

СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ДНЕВНОГО МАКСИМУМА ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ СЛОЯ F2 ИОНОСФЕРЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ ТОМСКОЙ ИОНОСФЕРНОЙ СТАНЦИИ

SEASONAL VARIATIONS IN DAILY MAXIMUM OF ELECTRON DENSITY IN THE F2 IONOSPHERIC LAYER DEPENDING ON SOLAR ACTIVITY ACCORDING TO THE TOMSK IONOSPHERIC STATION DATA

С.А. Колесник

Томский государственный университет,
Томск, Россия, serkol@mail.tsu.ru

А.Н. Борисевич

ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН»,
Красноярск, Россия, aborisevich77@gmail.com

S.A. Kolesnik

Tomsk State University,
Tomsk, Russia, serkol@mail.tsu.ru

A.N. Borisevich

Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center
SB RAS”,
Krasnoyarsk, Russia, aborisevich77@gmail.com

Аннотация. В работе проведен анализ вариаций максимума электронной концентрации N_mF2 слоя F2 ионосферы по данным Томской ионосферной станции с 1947 по 2024 г. Этот период включает восемь 11-летних циклов солнечной активности; цель проведенного анализа — выявление сезонных изменений дневных максимумов N_mF2 в среднеширотной ионосфере и их связь с солнечной активностью. Построены сезонно-суточные вариации N_mF2 отдельно для низких и высоких уровней солнечной активности. Для каждого месяца года рассчитаны линейные и квадратичные модели регрессионной зависимости дневных максимумов N_mF2 от индекса $F10.7$. Вычислены регрессионные модели для месячных медиан и ежесуточных значений дневных максимумов N_mF2 . Приведены количественные сравнения и факторы ограничений этих моделей для разного типа агрегации данных.

Ключевые слова: солнечная активность, ионосферный слой F2, регрессионные модели.

Abstract. The paper analyzes variations in the maximum electron density of the F2 ionospheric layer (N_mF2), using data from the Tomsk ionospheric station for the period from 1947 to 2024, including seven 11-year solar cycles, with the aim of identifying seasonal changes in daily N_mF2 maxima in the mid-latitude ionosphere and their relationship with solar activity. Seasonal-daily variations of N_mF2 were constructed separately for low and high solar activity levels. Linear and quadratic models of the regression dependence of the N_mF2 daily values on the $F10.7$ index are calculated for each month of the year. Regression models are computed for both monthly medians and daily data. Quantitative comparisons and resistance factors of different models for different types of data aggregation are given.

Keywords: solar activity, F2 layer, regression models.

ВВЕДЕНИЕ

В 80-х гг. прошлого века большую популярность приобрела тема глобальных изменений климата. Модельные расчеты, основанные на выявленном росте концентрации парниковых газов в атмосфере, показали изменения температурных режимов и концентрации газовых компонент мезосферы и нижней термосферы [Roble, Dickinson, 1989]. На основе этих модельных расчетов было выдвинуто предположение о долговременных изменениях в ионосфере Земли [Rishbeth, 1990]. Первая работа на основе инструментальных наблюдений [Laštovička, Pancheva, 1991] посвящена многолетней динамике параметров распространения радиоволн. Далее последовали серии работ, посвященных проверке гипотезы существования многолетних трендов на основе длинных рядов ионосферных измерений начиная с работы [Bremer, 1992].

Первая российская публикация по этой теме показала, что тренды критической частоты как слоя E, так и слоя F, имеют разную скорость в разные месяцы [Гившвили, Лещенко, 1993]. Всем этим исследованиям способствовало достаточное накопление данных вертикального зондирования ионосферы, начавшееся массово по всему миру в 1957-м международном геофизическом году (1957–1958 гг.). К началу 90-х гг. по многим ионосферным станциям были накоплены ряды измерений в двух полных циклах солнечной активности (СА). Как отмечено в работе [Laštovička et al., 2006] (цитата из частной переписки с Rishbeth H.), «долгосрочные изменения могут быть надежно обнаружены только в течение интервалов времени, которые значительно превышают 11-летний солнечный цикл». Проблемы построения климатических трендов подробно рассмотрены в многочисленных статьях

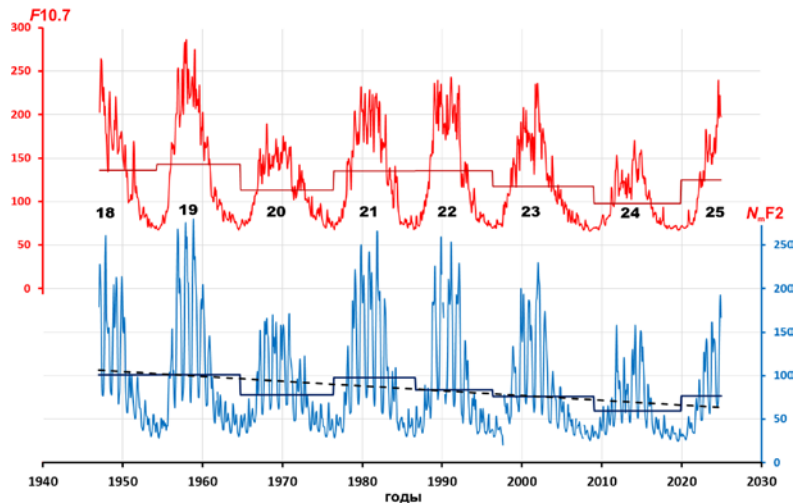


Рис. 1. Временной ход месячных медиан $F10.7$ (красная кривая) и месячных медиан дневного максимума электронной концентрации слоя F2 (N_mF2 , 10^4 см^{-3}) по данным Томской ионосферной станции (синяя кривая). Черными цифрами указаны номера солнечных циклов. Ступеньками даны средние значения $F10.7$ и N_mF2 за каждый цикл SA

двух последних десятилетий [Laštovička, Burešová, 2023; Данилов, Константинова, 2020; Жеребцов и др., 2024]. Наша работа является продолжением серии исследований [Тарашук, Цыбиков, 2003; Костюкевич, Цыбиков, 2005], проводимых в Томском государственном университете с начала 2000-х гг., по выявлению трендов параметров ионосферы.

С самого начала ионосферных наблюдений стало ясно, что основным агентом, производящим ионизацию верхней атмосферы Земли, является поток солнечного ультрафиолетового излучения (УФИ), который имеет самую сильную вариацию, связанную с 11-летним циклом SA [Лихачев, 1965]. Кроме 11-летних циклов, SA имеет более длиннопериодические изменения (вековые и более длинные), о существовании которых и об их влиянии на геомагнетизм было известно еще в начале XX в. [Bauer, 1918]. В вопросе описания климатических (долговременных) изменений параметров ионосферы можно условно выделить глобальные и региональные факторы. Под глобальными следует понимать все возможные воздействия Солнца: вариации потоков излучения в разных диапазонах, солнечный ветер, межпланетное магнитное поле, вспышечную активность. К региональным относятся сезонные аномалии, сезонно-суточная вариация, геомагнитные широтные и долготные особенности, возможное антропогенное воздействие. Наша основная цель — выявление тенденций влияния на ионосферу SA как основного глобального фактора. В большинстве работ последних тридцати лет SA учитывается через регрессионные модели плазменной частоты и различных индексов SA [Laštovička, Burešová, 2023]. Самый распространенный индекс SA, на который параметризованы большинство моделей ионосферы и верхней атмосферы — $F10.7$.

Все работы, посвященные исследованиям долговременных трендов в вариациях параметров ионосферы, построены на статистике временных рядов критической (плазменной) частоты, измеряемой ионозондами различных конструкций. Плазменная

частота является характеристикой квазиэлектронейтральной ионосферы, отражающей взаимодействия заряженных частиц в плазме, а концентрация электронов является фундаментальной величиной, характеризующей ионосферу. Кроме того, в теоретических моделях скорость образования ионов прямо пропорциональна потоку УФФИ [Лихачев, 1965; Иванов-Холодный, Никольский, 1969].

В нашей работе приводятся результаты анализа вариаций N_mF2 по данным Томской ионосферной станции с 1947 по 2024 г., включающим восемь 11-летних циклов SA, с целью выявления сезонных изменений N_mF2 в среднеширотной ионосфере и их связи с SA.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В работе используются данные, полученные на Томской ионосферной станции (ТИС, $56^\circ 49' 77'' \text{ N}$, $84^\circ 97' 44'' \text{ E}$), которая имеет самый длинный и самый однородный ряд оригинальных наблюдений, начиная с 1936 г. по настоящее время.

Начало исследуемого ряда в 1947 г. связано с началом регулярных наблюдений SA в радиодиапазоне, а именно с индексом $F10.7$ [Tapping, 2013]. Этот индекс выражается в солнечных единицах потока ($1 \text{ с.е.п.} = 10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$). Индекс $F10.7$ представляет собой ежесуточные значения. Измерения проводятся в локальный полдень в Пентиктонской радиобсерватории (Британская Колумбия, Канада). Измерения критической частоты f_oF2 F2-слоя на ТИС с 1947 по май 1957 г. представляют собой получасовые измерения, с июня 1957 г. — 15-минутные измерения. Среди всех параметров ионосферы в этой работе рассмотрен максимум электронной концентрации N_mF2 в слое F2 как области, содержащей большую часть всей ионосферы Земли. Для расчета N_mF2 из измеряемой f_oF2 использовалась формула

$$N_mF2(10^4 \text{ см}^{-3}) = 1.24 f_oF2^2 (\text{МГц}). \quad (1)$$

На верхней панели рис. 1 красная кривая — изменение SA, выраженное в месячных медианах $F10.7$,

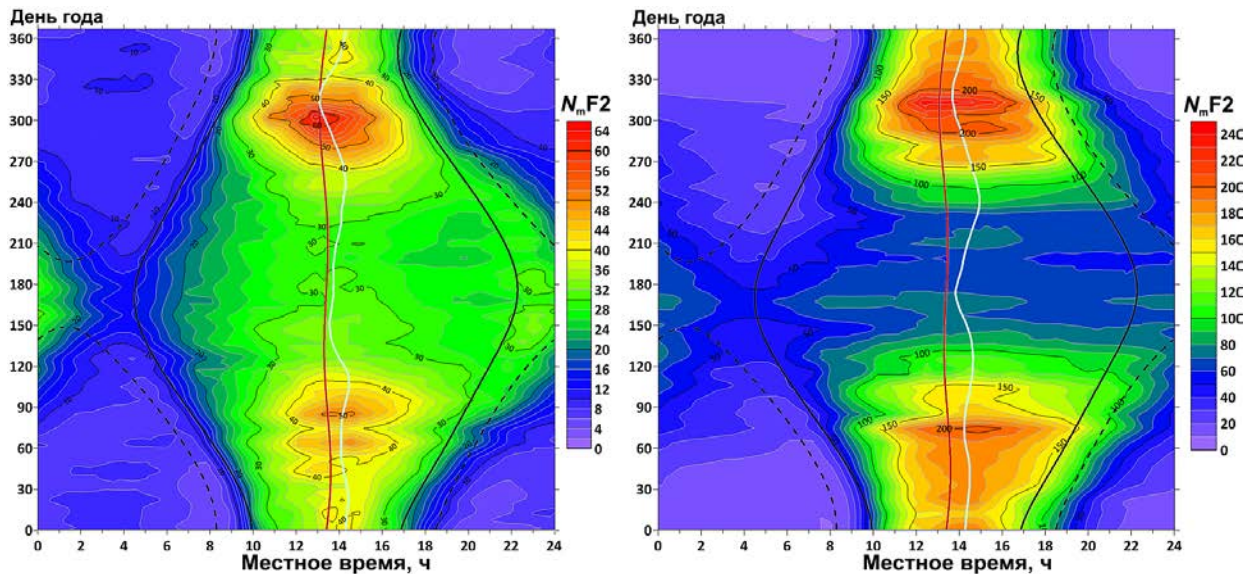


Рис. 2. Сезонно-суточная вариация N_mF2 (10^4 см^{-3}) при разных уровнях СА: слева $62 < F10.7 < 78$, справа $158 < F10.7 < 325$

черные цифры — общепринятые номера солнечных циклов, ступеньки — средние значения за каждый цикл СА. Из этого ряда наблюдений наиболее похожи по форме и значениям циклы 21 и 22. Средние значения $F10.7$ в этих циклах совпадают. Кроме того, в последних двух циклах отмечались самые глубокие и продолжительные минимумы СА. В 2008–2009 гг. наблюдалось 527 дней без солнечных пятен, в 2019–2020 гг. — 466. По количеству солнечных пятен это самые продолжительные минимумы с времени минимума Маундера (1645–1715 гг.) [Liu et al., 2021]. Конечно, нынешние минимумы СА не столь грандиозны, как минимум Маундера, но являются самыми низкими в эпоху космических исследований и более похожи на минимум Далтона (1790–1830 гг.) [Ahluwalia, Ygbuhay, 2012].

На нижней панели синяя кривая — месячные медианы дневных максимумов электронной концентрации. Показан нисходящий линейный тренд (штриховая прямая), в основном соответствующий аналогичной тенденции в СА. Необходимо отметить, что в похожих 21-м и 22-м циклах СА отклик ионосферы, выраженный в средних за цикл значениях N_mF2 , различен. В 22-м цикле он ниже на 18 % чем в 21-м. Возможно, различия в реакции N_mF2 на СА в 21-м и 22-м циклах того же порядка, что и особенность 22-го цикла, выявленная [Жеребцов и др., 2024] по данным ионосферных измерений в Иркутске.

Для понимания поведения суточного дневного максимума электронной концентрации при различных уровнях СА построены сезонно-суточные вариации N_mF2 . Построение моделей сезонно-суточных вариаций может быть полезно для восполнения пробелов данных интерполированными значениями на основе данных в другое время этого дня, как это сделано в [Laštovička et al., 2006]. В нашей работе весь диапазон значений $F10.7$ был разделен на четверти по примерно равным количествам значений. На рис. 2 показаны результаты вычисления для

первой и последней четверти значений СА ($62 < F10.7 < 78$ и $158 < F10.7 < 325$ соответственно). В эти четверти попало по ~6950 суток измерений, и для них вычислены средние значения N_mF2 для каждого 15-минутного интервала наблюдений каждого дня года. Местное время выражено в UT+7, а шкала цветности N_mF2 различна при разных уровнях СА.

Черной штриховой линией показано время наступления навигационных сумерек, соответствующее погружению Солнца ниже горизонта на 12° на уровне поверхности Земли или закат/восход на высоте слоя F2 ионосферы 140 км. Во время летнего солнцестояния на широте Томска на высоте ионосферы выше 120 км Солнце светит круглые сутки. Сплошные черные линии — время восхода/заката в Томске на поверхности Земли. Бордовая сплошная линия — время локального полдня, которое в Томске в течение года меняется в пределах 31 мин. Белая сплошная линия — вычисленное время дневного максимума N_mF2 . Для разных дат года и разных уровней СА максимум наблюдается в 13:00–15:00 LT. При высоких значениях $F10.7$ максимум N_mF2 наблюдается в среднем на 24 мин позже, чем при низких значениях $F10.7$. Для декабря–марта разница времен наступления максимума при низкой и высокой СА незначительна, для мая и августа достигает 45 мин. Таким образом, используемый в этой работе дневной максимум представляет собой максимум электронной концентрации, вычисленный за каждые сутки в интервале 13–15 LT.

Кроме дневного максимума, рис. 2 иллюстрирует появление вечернего максимума ионизации N_mF2 с мая по август после заката Солнца. Наиболее выражен вечерний максимум ионизации при низких значениях $F10.7$, в отдельные дни июня–июля он может быть выше дневного максимума. При высоких уровнях СА дневной максимум в летние месяцы менее выражен, наблюдается более «плоское» поведение электронной концентрации в светлое время суток.

Вообще, дневной максимум N_mF2 при высокой СА более длителен, вечером электронная концентрация падает медленнее. В абсолютных величинах дневной максимум N_mF2 различается в ~ 4 раза при низкой и высокой СА. В связи с сезонными региональными особенностями Томска, максимумы абсолютных дневных значений наблюдаются в марте и ноябре.

Что касается суточного минимума N_mF2 , с сентября по апрель он наблюдается по линии навигационных сумерек (момент восхода Солнца на высоте ионосферы 140 км). Для этих же месяцев наблюдается вторичный минимум спустя 2 ч после заката Солнца в ионосфере. Двумодальность суточного минимума наиболее характерна для ноября–января в условиях низкой СА.

Исходя из полученных значений сезонно-суточных вариаций N_mF2 , в нашей работе был выбран дневной максимум, наблюдаемый после местного полудня. Данный параметр отражает максимум влияния УФИ на электронную концентрацию ионосферы по причине предшествующей полуденной максимальной инсоляции. В разные месяцы дневной максимум в слое F2 наблюдается в разное время, в том числе вследствие разного времени наступления локального полудня из-за движения Земли по эллиптической орбите. Для Томска максимальный зенитный угол Солнца наблюдается в разные месяцы в 13:04–13:35 LT.

Некоторые исследования по выявлению долгопериодических трендов выполнены по данным среднегодовых параметров, не учитывающим сезон [Жеребцов и др., 2024]. В результате коэффициенты корреляции среднегодовых значений N_mF2 и $F10.7$ составляют 0.98 и более. В связи с сильно выраженными для среднеширотной ионосферы годовой, полугодовой и сезонными вариациями при построении регрессионных моделей необходимо учитывать сезон. Кроме того, критерием корректности выбора регрессионных моделей является нормальность распределения остаточного ряда. В случае линейных и квадратичных моделей без учета времени года по данным ТИС для уровней $F10.7 > 90$ (64 % измерений) наблюдается бимодальное распределение. Из этого можно сделать заключение о неприемлемости такого подхода.

2. ЭМПИРИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

В качестве аппроксимационных моделей зависимости N_mF2 от $F10.7$ использовались следующие регрессии.

1. Линейная модель электронной концентрации

$$N_mF2(F10.7) = a_1 F10.7 + b_1; \quad (2)$$

2. Квадратичная модель электронной концентрации

$$N_mF2(F10.7) = a_2 F10.7^2 + b_2 F10.7 + c_2. \quad (3)$$

На рис. 3 показаны регрессионные модели N_mF2 (10^4 см^{-3}) от $F10.7$ для четырех месяцев, построенные по их ежесуточным и месячным медианным значениям. Регрессионные коэффициенты по ежесуточным значениям, рассчитанные методом наименьших квадратов, даны в табл. 1.

Качество регрессионных моделей для каждого месяца в виде коэффициентов корреляции показано в табл. 2. Для месячных медиан всех месяцев, кроме июня, зависимость имеет линейный характер, так как коэффициенты корреляции за остальные месяцы отличаются не более чем на 1.3 %, а для июня такое различие составляет 3.9 %. Если мы рассматриваем регрессионные модели, построенные по дневным максимумам за каждый день наблюдений, качество квадратичных моделей с марта по октябрь выше линейных приближений в среднем на 3.6 %.

Для демонстрации качества (формы) зависимости N_mF2 от $F10.7$ предлагается использовать линейную фильтрацию последовательных значений регрессии, в нашем случае — скользящее среднее по 30 точкам (жирная серая кривая). На всех панелях рис. 3 наблюдается «перелом» на высоких уровнях $F10.7$ от 150 до 250.

На рис. 4 показана полученная зависимость N_mF2 от $F10.7$ и времени года. Для каждого месяца года использовалась своя квадратичная аппроксимация.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Регулярные внеатмосферные спутниковые измерения потока ионизирующего солнечного ультрафиолета начались с 1977 г. В работе [Richards et al., 1994] описывается модель EUVAC, систематизирующая все предыдущие разовые ракетные измерения спектра солнечного ионизирующего ультрафиолета и появившиеся к тому времени непрерывные спутниковые ряды наблюдений отдельных спектральных линий. В частности, показано, что в отдельных спектральных линиях наблюдается линейная зависимость потока УФИ от $F10.7$, которая имеет качественный перелом при $F10.7 = 180 \div 225$ (в среднем ~ 200). Возможно, перелом, который мы описываем квадратичной аппроксимацией — результат формы зависимости потока солнечного ионизирующего УФИ от $F10.7$. В стандартной модели ионосферы IRI [Bilitza, 2000] используется также двухсегментная линейная модель для зависимости N_mF2 ($F10.7$), выраженной в количестве солнечных пятен. Точкой перелома выбрано значение 150. Выше при описании рис. 1 было отмечено, что далеко не во всех циклах СА можно исследовать этот эффект, поскольку отдельные максимумы отдельных циклов не во все месяцы превышают $F10.7 = 150$.

В [Liu et al., 2021] приводится полемика в различных исследованиях: есть или нет насыщение N_mF2 относительно потоков солнечного УФИ? Приводятся различные примеры как насыщения, так и амплификации в поведении этой зависимости для разных широтных зон Земли. В итоге делается вывод, что квадратичных полиномов вполне достаточно для хорошего описания всех вариантов зависимостей электронной концентрации от $F10.7$.

При построении моделей зависимости медианных месячных значений $N_mF2(F10.7)$ значения $F10.7$ в среднем ограничиваются 250 (в отдельные месяцы 217–272). Месячные медианы $F10.7 > 200$ наблюдались в 9.4 % всех измерений, а $F10.7 > 250 \pm 0.8$ % — не каждый месяц (не более 1 точки). При использовании месячных медиан существенно уменьшается

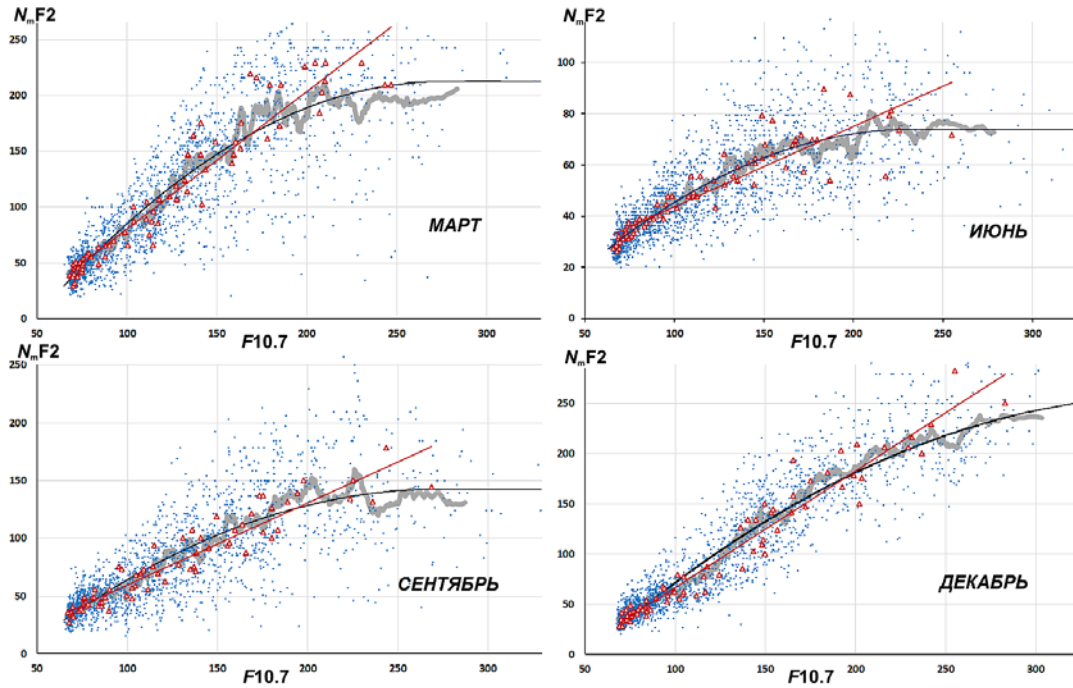


Рис. 3. Регрессионные модели зависимости $N_m F2$ (10^4 см^{-3}) от $F10.7$ для четырех месяцев. Синие точки — оригинальные ежесуточные значения, черная кривая — их квадратичная аппроксимация. Красная кривая, Δ — месячные медианные значения и их линейная аппроксимация. Серая жирная кривая — скользящее линейное среднее по 30 точкам регрессии ежесуточных значений

Таблица 1

Регрессионные коэффициенты линейной и квадратичной аппроксимации $N_m F2(F10.7)$ согласно (2), (3), рассчитанные методом наименьших квадратов

Месяц	a_1	b_1	a_2	b_2	c_2
январь	1.023	-33.2	-0.00213	1.698	-77.9
февраль	1.096	-35.3	-0.00241	1.822	-81.6
март	1.043	-22.7	-0.00412	2.273	-100.9
апрель	0.805	-11.9	-0.00203	1.406	-49.8
май	0.459	5.8	-0.00170	0.964	-26.2
июнь	0.276	16.0	-0.00162	0.754	-13.9
июль	0.284	13.2	-0.00178	0.790	-17.8
август	0.333	11.6	-0.00134	0.748	-15.3
сентябрь	0.636	-1.8	-0.00262	1.431	-52.9
октябрь	1.017	-14.2	-0.00371	2.164	-88.9
ноябрь	1.215	-35.6	-0.00256	1.998	-86.1
декабрь	1.054	-35.4	-0.00239	1.813	-85.6

Таблица 2

Коэффициенты корреляций между регрессионным описанием и оригинальными данными $N_m F2$ по месячным медианным и ежедневным максимумам

Месяц	Месячные медианы		Ежедневные измерения	
	линейная	квадратичная	линейная	квадратичная
январь	0.975	0.975	0.911	0.921
февраль	0.971	0.971	0.903	0.911
март	0.960	0.967	0.847	0.874
апрель	0.933	0.939	0.797	0.809
май	0.946	0.945	0.742	0.765
июнь	0.902	0.937	0.742	0.785
июль	0.932	0.945	0.757	0.800
август	0.930	0.937	0.759	0.784
сентябрь	0.949	0.955	0.772	0.797
октябрь	0.963	0.973	0.846	0.870
ноябрь	0.976	0.976	0.906	0.914
декабрь	0.973	0.974	0.921	0.932

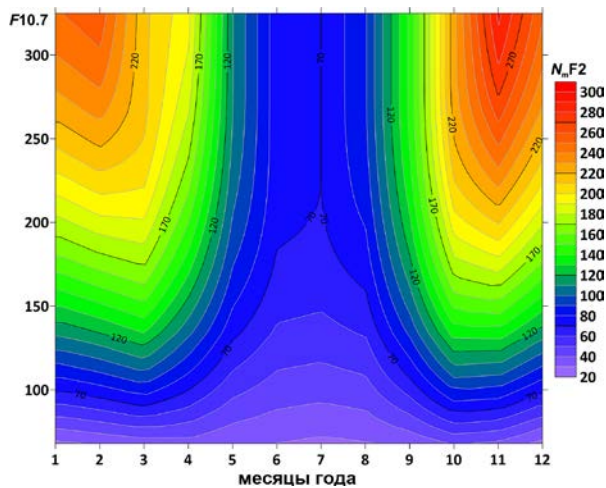


Рис. 4. Зависимость N_mF2 (10^4 см^{-3}) от $F10.7$ и времени года

(на 20–25 %) динамический диапазон $F10.7$ ежедневных исходных данных, используемых для регрессионных моделей. Таким образом, теряется возможность описания поведения электронной концентрации (качественного и количественного) при высоких значениях $F10.7$. Следствием является невозможность описания вышеупомянутого перелома, отражающего зависимость потока солнечного УФ от $F10.7$. Для большинства месяцев зависимость N_mF2 от $F10.7$ ложно представляется линейной. При прогнозировании параметров ионосферы важно иметь представление о поведении ионосферы во всем диапазоне возможных значений $F10.7$. Для выявления зависимости параметров ионосферы на всем диапазоне значений SA целесообразно исследовать регрессионные модели по их суточным значениям, поскольку в ежесуточных измерениях SA значения $F10.7 > 200$ наблюдались в 10.5 % всех ежесуточных измерений, а $F10.7 > 250$ — в 2.6 % (654 измерения). Вместе с тем особенный интерес представляет выявление многолетних трендов электронной концентрации в отдельные месяцы или сезоны, поскольку в многочисленных работах по исследованию климатических трендов ионосферы ведется дискуссия по вопросу положительных или отрицательных трендов для разных станций в разные периоды наблюдений в разные сезоны. При этом в каждом месяце распределение дневных максимумов электронной концентрации близко к нормальному, а вычисленные месячные медианные и месячные средние N_mF2 по ряду наблюдений ТИС 1947–2024 гг. незначительно отличаются друг от друга, среднеквадратичное отклонение составляет ± 3.8 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа ионосферных данных, полученных на Томской ионосферной станции, выявлены сезонно-суточные вариации N_mF2 .

Впервые для Томского региона рассчитаны коэффициенты линейных и квадратичных регрессионных моделей, описывающих зависимость дневных N_mF2 от $F10.7$ для каждого месяца года за восемь 11-летних циклов SA . Корреляционный анализ по-

казал предпочтительность использования квадратичных зависимостей.

Для регрессионных моделей, построенных по месячным медианам, качество линейных и квадратичных моделей неразлично, за исключением июня, где коэффициент корреляции на 3.9 % выше у квадратичной аппроксимации. Для моделей, построенных по ежесуточным значениям, в марте–октябре качество квадратичных моделей выше линейных в коэффициентах корреляции в среднем на 3.6 %. Регрессионные модели, построенные по ежесуточным значениям, в отличие от использования месячных медиан, могут качественно и количественно описывать поведение электронной концентрации при высокой SA . Таким образом, динамический диапазон значений SA увеличивается на 20–25 % относительно моделей по месячным медианам. Анализ регрессионных моделей по ежесуточным значениям проведен впервые. Все наиболее цитируемые работы последних 25 лет по этой теме основываются на данных месячного или годового разрешения.

Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы для выявления климатических изменений в поведении максимума электронной концентрации или критических частот в F2-области путем построения и анализа многолетних трендов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гивишвили Г.В., Лещенко Л.Н. Долговременные тренды свойств ионосферы и термосферы средних широт. *Докл. РАН*. 1993, т. 333, № 1, с. 86–89.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Долговременные вариации параметров средней и верхней атмосферы и ионосферы (обзор). *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2020, т. 60, № 4, с. 411–435. <https://doi.org/10.31857/S0016794020040045>.
- Жеребцов Г.А., Ратовский К.Г., Медведева И.В. Долговременные вариации максимума электронной концентрации и температуры области мезопаузы: зависимости от солнечной, геомагнитной и атмосферной активности, долговременные тренды. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 4, с. 5–16. <https://doi.org/10.12737/szf-104202401> / Zherebtsov G.A., Ratovsky K.G., Medvedeva I.V. Long-term variations in peak electron density and temperature of mesopause region: Dependence on solar, geomagnetic, and atmospheric activities, long-term trends. *Sol.-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, iss. 4, pp. 3–13. <https://doi.org/10.12737/stp-104202401>.
- Иванов–Холодный Г.С., Никольский Г.М. *Солнце и ионосфера. Коротковолновое излучение Солнца и его воздействие на ионосферу*. М.: Наука, 1969, 455 с.
- Костюкевич С.М., Цыбиков Б.Б. Долгопериодные вариации параметров слоя F2 ионосферы по данным Томской ионосферной станции за период 1936–2003 гг. *Труды VIII Конференции молодых ученых. БШФФ-2005*. Иркутск, 2005, с. 96–97.
- Лихачев А.И. Зависимость состояния ионизации на уровне слоя F2 от поступления солнечной волновой энергии в атмосферу Земли: дисс. д-ра физ.-мат. наук. Томск, 1965, 278 с.
- Тарашук Ю.Е., Цыбиков Б.Б. Долгопериодные тренды критических частот по данным ионосферных станций Томска и Слоу. *Вестник Томского государственного университета*. 2003, № 278, с. 150–153.
- Ahluwalia H.S., Ygbuhay R.C. Sunspot Cycle 24 and the advent of Dalton-like Minimum. *Adv. Astron.* 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/126516>.

- Bauer L.A. Relation between the secular variation of the Earth's magnetism and solar activity. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 1918, vol. XXIII, no. 1.
- Bilitza D. The importance of EUV indices for the international reference ionosphere. *Physics and Chemistry of the Earth (C)*. 2000, vol. 25, pp. 515–521.
- Bremer J. Ionospheric trends in mid-latitudes as a possible indicator of the atmospheric greenhouse effect. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1992, vol. 54, pp. 1505–1511.
- Laštovička J., Pancheva D. Changes in characteristics of planetary waves at 80–100 km over Central and Southern Europe since 1980. *Adv. Space Res.* 1991, vol. 11, № 3, pp. 31–34. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(91\)90399-5](https://doi.org/10.1016/0273-1177(91)90399-5).
- Laštovička J., Burešová D. Relationships between f_oF_2 and various solar activity proxies. *Space Weather*. 2023, vol. 21. <https://doi.org/10.1029/2022SW003359>.
- Laštovička J., Mikhailov A.V., Ulich T., et al. Long-term trends in f_oF_2 : A comparison of various methods. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006, vol. 68, iss. 17, pp. 1854–1870. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.02.009>.
- Liu L.B., Chen Y.D., Le H.J. Response of the ionosphere to varying solar fluxes. *Upper Atmosphere Dynamics and Energetics. Geophysical Monograph*. 2021, pp. 301–324. <https://doi.org/10.1002/9781119815631.ch16>.
- Richards P.G., Fennelly J.A., Torr D.G. EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1994, vol. 99, no. A5, pp. 8981–8992.
- Rishbeth H. A greenhouse effect in the ionosphere? *Planet. Space Sci.* 1990, vol. 38, pp. 945–948.
- Roble R.G., Dickinson R.E. How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and lower thermosphere? *Geophys. Res. Lett.* 1989, vol. 16, iss. 12, pp. 1441–1444. <https://doi.org/10.1029/GL016i012p01441>.
- Tapping K.F. The 10.7 cm solar radio flux ($F_{10.7}$). *Space Weather*. 2013, vol. 11, pp. 394–406. <https://doi.org/10.1002/swe.20064>.

Как цитировать эту статью:

Колесник С.А., Борисевич А.Н. Сезонные вариации дневного максимума электронной концентрации слоя F2 ионосферы в зависимости от солнечной активности по данным Томской ионосферной станции. *Солнечно-земная физика*. 2026, т. 12, № 2, с. 47–53. <https://doi.org/10.12737/szf-122202605>.