

Анализ сезонной и суточной зависимости ионосферных трендов на основе долговременных измерений на Иркутской ионосферной станции

К.Г. Ратовский, А.Г. Сетов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, а/я 291
E-mail: ratovsky@iszf.irk.ru, setov@iszf.irk.ru*

*Представлены результаты анализа сезонной и суточной зависимости ионосферных трендов на основе долговременных (1955-2023 гг.) измерений максимума электронной концентрации на Иркутской ионосферной станции. Проанализированы различия в ошибках регрессий, коэффициентах регрессий и трендах максимума электронной концентрации при использовании среднесезонных значений вместо среднегодовых.
Ключевые слова: ионосферные тренды, корреляционный анализ*

Analysis of seasonal and diurnal dependence of ionospheric trends based on long-term measurements at the Irkutsk ionospheric station

K.G. Ratovsky, A.G. Setov
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS.

*We present the results of an analysis of the seasonal and diurnal dependence of ionospheric trends based on long-term (1955-2023) measurements of the peak electron density at the Irkutsk ionospheric station. We analyze differences in regression errors, regression coefficients, and trends in the peak electron density when using seasonal averages instead of annual averages.
Keywords: ionospheric trends, correlation analysis*

Введение

Работа является прямым продолжением исследования [1], где метод оценки ионосферных трендов заключался в аппроксимации линейным временным трендом отклонений от множественной линейной регрессии максимума электронной концентрации (NmF2) на индексы солнечной активности F10.7 и геомагнитной активности Ap. Использовались среднегодовые значения NmF2 для дневного (10-14 LT) и ночного времени (22-02 LT), а также среднегодовые значения индексов F10.7 и Ap. Побудительным мотивом для данной работы стал вывод исследования [2] о том, что среднесуточные и среднегодовые тренды могут быть существенно ниже трендов, наблюдаемых днем в отдельные сезоны. Целью данной работы является анализ различий в ошибках регрессий NmF2 на F10.7 и Ap, коэффициентах регрессий и трендах NmF2 при использовании среднесезонных значений вместо среднегодовых.

Метод анализа данных

Для анализа долговременных изменений параметров ионосферы нами использовались данные иркутской аналоговой автоматической ионосферной станции (АИС) за 1955-1996 гг. и данные иркутского цифрового ионозонда DPS-4 за 2003-2023 гг. В качестве ионосферной характеристики использовалось значение NmF2, рассчитанное по критической частоте foF2, определяемой с помощью ионограмм ионосферной станции АИС либо ионозонда DPS-4 ($\text{NmF2} [10^5 \cdot \text{см}^{-3}] = 0.124 (\text{foF2} [\text{МГц}])^2$). В качестве индикатора солнечной активности использовался индекс F10.7, представляющий собой среднесуточный поток радиоизлучения Солнца на длине

волны 10.7 см, выраженный в солнечных единицах потока (с.е.п.). В качестве индикатора геомагнитной активности использовался индекс A_p , представляющий вариации наиболее возмущенных компонент геомагнитного поля в нанотесла (нТл). Для каждого года рассчитывались среднесезонные значения $NmF2$ для дневного (10-14 LT) и ночного времени (22-02 LT), а также среднесезонные значения индексов $F10.7$ и A_p . В качестве сезонов выбраны интервалы продолжительностью ~ 91 день, центрированные относительно солнцестояний и равноденствий в Северном полушарии: зима (07.11-22.12-05.02); весна (06.02-22.03-07.05); лето (08.05-22.06-07.08) и осень (08.08-22.09-06.11).

Для анализа зависимости $NmF2$ от солнечной и геомагнитной активности использовалась множественная линейная регрессия $NmF2$ на $F10.7$ и A_p :

$$NmF2 = N0 + N1 \cdot (F10.7 - 69 \text{ с.е.п.}) + N2 \cdot (A_p - 4 \text{ нТл}), \quad (1)$$

где $N0$ – значение $NmF2$ в минимуме солнечной и геомагнитной активности ($F10.7 = 69$ с.е.п. и $A_p = 4$ нТл),

$N1$ и $N2$ являются скоростями изменения $NmF2$ с ростом $F10.7$ и A_p , соответственно.

Метод оценки тренда $NmF2$ заключался в аппроксимации отклонений $\Delta NmF2$ от множественной регрессии $NmF2$ на $F10.7$ и A_p линейным временным трендом:

$$\Delta NmF2 = \Delta N0 + \Delta N1 \cdot (\text{Year} - 1955), \quad (2)$$

где Year – год,

$\Delta N0$ – значение $\Delta NmF2$ в 1955 г.,

$\Delta N1$ – скорость тренда изменения $\Delta NmF2$ со временем.

Для оценки вклада геомагнитной активности в межгодовые вариации $NmF2$ использовалась также простая линейная регрессия $NmF2$ на $F10.7$, с целью сравнения ошибок простой и множественной регрессий:

$$NmF2 = N0 + N1 \cdot (F10.7 - 69 \text{ с.е.п.}), \quad (1)$$

где коэффициенты $N0$ и $N1$ имеют тот же смысл, что и для множественной регрессии. Все расчеты были проведены как для среднегодовых, так и для среднесезонных значений.

Анализ различий в ошибках регрессий $NmF2$ на $F10.7$ и A_p , коэффициентах регрессий и трендах $NmF2$ при использовании среднесезонных значений вместо среднегодовых

Таблица 1 представляет коэффициенты множественных регрессий, ошибки множественных и простых регрессий, а также тренды в отклонениях от регрессий.

Из таблицы 1 видно, что использование среднесезонных значений вместо среднегодовых существенно сказывается на трендах, вписанных в отклонения от регрессий. В зимних условиях тренды практически исчезают (для дня и для ночи). В дневных условиях происходит заметное увеличение отрицательного тренда: в ~ 1.2 раза для лета, в ~ 1.6 раза для весны и в ~ 2.3 раза для осени. В дневных условиях происходит заметное увеличение отрицательного тренда для лета (в ~ 2.8 раза) и осени (в ~ 2.1 раза). Тот факт, что среднесуточные и среднегодовые тренды могут быть существенно ниже трендов, наблюдаемых днем в отдельные сезоны, согласуется с выводом исследования [2]. Различие заключается в том, что согласно результатам работы [2] для станции Juliusruh отрицательные тренды максимальны в зимний период и околополуденные часы, тогда как в ночные часы и в летний период тренды малы по амплитуде. В нашем случае тренды малы по амплитуде для зимнего периода. Данное различие требует специального исследования, включающего в себя согласованный метод расчета трендов.

Таблица 1. Коэффициенты регрессий NmF2 на F10.7 и Ap N0($10^5 \cdot \text{см}^{-3}$), N1($10^5 \cdot \text{см}^{-3}/100$ с.е.п.), N2($10^5 \cdot \text{см}^{-3}/10$ нТл), ошибки множественных $\sigma_2(\%)$ и простых $\sigma_1(\%)$ регрессий и тренды в отклонениях от регрессий ($10^5 \cdot \text{см}^{-3}/100$ лет)

Сезон	N0	N1	N2	$\sigma_2(\%)$	$\sigma_1(\%)$	Тренд	N0	N1	N2	$\sigma_2(\%)$	$\sigma_1(\%)$	Тренд
Весь год	3.8	8.7	- 0.23	1.63	1.67	-0.61	1.62	2.15	- 0.06	2.83	2.88	-0.24
Зима	3.4	10.6	0.58	2.05	2.23	+0.07	1.05	0.67	- 0.02	25.1	25.2	+0.01
Весна	3.9	11.0	- 0.14	2.25	2.27	-0.98	1.41	2.83	- 0.11	3.00	3.17	-0.21
Лето	3.1	3.8	- 0.35	4.58	5.35	-0.73	2.46	3.44	- 0.23	4.52	4.92	-0.67
Осень	4.5	8.6	- 0.72	4.00	4.69	-1.38	1.58	2.21	- 0.19	5.97	6.69	-0.51

На рис. 1 представлены отклонения от регрессий как функции года и вписанные в них тренды.

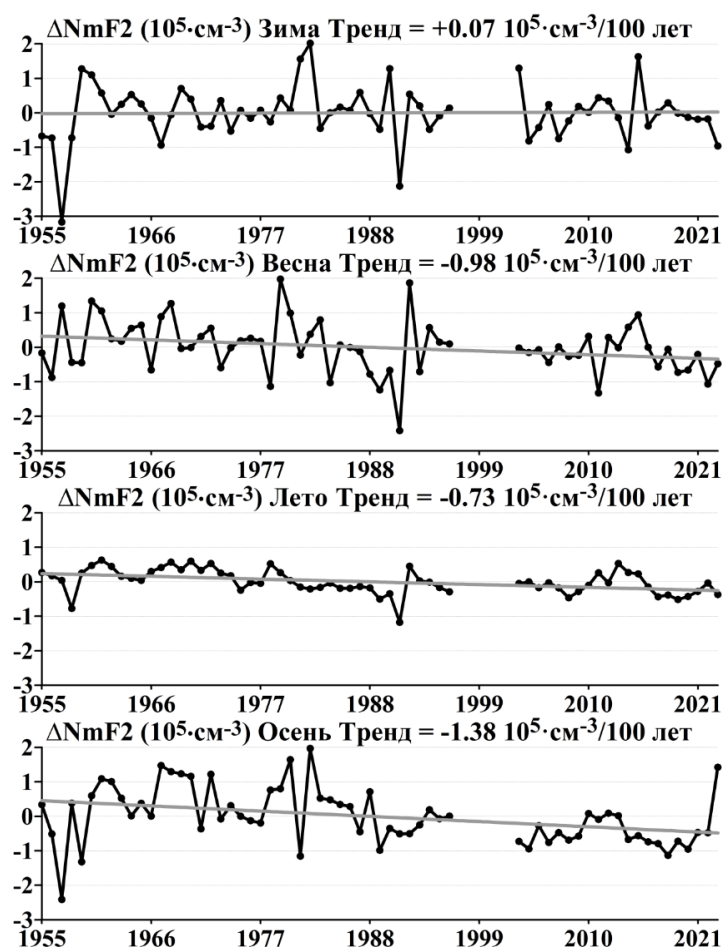


Рис. 1. Отклонения от регрессий как функции года и вписанные в них тренды

Из таблицы 1 видно, что использование среднесезонных значений вместо среднегодовых заметно повышает ошибку как множественной, так и простой регрессии. Для множественной регрессии в дневных условиях ошибка возрастает в ~ 1.3 раза для зимы, в ~ 1.4 раза для весны в ~ 2.8 раза для лета и в ~ 2.5 раза для осени. В ночных условиях ошибка возрастает в ~ 8.9 раза для зимы, в ~ 1.1 раза для весны в ~ 1.6 раза для лета и в ~ 2.1 раза для осени. Данный результат согласуется с выводом исследования [3], где было показано, что оптимальным периодом усреднения F10.7 с точки зрения минимизации ошибки простой регрессии NmF2 на F10.7 является 1 год.

При использовании среднесезонных значений меняется вклад геомагнитной активности в межгодовые вариации NmF2. Для среднегодовых значений ошибка множественной регрессии относительно ошибки простой регрессии уменьшается на $\sim 3\%$ днем и $\sim 2\%$ ночью. Для среднесезонных значений уменьшение ошибки множественной регрессии относительно ошибки простой регрессии достигает $\sim 17\%$ днем (летом и осенью) и $\sim 12\%$ ночью в осенний период. Знак коэффициента N2 показывает возрастание либо убывание NmF2 с ростом геомагнитной активности (возрастает зимой днем и убывает в остальных случаях). В целом суточно-сезонное поведение коэффициента N2 соответствует сезонной зависимости возмущений NmF2 в рамках концепции термосферной бури: положительные возмущения NmF2 зимой днем и отрицательные возмущения в остальных случаях [4]. Открытым вопросом остается весенне-осенняя асимметрия коэффициента N2.

Выводы

Использование среднесезонных значений вместо среднегодовых приводит к исчезновению трендов зимой и увеличению отрицательных трендов в другие сезоны.

Использование среднесезонных значений вместо среднегодовых заметно повышает ошибку как множественной, так и простой регрессии.

При использовании среднесезонных значений возрастает вклад геомагнитной активности в межгодовые вариации NmF2 для всех сезонов кроме весны.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 25-17-00187.

Литература

1. 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.
2. Данилов А.Д., Бербенева Н.А. Тренды критической частоты слоя F2 в последнее десятилетие // Геомагнетизм и аэрономия. 2023. Т. 63. № 2 С. 139–146, DOI: 10.31857/S0016794022600697.
3. Ratovsky K.G., Oinats A.V. Local empirical model of ionospheric plasma density derived from Digisonde measurements at Irkutsk // Earth Planets Space. 2011. V. 63. N. 4. P. 351–357, DOI: 10.5047/eps.2011.03.002.
4. Mikhailov A.V. Ionospheric F2-Layer Storms // Fis. Tierra. 2000. V. 12. P. 223-262.