

УДК 550.388.2

СЕЗОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЧИВОСТИ $NmF2$ НА РАЗНЫХ ДОЛГОТАХ СРЕДНИХ ШИРОТ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2024 г. В. Х. Депуев¹, *, М. Г. Деминов¹, Г. Ф. Деминова¹, А. Х. Депуева¹¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН),
Москва, Троицк, Россия

*e-mail: depuev@izmiran.ru

Поступила в редакцию 27.02.2024 г.

После доработки 27.03.2024 г.

Принята к публикации 04.04.2024 г.

На основе данных семнадцати среднеширотных ионосферных станций за 1958–1988 гг. проведен анализ сезонных особенностей концентрации максимума слоя $F2$ ($NmF2$) на разных долготах при повышенной ($48 > ap(\tau) > 27$) геомагнитной активности, где $ap(\tau)$ – средневзвешенный (с характерным временем 14 ч) ap -индекс этой активности. В качестве характеристик изменчивости использованы стандартное отклонение σ флуктуаций $NmF2$ относительно спокойного уровня и средний сдвиг этих флуктуаций x_{ave} в дневные (11–13 LT) и ночные (23–01 LT) часы. Получено, что на всех анализируемых станциях дисперсия σ^2 для повышенной геомагнитной активности больше, чем для спокойных условий, и, при прочих равных условиях, она максимальна зимой в ночные часы. Для повышенной геомагнитной активности во все сезоны разница в значениях x_{ave} между анализируемыми станциями достаточно большая. Одна из причин этой разницы связана с зависимостью x_{ave} от геомагнитных широт. Для выбора этих широт использованы аппроксимации геомагнитного поля наклонным диполем (TD), эксцентричным диполем (ED) или с помощью исправленных геомагнитных (CGM) координат. Получено, что зависимость x_{ave} от ED-широты точнее зависимости x_{ave} от TD-широты или CGM-широты во все сезоны в ночные часы и в равноденствия и зимой в дневные часы. Летом в дневные часы зависимости x_{ave} от ED-широты и CGM-широты сопоставимы по точности, и они точнее зависимости x_{ave} от TD-широты. Следовательно, ED-широты являются оптимальными для учета эффектов бурь в концентрации максимума слоя $F2$ на средних широтах во все сезоны. Этот вывод получен, по-видимому, впервые.

Ключевые слова: изменчивость ионосферы, геомагнитные возмущения, сезонные особенности.

DOI: 10.31857/S0016794024050075, EDN: QQMJBW

1. ВВЕДЕНИЕ

Под изменчивостью ионосферы понимают флуктуации параметров ионосферы относительно фона. Изменчивость концентрации максимума слоя $F2$ ионосферы $NmF2$ (или критической частоты $foF2 \sim NmF2^{1/2}$) исследовалась неоднократно [Forbes et al., 2000; Rishbeth and Mendillo, 2001; Araujo-Pradere et al., 2005; Fotiadis and Kouris, 2006; Altadill, 2007; Zhang and Holt, 2008; Pirog et al., 2011; Deminov et al., 2013; Ratovsky et al., 2015, 2023]. Ниже $NmF2$ обозначена через Nm для краткости изложения. В этих работах изменчивость Nm оценивалась по величине стандартного (или среднеквадратичного) отклонения Nm относительно фона. В качестве фона можно

использовать средние значения Nm для низкой геомагнитной активности. Получение таких значений Nm сопряжено с определенными трудностями, поскольку периоды продолжительной низкой геомагнитной активности встречаются нечасто (см., например, [Rishbeth and Mendillo, 2001]). Этот способ определения статистических свойств флуктуаций Nm относительно спокойного уровня при разных уровнях солнечной и геомагнитной активности был реализован по данным ст. Irkutsk (52.5° N, 104° E), Alma-Ata (52.5° N, 104° E) и Yamagawa (31.2° N, 130.6° E) [Деминев и др., 2015, 2023].

Эти станции расположены в определенном долготном секторе. В разных долготных секторах

свойства изменчивости Nm могут отличаться. Эти отличия в периоды конкретных геомагнитных бурь отмечены, например, в работах [Kilifarska, 1988; Shpynev et al., 2018; Chernigovskaya et al., 2021; Черниговская и др., 2022]. Они до некоторой степени были учтены в эмпирической модели бури в ионосфере [Araujo-Pradere et al., 2002] и в полумпирической модели отрицательной фазы ионосферной бури [Аннакулиев и др., 1997]. В эмпирической модели бури в ионосфере поправка на геомагнитную бурю зависит от исправленной геомагнитной (CGM) широты [Araujo-Pradere et al., 2002]. Следовательно, можно было предположить, что на средних широтах для высокой геомагнитной активности свойства изменчивости ионосферы на разных долготах будут почти одинаковы для фиксированной CGM-широты и местного времени. Первая проверка этого предположения была выполнена нами по данным ионосферных станций на близких CGM-широтах ($49 \pm 2^\circ$ N) для дневных и ночных часов при повышенной и высокой геомагнитной активностях без разделения на сезоны [Депуев и др., 2024]. Кроме исправленных геомагнитных координат [Gustafsson et al., 1992] были рассмотрены координаты наклонного (TD) и эксцентричного (ED) диполя [Fraser-Smith, 1987; Деминов и Фишук, 2000; Kooschak and Fraser-Smith, 2017]. Напомним, что CGM-, TD- и ED-координаты являются аппроксимациями геомагнитного поля, в TD-координатах центр диполя совпадает с центром Земли и ось диполя наклонена относительно оси вращения, ED-координаты отличаются от TD-координат тем, что центр диполя не совпадает с центром Земли. Было установлено, что ED-широты, а не CGM-широты, являются оптимальными для учета эффектов бурь в концентрации максимума слоя F_2 на средних широтах [Депуев и др., 2024]. Этот вывод был предварительным, поскольку свойства изменчивости Nm могут существенно зависеть от сезона (см., например, [Araujo-Pradere et al., 2005]). Целью данной работы был анализ свойств изменчивости Nm в дневные и ночные часы в разные сезоны при низкой и повышенной геомагнитной активности. Одной из основных целей работы было определение оптимальных геомагнитных координат (TD, ED или CGM) для учета эффектов бурь в Nm с учетом сезонных особенностей этих эффектов.

Ниже представлены результаты этой работы. Они приведены в следующей последовательности: локальные модели Nm для спокойного уровня, т.е. низкой геомагнитной активности, статистические свойства флуктуаций Nm относительно спокойного уровня при низкой и повышенной геомагнит-

ной активности в разные сезоны в дневные и ночные часы, обсуждение этих свойств и выводы.

2. МОДЕЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ МАКСИМУМА СЛОЯ F_2 ДЛЯ НИЗКОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

В данном случае эмпирическая модель концентрации максимума слоя F_2 для низкой геомагнитной активности Nm_0 по данным конкретной станции представляет собой набор коэффициентов a_j ($j = 0, 1, 2, 3$) уравнения регрессии

$$Nm_0(F) = a_0 + a_1 F + a_2 F^2 + a_3 F^3 \quad (1)$$

для каждого часа мирового времени UT с дискретностью 1 час и месяца года ($M = 1$ – январь, $M = 12$ – декабрь), где

$$F = 0.5(F_1 + F_m), \quad (2)$$

F_1 и F_m – величина потока солнечного излучения на длине волны 10.7 см (в 10^{-22} Вт/м² Гц) в данный день и среднее за 81 день значение этого потока, центрированное на данный день.

Коэффициенты a_j уравнения (1) для каждого фиксированного значения UT и M определялись по массиву данных часовых значений Nm конкретной станции за 1958–1988 гг., из которого исключались данные, которые не удовлетворяли условию

$$ap(\tau) < 9, \quad (3)$$

где $ap(\tau)$ – средневзвешенное значение ap -индекса геомагнитной активности с характерным временем $T = 14$ ч или $\tau = \exp(-3/T) \approx 0.8$ [Wrenn, 1987]:

$$ap(\tau) = (1 - \tau)(ap_0 + ap_{-1}\tau + ap_{-2}\tau^2 + \dots), \quad (4)$$

ap_0 , ap_{-1} и т.д. – значения ap -индекса в данный, предыдущий и т.д. трехчасовые интервалы. Условие (3) предназначено для исключения из рассмотрения эффектов магнитосферных бурь в ионосфере [Wrenn and Rodger, 1989]. В данном случае спокойная ионосфера – это ионосфера, из которой исключены эффекты магнитосферных бурь. Уравнения (1)–(4) совпадают с приведенными нами ранее [Депуев и др., 2024].

Для анализа были использованы данные ионосферных станций за 1958–1988 гг., координаты ко-

Таблица 1. Ионосферные станции, их географические (GEOGR) координаты, широты наклонного (TD), эксцентричного (ED) диполя и исправленные геомагнитные (CGM) широты. Статистические свойства изменчивости концентрации максимума слоя $F2$ (среднего сдвига x_{ave} и стандартного отклонения σ относительно спокойного уровня) в равноденствия для дневных (11–13 LT) и ночных (23–01 LT) часов при повышенной ($48 > ap(\tau) > 27$) геомагнитной активности

№	Станция	GEOGR		TD	ED	CGM	48 > $ap(\tau)$ > 27	
		Lon, ° E	Lat, ° N	Lat, ° N	Lat, ° N	Lat, ° N	11–13 LT x_{ave}/σ , %	23–01 LT x_{ave}/σ , %
1	Slough	–0.6	51.5	54	51.1	48.3	–24/27	–36/22
2	Poitiers	0.3	46.6	49.1	46.3	42.1	–21/28	–21/25
3	Rome	12.5	41.8	42.1	39.9	35.5	–06/32	–09/29
4	Juliusruh	13.4	54.6	54.2	52	50.8	–28/26	–39/23
5	Kalinigrad	20.6	54.7	52.9	51.1	50.6	–28/25	–37/24
6	Kiev	30.5	50.5	47.1	45.7	45.7	–21/29	–22/26
7	Leningrad	30.7	60.0	56.1	54.9	55.8	–34/23	–47/28
8	Moscow	37.3	55.5	50.7	49.7	51	–25/29	–35/24
9	Rostov	39.7	47.2	42.4	41.3	42.2	–11/31	–13/28
10	Tomsk	84.9	56.5	46.1	47.1	51.5	–20/28	–28/26
11	Irkutsk	104.0	52.5	41.3	42.9	47.1	–13/28	–16/26
12	Yakutsk	129.6	62.0	51.3	54.6	55.6	–38/23	–47/27
13	Magadan	151.0	60.0	51	53.9	53.2	–36/23	–47/23
14	Boulder	254.7	40.0	48.9	47.4	49.2	–20/32	–11/33
15	Washington	282.9	38.7	49.8	46.9	50.8	–11/32	–17/33
16	Ottawa	284.1	45.4	56.5	53.4	57.3	–29/28	–39/30
17	Wallops Is	284.5	37.8	48.9	46	49.9	–15/34	–12/32

торых приведены в табл. 1. Геомагнитные широты (TD, ED и CGM) в этой таблице вычислены для 1980 г. по международной модели IGRF-13 [Alken et al., 2021]. В данном случае эти станции расположены на географических широтах $50 \pm 12^\circ$ N, TD-широтах $49 \pm 8^\circ$ N, ED-широтах $47.5 \pm 7.5^\circ$ N, CGM-широтах $49 \pm 8^\circ$ N. Отметим, что в табл. 1 приведены 17 станций, в предыдущей работе [Депуев и др., 2024] использовалось 7 разнесенных по долготе станций на близких CGM-широтах ($49 \pm 2^\circ$ N).

На первом этапе для каждой из этих станций были получены эмпирические модели концентрации максимума слоя $F2$ для низкой геомагнитной активности Nm_0 , которые представляют собой уравнения (1) для каждого часа мирового времени и месяца года.

На следующем этапе модели Nm_0 были использованы для анализа свойств флуктуаций Nm относительно спокойного уровня (в процентах), $x = (Nm/Nm_0 - 1) \cdot 100\%$, по данным выбранных

станций: стандартного отклонения $\sigma(x)$, среднеквадратичного отклонения $s(x)$ и среднего сдвига x_{ave} этих флуктуаций относительно спокойного уровня (см., например, [Taylor, 1982]):

$$\begin{aligned}x_{\text{ave}} &= (1/n) \sum_i x_i, \\ \sigma^2 &= (1/n) \sum_i (x_i - x_{\text{ave}})^2, \\ s^2 &= (1/n) \sum_i x_i^2 = \sigma^2 + x_{\text{ave}}^2,\end{aligned}\quad (5)$$

где $x_i = (Nm(i)/Nm_0 - 1) \cdot 100\%$, $\sum_i$ обозначает суммирование по индексу i от 1 до n , n — число значений x данной выборки. При записи этих уравнений учтено, что во всех рассмотренных ниже случаях величина $n > 100$ и можно не учитывать разницу между $(n-1)$ и n . Последнее из равенств (5) показывает, что квадрат среднеквадратического отклонения x относительно спокойного уровня складывается из дисперсии σ^2 , которая характеризует флуктуации x относительно их среднего значения, и квадрата этого среднего значения. Если модель (1) для спокойных условий является точной, то для этих спокойных условий величина $x_{\text{ave}} = 0$. Следовательно, величина x_{ave} характеризует систематическое изменение (сдвиг) Nm относительно спокойного уровня. Величины σ и x_{ave} рассмотрены ниже в качестве основных характеристик флуктуаций Nm относительно спокойного уровня Nm_0 , поскольку величина $s(x)$ однозначно связана с σ и x_{ave} уравнением, приведенным выше.

Для получения надежных статистических оценок были использованы данные ионосферных станций за 1958–1988 гг. для дневных (11–13 LT) и ночных (23–01 LT) часов для трех сезонов (зима (11, 12, 1, 2), равноденствия (3, 4, 9, 10), лето (5, 6, 7, 8), где число обозначает номер месяца года), для двух интервалов геомагнитной активности: низкая ($ap(\tau) < 9$) и повышенная ($48 > ap(\tau) > 27$) активность.

Флуктуации Nm относительно спокойного уровня Nm_0 для низкой геомагнитной активности являются характеристиками точности модели Nm_0 и изменчивости ионосферы для этой активности. Для приведенных в таблице 1 станций для низкой геомагнитной активности в дневные и ночные часы для всех сезонов выполнено условие

$$x_{\text{ave}}^2 \ll \sigma^2. \quad (6)$$

Для дневных часов сезонные различия флуктуаций Nm обычно незначительны. Например,

$|x_{\text{ave}}| \leq 1\%$, $\sigma = 18\text{--}20\%$ для типичных среднеширотных станций Slough, Juliusruh, Moscow в дневные часы для всех сезонов. В ночные часы для этих станций сезонные различия флуктуаций Nm существенны: $x_{\text{ave}} = -4 \pm 1\%$, $\sigma = 26\text{--}27\%$ зимой, $x_{\text{ave}} = -1 \pm 0.5\%$, $\sigma = 23\text{--}24\%$ в равноденствия, $x_{\text{ave}} = -0.3 \pm 0.1\%$, $\sigma = 20\text{--}22\%$ летом. Данные других анализируемых станций подтверждают приведенные результаты: для низкой геомагнитной активности флуктуации Nm почти не зависят от сезона в дневные часы, в ночные часы они больше, чем в дневные часы, и максимальны в ночные часы зимой. Для всех анализируемых станций в ночные часы зимой наблюдается систематический отрицательный сдвиг ($x_{\text{ave}} < 0$) и в среднем $x_{\text{ave}} = -4\%$. Тем не менее, условие (6) выполнено даже для ночных часов зимой, т.е. модель (1) является достаточно точной для всех анализируемых случаев. В данном случае дисперсия σ^2 относительных флуктуаций Nm отражает внутреннюю, т.е. не связанную с геомагнитной активностью, изменчивость ионосферы.

Для типичных среднеширотных станций (Slough, Juliusruh, Moscow) число измерений Nm в интервале 1958–1988 гг. в среднем равно 4000–4500 для каждого из сезонов в дневные и ночные часы при низкой геомагнитной активности. Для этих же условий, но при повышенной геомагнитной активности ($48 > ap(\tau) > 27$), число измерений составляет примерно 800, 1200 и 1000 для зимы, равноденствия и лета. Причина этого: полугодовые изменения геомагнитной активности с максимумами осенью и весной и минимумами летом и зимой, причем минимум зимой более значителен, чем летом [Cliver et al., 2002]. Для аналогичных условий, но при высокой геомагнитной активности ($ap(\tau) > 48$) число измерений около 130, 340, 290. Из приведенных данных следует, что в среднем число измерений для низкой геомагнитной активности примерно в 4–5 и 10–30 раз больше числа измерений при повышенной и высокой геомагнитной активности соответственно. Число измерений при высокой геомагнитной активности незначительно, несмотря на очень большой диапазон изменения этой активности. По этой причине получение корректных оценок изменчивости Nm для высокой геомагнитной активности возможно только без разделения на сезоны. Такие оценки были приведены нами ранее [Депуев и др., 2024]. Ниже представлены оценки изменчивости Nm при повышенной геомагнитной активности для разных сезонов, начиная с равноденствия, поскольку число измерений Nm для этого сезона максимально.

3. ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ МАКСИМУМА СЛОЯ $F2$ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

В табл. 1 приведены результаты вычисления среднего сдвига x_{ave} и стандартного отклонения σ концентрации максимума слоя $F2$ от спокойного уровня для анализируемых станций в дневные (11–13 LT) и ночные (23–01 LT) часы для повышенной геомагнитной активности ($48 > ap(\tau) > 27$). Из этих результатов можно видеть, что стандартные отклонения σ лежат в диапазоне 23–34% и 22–33% в дневные и ночные часы. Следовательно, в среднем стандартное отклонение σ для повышенной геомагнитной активности больше, чем для спокойных условий, примерно на 10% и 5% в дневные и ночные часы. В целом, отличия в значениях σ между анализируемыми станциями не очень большие: $\sigma = 28.5 \pm 5.5\%$ и $\sigma = 27.5 \pm 5.5\%$ в дневные и ночные часы.

Для всех приведенных в табл. 1 случаев сдвиг $x_{ave} < 0$, т.е. в равноденствия при повышенной геомагнитной активности этот сдвиг соответствует уменьшению Nm относительно спокойного уровня – отрицательная фаза ионосферного возмущения. Диапазон изменений $|x_{ave}|$ равен 6–38% и 9–47% для дневных и ночных часов. Следовательно, для всех анализируемых станций в дневные и ночные часы средняя величина $|x_{ave}|$ в периоды повышенной геомагнитной активности на порядок больше, чем для спокойных условий.

Не менее важным является очень большой диапазон изменений x_{ave} между анализируемыми станциями: $|x_{ave}| = 22 \pm 16\%$ и $|x_{ave}| = 28 \pm 19\%$ для дневных и ночных часов. Эффекты ионосферных возмущений в периоды повышенной геомагнитной активности зависят от широты, поскольку источник этих возмущений расположен в высоких широтах. В качестве таких широт можно выбрать широты в координатах ED, TD или CGM и оценить, которая из них является более точной для описания возмущений в ионосфере средних широт в периоды повышенной геомагнитной активности. Для этого по данным x_{ave} в таблице 1 были определены коэффициенты уравнений регрессии (a и b) и статистические свойства этих уравнений

$$x_{ave} = a + b\Phi, \quad (7)$$

где Φ – TD-, ED- или CGM-широты, которые для каждой из анализируемых станций (и каждого x_{ave} в дневные или ночные часы) приведены в таблице 1. Для равноденствий результат показан

на рис. 1, где приведены исходные данные x_{ave} , уравнения регрессии (7), коэффициенты определенности R^2 и стандартные отклонения σ для этих уравнений. Отметим, что R – коэффициент корреляции между вычисленными по уравнению (6) и исходными значениями x_{ave} . Из данных на рисунке 1 следует, что зависимость x_{ave} от ED-широты гораздо точнее зависимости x_{ave} от TD- или CGM-широты, как в дневные, так и в ночные часы: а) коэффициент определенности R^2 для зависимости x_{ave} от ED-широты в 1.5 раза больше, чем для этой зависимости от TD- или CGM-широты; б) величина σ для зависимости x_{ave} от ED-широты в 1.7–2 раза меньше, чем для этой зависимости от TD- или CGM-широты.

На рис. 2 для лета приведены исходные данные x_{ave} , уравнения регрессии (7), коэффициенты определенности R^2 и стандартные отклонения σ для этих уравнений. Они основаны на данных ионосферных станций, координаты которых приведены в табл. 1. Из данных на рис. 2 можно видеть, что в дневные часы зависимость x_{ave} от ED- или CGM-широты точнее зависимости x_{ave} от TD-широты. Для этих часов зависимость x_{ave} от CGM-широты немного точнее зависимости x_{ave} от ED-широты: разница стандартных отклонений σ для этих зависимостей относительно низкая и равна 0.5%. Поэтому можно утверждать, что в данном случае точности зависимостей x_{ave} от ED- или CGM-широт почти совпадают. Из данных на рис. 2 следует, что для ночных часов зависимость x_{ave} от ED-широты гораздо точнее зависимости x_{ave} от TD- или CGM-широты: а) коэффициент определенности R^2 для зависимости x_{ave} от ED-широты в 1.5 раза больше, чем для этой зависимости от TD- или CGM-широты; б) величина σ для зависимости x_{ave} от ED-широты в 1.6–1.7 раза меньше, чем для этой зависимости от TD- или CGM-широты.

На рис. 3 для зимы приведены исходные данные x_{ave} , уравнения регрессии (7), коэффициенты определенности R^2 и стандартные отклонения σ для этих уравнений. Они основаны на данных ионосферных станций, координаты которых приведены в табл. 1. Из данных на рис. 3 можно видеть, что для дневных часов зависимость x_{ave} от ED-широты гораздо точнее зависимости x_{ave} от TD- или CGM-широты: а) коэффициент определенности R^2 для зависимости x_{ave} от ED-широты в 1.4–1.7 раза больше, чем для этой зависимости от TD- или CGM-широты; б) величина σ для зависимости x_{ave} от ED-широты в 1.6–1.8 раза меньше, чем для этой зависимости от TD- или CGM-широты. Уравнения регрессии (7) для ночных часов зимой описывают только небольшую

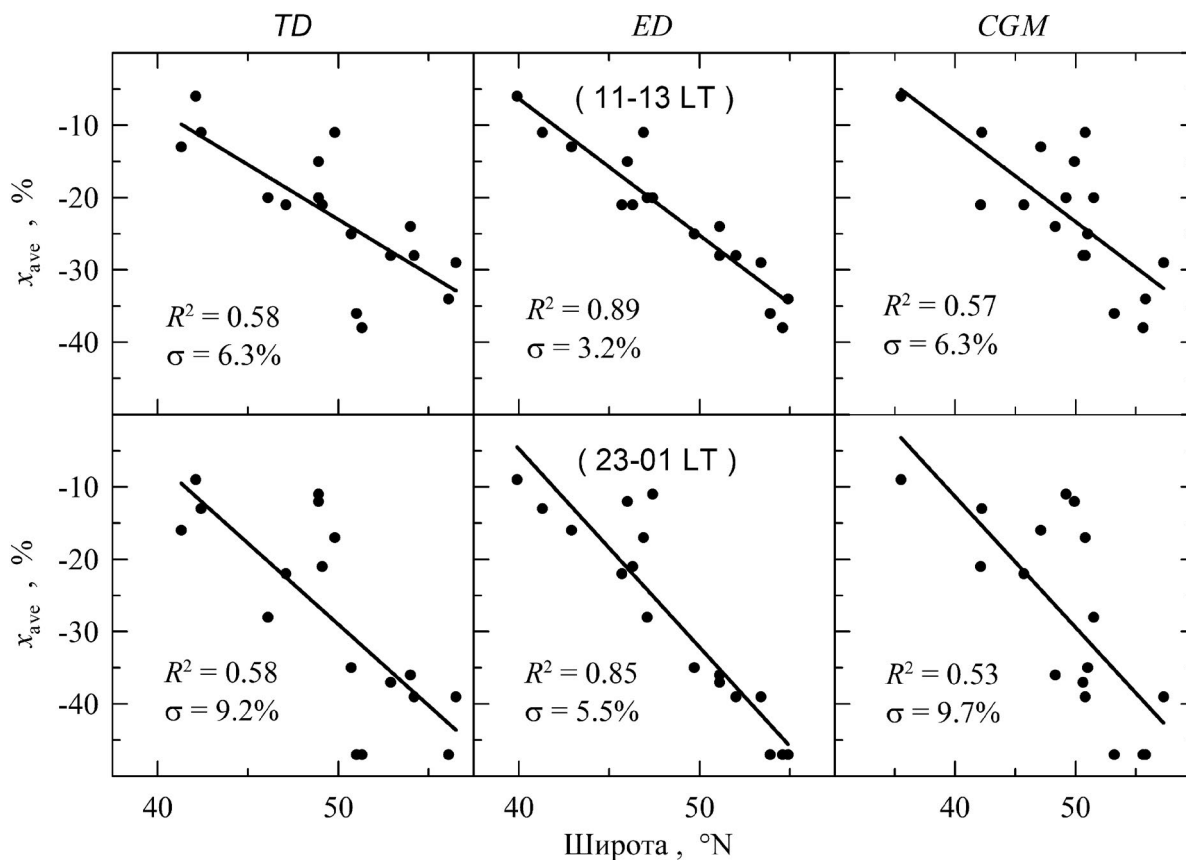


Рис. 1. Зависимости среднего сдвига x_{ave} концентрации максимума слоя $F2$ от широт наклонного (TD) или эксцентричного (ED) диполя или исправленных геомагнитных (CGM) широт в равноденствия для дневных (11–13 LT) и ночных (23–01 LT) часов при повышенной геомагнитной активности по данным в табл. 1 (точки). Уравнения регрессии (7) по этим данным (сплошные линии), коэффициенты определенности R^2 и стандартные отклонения σ для этих уравнений.

часть зависимости x_{ave} от широты: 28, 36 и 15% этой зависимости для координат TD, ED и CGM, если судить по данным R^2 на рис. 3. Тем не менее, даже в этом случае зависимость x_{ave} от ED-широты точнее зависимости x_{ave} от TD-или CGM-широты. Из данных на рис. 3 можно видеть, что $x_{ave} > 0$ в дневные часы на ED-широтах, меньших 45° N. Следовательно, в дневные часы зимой при повышенной геомагнитной активности на относительно низких широтах наблюдается положительная фаза бури в ионосфере, на более высоких широтах — отрицательная фаза этой бури. Из данных на рис. 1 и рис. 2 можно видеть, что при повышенной геомагнитной активности в равноденствия и летом на всех анализируемых станциях наблюдается только отрицательная фаза ионосферной бури, т.е. $x_{ave} < 0$ для этих условий.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Выше было получено, что модель (1) для концентрации Nm_0 при низкой геомагнитной актив-

ности является достаточно точной для анализируемых станций, поскольку для этой активности выполнено условие (6): стандартные отклонения σ гораздо больше средних отклонений (сдвига) x_{ave} измеренных значений Nm от Nm_0 . Для низкой геомагнитной активности флуктуации Nm относительно Nm_0 почти не зависят от сезона в дневные часы, в ночные часы они больше, чем в дневные часы. Эти флуктуации максимальны в ночные часы зимой, когда наблюдается отрицательный сдвиг Nm относительно Nm_0 и в среднем $x_{ave} = -4\%$. Существование такого сдвига указывает на неточность модели (1) для ночных условий зимой при низкой геомагнитной активности. Для этих условий зимой на средних широтах зависимость Nm_0 от индекса солнечной активности F практически отсутствует для низкой солнечной активности и Nm_0 увеличивается с ростом F для высокой солнечной активности (см., например, [Кринберг и Ташилин, 1984]). Поэтому более точным было построение модели (1) для нескольких интерва-

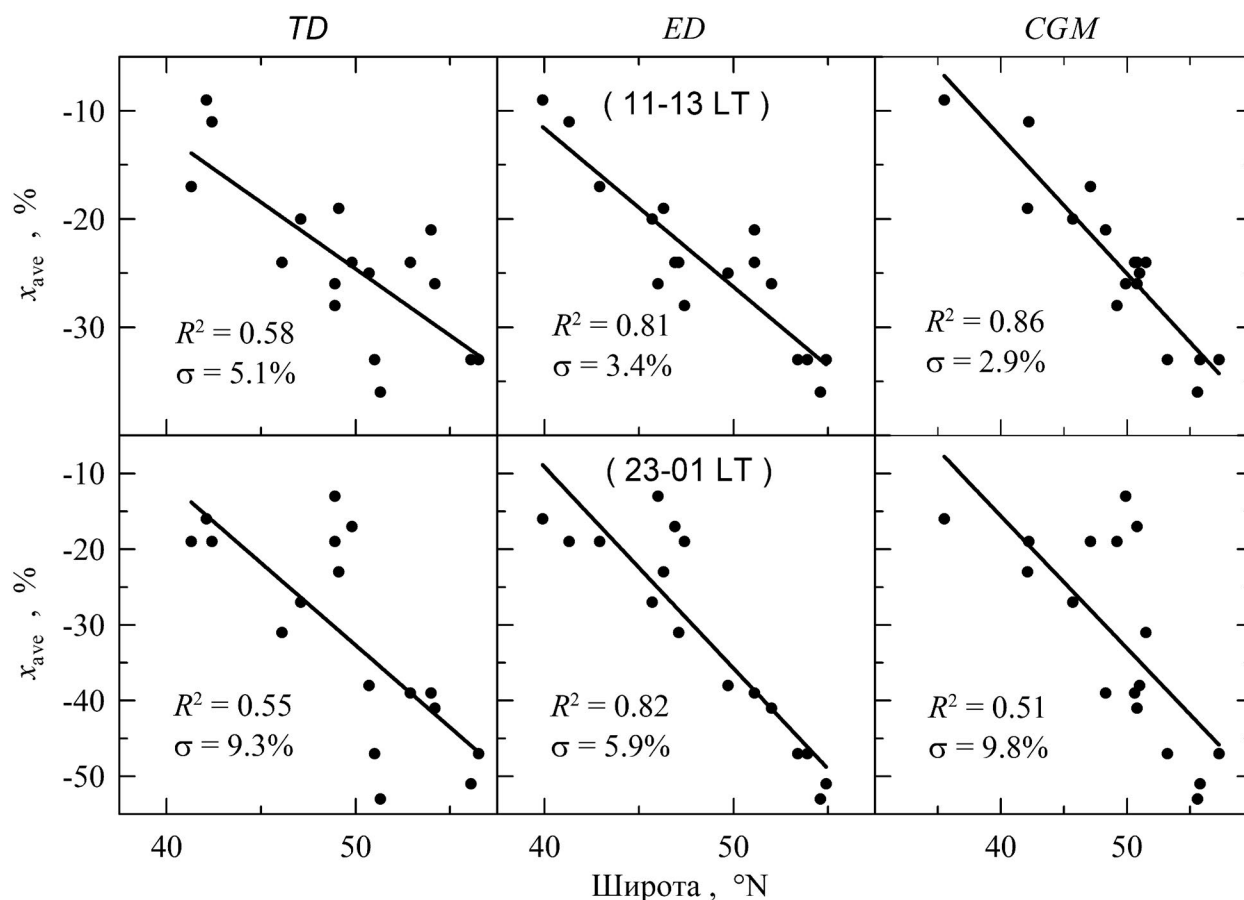


Рис. 2. Зависимости среднего сдвига x_{ave} концентрации максимума слоя $F2$ от широт наклонного (TD) или эксцентричного (ED) диполя или исправленных геомагнитных (CGM) широт летом для дневных (11–13 LT) и ночных (23–01 LT) часов при повышенной геомагнитной активности по данным ионосферных станций, координаты которых приведены в табл. 1 (точки). Уравнения регрессии (7) по этим данным (сплошные линии), коэффициенты определенности R^2 и стандартные отклонения σ для этих уравнений.

лов индекса солнечной активности. Тем не менее, даже для ночных зимних условий выполнено условие (6), т.е. модель (1) обладает достаточной точностью для решения поставленной задачи.

В модели (1) использован индекс солнечной активности F , который основан на традиционном индексе $F10.7$. Поток солнечного радиоизлучения на длине волны 30 см (индекс $F30$) может быть более точным, чем $F10.7$, индикатором солнечной активности для медиан или ежегодных значений $foF2$ [Danilov and Berbeneva, 2023; Laštovička and Burešova, 2023]. Медианы и ежегодные значения $foF2$ в значительной степени являются характеристиками долговременных (климатических) изменений $foF2$. Разница между индексами $F30$ и $F10.7$ (с учетом приведения одного индекса к другому на основе уравнения регрессии) такова, что она не имеет значения для большинства при-

ложений космической погоды, но может быть важной для исследований космического климата [Dudok de Wit and Bruinsma, 2017]. В данном случае нас интересовала космическая погода, поэтому мы сохранили индекс F как индикатор солнечной активности для ежедневных значений Nm_0 во все часы мирового времени.

Приведенные на рисунках 1–3 данные отражают известные закономерности бури в ионосфере средних широт: а) амплитуда отрицательной фазы бури ($x_{ave} < 0$) больше летом, чем зимой, и в ночные часы больше, чем в дневные часы; б) положительная фаза бури ($x_{ave} > 0$) чаще наблюдается в дневные часы зимой на относительно низких широтах [Pröls, 1977; Fuller-Rowell et al., 1996; Mikhailov, 2000; Kumar and Parkinson, 2017]. Например, средние по 17 анализируемым станциям значения x_{ave} в дневные часы равны -7 , -22

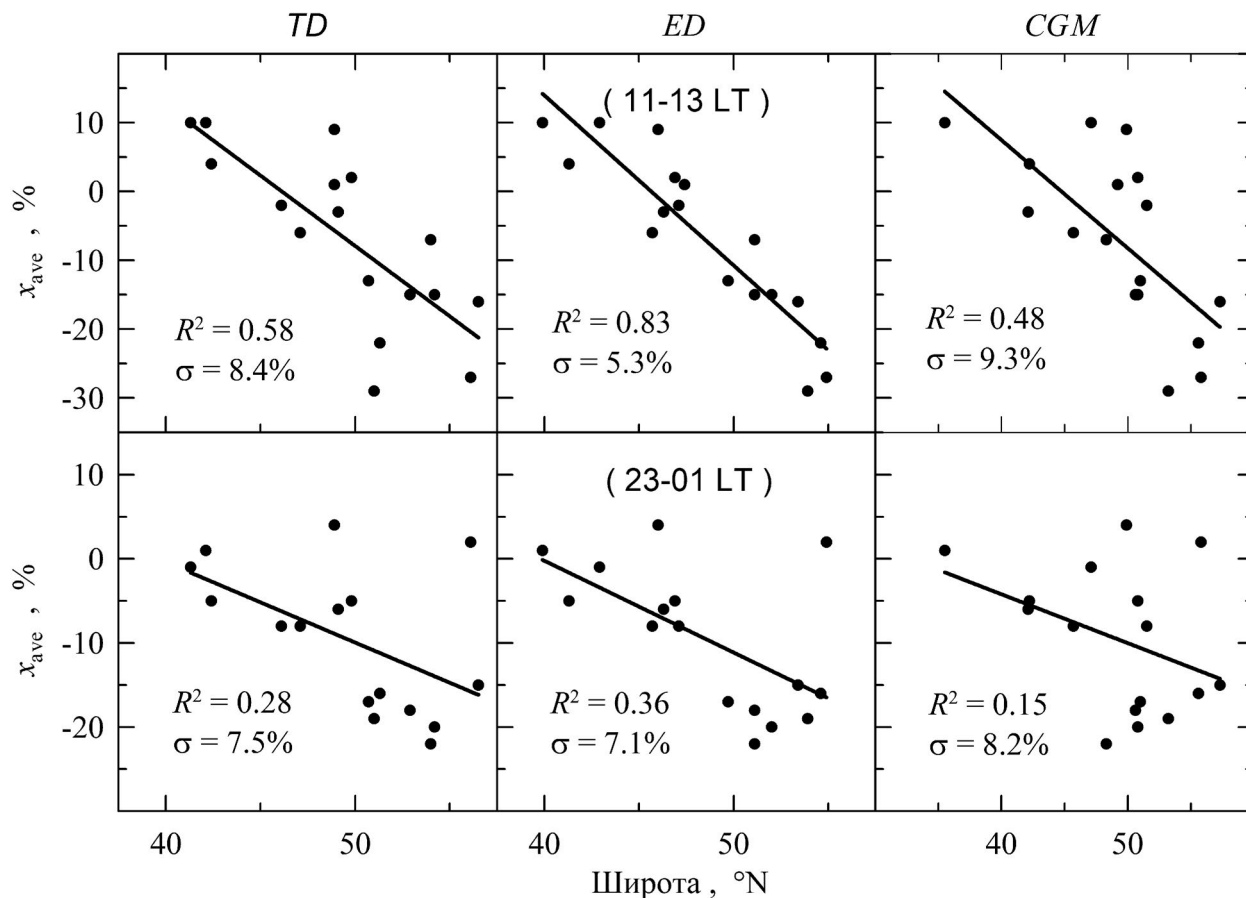


Рис. 3. Зависимости среднего сдвига x_{ave} концентрации максимума слоя $F2$ от широт наклонного (TD) или эксцентричного (ED) диполя или исправленных геомагнитных (CGM) широт зимой для дневных (11–13 LT) и ночных (23–01 LT) часов при повышенной геомагнитной активности по данным ионосферных станций, координаты которых приведены в табл. 1 (точки). Уравнения регрессии (7) по этим данным (сплошные линии), коэффициенты определенности R^2 и стандартные отклонения σ для этих уравнений.

и -24% зимой, в равноденствия и летом; в ночные часы эти значения равны -10 , -28 и -31% .

Отличия в значениях стандартного отклонения σ между анализируемыми станциями для умеренной геомагнитной активности не очень большие. Например, для равноденствия $\sigma = 28.5 \pm 5.5\%$ и $\sigma = 27.5 \pm 5.5\%$ в дневные и ночные часы (см. табл. 1). Это не позволило выбрать оптимальные геомагнитные широты для учета зависимости σ от широты.

Отличия в значениях среднего сдвига x_{ave} концентрации максимума слоя $F2$ относительно спокойного уровня между анализируемыми станциями достаточно большие. Сильная зависимость x_{ave} от геомагнитных широт может быть одной из основных причин такого отличия. В качестве таких геомагнитных широт были выбраны TD-, ED- и CGM-широты. Было получено, что для повышенной геомагнитной активности зависи-

мость x_{ave} от ED-широты точнее зависимостей x_{ave} от TD-широты и CGM-широты в ночные часы для всех сезонов и в дневные часы для равноденствий и зимы. В дневные часы летом зависимости x_{ave} от ED- и CGM-широты практически совпадают по точности, и они точнее зависимости x_{ave} от TD-широты. Следовательно, в целом, ED-широты являются оптимальными для учета эффектов бурь в концентрации максимума слоя $F2$ на средних широтах во все сезоны для периодов повышенной геомагнитной активности. Этот вывод получен, по-видимому, впервые. Для высокой геомагнитной активности, но без разделения на сезоны, аналогичный вывод был получен нами ранее [Депуев и др., 2024]. Высокая геомагнитная активность встречается нечасто, поэтому нам не удалось получить корректные оценки зависимости изменчивости ионосферы от сезона для этой активности.

6. ВЫВОДЫ

На основе данных семнадцати среднеширотных ионосферных станций за 1958–1988 гг. проведен анализ сезонных особенностей концентрации максимума слоя $F2$ ($NmF2$) на разных долготах при повышенной ($48 > ap(\tau) > 27$) геомагнитной активности, где $ap(\tau)$ – средневзвешенный (с характерным временем 14 ч) ap -индекс этой активности. В качестве характеристик этой изменчивости использованы стандартное отклонение σ флуктуаций Nm относительно спокойного уровня и средний сдвиг этих флуктуаций x_{ave} в дневные (11–13 LT) и ночные (23–01 LT) часы. Получены следующие выводы.

1. На всех анализируемых станциях дисперсия σ^2 для повышенной геомагнитной активности больше, чем для спокойных условий, и, при прочих равных условиях, она максимальна зимой в ночные часы.

2. Для повышенной геомагнитной активности изменения x_{ave} отражают известные закономерности бури в ионосфере средних широт: а) амплитуда отрицательной фазы бури ($x_{ave} < 0$) больше летом, чем зимой, и в ночные часы больше, чем в дневные часы; б) положительная фаза бури ($x_{ave} > 0$) чаще наблюдается в дневные часы зимой на относительно низких широтах.

3. Для повышенной геомагнитной активности во все сезоны разница в значениях x_{ave} между анализируемыми станциями достаточно большая. Одна из причин этой разницы связана с зависимостью x_{ave} от геомагнитных широт. Для выбора этих широт использованы аппроксимации геомагнитного поля наклонным диполем (TD), эксцентричным диполем (ED) или с помощью исправленных геомагнитных (CGM) координат. Получено, что зависимость x_{ave} от ED-широты точнее зависимости x_{ave} от TD-широты или CGM-широты во все сезоны в ночные часы и в равноденствия и зимой в дневные часы. Летом в дневные часы зависимости x_{ave} от ED-широты и CGM-широты сопоставимы по точности, и они точнее зависимости x_{ave} от TD-широты. Следовательно, ED-широты являются оптимальными для учета эффектов бурь в концентрации максимума слоя $F2$ на средних широтах во все сезоны. Этот вывод получен, по-видимому, впервые.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данные критических частот слоя $F2$ анализируемых ионосферных станций, индексы солнечной и геомагнитной активности были взяты с сайтов Space Physics Interactive Data Resource (SPIDR, <http://spidr.ngdc.noaa.gov/>, до 2015 года), WDC for Solar-Terrestrial Physics,

Chilton (<http://www.ukssdc.ac.uk/wdccc1/>), WDC for Geomagnetism, Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аннакулиев С.К., Деминов М.Г., Фельдштейн А.Я., Шубин В.Н. О долгом эффекте в отрицательной фазе ионосферной бури на средних широтах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 37. № 1. С. 75–83. 1997.
- Деминов М.Г., Фишук Я.А. Об использовании аппроксимации геомагнитного поля эксцентричным диполем в задачах моделирования ионосферы и плазмосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 40. № 3. С. 119–123. 2000.
- Деминов М.Г., Деминова Г.Ф., Жеребцов Г.А., Полех Н.М. Свойства изменчивости концентрации максимума $F2$ -слоя над Иркутском при разных уровнях солнечной и геомагнитной активности // Солнечно-земная физика. Т. 1. № 1. С. 56–62. 2015. <https://doi.org/10.12737/6558>
- Деминов М.Г., Деминова Г.Ф., Денуев В.Х., Денуева А.Х. Свойства изменчивости концентрации максимума $F2$ -слоя над Алма-Атой при разных уровнях солнечной и геомагнитной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 5. С. 630–637. 2023. <https://doi.org/10.31857/S0016794023600308>
- Денуев В.Х., Деминов М.Г., Деминова Г.Ф., Денуева А.Х. Изменчивость $NmF2$ на разных долготах средних широт: роль геомагнитной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 64. № 4. С. 503–511. 2024. <https://doi.org/10.31857/S0016794024040059>
- Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 189 с. 1984.
- Черниговская М.А., Шнынев Б.Г., Хабитуев Д.С., Ратовский К.Г., Белинская А.Ю., Степанов А.Е., Бычков В.В., Григорьева С.А., Панченко В.А., Мелич Й. Исследование отклика среднеширотной ионосферы Северного полушария на магнитные бури в марте 2012 г. // Солнечно-земная физика. Т. 8. № 4. С. 46–56. 2022. <https://doi.org/10.12737/szf-84202204>
- Alken P., Thebault E., Beggan C.D. et al. International geomagnetic reference field: the thirteenth generation // Earth Planets Space. V. 73. № 1. ID 49. 2021. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>
- Altadill D. Time/altitude electron density variability above Ebro, Spain // Adv. Space Res. V. 39. № 5. P. 962–969. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.05.031>
- Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V. STORM: An empirical storm-time ionospheric correction model: 1. Model description // Radio Sci. V. 37. № 5. ID 1070. 2002. <https://doi.org/10.1029/2001RS002467>
- 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. V. 40. № 5. ID RS5009. 2005. <https://doi.org/10.1029/2004RS003179>

- 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.* V. 67. № 2. P. 762–776. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.028>
- Cliver E.W., Kamide Y., Ling A.G. The semiannual variation of geomagnetic activity: phases and profiles for 130 years of aa data // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 64. № 1. P. 47–53. 2002. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(01\)00093-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00093-1)
- Danilov A.D., Berbeneva N.A. Statistical analysis of the critical frequency foF2 dependence on various solar activity indices // *Adv. Space Res.* V. 72. № 6. P. 2351–2361. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.05.012>
- Deminov M.G., Deminova G.F., Zhrebtsov G.A., Polekh N.M. Statistical properties of variability of the quiet ionosphere F2-layer maximum parameters over Irkutsk under low solar activity // *Adv. Space Res.* V. 51. № 5. P. 702–711. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.09.037>
- Dudok de Wit T., Bruinsma S. The 30 cm radio flux as a solar proxy for thermosphere density modeling // *J. Space Weather Space Clim.* V. 7. ID A9. 2017. <https://doi.org/10.1051/swsc/2017008>
- Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. Variability of the ionosphere // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 62. № 8. P. 685–693. 2000. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00029-8)
- Fotiadis D.N., Kouris S.S. A functional dependence of foF2 variability on latitude // *Adv. Space Res.* V. 37. № 5. P. 1023–1028. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.02.054>
- Fraser-Smith A.C. Centered and eccentric geomagnetic dipoles and their poles, 1600–1985 // *Rev. Geophys.* V. 25. № 1. P. 1–16. 1987. <https://doi.org/10.1029/RG025i001p00001>
- Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Rishbeth H., Mofjett R.J., Quegan S. On the seasonal response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* — *Space*. V. 101. № 2. P. 2343–2353. 1996. <https://doi.org/10.1029/95JA01614>
- Gustafsson G., Papitashvili N.E., Papitashvili V.O. A revised corrected geomagnetic coordinate system for epochs 1985 and 1990 // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 54. № 11–12. P. 1609–1631. 1992. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(92\)90167-J](https://doi.org/10.1016/0021-9169(92)90167-J)
- Kilifarska N.A. Longitudinal effects in the ionosphere during geomagnetic storms // *Adv. Space Res.* V. 8. № 4. P. 23–26. 1988. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(88\)90200-1](https://doi.org/10.1016/0273-1177(88)90200-1)
- Koochak Z., Fraser-Smith A. C. An update on the centered and eccentric geomagnetic dipoles and their poles for the years 1980–2015 // *Earth and Space Science*. V. 4. № 10. P. 626–636. 2017. <https://doi.org/10.1002/2017EA000280>
- Kumar V.V., Parkinson M.L. A global scale picture of ionospheric peak electron density changes during geomagnetic storms // *Space Weather*. V. 15. № 4. P. 637–652. 2017. <https://doi.org/10.1002/2016SW001573>
- Laštovička J., Burešova D. Relationships between foF2 and various solar activity proxies // *Space Weather*. V. 21. № 4. ID e2022SW003359. 2023. <https://doi.org/10.1029/2022SW003359>
- Mikhailov A.V. Ionospheric F2-layer storms // *Física de la Tierra*. V. 12. P. 223–262. 2000.
- Pirog O., Deminov M., Deminova G., Zhrebtsov G., Polekh N. Peculiarities of the nighttime winter foF2 increase over Irkutsk // *Adv. Space Res.* V. 47. № 6. P. 921–929. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.11.015>
- Prölss G.W. Seasonal variations of atmospheric-ionospheric disturbances // *J. Geophys. Res.* V. 82. № 10. P. 1635–1640. 1977. <https://doi.org/10.1029/JA082i010p01635>
- Ratovsky K.G., Medvedev A.V., Tolstikov M.V. Diurnal, seasonal and solar activity pattern of ionospheric variability from Irkutsk Digisonde data // *Adv. Space Res.* V. 55. № 8. P. 2041–2047. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.08.001>
- Ratovsky K.G., Medvedeva I.V. Local empirical model of ionospheric variability // *Adv. Space Res.* V. 71. № 5. P. 2299–2306. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.10.065>
- Rishbeth H., Mendillo M. Patterns of F2-layer variability // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 63. № 15. P. 1661–1680. 2001. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(01\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00036-0)
- 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. Sol.-Terr. Phys.* V. 180. P. 93–105. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.10.014>
- Taylor J.R. An introduction to error analysis. Mill Valley, CA: Univer. Sci. Books, 270 p. 1982.
- Wrenn G.L. Time-weighted accumulations $ap(\tau)$ and $Kp(\tau)$ // *J. Geophys. Res.* — *Space*. V. 92. № 9. P. 10125–10129. 1987. <https://doi.org/10.1029/JA092iA09p10125>
- Wrenn G.L., Rodger A.S. Geomagnetic modification of the mid-latitude ionosphere - Toward a strategy for the improved forecasting of foF2 // *Radio Sci.* V. 24. № 1. P. 99–111. 1989. <https://doi.org/10.1029/RS024i001p00099>
- Zhang S.-R., Holt J.M. Ionospheric climatology and variability from long-term and multiple incoherent scatter radar observations: variability // *Ann. Geophys.* V. 26. № 6. P. 1525–1537. 2008. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-1525-2008>

Seasonal Features of the $NmF2$ Variability for Different Longitudes of the Middle Latitudes During Enhanced Geomagnetic Activity

V. H. Depuev^{1,*}, M. G. Deminov¹, G. F. Deminova¹, A. H. Depueva¹

¹*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia*

**e-mail:depuev@izmiran.ru*

Based on the data of seventeen midlatitude ionospheric stations for 1958–1988, analysis of seasonal features of the $F2$ layer maximum concentration ($NmF2$) at different longitudes with enhanced ($48 > ap(\tau) > 27$) geomagnetic activity, where $ap(\tau)$ – the weighted average (with a characteristic time of 14 hours) ap -index of this activity. As the characteristics of $NmF2$ variability, the standard deviation of $NmF2$ fluctuations for relatively quiet conditions and the average shift of these fluctuations x_{ave} during daytime (11–13 LT) and night (23–01 LT) were used. It was obtained that at all analyzed stations, the dispersion σ^2 for enhanced geomagnetic activity is greater than for quiet conditions, and, other things being equal, it is maximum in winter at night. For enhanced geomagnetic activity in all seasons, the difference in x_{ave} values between the analyzed stations is quite large. One of the reasons for this difference is associated with the dependence of x_{ave} on geomagnetic latitudes. To select these latitudes, approximations of the geomagnetic field with tilted dipole (TD), eccentric dipole (ED) or using corrected geomagnetic (CGM) coordinates were used. It has been obtained that the x_{ave} dependence on the ED-latitude is more accurate in comparison to the x_{ave} dependence on the TD-latitude or CGM-latitude during all seasons at night and during equinoxes and winter – in the daytime. In the summer, in the daytime hours x_{ave} dependence on ED-latitude and CGM-latitude are comparable in accuracy, and they are more accurate in comparison to x_{ave} dependence on the TD-latitude. Consequently, ED-latitudes are optimal for taking into account the effects of storms in the $F2$ layer maximum concentration at middle latitudes during all seasons. This conclusion was apparently made for the first time.

Keywords: ionospheric variability, geomagnetic disturbances, seasonal features.