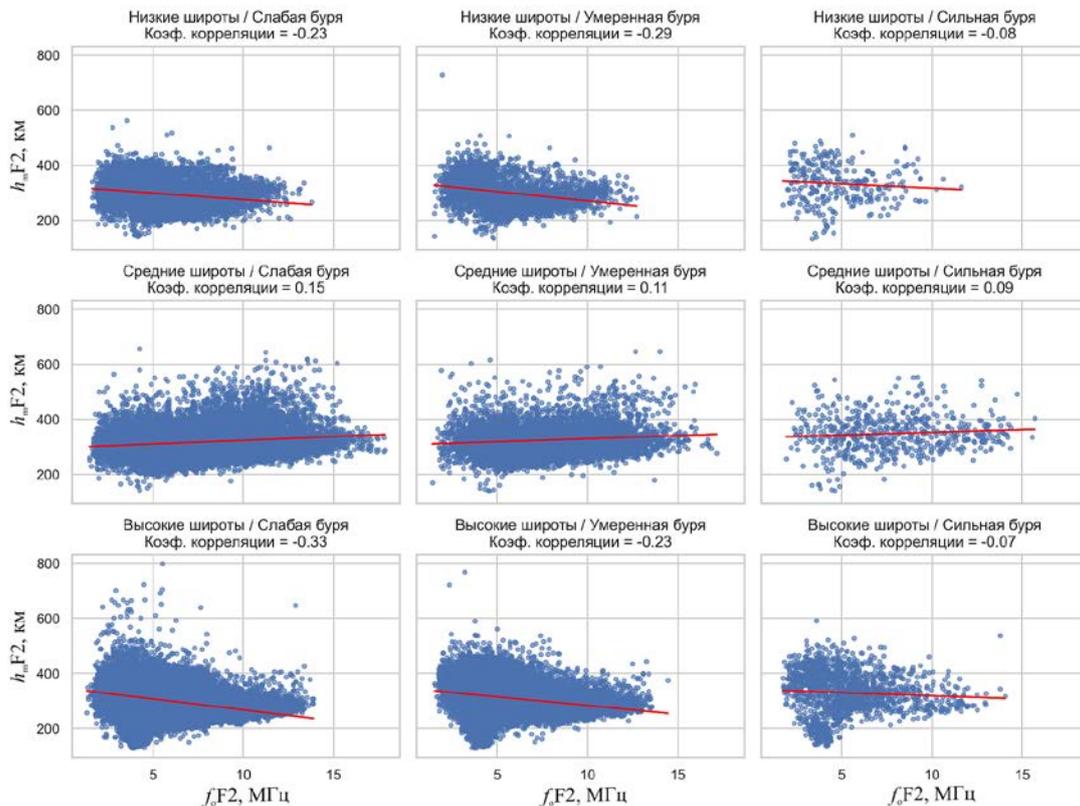


Рис. 7. Корреляция между f_oF2 и h_mF2 для разных широт и геомагнитных бурь

Для $h_m F2$ характерны также значительные $\sigma < \Delta h_m F2 >$ (от ~ 10 до ~ 31 %), что указывает на вариативность отдельных геомагнитных событий.

Между $f_o F2$ и $h_m F2$ в целом наблюдается умеренная отрицательная корреляция, особенно в дневные часы и в условиях высокой СА: когда электронная концентрация увеличивается, $f_o F2$ возрастает, а $h_m F2$, как правило, снижается, потому что ионизация более интенсивна на меньших высотах. Наоборот, в условиях уменьшения ионизации (ночью или при низкой СА) $h_m F2$ увеличивается, а $f_o F2$ уменьшается. На средних широтах корреляция между $f_o F2$ и $h_m F2$ может составлять от -0.3 до -0.7 в зависимости от времени и условий СА. Оценим взаимосвязь параметров ионосферного слоя F2 во время магнитных бурь (см. рис. 7).

Видно, что в период геомагнитных бурь, взаимосвязь существенно ослабевает, в период сильных бурь коэффициент корреляции меньше 0.1. Анализ зависимостей (рис. 3–6) показывает, что при усилении магнитных бурь (особенно на высоких широтах) наблюдается тенденция к снижению $f_o F2$ и одновременному подъему $h_m F2$. Это можно интерпретировать как процесс вертикального перемещения и перераспределения плазмы — эффект, где повышение слоя приводит к снижению плотности в пиковой точке. В средних и экваториальных зонах при слабых и умеренных бурях $f_o F2$ может показывать положительные значения (увеличение ионосферной плотности).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментов показали, что геомагнитные бури оказывают различное влияние на слой F2 в зависимости от географического положения, сезона и интенсивности бури.

1. На высоких широтах наблюдается снижение $f_o F2$, особенно весной ($M < \Delta f_o F2 > = -10.8$ %), летом ($M < \Delta f_o F2 > = -8.6$ %) и осенью ($M < \Delta f_o F2 > = -7.4$ %). В разрезе категорий бурь существенное снижение $f_o F2$ заметно при сильных и экстремальных бурях (-21.4 и -25.0 % соответственно).

2. Средние широты демонстрируют положительный эффект $M < \Delta f_o F2 >$ (до $+6.8$ %) для слабых и умеренных бурь, а также для всех сезонов (от $+3.6$ до $+6.0$ %), но при переходе к сильным бурям эффект меняется на отрицательный (-13.2 %).

3. В экваториальной зоне также наблюдаются положительные изменения $M < \Delta f_o F2 >$, при этом эффект усиливается зимой ($+6.6$ %). Однако экстремальные возмущения могут нарушать стандартную динамику и приводить к снижению $M < \Delta f_o F2 >$ до -15.0 %.

4. Значительные отклонения (в некоторых случаях более 60 %) указывают на вариативность отдельных геомагнитных возмущений. Это свидетельствует о том, что индивидуальные события могут значительно отличаться по интенсивности и продолжительности воздействия на $f_o F2$.

5. С увеличением интенсивности геомагнитной бури происходит подъем максимума слоя F2 во всех категориях. Особенно выражены эти изменения

в средних и экваториальных районах, где экстремальные бури могут повышать $< \Delta h_m F2 >$ до очень высоких значений (например $+27.3$ % в средних широтах).

6. При слабых бурях высота F2-слоя существенно ниже, что подчеркивает динамический характер поведения ионосферного слоя под воздействием внешних возмущений.

7. В случае сильных магнитных бурь взаимосвязь между $f_o F2$ и $h_m F2$ существенно снижается (коэффициент корреляции менее 0.1).

8. Наблюдается взаимосвязь между снижением $f_o F2$ и подъемом $h_m F2$ при магнитных бурях на высоких широтах. Это можно интерпретировать как результат вертикального перераспределения ионов, когда усиленные электрические поля и атмосферные волны вызывают сдвиг пикового слоя на большую высоту, что приводит к уменьшению локальной концентрации.

Таким образом, при прогнозировании влияния ионосферы на распространение радиоволн в период геомагнитных бурь необходимо учитывать интенсивность самой геомагнитной бури, географическую широту трассы и время года. Полученные результаты будут использованы для дальнейших исследований изменчивости ионосферы и возможности повышения точности ее прогнозирования.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

Авторы выражают благодарность организациям, выполняющим регистрацию ионосферных и магнитных данных, используемых в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акасофу С.И., Чепмен С. *Солнечно-земная физика*. Ч. 2. М.: Мир, 1975, 510 с.
- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. *Физика ионосферы*. М.: Наука, 1988, 528 с.
- Данилов А.Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения (обзор). *Гелиогеофизические исследования*. 2013, № 5, с. 1–33.
- 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/szf44201804](https://doi.org/10.12737/szf44201804) / Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Klimenko V.V., et al. After-effects of geomagnetic storms: statistical analysis and theoretical explanation. *Sol.-Terr. Phys.* 2018, vol. 4, iss. 4, pp. 36–42. DOI: [10.12737/stp44201804](https://doi.org/10.12737/stp44201804).
- Черниговская М.А., Ратовский К.Г., Жеребцов Г.А. и др. Отклик ионосферы над регионами высоких и средних широт Евразии по данным ионозондов во время экстремальной магнитной бури в марте 2015 г. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 4, с. 51–64. DOI: [10.12737/szf-104202406](https://doi.org/10.12737/szf-104202406) / Chernigovskaya M.A., Ratovsky K.G., Zherebtsov G.A., et al. Ionospheric response over the high and middle latitude regions of Eurasia according to ionosonde data during the severe magnetic storm in March 2015. *Sol.-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, iss. 4, pp. 46–58. DOI: [10.12737/stp-104202406](https://doi.org/10.12737/stp-104202406).
- 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, pp. 1–15. DOI: [10.1029/2004RS003179](https://doi.org/10.1029/2004RS003179).
- Arowolo O.A., Akala A.O., Oyeyemi E.O. Interplanetary Origins of Some Intense Geomagnetic Storms During Solar Cycle 24 and the Responses of African Equatorial/Low-Latitude Ionosphere to Them. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2021, vol. 126, iss. 2, pp. 1–20. DOI: [10.1029/2020JA027929](https://doi.org/10.1029/2020JA027929).
- Berényi K.A., Barta V., Kis A. Midlatitude ionospheric F2-layer response to eruptive solar events-caused geomagnetic disturbances over Hungary during the maximum of the solar cycle 24: A case study. *Adv. Space Res.* 2018, vol. 61, iss. 5, pp. 1230–1243. DOI: [10.1016/j.asr.2017.12.021](https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.12.021).
- Berényi K.A., Heilig B., Urbár J., et al. Comprehensive analysis of the ionospheric response to the largest geomagnetic storms from solar cycle 24 over Europe. *Front. Astron. Space Sci.* 2023, vol. 10, pp. 1–22. DOI: [10.3389/fspas.2023.1092850](https://doi.org/10.3389/fspas.2023.1092850).
- Chen Y., Liu L., Le H., et al. Responding trends of ionospheric F-layer to weaker geomagnetic activities. *J. Space Weather Space Climate.* 2022, vol. 12, no. 6, pp. 1–12. DOI: [10.1051/swsc/2022005](https://doi.org/10.1051/swsc/2022005).
- Danilov A.D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances. *Adv. Space Res.* 2001, vol. 52, iss. 5, pp. 441–449. DOI: [10.1016/S1364-6826\(00\)00175-9](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00175-9).
- Danilov A.D., Konstantinova A.V. Long-term variations in the parameters of the middle and upper atmosphere and ionosphere. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2020, vol. 60, iss. 4, pp. 397–420. DOI: [10.1134/S0016793220040040](https://doi.org/10.1134/S0016793220040040).
- Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. Variability of the ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2000, vol. 62, iss. 8, pp. 685–693. DOI: [10.1016/S1364-6826\(00\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00029-8).
- Kumar A., Kumar S. Space weather effects on the low latitude D-region ionosphere during solar minimum. *Earth, Planets and Space.* 2014, vol. 66, pp. 1–10. DOI: [10.1186/1880-5981-66-76](https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-76).
- Sidorenko K.A., Vasenina A.A., Kondratyev A.N. Improving forecasting accuracy the F2-layer peak characteristics using artificial neural network. *Adv. Space Res.* 2023, vol. 71, iss. 8, pp. 3373–3381. DOI: [10.1016/j.asr.2022.12.006](https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.12.006).
- Solomon S., Qian L., Burns A. The anomalous ionosphere between solar cycles 23 and 24. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013, vol. 118, iss. 10, pp. 6524–6535. DOI: [10.1002/jgra.50561](https://doi.org/10.1002/jgra.50561).
- URL: <https://giro.uml.edu/didbase/> (дата обращения 15 сентября 2025 г.).
- URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/index.html> (дата обращения 15 сентября 2025 г.).
- Как цитировать эту статью:*
Сидоренко К.А., Васенина А.А. Исследование влияния геомагнитных бурь на параметры слоя F2 ионосферы в течение 24-го цикла солнечной активности. *Солнечно-земная физика.* 2026, т. 12, № 1, с. 25–32. <https://doi.org/10.12737/szf-121202604>.