



ИНСТИТУТ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНОЙ ФИЗИКИ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



Международная конференция "Физика атмосферы и климата", посвященная
70-летию Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 6-9 апреля
2026, г. Кисловодск, Россия

Методы оценки изменения климата верхней атмосферы по данным долговременных измерений на Иркутской ионосферной станции

Ратовский К.Г., Сетов А.Г.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда
№ 25-17-00187, <https://rscf.ru/project/25-17-00187>.



Введение

На сегодня совершенно ясно, что **концепция охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы**, сформулированная более 10 лет назад, справедлива. Она находит подтверждение в различных экспериментальных данных как в средней атмосфере (стратосфера и мезосфера), так и в **термосфере и ионосфере**.

Большинством групп исследователей получено, что наблюдаются **отрицательные тренды критической частоты и высоты ионосферного слоя F2**. Именно это и должно происходить при **охлаждении и оседании термосферы**.

Тренды могут варьироваться в зависимости от геомагнитной широты, долготы и солнечной активности, что требует тщательной **фильтрации солнечных и геомагнитных эффектов**.

Данилов А.Д., Константинова А.В. Долговременные вариации параметров средней и верхней атмосферы и ионосферы (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 4. С. 411-435. 2020.

<https://doi.org/10.31857/S0016794020040045>

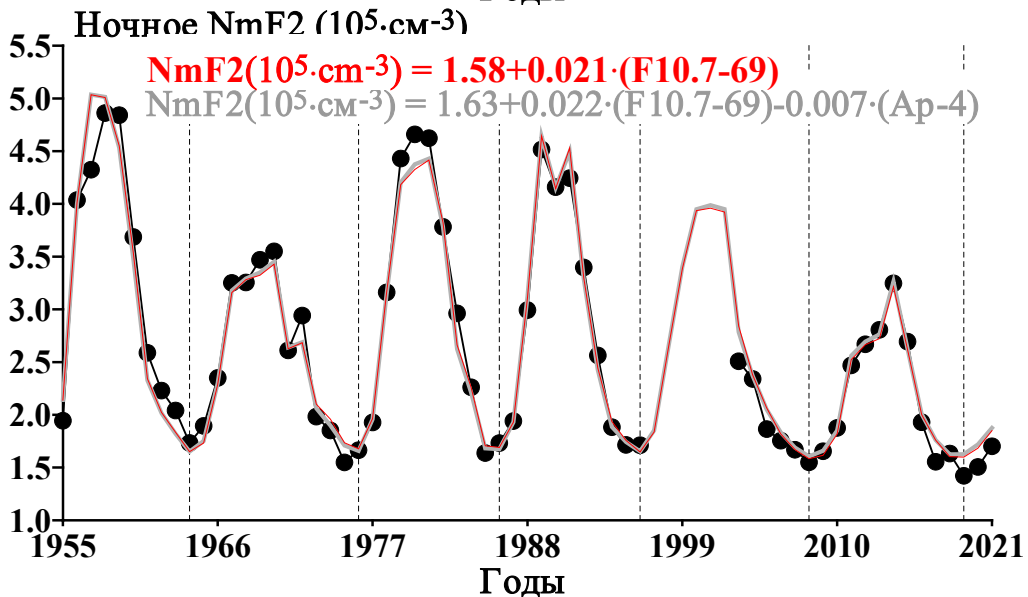
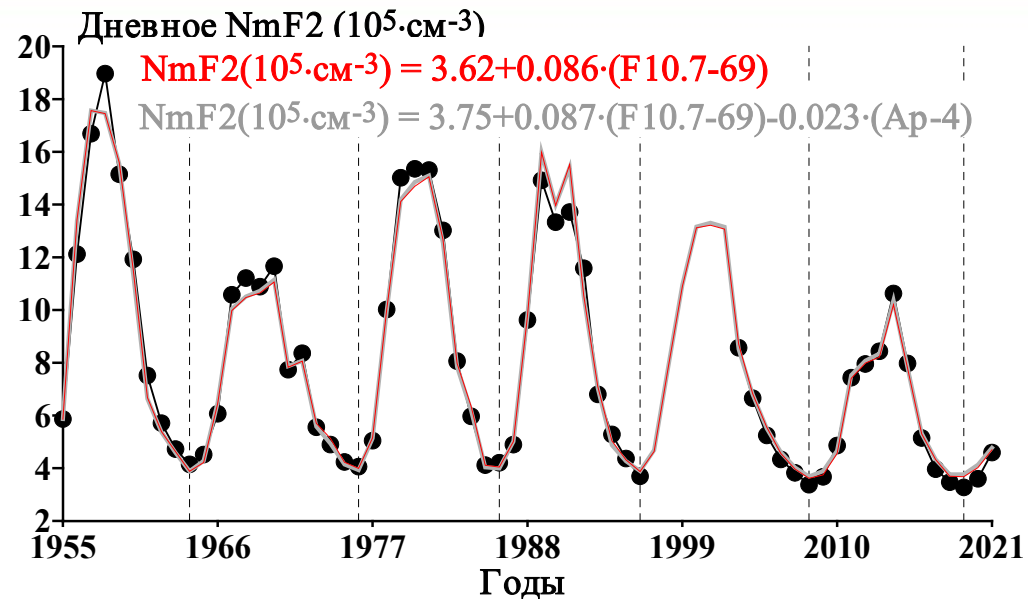


Данные и методы

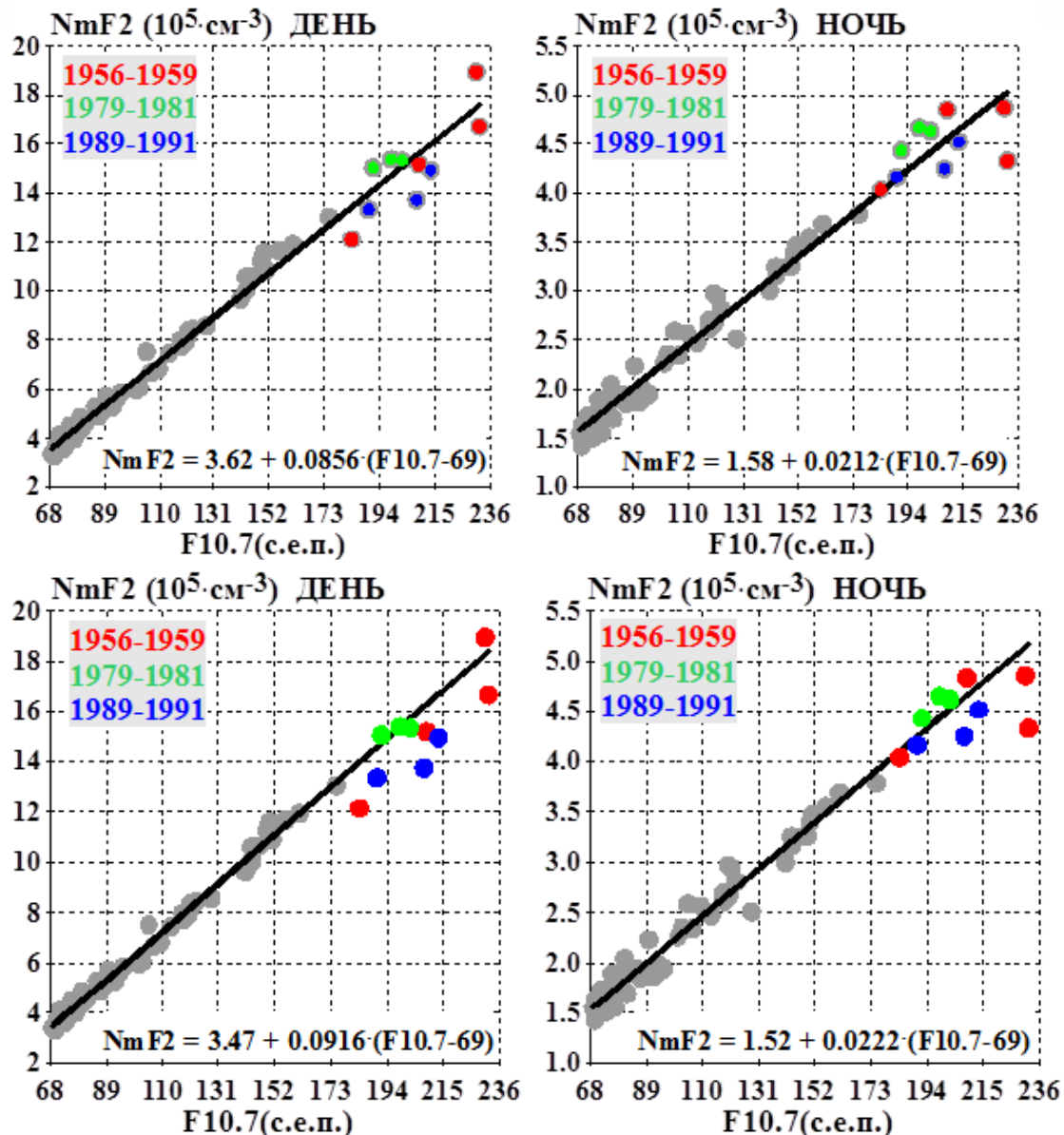
Данные иркутской аналоговой автоматической ионосферной станции (АИС) за **1957-1996 гг.** и иркутского цифрового ионозонда DPS-4 за **2003-2023 гг.** В качестве ионосферной характеристики использовалось значение **максимума электронной концентрации NmF2**, рассчитанное по критической частоте foF2, определяемой с помощью ионограмм ионосферной станции АИС либо ионозонда DPS-4. Анализировались среднегодовые значения NmF2 для дневного **10-14 LT** и ночного времени **22-02 LT**.

Индекс солнечной активности F10.7 (поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см или частоте ~ 2.8 ГГц) за 1957-2023 гг. с веб-сайта <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>. Анализировались среднегодовые значения. **Индекс солнечной активности F30** (поток радиоизлучения Солнца на длине волны 30 см или частоте 1 ГГц) за 1957-2023 гг. с веб-сайта <https://solar.nro.nao.ac.jp/norp/>. Анализировались среднегодовые значения.

Использовались **простые линейные регрессии** NmF2 на F10.7 и F30.



Простая линейная регрессия NmF2 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 являться влияние геомагнитной активности. Для проверки этой версии была осуществлена множественная регрессия среднегодовых значений NmF2 на среднегодовые значения F10.7 и Ap. Результаты множественного регрессионного анализа показали, что учет геомагнитной активности практически не сказывается на ошибках простых линейных регрессий. Коэффициенты детерминаций множественных регрессий на F10.7 и Ap составили **98.41% для дневного времени и 97.20% для ночного времени**, т.е. совпали с коэффициентами детерминаций простых регрессий с точностью **до 0.1%**.



Для устранения влияния высокой солнечной активности были построены регрессии с исключением годов с $F10.7 > 175$.

При исключении этих годов возрастает скорость роста $NmF2$ с ростом $F10.7$ и уменьшается значение $NmF2$ в минимуме.

Аппроксимация отклонений от регрессии $\Delta NmF2$ линейным временным трендом выявила отрицательные тренды в долговременных вариациях $NmF2$:

Днем $0.49 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3} / 100$ лет ($\sim 8\%$ за 100 лет или уменьшение на $\sim 5\%$ за исследуемый 66-летний период) и

Ночью $0.26 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3} / 100$ лет ($\sim 11\%$ за 100 лет или уменьшение на $\sim 7\%$ за исследуемый 66-летний период).

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



Стимулом к использованию индекса F30 вместо F10.7 стали работы

Laštovička J., Burešová D. Relationships between foF2 and various solar activity proxies // Space Weather. – 2023. – Vol. 21, e2022SW003359. DOI: 10.1029/2022SW003359 и

Laštovička J. Dependence of long-term trends in foF2 at middle latitudes on different solar activity proxies // Adv. Space Res. – 2024. – Vol. 73, No 1. – P. 685–689. DOI: 10.1016/j.asr.2023.09.047.

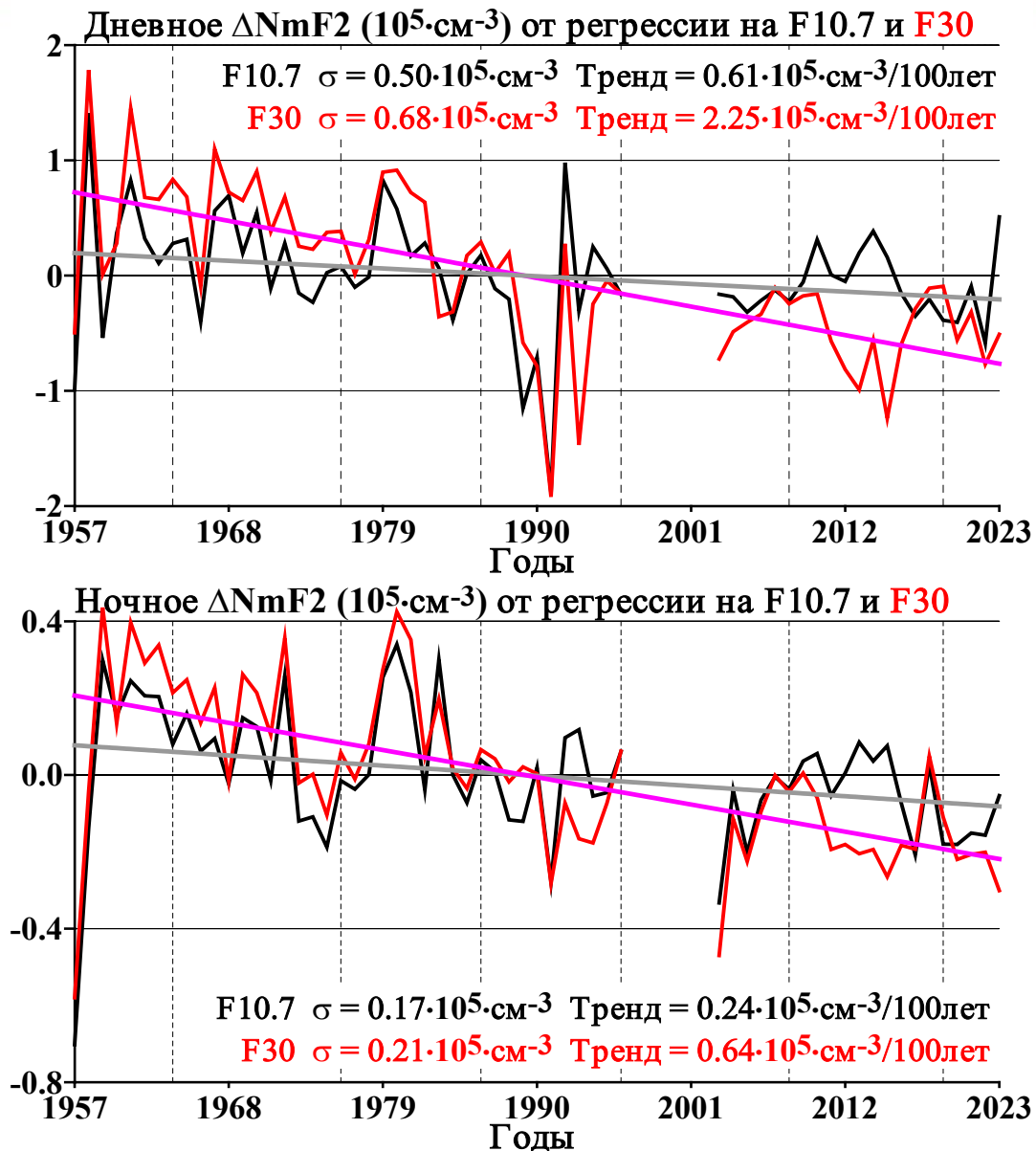
Зависимость foF2 от солнечных индексов значительно выше для 1996–2014 гг., чем для 1976–1995 гг. для F10.7 и числа солнечных пятен. Зависимость foF2 от F30 в среднем вообще не меняется. Мы рекомендуем в качестве наиболее подходящего индекса солнечной активности индекс F30 для анализа среднегодовых значений foF2 на средних широтах.

1. Долговременные тренды foF2 зависят от используемого индекса солнечной активности; при использовании разных индексов солнечной активности они могут быть даже противоположного знака.

2. Единственным солнечным индексом, который обеспечивает тренды одного знака для всех станций и обоих подпериодов, является F30 с отрицательным трендом foF2, а не F10.7, числом солнечных пятен или Mg II.

3. Основываясь на результатах этой статьи и работы [Laštovička and Burešová, 2023], я могу рекомендовать F30 как лучший солнечный индекс для изучения долгосрочных трендов foF2 в средних широтах (по крайней мере, для среднегодовых значений).

Ожидалось, что F30 обеспечит лучшую корреляцию с максимумом электронной концентрации NmF2 в целом и решит проблему выпадающего цикла 22 (1987–1996), для которого имели место наибольшие отклонения от регрессии на F10.7.

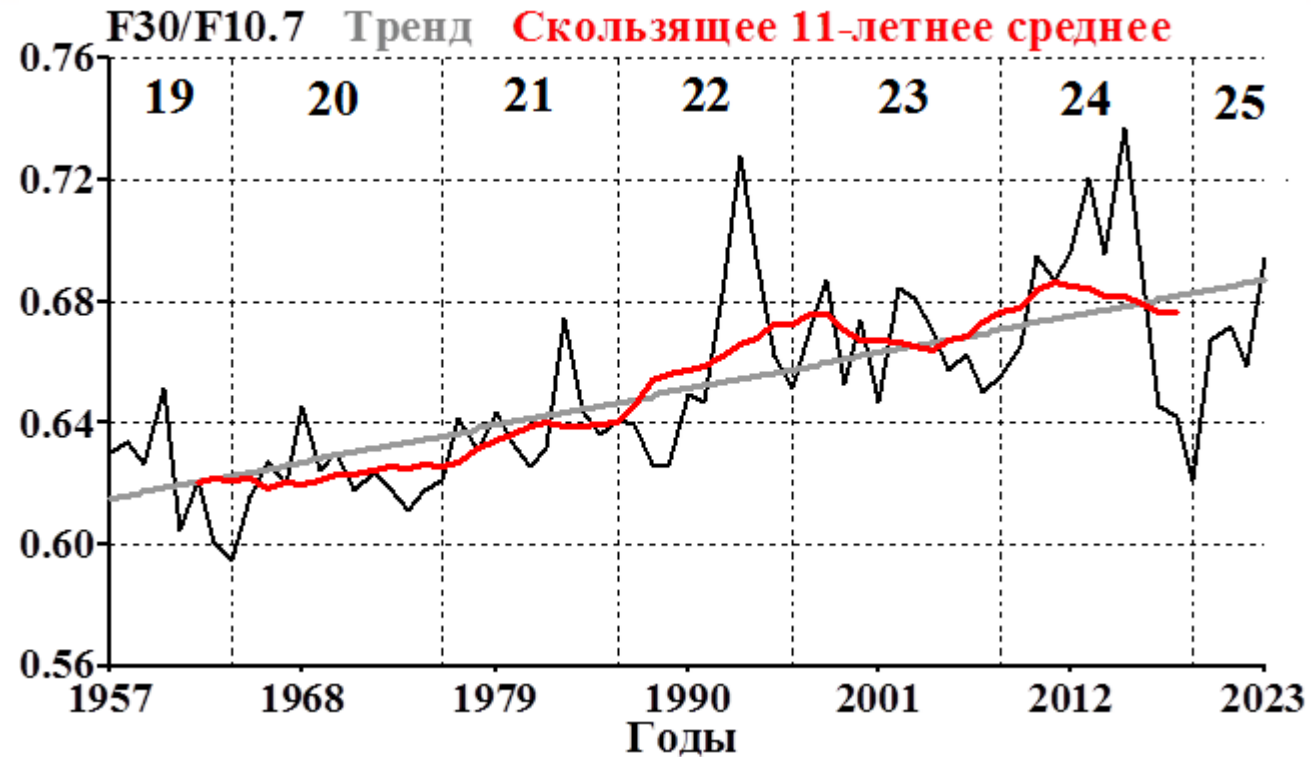


Во-первых, ошибка для F30 больше ошибки для F10.7 в ~ 1.4 раза для дня и в ~ 1.2 раза для ночи.

Во-вторых, тренд для F30 больше тренда для F10.7 в ~ 3.7 раза для дня и в ~ 2.7 раза для ночи.

Возможно, именно наличие большего тренда ведет к большей ошибке. Если тренд в отклонении от F30 имеет атмосферное происхождение, то не понятно каким образом этот тренд может компенсироваться на $\sim 2/3$ при использовании F10.7.

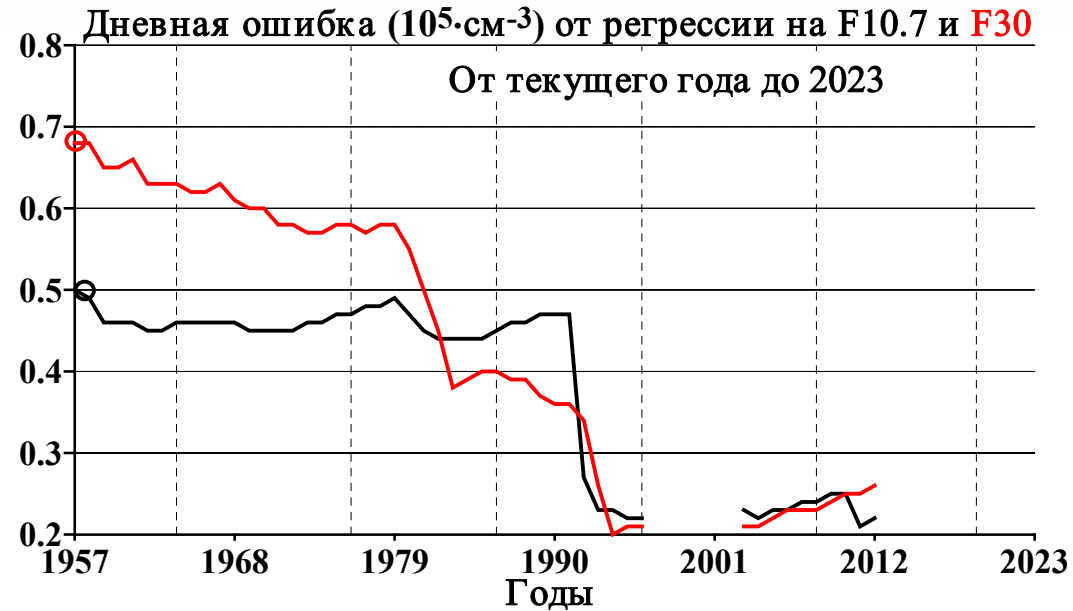
Очевидно, что различие в трендах F30 и F10.7 должно привести к тренду в отношении между индексами. (следующий слайд).



В соответствии с линейным трендом $F30/F107$ меняется от 0.615 до 0.687 (на $\sim 12\%$), в соответствии со скользящим 11-летним средним – от 0.620 до 0.687 (на $\sim 11\%$).

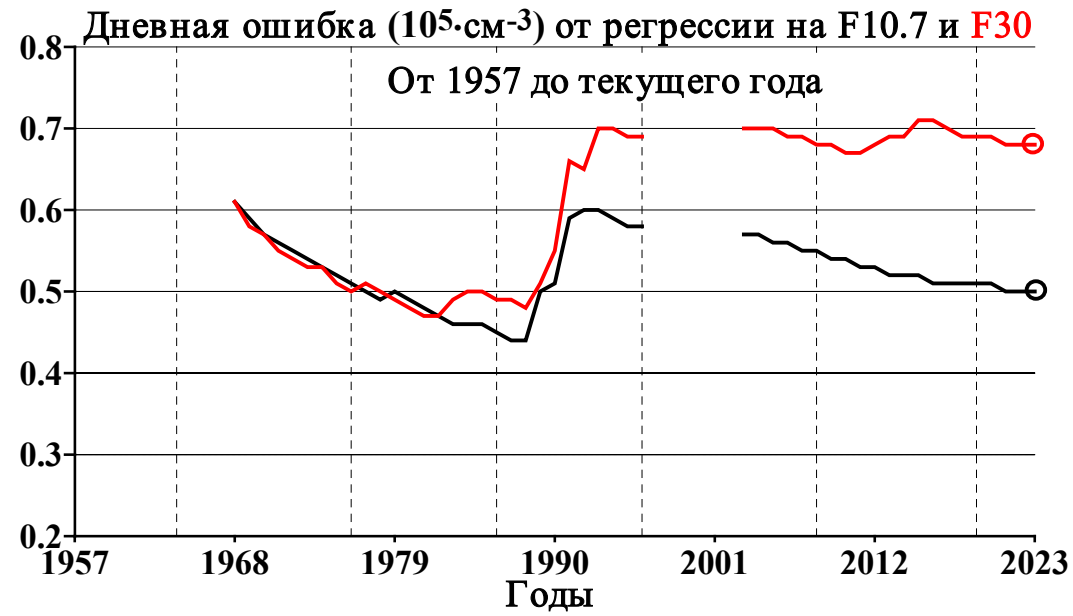
Согласно результатам работы [Mursula et al., 2024] причиной тренда являются **изменения на Солнце**. Нижеупомянутым следствием тренда является различие в ошибках регрессий NmF2 на F30 и F10.7..

Mursula, K., Pevtsov, A. A., Asikainen, T., Tähtinen, I., and Yeates, A.: Transition to a weaker Sun: Changes in the solar atmosphere during the decay of the Modern maximum, *Astron. Astrophys.*, 685, A170, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202449231>, 2024.



Дневные ошибки регрессий на F10.7 и F30 ($\sigma F10.7$ и $\sigma F30$) от текущего года до 2023.

$\sigma F10.7$ уменьшается в ~ 2 раза после исключения 1991 гг.
 $\sigma F30$ становится меньше $\sigma F10.7$ после исключения 1981-182 гг., после исключения 1991 гг. ошибки приблизительно одинаковы.

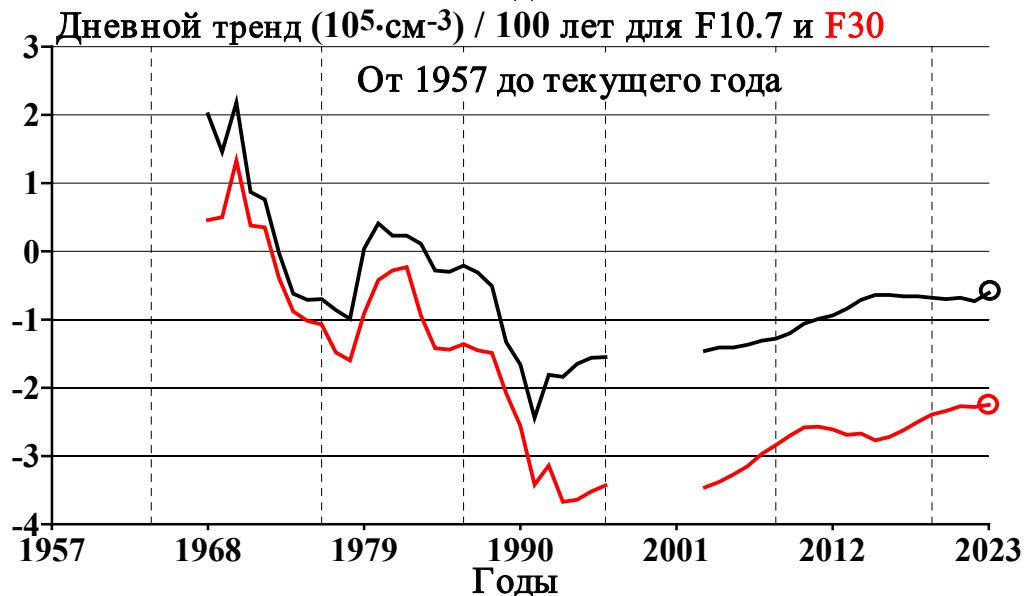
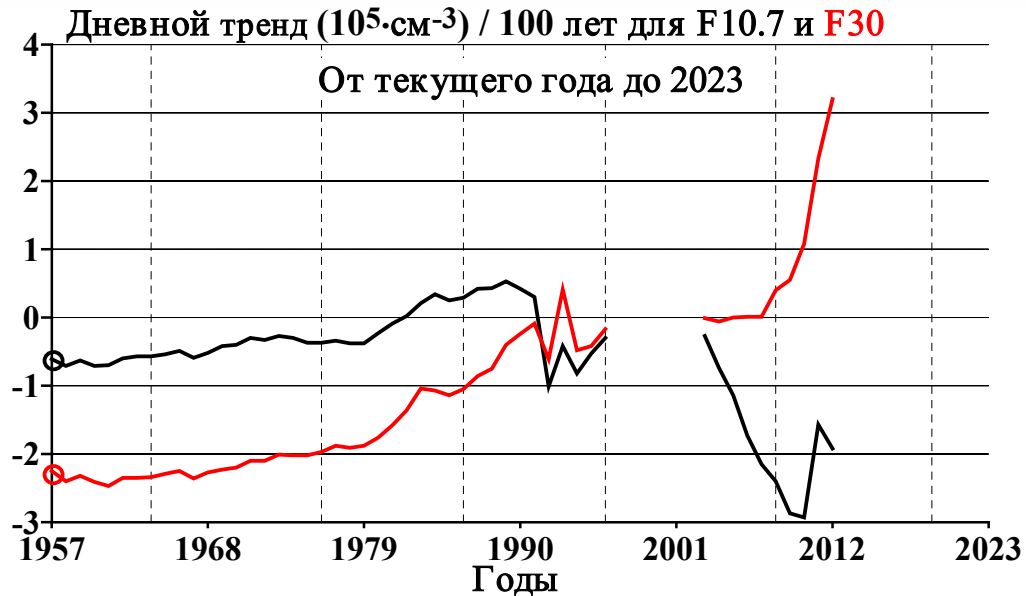


Дневные ошибки регрессий на F10.7 и F30 ($\sigma F10.7$ и $\sigma F30$) от 1957 до текущего года.

$\sigma F10.7$ и $\sigma F30$ последовательно уменьшаются с 1968 по 1982.
Минимальная $\sigma F10.7 = 0.44$ для 1957-1988, минимальная $\sigma F30 = 0.47$ для 1957-1982.

Скачкообразное увеличение $\sigma F10.7$ и $\sigma F30$ в 1989-1992 гг.

Ошибки приблизительно одинаковы для интервалов от 1957-1968 до 1957-1982, в остальных случаях $\sigma F10.7 < \sigma F30$.



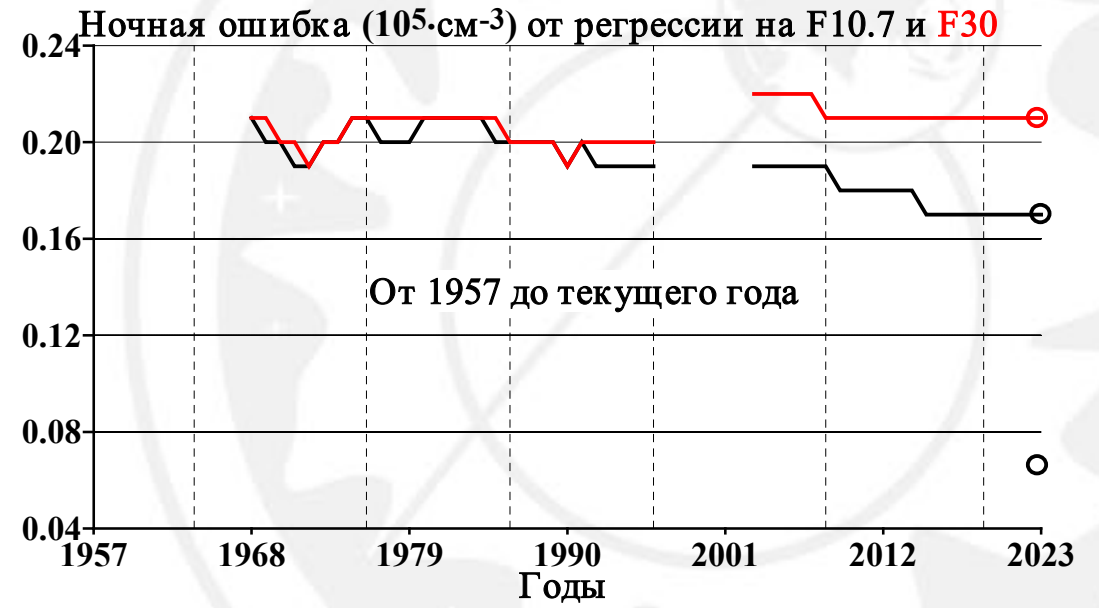
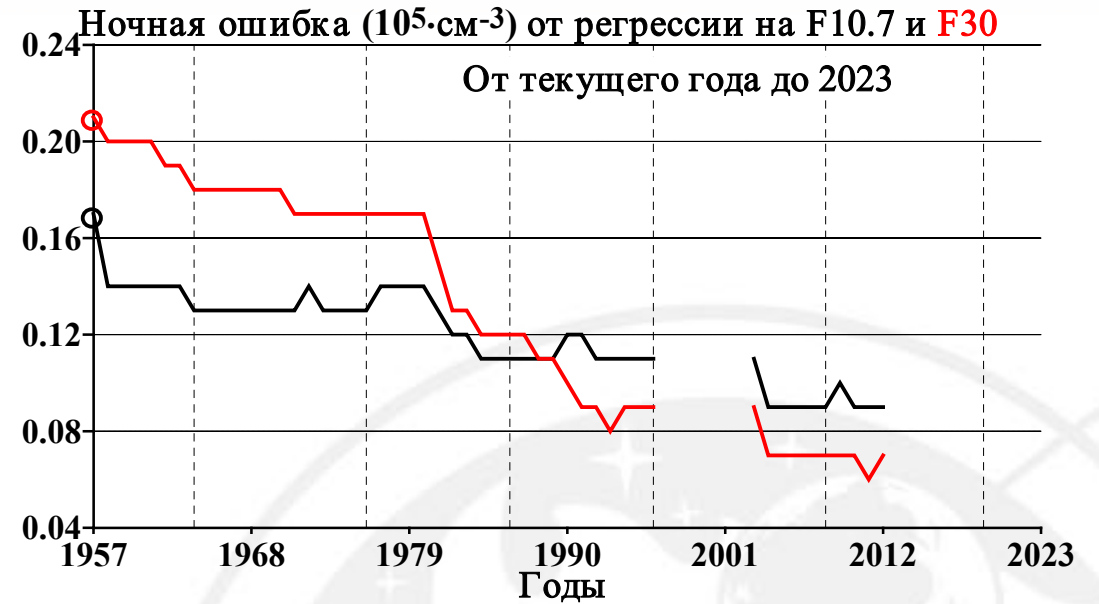
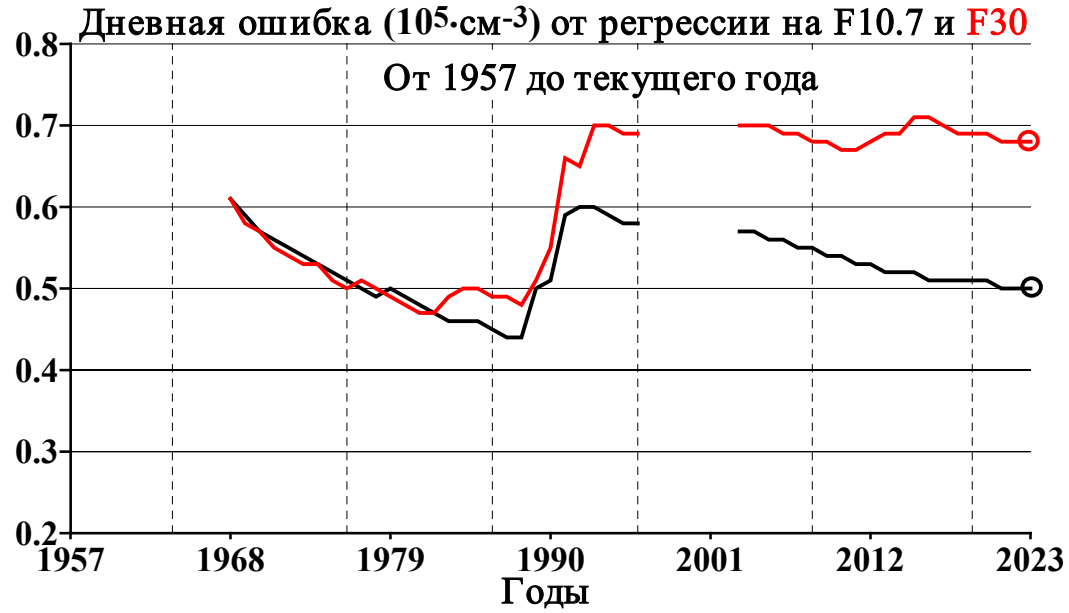
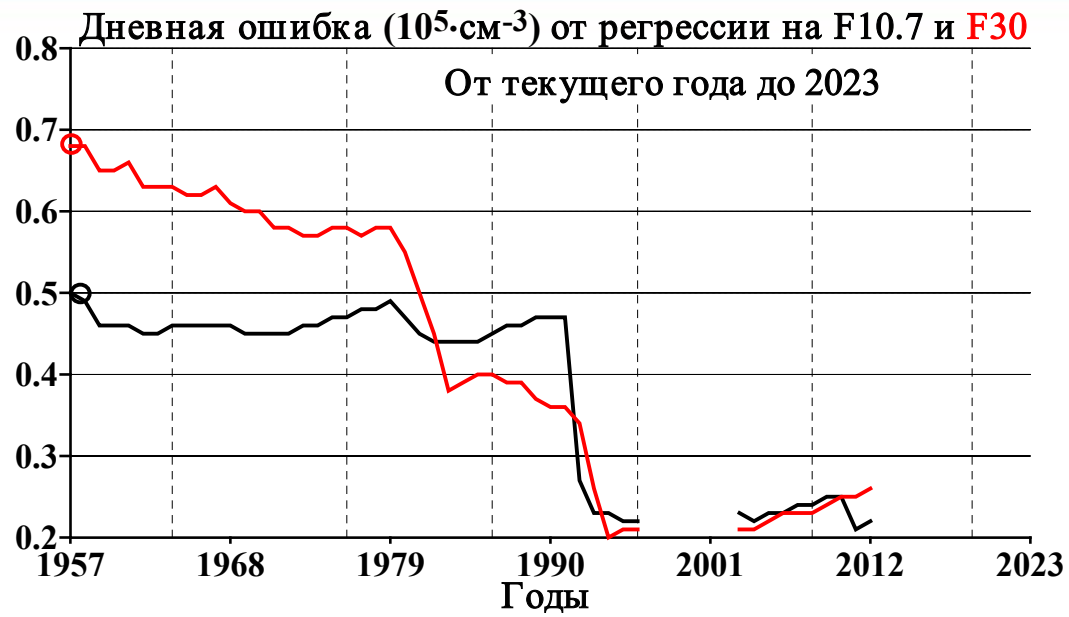
Дневные тренды в отклонениях от регрессий на F10.7 и F30 (TrF10.7 и TrF30) от текущего года до 2023.

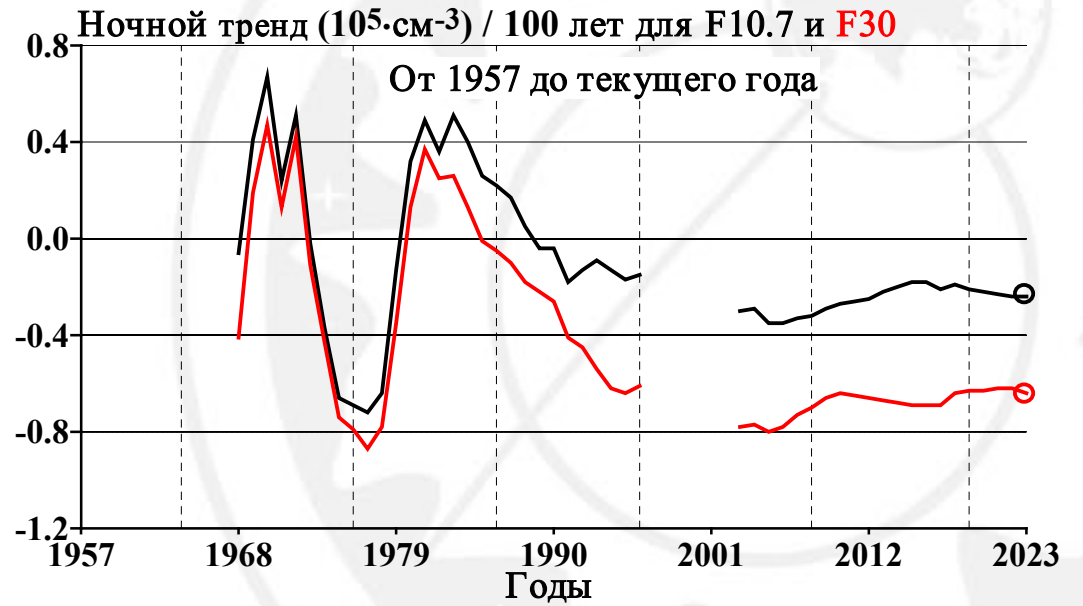
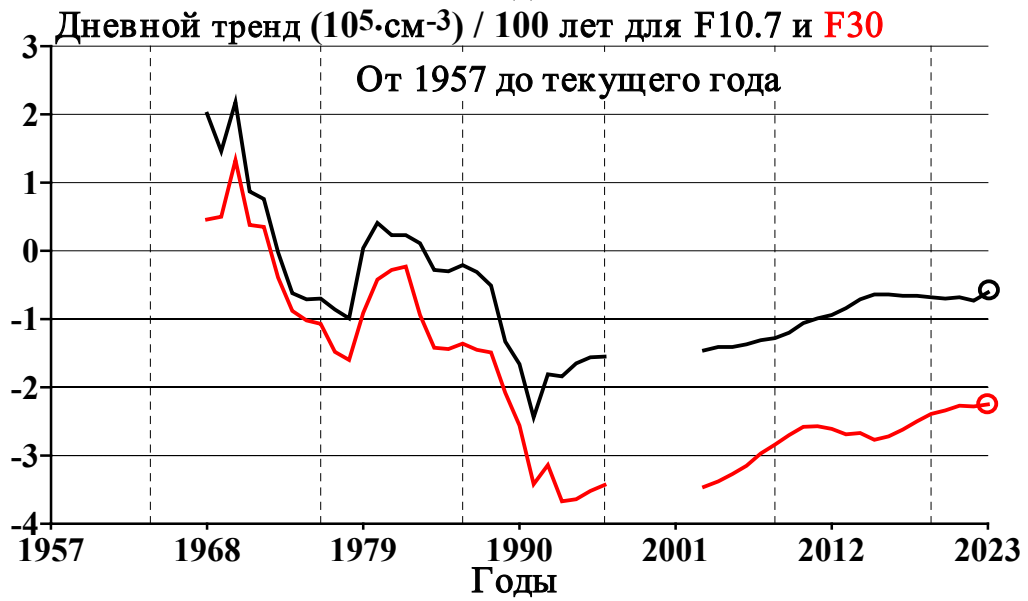
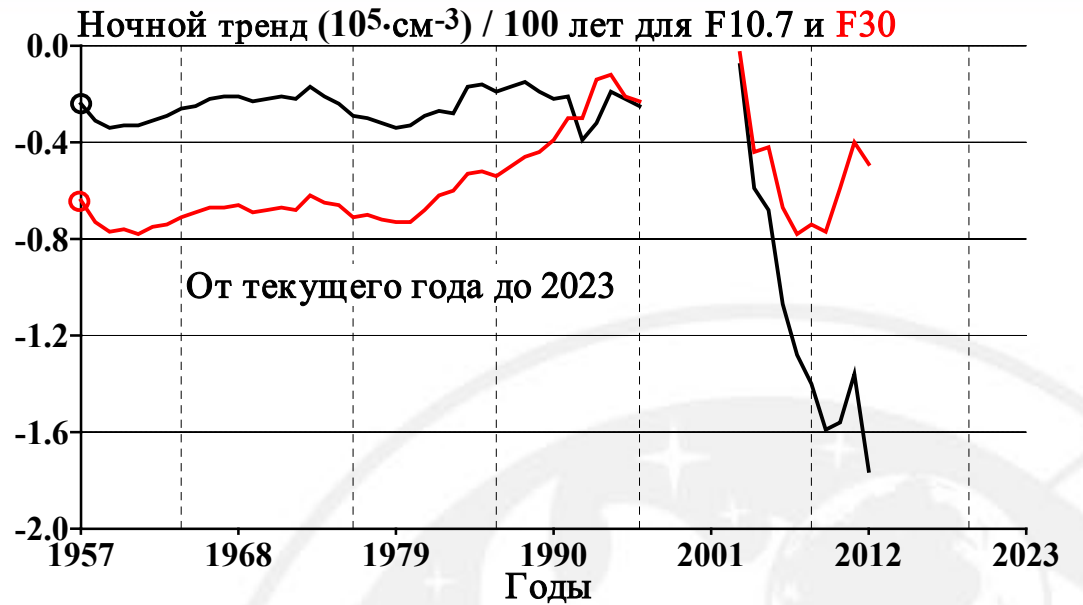
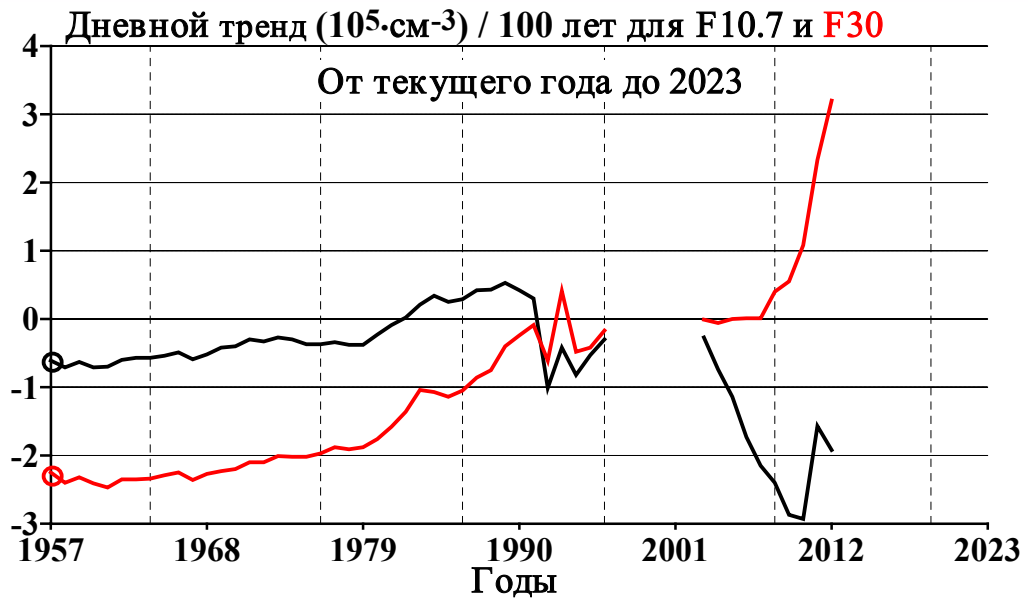
Изначально отрицательный $\text{TrF10.7} = -0.61$ становится положительным, достигая максимального значения $\text{TrF10.7} = +0.53$ для интервала 1989-2023. Изначально сильно отрицательный $\text{TrF30} = -2.25$ становится положительным, достигая максимального значения $\text{TrF30} = +0.41$ для интервала 1993-2023.

Означает ли это, что NmF2 в циклах 21-22 меньше, чем в современности?

Дневные тренды в отклонениях от регрессий на F10.7 и F30 (TrF10.7 и TrF30) от 1957 до текущего года.

Изначально положительный TrF10.7 становится отрицательным, достигая максимально отрицательного значения $\text{TrF10.7} = -2.24$ для интервала 1957-1991. Изначально положительный TrF30 становится отрицательным, достигая максимально отрицательного значения $\text{TrF30} = -3.67$ для интервала 1957-1993. **Означает ли это значительное уменьшение NmF2 в циклах 21-22 относительно NmF2 в циклах 19-20 и дальнейшее возрастание по мере приближения к современности?**







Заключение

Отношение индексов F30 и F10.7 не является стабильным, в среднем за 1957-2023 гг. это отношение возрастает на $\sim 12\%$ в соответствие с линейным трендом и на $\sim 11\%$ в соответствие со скользящим 11-летним средним.

Следствием изменения F30/F10.7 является различие в ошибках регрессий NmF2 на F30 и F10.7 и различные тренды в отклонениях от регрессий на F10.7 и F30. **Для полного интервала анализа 1957-2023, ошибка для F30 больше ошибки для F10.7 в ~ 1.4 раза для дня и в ~ 1.2 раза для ночи; тренд для F30 больше тренда для F10.7 в ~ 3.7 раза для дня и в ~ 2.7 раза для ночи.**

Варьирование начала и конца интервала анализа показало, что в большинстве случаев ошибка для F30 больше ошибки для F10.7 либо ошибки близки друг к другу. Тем не менее, существуют исключения, например, **для интервала 1991-2023 ошибка для F10.7 больше ошибки для F30 в ~ 1.3 раза для дня и ночи.**

Варьирование начала и конца интервала анализа показало, что тренды могут быть как отрицательными, так и положительными. Например, для F10.7 дневной тренд составляет **-2.24 для интервала 1957-1991 и +0.53 для интервала 1989-2023.**

Означает ли это значительное уменьшение NmF2 в циклах 21-22 относительно NmF2 в циклах 19-20 и дальнейшее возрастание по мере приближения к современности? Является ли это трендом или выпадением циклов 21-22?