

**ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ МАКСИМУМА ЭЛЕКТРОННОЙ
КОНЦЕНТРАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЛАСТИ МЕЗОПАУЗЫ:
ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОЛНЕЧНОЙ, ГЕОМАГНИТНОЙ
И АТМОСФЕРНОЙ АКТИВНОСТИ, ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ**

**LONG-TERM VARIATIONS IN PEAK ELECTRON DENSITY AND TEMPERATURE
OF MESOPAUSE REGION: DEPENDENCE ON SOLAR, GEOMAGNETIC,
AND ATMOSPHERIC ACTIVITIES, LONG-TERM TRENDS**

Г.А. Жеребцов 

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

К.Г. Ратовский 

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

И.В. Медведева 

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

G.A. Zherebtsov

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

K.G. Ratovsky

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

I.V. Medvedeva

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

Аннотация. Представлен обзор основных результатов исследования долговременных вариаций характеристик верхней нейтральной атмосферы и ионосферы, полученных в ходе выполнения Проекта РФФ № 22-17-00146 «Экспериментальное и теоретическое исследование взаимодействия нейтральной и ионизированной компонент атмосферы Земли». Проанализированы долговременные вариации максимума электронной концентрации N_mF2 и температуры области мезопаузы T_m , их зависимости от солнечной, геомагнитной и атмосферной активности, а также долговременные тренды. Для анализа использованы данные многолетних измерений на комплексе инструментов ИСЗФ СО РАН. Данные N_mF2 за 1955–1996 гг. получены на Иркутской аналоговой автоматической ионосферной станции, за 2003–2021 гг. — на Иркутском цифровом ионозонде DPS-4; данные T_m — по спектрометрическим наблюдениям эмиссии молекулы гидроксила (полоса OH (6-2), 834.0 нм, высота максимума излучения ~87 км) в 2008–2020 гг. К анализу привлечены данные об индексах солнечной и геомагнитной активности $F10.7$ и A_p , а также данные о вариациях индекса Южной осцилляции (SOI). Используются методы простой и множественной линейной регрессии. Обнаружено, что среднегодовые значения N_mF2 преимущественно контролируются изменениями солнечного потока. Анализ регрессионных остатков показал, что наибольшие отклонения от регрессии (как для простой, так и для множественной регрессии) наблюдаются в годы вблизи максимумов солнечных циклов 19 (1956–1959 гг.) и 22 (1989–1991 гг.). Вариации среднегодовых значений изменчивости температуры области мезопаузы коррелируют с SOI : межсуточная изменчивость демонстрирует положительную корреляцию с SOI , внутрисуточная — отрицательную. Значимая связь между годовыми вариациями N_mF2 и T_m не обнаружена.

Ключевые слова: долговременные вариации, максимум электронной концентрации, температура, область мезопаузы, солнечная активность, геомагнитная активность, долговременные тренды.

Abstract. The paper overviews the main results of the study of long-term variations in characteristics of the upper neutral atmosphere and ionosphere, obtained during the implementation of Russian Science Foundation Project No. 22-17-00146 “Experimental and theoretical study of the coupling neutral and ionized components of Earth’s atmosphere”. We study and compare long-term variations in the peak electron density and temperature of the mesopause region. Their dependences on solar, geomagnetic, and atmospheric activity, as well as long-term trends, are analyzed. The analysis is based on data from long-term measurements with the ISTP SB RAS complex of instruments. The peak electron density (N_mF2) data was acquired with the Irkutsk analog automatic ionospheric station for 1955–1996 and the Irkutsk digital ionosonde DPS-4 for 2003–2021. The atmospheric temperatures at mesopause altitudes (T_m) were obtained from spectrometric observations of the hydroxyl molecule emission (OH (6-2) band, 834.0 nm, emission maximum height ~87 km) for 2008–2020. The analysis uses solar ($F10.7$) and geomagnetic (A_p) activity indices, as well as data on variations in the Southern Oscillation Index (SOI). The study employs simple and multiple linear regression methods. Annual average N_mF2 values are found to be predominantly controlled by changes in solar flux. Analysis of regression residuals shows that the largest deviations from regression (for both simple and multiple regression) are observed in years near the maxima of solar cycles 19 (1956–1959) and 22 (1989–1991). Annual average temperature variability in the mesopause region correlates with changes in the SOI index: day-to-day variability exhibits a positive correlation with SOI ; and intra-diurnal variability, a negative correlation with SOI . No significant relationship was found between year-to-year variations in the N_mF2 and T_m variability.

Keywords: long-term variations, peak electron density, temperature, mesopause region, solar activity, geomagnetic activity, long-term trends

ВВЕДЕНИЕ

Исследование долговременных вариаций характеристик верхней атмосферы является крайне актуальной и важной задачей для понимания климатических изменений на этих высотах. Хорошо известно, что долговременные (один–несколько солнечных циклов) вариации ионосферных параметров, усредненных по месяцу, сезону или году, в основном обусловлены изменениями солнечной активности [Lastovicka, 2019; Данилов, Константинова, 2020; Bremer, 1998]. Дополнительный вклад могут вносить изменения геомагнитной активности. Кроме вариаций, связанных с солнечной и геомагнитной активностью, могут присутствовать долговременные тренды, представляющие собой климатические изменения на протяжении нескольких солнечных циклов. На изменчивость ионосферных параметров влияют геомагнитная и солнечная активность, а также динамические процессы в нижних слоях атмосферы [Forbes et al., 2000; Rishbeth, Mendillo, 2001; Araujo-Pradere et al., 2005; Deminov et al., 2013]. В работах [Rishbeth, Mendillo, 2001; Forbes et al., 2000] обнаружено, что вклад геомагнитной активности в ионосферные возмущения сравним по величине с влиянием со стороны нижней атмосферы и намного существеннее, чем возмущения в результате кратковременных вариаций солнечной активности.

Температурный режим области мезопаузы (80–100 км) испытывает активное воздействие как солнечного излучения, так и энергии диссипации волновых процессов, возникающих в нижележащих слоях атмосферы. Изменчивость температуры атмосферы на этих высотах является индикатором многих климатических и метеорологических процессов, возникающих в нижней и средней атмосфере. Сезонные вариации температуры мезопаузы T_m с максимумом зимой и минимумом летом являются наиболее выраженными, различия в температуре достигают 60 К. Межсуточная и внутрисуточная температурная изменчивости в основном обусловлены волновыми процессами — мигрирующими планетарными волнами, приливами и внутренними гравитационными волнами (ВГВ). Изменчивость T_m , вызванная влиянием атмосферных волн различных временных масштабов, также имеет выраженную сезонную зависимость, и характер вариаций может быть существенно разным в зависимости от региона наблюдения [Offermann et al., 2009; Perminov et al., 2014a, b]. Особый интерес представляют межгодовые вариации и долговременные тренды T_m . Они вызваны совместным воздействием многолетних вариаций солнечной активности и климатических изменений в нижней и средней атмосфере [Khomich et al., 2008; Beig, 2011]. В межгодовых вариациях T_m были обнаружены квазидвухлетние колебания, влияющие на солнечную активность и долговременный тренд [Semenov, 2008; Khomich et al., 2008; Beig, 2011].

В настоящей работе представлен обзор основных результатов исследования долговременных вариаций характеристик верхней нейтральной атмосферы и ионосферы, полученных в ходе выполнения Проекта РФФИ № 22-17-00146 «Экспериментальное и теоретическое исследование взаимодействия нейтральной

и ионизированной компонент атмосферы Земли». Исследованы и сопоставлены долговременные вариации максимума электронной концентрации N_mF2 и температуры области мезопаузы T_m . Проанализированы их зависимости от солнечной, геомагнитной и атмосферной активности, а также долговременные тренды. Для анализа использованы данные многолетних измерений на комплексе инструментов ИСЗФ СО РАН. Данные N_mF2 за 1955–1996 гг. получены на Иркутской аналоговой автоматической ионосферной станции, за 2003–2021 гг. — на Иркутском цифровом ионозонде DPS-4; данные T_m — по спектротрическим наблюдениям эмиссии молекулы гидроксидила (полоса ОН (6-2), 834.0 нм, высота максимума излучения ~87 км) в 2008–2020 гг.

Статья является продолжением ранее проведенных исследований, посвященных совместному анализу сезонных вариаций N_mF2 и T_m [Medvedeva, Ratovsky, 2015, 2017]. Обнаружены их общие черты и различия. Предварительный анализ межгодовых изменений анализируемых параметров за 2008–2015 гг. был выполнен в [Medvedeva, Ratovsky, 2017].

1. ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ N_mF2 ПО ДАННЫМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В 1955–2021 гг.

Проведено исследование долговременных вариаций N_mF2 в ионосфере над Иркутском (52° N, 104° E) за 1955–2021 гг. Для анализа зависимостей от солнечной и геомагнитной активности используются линейные регрессии среднегодовых значений N_mF2 (раздельно для ночного и дневного времени) на среднегодовые значения индексов солнечной и геомагнитной активности. Для анализа долговременных трендов используется аппроксимация отклонений от регрессий линейным временным трендом.

1.1. Метод анализа данных

Для исследования долговременных изменений параметров ионосферы мы использовали ионосферные данные, полученные на иркутских ионозондах за 1955–2021 гг., а также данные индексов солнечной и магнитной активности $F10.7$ и A_p за 1955–2021 гг. [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>]. Рассмотренный период покрывает шесть циклов солнечной активности (19–24). В качестве ионосферной характеристики использовалось значение N_mF2 , рассчитанное по критической частоте f_oF2 , определяемой с помощью ионограмм ионосферной станции АИС либо ионозонда DPS-4 ($N_mF2 [10^5 \text{ см}^{-3}] = 0.124 (f_oF2 [\text{МГц}])^2$). Анализировались среднегодовые значения N_mF2 для дневного (10–14 LT) и ночного (22–02 LT) времени, а также среднегодовые значения индексов $F10.7$ и A_p .

Выбранные индексы солнечной и геомагнитной активности имеют длительную историю измерений ($F10.7$ — с 1947 г., A_p — с 1932 г.). Они широко используются в оперативных и климатических моделях ионосферы и атмосферы (например, глобальная динамическая модель критической частоты F2-слоя ионосферы [Шубин, Деминов, 2019]; международная справочная модель ионосферы IRI [Bilitza et al.,

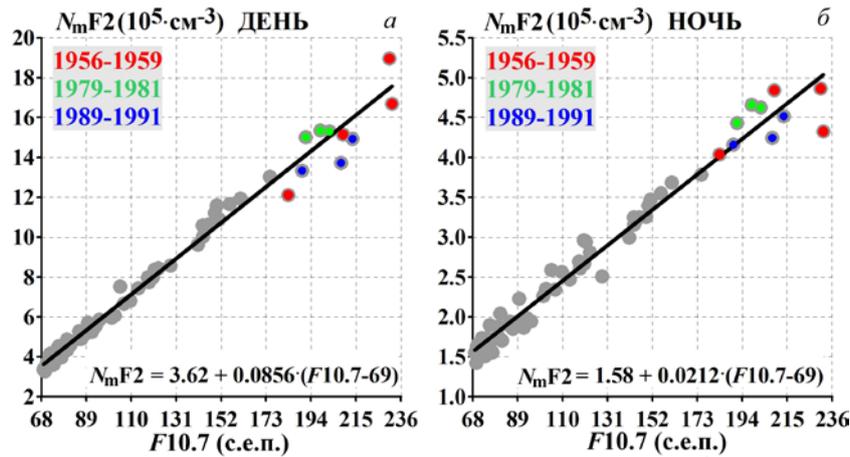


Рис. 1. Диаграмма рассеяния зависимости среднегодовых значений N_mF2 от среднегодовых значений $F10.7$ для дневного (а) и ночного (б) времени. Значения вблизи максимумов солнечных циклов 19 (1956–1959 гг.), 21 (1979–1981 гг.) и 22 (1989–1991 гг.) показаны красным, зеленым и синим цветом соответственно

2017]; эмпирическая модель атмосферы NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002]; эмпирическая модель горизонтального нейтрального ветра в верхней термосфере [Drob et al., 2015]). Вопрос о том, может ли использование альтернативных индексов солнечной и геомагнитной активности привести к другим результатам, требует дальнейших исследований.

Для анализа зависимости N_mF2 от солнечной активности использовалась простая линейная регрессия N_mF2 на $F10.7$: $N_mF2 = N_0 + N_1(F10.7 - 69)$. Для анализа вклада геомагнитной активности использовалась множественная линейная регрессия N_mF2 на $F10.7$ и A_p : $N_mF2 = N_0 + N_1(F10.7 - 69) + N_2(A_p - 4)$. Здесь N_0 — значение N_mF2 в минимуме солнечной активности ($F10.7 = 69$ с.е.п. $A_p = 4$); N_1, N_2 — скорости изменения N_mF2 с ростом $F10.7$ и A_p , соответственно.

Первый метод оценки тренда N_mF2 заключался в аппроксимации отклонений ΔN_mF2 от множественной регрессии N_mF2 на $F10.7$ и A_p линейным временным трендом: $\Delta N_mF2 = \Delta N_0 + \Delta N_1(\text{year} - 1955)$, где year — год, ΔN_0 — значение ΔN_mF2 в 1955 г., ΔN_1 — скорость тренда изменения ΔN_mF2 . Второй метод оценки тренда N_mF2 был сделан на основе анализа изменения коэффициентов простой регрессии N_mF2 на $F10.7$ от цикла к циклу.

1.2. Результаты анализа долговременных вариаций среднегодовых значений N_mF2

Простая линейная регрессия N_mF2 на $F10.7$ показала очень высокие коэффициенты детерминации (98.36 % днем и 97.13 % ночью), при этом наибольшие ошибки регрессии (отрицательные отклонения) наблюдаются в 1957–1958 гг. (максимум цикла 19) и 1989–1991 гг. (максимум цикла 22). Потенциальным источником ошибок простых линейных регрессий на $F10.7$ могло быть влияние геомагнитной активности. Для проверки этой версии использовалась множественная регрессия среднегодовых значений N_mF2 на среднегодовые значения $F10.7$ и A_p . Результаты показали, что учет геомагнитной активности практически не сказывается на ошибках простых линейных регрессий. Коэффициенты детерминаций

множественных регрессий на $F10.7$ и A_p составили 98.41 % для дневного времени и 97.20 % — для ночного, т. е. совпали с коэффициентами детерминаций простых регрессий с точностью до 0.1 %.

Для выявления причин ошибок простой линейной регрессии N_mF2 на $F10.7$ была рассмотрена диаграмма рассеяния зависимости N_mF2 от $F10.7$ (рис. 1). Хорошо заметны отклонения от регрессий при больших значениях среднегодовых $F10.7$. Для устранения влияния годов с высокой солнечной активностью были проведены простые регрессии N_mF2 на $F10.7$ (рис. 2) с исключением годов, для которых среднегодовое значение $F10.7$ превышало 175 с.е.п.

Сравнивая результаты двух вариантов регрессий, можно отметить следующее. При исключении годов с $F10.7 > 175$ с.е.п. возрастает скорость роста N_mF2 с ростом $F10.7$ и уменьшается N_mF2 в минимуме солнечной активности. Изменение коэффициентов регрессий приводит к увеличению отрицательных отклонений от регрессии, уменьшению положительных отклонений, при этом для дневного времени значения вблизи максимума цикла 21 (1979–1981 гг.) хорошо укладываются в новую регрессионную кривую, несмотря на то, что эти значения не рассматривались в регрессии с $F10.7 < 175$ с.е.п. Данный факт говорит о том, что причина ошибок регрессии не связана с высокой солнечной активностью как таковой. Отклонение от регрессионных кривых в годы вблизи максимума солнечного цикла 22 (1989–1991 гг.) отмечалось в предыдущих исследованиях [Lastovicka, 2019; Данилов, Ванина-Дарт, 2010]. Более детально этот вопрос будет рассмотрен в подразделе 1.3.

В рамках первого метода оценки тренда N_mF2 использовалась аппроксимация отклонений ΔN_mF2 от множественной регрессии N_mF2 на $F10.7$ и A_p линейным временным трендом. При анализе трендов использовались два варианта регрессии на $F10.7$ и A_p : (1) с использованием всего набора данных и (2) с исключением годов, для которых $F10.7 > 175$ с.е.п. Временные вариации ΔN_mF2 и их аппроксимации линейными временными трендами показаны на рис. 3.

Видно, что во всех случаях выявленный тренд является отрицательным, что говорит об уменьшении

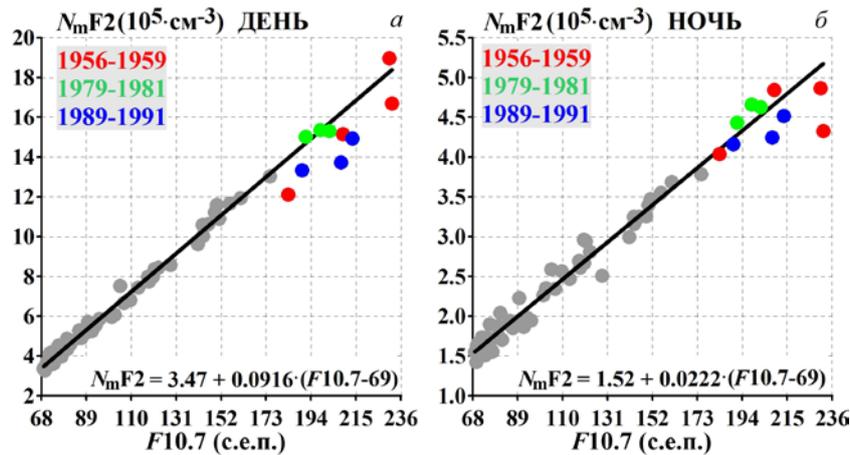


Рис. 2. То же, что на рис. 1, с исключением годов, для которых $F10.7 > 175$ с.е.п.

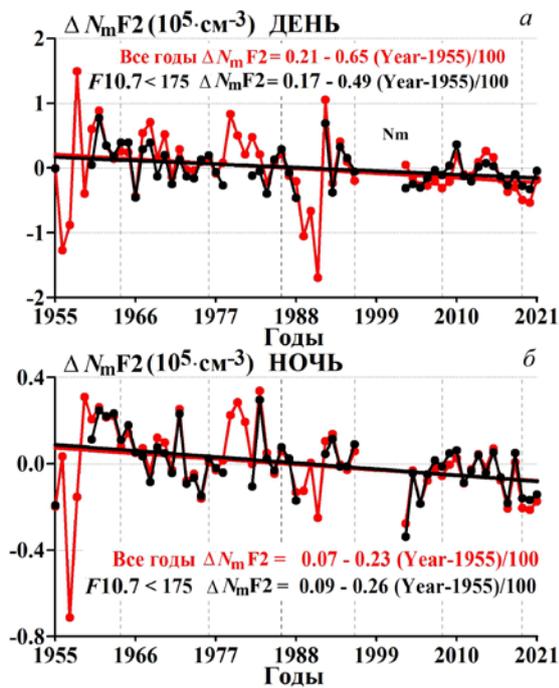


Рис. 3. Временные вариации $\Delta N_m F_2$ и их аппроксимации линейными временными трендами для дневного (а) и ночного (б) времени. Красный цвет — все годы, черный — годы с $F10.7 < 175$ с.е.п. Вертикальные штриховые линии — границы солнечных циклов

$N_m F_2$ с 1955 по 2021 г. Отрицательные тренды $N_m F_2$ согласуются с основными результатами обзора [Данилов, Константинова, 2020] (более детально этот вопрос будет рассмотрен в подразделе 1.3). Необходимо отметить, что выявленные тренды незначительно уменьшают отклонения от регрессий на $F10.7$. Диапазон тренда в ~ 10 раз больше диапазона отклонений от регрессий для всех годов и в ~ 4 раза больше диапазона отклонений от регрессий для годов с $F10.7 < 175$ с.е.п. В обоих случаях вычитание тренда незначительно уменьшает среднеквадратичное отклонение.

В табл. 1 приведены полученные коэффициенты множественных регрессий $N_m F_2$ на $F10.7$ и A_p (N_0 , N_1 , N_2), а также скорость тренда ΔN_1 для четырех вариантов (день, ночь, все годы и годы с $F10.7 < 175$ с.е.п.).

Видно, что исключение годов с $F10.7 > 175$ с.е.п. приводит к заметному изменению коэффициентов. Для дневных условий N_0 уменьшается на $\sim 7\%$, N_1 увеличивается на $\sim 6\%$, N_2 уменьшается на $\sim 78\%$ (т. е. в ~ 4.5 раза) и ΔN_1 уменьшается на $\sim 25\%$. Для ночных условий N_0 уменьшается на $\sim 4\%$, N_1 увеличивается на $\sim 4\%$, N_2 уменьшается на $\sim 43\%$ (т. е. в ~ 1.8 раза) и ΔN_1 увеличивается на $\sim 13\%$.

Для оценки вкладов солнечной, геомагнитной активности и долговременного тренда можно воспользоваться полученными коэффициентами и экстремальными изменениями $F10.7 = 163$ с.е.п., $A_p = 20$ нТл и $Y = 66$ лет за рассматриваемый период, используя формулу множественной регрессии $N_m F_2$ на $F10.7$ и A_p , а также формулу аппроксимации $\Delta N_m F_2$ линейным трендом. В табл. 2 даны оценки вкладов $F10.7$, A_p и тренда. Видно, что вклад солнечной активности превышает вклад геомагнитной в $\sim 25\text{--}150$ раз и вклад тренда в $\sim 21\text{--}46$ раз. Необходимо отметить, что исключение годов с $F10.7 > 175$ приводит к существенному уменьшению коэффициента N_2 (~ 4.5 раза для дня и ~ 1.8 раза для ночи), тогда как изменение коэффициента ΔN_1 заметно меньше ($\sim 25\%$ для дня и $\sim 13\%$ для ночи). Из этого можно предположить, что в случае использования всех годов коэффициент N_2 отражает не столько вклад геомагнитной активности, сколько попытку компенсации anomalously низких значений $N_m F_2$ в максимумах циклов 19 и 22. При этом эффект тренда более стабилен и в обоих случаях показывает отрицательный тренд с сопоставимыми коэффициентами.

Второй метод оценки долговременного тренда $N_m F_2$ был сделан на основе анализа изменения коэффициентов простой регрессии $N_m F_2$ на $F10.7$ от цикла к циклу (рис. 4). Как и ожидалось, коэффициенты для циклов 19 и 22 заметно отличаются от коэффициентов, полученных для других циклов. В дневных условиях коэффициенты N_0 для циклов 19 и 22 составляют $\sim 3.9 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, для других циклов меняются в пределах $(3.4 \div 3.5) \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, коэффициенты N_1 для циклов 19 и 22 составляют 8.3 и $7.7 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}/100$ с.е.п., для других циклов меняются от 8.7 до $9.4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}/100$ с.е.п. В дневных условиях линейные тренды, построенные для коэффициентов

Таблица 1

Коэффициенты регрессий на $F10.7$ и A_p ($N_0(10^5 \text{ см}^{-3})$, $N_1(10^5 \text{ см}^{-3} / 100 \text{ с.е.п.})$, $N_2(10^5 \text{ см}^{-3} / 10 \text{ нТл})$, а также скорость тренда $\Delta N_1(10^5 \text{ см}^{-3} / 100 \text{ лет})$

Период/время суток	N_0	N_1	N_2	ΔN_1
Все годы/день	3.75	8.70	-0.23	-0.65
Годы с $F10.7 < 175$ /день	3.50	9.19	-0.05	-0.49
Все годы/ночь	1.63	2.16	-0.07	-0.23
Годы с $F10.7 < 175$ /ночь	1.57	2.25	-0.04	-0.26

Таблица 2

Оценки вкладов $F10.7$, A_p и тренда в N_mF2

Период/время суток	$F10.7$	A_p	Тренд
Все годы/день	14.1	-0.45	-0.43
Годы с $F10.7 < 175$ /день	14.9	-0.10	-0.32
Все годы/ночь	3.5	-0.14	-0.15
Годы с $F10.7 < 175$ /ночь	3.6	-0.08	-0.17

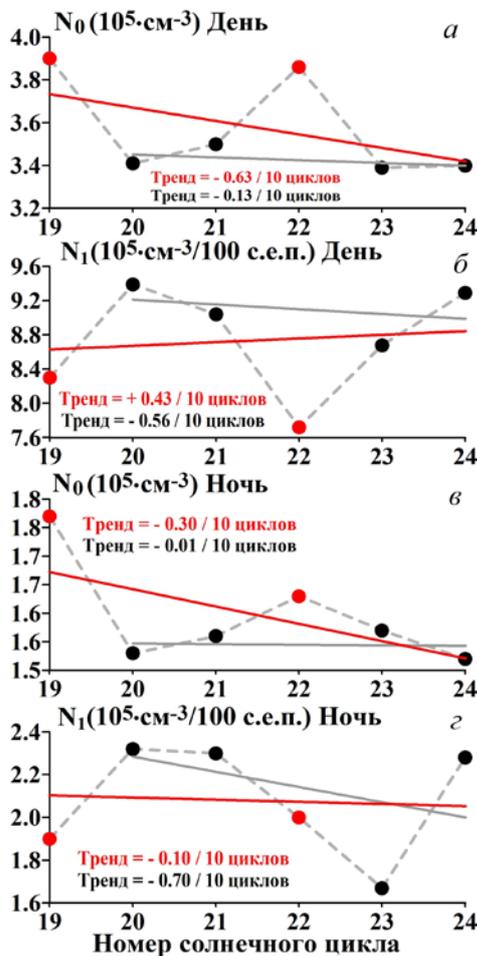


Рис. 4. Изменения коэффициентов простой регрессии N_mF2 на $F10.7$ от цикла к циклу для дневного (а, б) и ночного (в, з) времени. Красные точки — циклы 19 и 22, черные точки — остальные циклы. Красный тренд проведен по всем циклам, серый тренд — по циклам 20, 21, 23 и 24

циклов 20, 21, 23 и 24, дали следующие значения: тренд $N_0 = -0.13 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3} / 10$ циклов и тренд $N_1 = -0.56 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3} / 100 \text{ с.е.п.} / 10$ циклов. Для оценки вкладов трендов коэффициентов в тренд N_mF2 была использована формула простой регрессии N_mF2 на $F10.7$: тренд $N_mF2 = \text{тренд } N_0 + \text{тренд } N_1 (<F10.7> - 69) / 100$, где $<F10.7> = 122 \text{ с.е.п.}$ — среднее значение $F10.7$

за все анализируемые циклы. Полученная оценка тренда $N_mF2 = -0.43 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3} / 10$ циклов близка к оценке, полученной с помощью первого метода: $\Delta N_1 = -0.49 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3} / 100$ лет (10 циклов примерно эквивалентно 110 годам). Для ночных условий аналогичная методика дала тренд $N_0 = -0.01 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3} / 10$ циклов, тренд $N_1 = -0.70 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3} / 100 \text{ с.е.п.} / 10$ циклов и оценку тренда $N_mF2 = -0.38 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3} / 10$ циклов. Данная оценка заметно превышает $\Delta N_1 = -0.26 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3} / 100$ лет для ночных условий. Причина этого различия связана с завышением ночного тренда N_1 из-за anomalно низкого значения N_1 в цикле 23 (причины могут быть связаны с недостатком данных в этом цикле).

1.3. Обсуждение долговременных вариаций среднегодовых значений N_mF2

Анализ долговременных вариаций среднегодовых значений N_mF2 выявил anomalно низкие значения N_mF2 в 1957–1958 гг. (максимум цикла 19) и 1989–1991 гг. (максимум цикла 22). Для дневного времени наиболее anomalным является 1991 г., когда отклонение от регрессии составило $-2.5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ или -16% от ожидаемого значения. Для ночного времени наиболее anomalным является 1957 г. — $-0.85 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ или -16% от ожидаемого значения. Анализ изменения коэффициентов простой регрессии N_mF2 на $F10.7$ от цикла к циклу выявил anomalно низкую скорость изменения N_mF2 с ростом $F10.7$ (коэффициент N_1) в отмеченных циклах. В цикле 22 этот коэффициент оказался на 15% ниже по сравнению с N_1 , полученным усреднением за 20, 21, 23 и 24 циклы. Тот факт, что значения N_mF2 вблизи максимума цикла 21 (1979–1981 гг.) хорошо укладываются в регрессионную кривую, построенную по годам с $F10.7 < 175 \text{ с.е.п.}$ (т. е. без участия N_mF2 вблизи максимума цикла 21), говорит о том, что причина отклонения от регрессии в циклах 19 и 22 не связана с высокой солнечной активностью как таковой.

Отклонение от регрессионных кривых вблизи максимума солнечного цикла 22 (1989–1991 гг.) отмечалось в предыдущих исследованиях. Lastovicka [2019] обнаружил, что скорость роста среднегодовых значений критических частот f_oF2 и f_oE с ростом $F10.7$ была выше в 1996–2014 гг. (циклы 23 и 24) чем в 1976–1995 гг. (циклы 21 и 22). Отмечая, что механизм этого различия в настоящее время не установлен, Lastovicka [2019] выдвинул две потенциальные причины этого различия: (1) изменение соотношения между $F10.7$ и солнечным ионизирующим излучением и (2) изменение соотношения между

параметрами ионосферы и солнечным ионизирующим излучением. Вторая причина может быть связана с изменением параметров нейтральной атмосферы (температура, химический состав, ветер). Данилов, Ванина-Дарт [2010] обнаружили, что отклонение от скользящей 11-летней регрессии величины f_oF2 (на заходе) / f_oF2 (14 LT) на $F10.7$ начинает возрастать после 1980 г., достигая пика в максимуме солнечного цикла 22. В качестве возможной причины обнаруженного возрастания указывалось изменение ветрового режима в термосфере. Выявление причины отклонения от регрессии в циклах 19 и 22 (солнечная либо атмосферная) является актуальной задачей, поскольку остальные отклонения от регрессии (включая долговременный тренд) могут объясняться тем же.

Использование альтернативных индексов солнечной активности [Laštovička, Burešová, 2023] показало, что различие скоростей роста среднегодовых значений f_oF2 с ростом индекса в 1996–2014 гг. и 1976–1995 гг. существенно зависит от выбора индекса солнечной активности. Для индекса $F10.7$ и числа солнечных пятен различие было максимальным, для индексов $L\alpha$ (поток солнечного излучения в линии Лайман-альфа), $MgII$ и $HeII$ меньше, а для индекса $F30$ — минимальным. Таким образом, результаты работы [Laštovička, Burešová, 2023] подтвердили первую версию [Lastovička, 2019]: причиной аномалии в максимуме цикла 19 является изменение соотношения между $F10.7$ и солнечным ионизирующим излучением. В свою очередь, причина изменения этого соотношения в максимуме цикла 19 в настоящее время остается открытым вопросом.

В результате регрессионного анализа был выявлен отрицательный тренд в среднегодовых значениях N_mF2 : в дневных условиях N_mF2 уменьшается со скоростью $0.49 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ за 100 лет или на $0.32 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ за исследуемый 66-летний период. Относительно средних значений N_mF2 скорость тренда составляет ~8 % за 100 лет или уменьшение на ~5 % за исследуемый 66-летний период. Для ночных условий также был выявлен отрицательный тренд: скорость тренда составляла $0.26 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ за 100 лет (или ~11 % относительно средних значений N_mF2). С учетом квадратичной зависимости N_mF2 от критической частоты f_oF2 тренд N_mF2 может быть пересчитан в тренд f_oF2 : $\Delta f_oF2 / \langle f_oF2 \rangle \approx 0.5 \Delta N_mF2 / \langle N_mF2 \rangle$, где скобки означают средние значения за 66-летний период. Пересчет дает тренды f_oF2 : -0.26 МГц за 100 лет днем и -0.23 МГц за 100 лет ночью.

Полученные тренды N_mF2 и f_oF2 были сопоставлены с трендами, представленными в обзоре [Данилов, Константинова, 2020]. С одной стороны, там показаны небольшие тренды f_oF2 от -0.0028 до -0.0002 МГц в год (от -0.28 до -0.02 МГц за 100 лет) [Bremer et al., 2012; Mielich, Bremer, 2013]. Наибольший тренд из представленного диапазона хорошо согласуется с результатами данной работы. С другой стороны, в обзоре приводятся тренды, которые в несколько раз или даже на порядок превышают значения, полученные в данной работе. Результаты анализа трендов f_oF2 в [Cnossen, Franzke, 2014] показали, что все статистически значимые тренды f_oF2 отрицательны, и их абсолютные величины лежат в пределах от 0.008

до 0.033 МГц/год (последнее значение более чем на порядок превышает оценку тренда в данной работе). Zhang [2018] привел тренды электронной концентрации в области F по данным некогерентного рассеяния. Согласно этим данным, тренд N_mF2 составляет 5 % за десятилетие, что в ~5–6 раз превышает оценку тренда N_mF2 в данной работе (8–11 % за 100 лет).

С учетом того, что диапазон тренда N_mF2 или f_oF2 намного меньше диапазона отклонений от регрессии, расхождения между небольшими трендами вполне объяснимы. При этом объяснить тренды, которые в несколько раз или даже на порядок превышают значения, полученные в данной работе, затруднительно. Например, тренд N_mF2 , эквивалентный 5 % за десятилетие, дал бы изменение ~33 % в коэффициенте регрессии за шесть циклов, что было бы видно невооруженным глазом. Мы показали, что изменение коэффициентов регрессии от цикла к циклу может составлять ~15 %, однако такое изменение является не трендом, а аномалией определенного цикла.

2. МЕЖГОДОВЫЕ ВАРИАЦИИ N_mF2 И T_m И ИХ ИЗМЕНЧИВОСТЕЙ В 24-ОМ СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ

2.1. Используемые данные и методика анализа

Для анализа были использованы экспериментальные данные о вращательной температуре молекулы гидроксидов T_m (полоса $OH(6-2)$ 834.0 нм, ~87 км), полученные из спектрометрических измерений в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (51.8° N, 103.1° E, Торы) с временным разрешением 10 мин, и значения максимума электронной концентрации N_mF2 , полученные по данным вертикального зондирования на иркутском дигизонде DPS-4 (52.3° N, 104.3° E), работающем в режиме мониторинга с разрешением 15 мин. Методики измерений и обработки данных подробно описаны в [Semenov, et al., 2002; Khomich et al., 2008; Medvedeva et al., 2014]. Вращательная температура молекулы гидроксидов отображает температуру атмосферы на высотах мезопазы, анализируемый период — 2008–2020 гг. Для каждого года были рассчитаны среднегодовые значения T_m и N_mF2 и их изменчивостей σT_m и σN_mF2 . К анализу привлечены данные $F10.7$ и A_p , полученные через интерфейс GSFC/SPDF OMNIWeb на веб-сайте [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>], а также данные вариаций SOI в формате Climatic Research Unit of East Anglia University [<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/soi/>], Ropelewski, Jones, 1987]. Отрицательные значения этого индекса означают, что установилась фаза Эль-Ниньо, положительные — фаза Ла-Нинья. Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК) — основной климатический сигнал, обуславливающий межгодовую изменчивость глобальной системы океан — атмосфера. Исследованы и сопоставлены среднегодовые значения T_m и N_mF2 , а также их межсуточной и внутрисуточной изменчивости, рассчитанные по методике, представленной в [Medvedeva, Ratovsky, 2017].

Для расчета средних за каждый год значений T_m и σT_m использована методика, подробно описанная

в [Offermann et al., 2009; Perminov et al., 2014a, b; Medvedeva, Ratovsky, 2015, 2017]. В качестве характеристики атмосферной изменчивости использованы стандартные отклонения T_m в годовом и ночном ходе, с помощью которых можно анализировать проявление активности волновых процессов различного временного масштаба в верхней атмосфере. Межсуточные изменения температуры в основном обусловлены мигрирующими планетарными волнами, основной вклад в ночную изменчивость вносят приливы и ВГВ. Анализируемый временной интервал 2008–2020 гг. включает 2185 ночей наблюдений. Для определения средних значений T_m и межсуточной σT_m из набора средних за каждую ночь наблюдений выделялись сезонные вариации, а затем анализировались остаточные отклонения температуры. Сезонные вариации рассчитывались при помощи метода наименьших квадратов:

$$T = \bar{T} + \sum_{n=1}^3 A_n \cos\left(\frac{2\pi n}{365.25}(t_d - \varphi_n)\right), \quad (1)$$

где \bar{T} — среднегодовая температура, t_d — день года, A_n и φ_n — амплитуды и фазы гармоники n . Аппроксимация проводилась суммой первых трех гармоник сезонного хода с периодами 12, 6 и 4 мес.

Основной вклад в ночную изменчивость T_m вносят приливы и ВГВ. Анализ внутрисуточных температурных вариаций проводился согласно методу, описанному в [Offermann et al., 2009, Perminov et al., 2014a, b; Medvedeva, Ratovsky, 2015]: квадрат данного стандартного отклонения можно представить как сумму квадратов стандартных отклонений

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{id}}^2 + \sigma_{\text{gw}}^2 + \sigma_n^2, \quad (2)$$

характеризующих активность в течение ночи приливов σ_{id}^2 , ВГВ σ_{gw}^2 , а также флуктуаций темного тока приемника спектрометра σ_n^2 , которые определяются при закрытой входной щели прибора. Величины σ_{gw} и σ_{id} последовательно вычислялись после выделения из ряда ночных температур методом наименьших квадратов гармоник, соответствующих компонентам суточного прилива 24, 12 и 8 ч. Такая процедура проводилась для каждой ночи наблюдений. Рассчитанные таким образом σ_{id} и σ_{gw} были использованы в качестве параметров, характеризующих изменчивость температуры вследствие приливов и ВГВ.

В качестве характеристики ионосферной изменчивости использована $\sigma N_m F2$. Для анализа были рассчитаны относительные возмущения $\Delta N_m F2$, представляющие собой относительную разницу между наблюдаемыми значениями $N_m F2_{\text{obs}}$ и значениями скользящей 27-дневной медианы $N_m F2_{\text{med}}$:

$$\Delta N_m F2 = (N_m F2_{\text{obs}} - N_m F2_{\text{med}}) / N_m F2_{\text{med}} \cdot 100\%. \quad (3)$$

В качестве параметра ионосферной изменчивости были выбраны среднеквадратичные значения $\Delta N_m F2$:

$$\sigma N_m F2 = \sqrt{\langle \Delta N_m F2^2 \rangle}. \quad (4)$$

Полученные значения $\Delta N_m F2$ анализировались в тех же временных периодах, что и T_m , для чего

были выделены волновые возмущения с периодами $T > 24$, $8 \leq T \leq 24$ и $T < 8$ ч. Значения $\Delta N_m F2$ анализировались отдельно для дневного и ночного времени суток, граница день–ночь определялась по прохождению терминатора на земле. Межсуточные ($T > 24$ ч) вариации $N_m F2$ могут быть вызваны геомагнитными возмущениями, влиянием планетарных волн, а также короткопериодными вариациями солнечной активности. Вариации с периодами $8 \leq T \leq 24$ ч соответствуют первым трем гармоникам термических приливов (24, 12 и 8 ч) и могут быть вызваны приливными волнами из нижележащей атмосферы и эффектами геомагнитных бурь. Наиболее быстрые вариации ($T < 8$ ч) относятся к перемещающимся ионосферным возмущениям (ПИВ), причиной которых могут быть распространяющиеся из нижних слоев ВГВ.

Изменчивость T_m и $N_m F2$, соответствующие различным периодам, далее обозначаются как межсуточная ($T > 24$ ч), приливная ($8 \leq T \leq 24$ ч) и ВГВ-изменчивости ($T < 8$ ч).

Для анализа межгодовых вариаций ионосферной изменчивости $\sigma N_m F2$ и их связи с вариациями солнечной и геомагнитной активности был использован множественный регрессионный анализ между $\sigma N_m F2$ и усредненными за год $F10.7$ и A_p . Уравнение множественной регрессии $\sigma N_m F2$ на $F10.7$ и A_p имеет вид

$$\sigma N_m F2 = \sigma_0 + \sigma_F (F10.7 - 69) / 10 + \sigma_A (A_p - 4), \quad (5)$$

где σ_0 — константа регрессии при $F10.7 = 69$ с.е.п. и $A_p = 4$ нТл, σ_F и σ_A — наклоны регрессии, показывающие скорость изменения $\sigma N_m F2$ с увеличением $F10.7$ и A_p соответственно. Значение константы σ_0 соответствует солнечно-геомагнитным условиям во время глубокого солнечного минимума 2009 г. ($F10.7 = 69$ с.е.п., $A_p = 4$ нТл).

Коэффициент детерминации является важной характеристикой любой регрессии. Для множественной регрессии $\sigma N_m F2$ на $F10.7$ и A_p коэффициент детерминации показывает, какая доля (%) межгодовых изменений $\sigma N_m F2$ может быть объяснена совместными вариациями солнечной и геомагнитной активности ($F10.7$ и A_p). В случае простой регрессии на $F10.7$ или A_p коэффициент детерминации показывает, какая часть вариаций $\sigma N_m F2$ может быть объяснена вариациями только солнечной или геомагнитной активности (только $F10.7$ или A_p). В случае анализа вариаций $N_m F2$ были использованы множественные регрессии $\sigma N_m F2$ и среднегодового значения $N_m F2$ на $F10.7$ и A_p , а также простые регрессии на $F10.7$ и A_p . Для исследования σT_m мы сделали ту же процедуру и дополнительно включили в анализ *SOI*.

2.2. Результаты анализа межгодовых изменений максимума электронной концентрации и его изменчивости в 24-ом солнечном цикле и их обсуждение

На рис. 5, а показаны вариации от года к году среднегодовых значений $N_m F2$ (кружки) с наложенными результатами линейной регрессии на среднего-

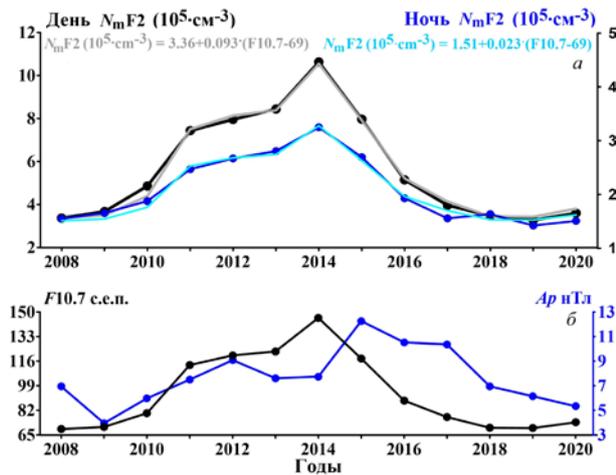


Рис. 5. Вариации среднегодовых значений N_mF2 (кружки) с наложенными результатами линейной регрессии на среднегодовые значения $F10.7$ для дневных (черный, серый) и ночных (синий, голубой) условий (а); межгодовые вариации индексов солнечной $F10.7$ (черный) и геомагнитной A_p (синий) активности в 24-ом солнечном цикле (б)

дывые значения $F10.7$ для дневных (черный, серый) и ночных (синий, голубой) условий. На панели б показаны вариации $F10.7$ (черная кривая) и A_p (синяя кривая).

Видно, что вариации $F10.7$ опережают вариации A_p на ~ 1 год на фазе роста и на ~ 2 года на фазе спада. Анализ показал, что регрессия среднегодовых значений N_mF2 на $F10.7$ практически идеальна, и асимметрия вариаций солнечной и геомагнитной активности не ухудшила регрессию. Расчеты показали, что коэффициент детерминации простой линейной регрессии среднегодового значения N_mF2 на $F10.7$ очень высок (99.5 % для дневного времени и 98 % для ночного времени). Это означает, что вклад геомагнитной активности в межгодовые вариации среднегодовых значений N_mF2 за 2008–2020 гг. пренебрежимо мал по сравнению с вкладом солнечной активности.

На рис. 6 показаны межгодовые вариации σN_mF2 и их аппроксимация при помощи множественной регрессии на $F10.7$ и A_p . В табл. 3 даны коэффициенты детерминации для множественной регрессии R_{FA}^2 , рассчитанной по (5), простой регрессии R_F^2 на $F10.7$ и простой регрессии R_A^2 на A_p . Обнаружено, что множественная регрессия существенно увеличивает коэффициент детерминации по сравнению с простой регрессией для четырех из шести типов изменчивости, в табл. 3 эти значения выделены жирным шрифтом с подчеркиванием. Так, коэффициент детерминации увеличивается с 66 до 92 % для дневной межсуточной σN_mF2 , с 19 до 48 % для дневной приливной σN_mF2 , с 27 до 65 % для ночной приливной σN_mF2 и с 48 до 83 % для ночной σN_mF2 с периодами ВГВ. Это указывает на то, что вклады солнечной и геомагнитной активности для ионосферной изменчивости этих типов сопоставимы. Для дневных значений σN_mF2 с периодами ВГВ, коэффициент детерминации простой регрессии на $F10.7$ составляет 83 %, а множественная регрессия дает прирост

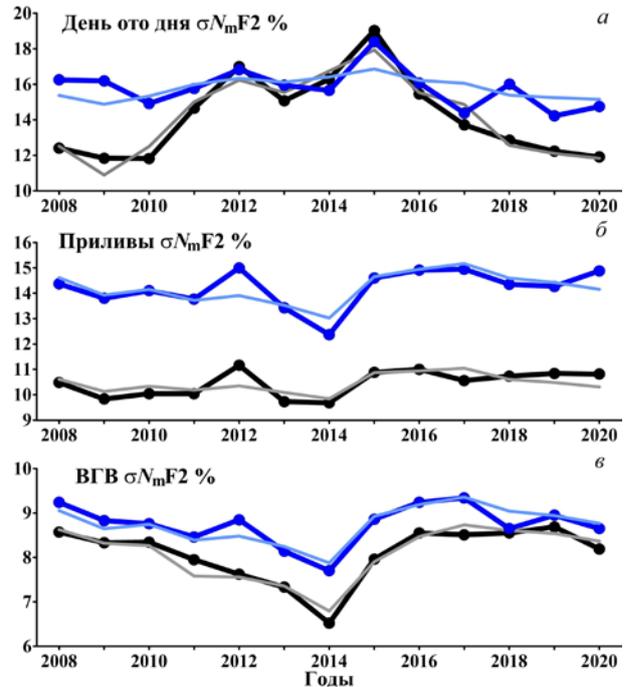


Рис. 6. Межгодовые вариации σN_mF2 (кружки) и их аппроксимация при помощи множественной регрессии на $F10.7$ и A_p для дневных (черный, серый) и ночных (синий, голубой) условий: а — межсуточная изменчивость; б — с периодами приливов; в — с периодами ВГВ

на 10 %, что означает доминирование вклада солнечной активности. Для ночных значений межсуточной σN_mF2 ни одна из регрессий не дает коэффициента детерминации >30 %, что указывает на небольшой вклад как солнечной, так и геомагнитной активности.

Таким образом, регрессионный анализ показал положительную корреляцию дневной межсуточной σN_mF2 как с солнечной, так и с геомагнитной активностью, что и ожидалось, поскольку суточные вариации солнечного потока и воздействие геомагнитных бурь увеличивают ионосферную изменчивость. Для дневной межсуточной изменчивости коэффициент детерминации увеличивается с 66 % для простой регрессии σN_mF2 на A_p до 92 % для множественной регрессии σN_mF2 на $F10.7$ и A_p , что можно интерпретировать сопоставимостью влияния геомагнитной и солнечной активности на σN_mF2 . Сопоставимость вкладов геомагнитной и солнечной активности в изменчивость N_mF2 не согласуется с результатами работ [Forbes et al., 2000; Rishbeth, Mendillo, 2001], авторы которых пришли к выводу, что изменчивость ионосферы, обусловленная межсуточными изменениями солнечной активности, невелика по сравнению с той, которая связана с геомагнитной активностью. Данное расхождение можно объяснить двумя причинами. Во-первых, в анализируемом 24-ом цикле геомагнитная активность была нетипично низкой. Rishbeth, Mendillo [2001] использовали значение $A_p=13$ нТл в качестве типичной (или средней) геомагнитной активности, тогда как в 24-ом цикле наибольшее среднегодовое значение $A_p=12.3$ нТл, что в ~ 1.8 раза ниже, чем в 23-ом цикле. Еще одной причиной могут быть разные методы оценки вкладов

Таблица 3

Коэффициенты детерминации для множественной R_{FA}^2 и простой регрессии R_F^2, R_A^2 ионосферной изменчивости $\sigma N_m F2$ на индексы $F10.7$ и A_p

Изменчивость $\sigma N_m F2$	$R_{FA}^2, \%$	$R_F^2, \%$	$R_A^2, \%$
Межсуточная	День 91.9	65.6	66.0
Приливная	48.0	8.8	19.1
ВГВ	92.6	83.2	1.3
Межсуточная	Ночь 29.6	19.1	23.1
Приливная	64.6	27.4	10.6
ВГВ	82.7	47.7	5.6

солнечной и геомагнитной активности. Forbes et al. [2000] использовали множественную регрессию среднедневного значения $N_m F2$ на годовую составляющую вариаций, полугодовую составляющую вариаций, усредненное значение $F10.7$ за 81 день и ежедневное значение $F10.7$. Именно последняя компонента регрессии использовалась для оценки вклада межсуточных изменений солнечной активности в $\sigma N_m F2$. В отличие от [Forbes et al., 2000], в настоящем исследовании использован множественный регрессионный анализ $\sigma N_m F2$ на $F10.7$ и A_p . В настоящее время сложно сказать, какой метод более правильный, однако можно сделать следующий вывод. Если бы вклад геомагнитной активности был доминирующим, мы бы не получили существенного увеличения коэффициента детерминации при использовании множественной регрессии на $F10.7$ и A_p по сравнению с простой регрессией на A_p .

Регрессионный анализ показал положительную корреляцию ночной межсуточной $\sigma N_m F2$ как с солнечной, так и с геомагнитной активностью, однако чувствительность к геомагнитной/солнечной активности была в $\sim 3-4$ раза ниже, чем для дневной изменчивости. Столь низкая чувствительность приводит к низкому коэффициенту детерминации, который показывает, что только $\sim 30\%$ межгодовых изменений ночной и суточной $\sigma N_m F2$ можно объяснить совместными вариациями солнечной и геомагнитной активности. Отсутствие увеличения ночной изменчивости с геомагнитной активностью или даже уменьшение ночной изменчивости с геомагнитной активностью отмечалось в ряде предыдущих исследований [Ratovsky et al., 2015; Altadill, 2007; Mikhailov et al., 2000; Araujo-Pradere et al., 2005; Deminov et al., 2013]. Среди причин, объясняющих такое поведение, авторы выделили усиление химического контроля (или скорости рекомбинации) с увеличением геомагнитной активности, что уменьшало амплитуду ночных возмущений $N_m F2$. Другая причина может быть связана с ночными возмущениями $N_m F2$, вызванными так называемыми CIR-бурями (буриями, инициированными областью сжатия перед высокоскоростными потоками) [Buresova et al., 2014; Ratovsky et al., 2022]. CIR-бури могут возникать при низких значениях A_p и усиливать ночную $\sigma N_m F2$ в годы геомагнитного минимума. Для геомагнитной активности такого рода A_p может не быть подходя-

щим индикатором. В этом случае в коэффициент σ_0 в (5) входят вклады как метеорологической, так и геомагнитной активности, не идентифицируемой с A_p .

2.3. Результаты анализа межгодовых изменений T_m и σT_m в 24-ом цикле и их обсуждение

Изначально были построены множественные линейные регрессии T_m и σT_m на $F10.7$ и A_p аналогично тому, как это было сделано для $N_m F2$ с использованием (5). В отличие от $N_m F2$ в вариациях среднегодовых T_m и σT_m значимой связи с $F10.7$ и A_p не обнаружено. Тогда было решено привлечь к анализу дополнительный параметр, характеризующий состояние нижележащей атмосферы, для чего был выбран SOI . Был проведен множественный регрессионный анализ T_m и σT_m на SOI и $F10.7$ (7), а также T_m и σT_m на SOI и A_p (6) и рассчитаны коэффициенты детерминации для каждого вида регрессии.

$$\sigma T_m = \sigma_0 + \sigma_S SOI + \sigma_A (A_p - 4), \tag{6}$$

$$\sigma T_m = \sigma_0 + \sigma_S SOI + \sigma_F (F10.7 - 69) / 10. \tag{7}$$

На рис. 7 показаны межгодовые вариации изменчивости температуры мезопаузы σT_m и их аппроксимации при помощи множественной регрессии на SOI и A_p (а-в), вариации среднегодовых значений температуры мезопаузы T_m и их аппроксимация при помощи множественной регрессии на SOI и $F10.7$ (г), а также вариации среднегодовых значений SOI (д). Множественный регрессионный анализ σT_m на SOI и $F10.7$, а также σT_m на SOI и A_p показал, что наиболее высокие коэффициенты детерминации получены для множественной регрессии на SOI и A_p ; результаты аппроксимации показаны на рис. 7 (а-в).

В табл. 4 представлены коэффициенты детерминации для множественной (R_{FA}^2) и простой регрессии (R_F^2, R_A^2) σT_m на $F10.7$ и A_p , а также для множественной регрессии σT_m на SOI и A_p (R_{SA}^2). Обнаружено, что включение SOI в анализ существенно улучшило качество аппроксимации, что может указывать на влияние явлений Эль-Ниньо/Ла-Нинья на характеристики верхней атмосферы средних широт. По сравнению с регрессией σT_m на $F10.7$ и A_p коэффициенты детерминации значительно возрастают с ~ 32 до 67% для межсуточной σT_m , с ~ 7 до 57% для приливной σT_m и с ~ 6 до 36% для σT_m с периодами ВГВ. Межсу-

Таблица 4

Коэффициенты детерминации для множественной (R_{FA}^2) и простой регрессии (R_F^2, R_A^2) σT_m на $F10.7$ и A_p , а также для множественной регрессии σT_m на SOI и A_p (R_{SA}^2)

Тип изменчивости T_m	R_{FA}^2 %	R_F^2 %	R_A^2 %	R_{SA}^2 %
Межсуточная	32.2	5.9	32.2	66.7
Приливная	7.0	2.6	6.6	56.8
ВГВ	6.2	5.3	3.1	35.5

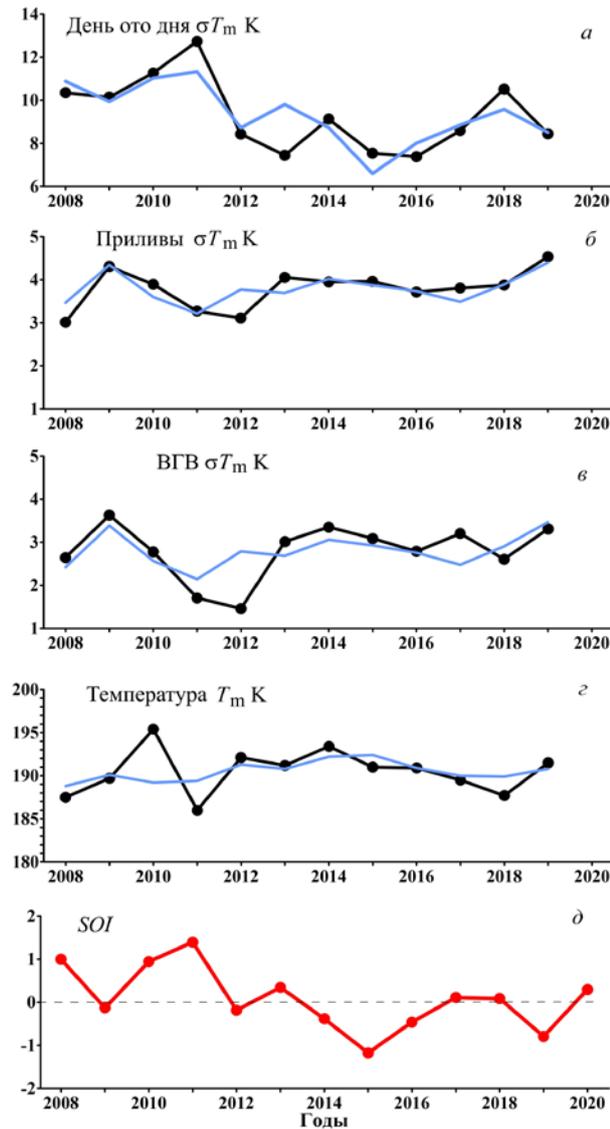


Рис. 7. Межгодовые вариации σT_m (черная кривая) и их аппроксимации при помощи множественной регрессии на SOI и A_p (синяя кривая): *a* — межсуточная изменчивость; *б* — с периодами приливов; *в* — с периодами ВГВ; *з* — вариации среднегодовых значений T_m (черная кривая) и их аппроксимация при помощи множественной регрессии на SOI и $F10.7$ (синяя кривая); *д* — вариации среднегодовых значений SOI

точная σT_m , обусловленная влиянием мигрирующих планетарных волн, коррелирует с SOI , с пиком изменчивости в фазе Ла-Нинья (максимум SOI в 2011 г.) и минимумом в фазе Эль-Ниньо (рис. 7, *a*). Внутрисуточная изменчивость, обусловленная приливами и ВГВ (рис. 7, *б*, *в*) демонстрирует отрицательную

корреляцию с индексом SOI , причем наименьшая изменчивость наблюдается вблизи фазы Ла-Нинья (2011–2012 гг.).

В работе [Pedatella, Liu, 2012] были проведены численные расчеты по модели WACCM (Whole Atmosphere Community Climate Model) и показано, что Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК) может быть причиной значительной межгодовой изменчивости мигрирующих и немигрирующих приливов в области мезосферы и нижней термосферы (МНТ). Авторы пришли к выводу, что приливы демонстрируют наибольший отклик на ЭНЮК. В работе [Pedatella, Liu, 2013] сделан вывод, что явление ЭНЮК может быть рассмотрено как потенциально значительный источник изменчивости в верхней атмосфере. Таким образом, наблюдаемое повышение во внутрисуточной изменчивости температуры области мезопаузы во время фазы Эль-Ниньо может быть связано с интенсификацией приливных волн в верхней атмосфере. Анализ межсуточной σT_m , обусловленной влиянием мигрирующих планетарных волн, выявил ее корреляцию с вариациями SOI , с максимальной изменчивостью в фазе Ла-Нинья (максимум SOI в 2011 г.) и минимальной в фазе Эль-Ниньо (рис. 7, *a*). Это противоречит выводу работ [Pedatella, Liu, 2013; Sassi et al., 2004], что значительное усиление активности планетарных волн происходит в периоды Эль-Ниньо. В [Pedatella, Liu, 2013] на основе модельных расчетов был сделан вывод, что на низких широтах в периоды Эль-Ниньо аномальные средние зональные ветры, направленные на запад, возникают в интервале высот 40–60 км, а направленные на восток — на высотах 60–90 км. Во время фазы Ла-Нинья картина противоположна. Sassi et al. [2004] также выявили, что ЭНЮК вызывает изменчивость в стратосфере и мезосфере низких широт. Однако авторы работы [García-Herrera et al., 2006] не обнаружили существенной изменчивости атмосферных параметров на низких широтах. Возможная причина этого расхождения может быть связана с использованием разных моделей в [Pedatella, Liu, 2013; Sassi et al., 2004; García-Herrera et al., 2006], а также с выбором событий ЭНЮК для анализа. В работах [Offermann et al., 2009; Perminov et al., 2014a, b] были обнаружены различия в σT_m для разных анализируемых регионов. Можно предположить, что причиной расхождения между полученным нами результатом (увеличение межсуточной σT_m в фазе Ла-Нинья) и выводами работ [Pedatella, Liu, 2013; Sassi et al., 2004] (увеличением активности планетарных волн в фазе Эль-Ниньо) могут быть широтные и долготные различия между анализируемыми регионами.

Множественный регрессионный анализ среднегодовой T_m на $F_{10.7}$ и A_p не выявил их значимой корреляции (коэффициент детерминации 9.1 %). Наилучший коэффициент детерминации (18.1 %) дает множественная регрессия среднегодовых значений T_m на SOI и $F_{10.7}$. Результаты анализа показаны на рис. 7, з. Низкие коэффициенты детерминации связаны с поведением среднегодовой температуры мезопаузы в 2009–2011 гг.: ни один из индексов не воспроизводит резкого роста в 2009–2010 гг. и резкого падения в 2010–2011 гг. В [Sun et al., 2019] было исследовано влияние Эль-Ниньо — Южного колебания на полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы и показано, что вклад холодной фазы ЭНЮК в 2010 и 2011 гг. в квазидвухлетние колебания вариаций ПЭС не является незначительным. Возможной причиной значительных изменений среднегодовой T_m в 2009–2011 гг. может быть холодная фаза Ла-Нинья и самые высокие значения SOI за последние 70 лет (рис. 7, д).

Для исследования связи σT_m и $\sigma N_m F_2$ были рассчитаны коэффициенты корреляции и детерминации между межгодовыми вариациями этих характеристик в ночное время. Расчеты выявили низкую отрицательную корреляцию с коэффициентами -0.229 для межсуточной изменчивости, -0.284 для приливной изменчивости и -0.046 для изменчивости с периодами ВГВ. Соответствующие коэффициенты детерминации составили 5.2, 8.1 и 0.2 %. Таким образом, значимой связи между межгодовыми вариациями σT_m и $\sigma N_m F_2$ в ночное время не обнаружено. Сопоставление межгодовых вариаций $\sigma N_m F_2$ и SOI также не выявило значимой связи между этими характеристиками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование долговременных вариаций среднегодовых значений $N_m F_2$ за 66-летний период привело к следующим заключениям.

Основным фактором вариаций среднегодовых дневных и ночных значений является изменение солнечной активности (коэффициенты детерминации 98 % днем и 97 % ночью). Учет влияния геомагнитной активности практически не сказывается на ошибках регрессии. Аппроксимация отклонений от регрессии $\Delta N_m F_2$ линейным временным трендом выявила отрицательные тренды в долговременных вариациях $N_m F_2$: $0.49 \cdot 10^5 \text{ см}^3/100$ лет днем и $0.26 \cdot 10^5 \text{ см}^3 / 100$ лет ночью. Диапазон тренда в ~ 10 раз меньше диапазона отклонений от регрессий для всех годов и в ~ 4 раза меньше диапазона отклонений от регрессий для годов с $F_{10.7} < 175$ с.е.п. В обоих случаях вычитание тренда незначительно уменьшает среднеквадратичное отклонение. Наибольшие отклонения от регрессий на $F_{10.7}$ наблюдаются в годы вблизи максимумов солнечных циклов 19 и 22. Данный факт отмечался в предыдущих исследованиях, а причина отклонений в настоящее время является дискуссионным вопросом. Сопоставление полученных трендов $N_m F_2$ с трендами, представленными в обзоре [Данилов, Константинова, 2020] показало согласие с небольшими трендами $f_o F_2$; при этом в обзоре приводятся тренды, которые в несколько раз или даже на порядок превышают значе-

ния, полученные в данной работе. Проведенный анализ показал, что изменение в коэффициентах регрессии от цикла к циклу может составлять ~ 15 %, однако такое изменение является не трендом, а аномалией определенного цикла.

По данным радиофизических и спектрометрических измерений на комплексе инструментов ИСЗФ СО РАН в 24-ом цикле проведено исследование межгодовых вариаций $N_m F_2$, T_m и их изменчивостей. В результате множественного регрессионного анализа получены следующие выводы. Основной вклад в межгодовые вариации среднегодовых значений $N_m F_2$ вносит солнечная активность, вклад геомагнитной активности пренебрежимо мал. Для четырех из шести типов ионосферной изменчивости вклады солнечной и геомагнитной активности сопоставимы. Для дневных значений $\sigma N_m F_2$ с периодами ВГВ, преобладает влияние солнечной активности. Для ночных значений межсуточной $\sigma N_m F_2$ вклад как солнечной, так и геомагнитной активности является незначительным. Анализ межгодовых вариаций σT_m показал, что включение SOI в множественный регрессионный анализ привело к значительному увеличению коэффициентов детерминации: наиболее высокие получены для множественной регрессии на SOI и A_p . Это может указывать на влияние явлений Эль-Ниньо/Ла-Нинья на характеристики верхней атмосферы средних широт. Межсуточная σT_m коррелирует с SOI , с пиком изменчивости в фазе Ла-Нинья (2011–2012 гг.). Максимальная внутрисуточная σT_m наблюдается вблизи фазы Эль-Ниньо. Для среднегодовых значений T_m наилучший коэффициент детерминации (18.1 %) дает множественная регрессия на индексы SOI и $F_{10.7}$. Значимая связь между межгодовыми вариациями $\sigma N_m F_2$ и σT_m не обнаружена.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00146, [<https://rscf.ru/project/22-17-00146/>]. Для анализа использовались экспериментальные данные Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>], полученные при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А.Д., Ванина-Дарт Л.Б. Сравнение величин $f_o F_2$ в дневное время и после захода Солнца. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2010. Т. 50, № 1. С. 61–66. DOI: [10.1134/S001679321001007X](https://doi.org/10.1134/S001679321001007X).
- 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. DOI: [10.31857/S0016794020040045](https://doi.org/10.31857/S0016794020040045).
- Шубин В.Н., Деминов М.Г. Глобальная динамическая модель критической частоты F2-слоя ионосферы. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2019. Т. 59, № 4. С. 461–473. DOI: [10.1134/S0016794019040151](https://doi.org/10.1134/S0016794019040151).
- Altadill D. Time/altitude electron density variability above Ebro, Spain. *Adv. Space Res.* 2007. Vol. 3. P. 962–969. DOI: [10.1016/j.asr.2006.05.031](https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.05.031).
- Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Bilitza D. Characteristics of the ionospheric variability as a function of season, latitude, local time, and geomagnetic activity. *Radio Sci.* 2005. Vol. 40. RS5009. DOI: [10.1029/2004rs003179](https://doi.org/10.1029/2004rs003179).
- Beig G. Long-term trends in the temperature of the mesosphere/lower thermosphere region: 2. Solar response. *J. Geophys.*

Res. Atmos. 2011. Vol. 116. A00H12. DOI: [10.1029/2011ja016766](https://doi.org/10.1029/2011ja016766).

Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., et al. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions. *Space Weather*. 2017. Vol. 15. P. 418–429. DOI: [10.1002/2016SW001593](https://doi.org/10.1002/2016SW001593).

Bremer J. Trends in the ionospheric E and F regions over Europe. *Ann. Geophys.* 1998. Vol. 16, no. 8. P. 986–996. DOI: [10.1007/s00585-998-0986-9](https://doi.org/10.1007/s00585-998-0986-9).

Bremer J., Damboldt T., Mielich J., Suessmann P. Comparing long-term trends in the ionospheric F2 region with two different methods. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2012. Vol. 77. P. 174–185. DOI: [10.1016/j.jastp.2011.12.017](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.12.017).

Buresova D., Lastovicka J., Hejda P., Bochnicek J. Ionospheric disturbances under low solar activity conditions. *Adv. Space Res.* 2014. Vol. 54. P. 185–196. DOI: [10.1016/j.asr.2014.04.007](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.04.007).

Cnossen I., Franzke C. The role of the Sun in long-term change in the F2 peak ionosphere: new insights from Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) and numerical modeling. *J. Geophys. Res.* 2014. Vol. 119, no. 10. P. 8610–8623. DOI: [10.1002/2014JA020048](https://doi.org/10.1002/2014JA020048).

Deminov M.G., Deminova G.F., Zherebtsov 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.* 2013. Vol. 51. P. 702–711. DOI: [10.1016/j.asr.2012.09.037](https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.09.037).

Drob D.P., Emmert J.T., Meriwether J.W., et al. An update to the Horizontal Wind Model (HWM): The quiet time thermosphere. *Earth and Space Sci.* 2015. Vol. 2. P. 301–319. DOI: [10.1002/2014EA000089](https://doi.org/10.1002/2014EA000089).

Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. Variability of the ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2000. Vol. 62. P. 685–693. DOI: [10.1016/s1364-6826\(00\)00029-8](https://doi.org/10.1016/s1364-6826(00)00029-8).

García-Herrera R., Calvo N., Garcia R.R., Giorgetta M.A. Propagation of ENSO temperature signals into the middle atmosphere: A comparison of two general circulation models and ERA-40 reanalysis data. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111, D06101. DOI: [10.1029/2005JD006061](https://doi.org/10.1029/2005JD006061).

Khomich V.Y., Semenov A.I., Shefov N.N. Airglow as an Indicator of Upper Atmospheric Structure and Dynamics, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2008.

Lastovicka J. Is the relation between ionospheric parameters and solar proxies stable? *Geophys. Res. Lett.* 2019. Vol. 46, no. 24. P. 14208–14213. DOI: [10.1029/2019GL085033](https://doi.org/10.1029/2019GL085033).

Laštovička J., Burešová D. Relationships between f_oF_2 and various solar activity proxies. *Space Weather*. 2023. Vol. 21. e2022SW003359. DOI: [10.1029/2022SW003359](https://doi.org/10.1029/2022SW003359).

Medvedeva I., Ratovsky K. Studying atmospheric and ionospheric variabilities from long-term spectrometric and radio sounding measurements. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. Vol. 120. P. 5151–5159. DOI: [10.1002/2015ja021289](https://doi.org/10.1002/2015ja021289).

Medvedeva I.V., Ratovsky K.G. Comparative analysis of atmospheric and ionospheric variability by measurements of temperature in the mesopause region and peak electron density N_mF_2 . *Geomagnetism and Aeronomy.* 2017. Vol. 57. P. 217–228. DOI: [10.1134/s0016793217020104](https://doi.org/10.1134/s0016793217020104).

Medvedeva I.V., Semenov A.I., Perminov V.I., et al. Comparison of ground-based OH temperature data measured at Irkutsk (52° N, 103° E) and Zvenigorod (56° N, 37° E) stations with aura MLS v3.3. *Acta Geophys.* 2014. Vol. 62. P. 340–349.

Mielich J., Bremer J. Long-term trends in the ionospheric F2 region with two different solar activity indices. *Ann. Geophys.* 2013. Vol. 31, no. 2. P. 291–303. DOI: [10.5194/angeo-31-291-2013](https://doi.org/10.5194/angeo-31-291-2013).

Mikhailov A.V., Förster M., Leschinskaya T.Y. On the mechanism of the post-midnight winter N_mF_2 enhancements: Dependence on solar activity. *Ann. Geophys.* 2000. Vol. 18. P. 1422–1434. DOI: [10.1007/s00585-000-1422-y](https://doi.org/10.1007/s00585-000-1422-y).

Offermann D., Gusev O., Donner M., et al. III. Relative intensities of middle atmosphere waves. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2009. Vol. 114. D06110. DOI: [10.1029/2008jd010662](https://doi.org/10.1029/2008jd010662).

Pedatella N.M., Liu H.-L. Tidal variability in the mesosphere and lower thermosphere due to the El Niño–Southern Oscillation. *Geophys. Res. Lett.* 2012. Vol. 39. L19802. DOI: [10.1029/2012gl053383](https://doi.org/10.1029/2012gl053383).

Pedatella N.M., Liu H.-L. Influence of the El Niño Southern Oscillation on the middle and upper atmosphere. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. Vol. 118. P. 2744–2755. DOI: [10.1002/jgra.50286](https://doi.org/10.1002/jgra.50286).

Perminov V.I., Semenov A.I., Medvedeva I.V., Zhelezov Y.A. Variability of mesopause temperature from the hydroxyl airglow observations over mid-latitude sites, Zvenigorod and Tory, Russia. *Adv. Space Res.* 2014a. Vol. 54. P. 2511–2517. DOI: [10.1016/j.asr.2014.01.027](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.01.027).

Perminov V.I., Semenov A.I., Medvedeva I.V., Pertsev N.N. Temperature variations in the mesopause region according to the hydroxyl-emission observations at midlatitudes. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2014b. Vol. 54. P. 230–239. DOI: [10.1134/s0016793214020157](https://doi.org/10.1134/s0016793214020157).

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, no. A12. P. 1468–1483. DOI: [10.1029/2002JA009430](https://doi.org/10.1029/2002JA009430).

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.* 2015. Vol. 55. P. 2041–2047. DOI: [10.1016/j.asr.2014.08.001](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.08.001).

Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Dmitriev A.V., Medvedeva I.V. Relation of extreme ionospheric events with geomagnetic and meteorological activity. *Atmosphere.* 2022. Vol. 13, no. 146. DOI: [10.3390/atmos13010146](https://doi.org/10.3390/atmos13010146).

Rishbeth H., Mendillo M. Patterns of F2-layer variability. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2001. Vol. 63. P. 1661–1680. DOI: [10.1016/s1364-6826\(01\)00036-0](https://doi.org/10.1016/s1364-6826(01)00036-0).

Ropelewski C.F., Jones P.D. An extension of the Tahiti–Darwin Southern Oscillation Index. *Monthly Weather Review.* 1987. Vol. 115. P. 2161–2165.

Sassi F., Kinnison, D., Boville, B.A., et al. Effect of El Niño–Southern Oscillation on the dynamical, thermal, and chemical structure of the middle atmosphere. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2004. Vol. 109. D17108. DOI: [10.1029/2003jd004434](https://doi.org/10.1029/2003jd004434).

Semenov A.I. Variations in the atmospheric temperature response (30–100 km) to solar activity for equatorial and polar latitudes. *Dokl. Earth Sci.* 2008. Vol. 423. P. 1483–1487. DOI: [2008DokES.423.1483S](https://doi.org/2008DokES.423.1483S).

Semenov A.I., Bakanas V.V., Perminov V.I., et al. The near infrared spectrum of the emission of the nighttime upper atmosphere of the Earth. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2002. Vol. 42. P. 390–397.

Sun Y.-Y., Liu H., Miyoshi Y., et al. El Niño–Southern Oscillation effect on ionospheric tidal/SPW amplitude in 2007–2015 FORMOSAT-3/COSMIC observations. *Earth Planets Space.* 2019. Vol. 71, no. 35. DOI: [10.1186/s40623-019-1009-7](https://doi.org/10.1186/s40623-019-1009-7).

Zhang S. Ionospheric Climate Change: a report on the ISI team research efforts. Paper presented at the 10th Workshop on long-term changes and trends in the atmosphere (Hefei, China, May 14–18, 2018). 2018.

URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> (дата обращения 3 августа 2022 г.).

URL: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/soi/> (дата обращения 7 октября 2022 г.).

URL: <https://rscf.ru/project/22-17-00146/> (дата обращения 3 августа 2022 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 3 августа 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

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. DOI: [10.12737/szf-104202401](https://doi.org/10.12737/szf-104202401).