



Влияние выбора индекса солнечной активности на тренды критической частоты слоя F2 по данным станций Якутск и Тикси

Кобякова С.Е., Гололобов А.Ю., Каримов Р.Р., Степанов А.Е.

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Россия

Абстракт

На основе анализа вариаций среднегодовых значений критической частоты слоя F2 (foF2) на субавроральной ионосферной станции Якутск (62,01° с.ш., 129,43° в.д.) за период 1957–2017 гг. и на высокоширотной станции — Полярной геокозмосфизической обсерватории (ПГО) Тикси (71,5° с.ш., 128,5° в.д.) за период 1969–2000 гг., проведено исследование влияния выбора индекса солнечной активности на величину и знак долговременных трендов foF2. Сравнивались результаты расчетов для шести индексов: F10.7, F30, Mg II, He II, SSN и Lyman- α . Для станции Якутск наилучшие результаты показали индексы F30 и Mg II, за ними следуют F10.7 и Lyman- α . Индексы SSN и He II оказались менее пригодными для анализа трендов. При этом отрицательные тренды, полученные с использованием F30 и Mg II, примерно в 2–3 раза превышают по величине тренды, рассчитанные для F10.7 и Lyman- α . Для ПГО Тикси предпочтительность какого-либо одного индекса солнечной активности выражена слабее, что обусловлено ослаблением роли солнечной активности в ионизации высокоширотной ионосферы из-за доминирования других источников, связанных с геомагнитной активностью. В данном случае величина и знак тренда существенно зависят от выбора индекса солнечной активности. Так, при использовании SSN рассчитанный тренд foF2 равен 4.352 кГц/год, а при использовании F30 он равен -5.773 кГц/год. Тем не менее, по совокупности критериев наилучший результат показал индекс F30. Таким образом, при исследовании долговременных вариаций foF2 как для субавроральной станции Якутск, так и для авроральной станции ПГО Тикси, в качестве оптимального индекса солнечной активности рекомендуется использовать F30.

Данные и Методика

Данные:

- Станции Якутск (62.01°N, 129.43°E) и ПГО Тикси (71,5° с.ш., 128,5° в.д.).
- Периоды: 1956–2017 гг. для Якутска и 1969–2000 гг. для Тикси.
- Приборы: АИС (1956–2002), Digisono DPS-4 (2002–2017).
- Время: Полночь (00 LT) и Полдень (12 LT).
- Используются индексы: F10.7, F30, MgII, HeII, SSN, Lyman- α (солнечный), Ар и Кр (геомагнитные).

Методика анализа трендов:

Линейная регрессия: $\text{foF2}_{\text{теор}} = A + B \cdot \text{solar proxy}$
Полиномиальная регрессия второго порядка: $\text{foF2}_{\text{модель}} = A + B \cdot \text{solar proxy} + C \cdot (\text{solar proxy})^2$
Множественная регрессия: $\text{foF2}_{\text{теор}} = A + B \cdot \text{solar proxy} + C \cdot A_p$
Вычисление остатков: $\Delta \text{foF2} = \text{foF2}_{\text{эксп}} - \text{foF2}_{\text{теор}}$
Выделение тренда из остатков: $\Delta \text{foF2} = D + T \cdot \text{год}$
Анализ проводился для невозмущенных дней ($\Sigma Kp \leq 24$)

Таблица 1. Коэффициенты детерминации $R^2_{\text{модель}}$ для разных индексов солнечной активности и регрессионных моделей

Индексы солнечной активности	00 LT			12 LT		
	Линейная модель	Полиномиальная модель	Множественная модель	Линейная модель	Полиномиальная модель	Множественная модель
Ионосферная станция Якутск						
F10.7	0.97	0.97	0.97	0.97	0.98	0.97
F30	0.95	0.96	0.95	0.97	0.97	0.97
Mg II	0.96	0.96	0.96	0.97	0.97	0.97
He II	0.92	0.92	0.94	0.92	0.93	0.94
SSN	0.98	0.98	0.98	0.97	0.98	0.98
Lyman- α	0.96	0.96	0.96	0.97	0.97	0.97
ПГО Тикси						
F10.7	0.97	0.96	0.95	0.97	0.98	0.98
F30	0.95	0.95	0.95	0.96	0.97	0.96
Mg II	0.96	0.96	0.96	0.96	0.97	0.97
He II	0.95	0.95	0.95	0.97	0.97	0.97
SSN	0.95	0.96	0.96	0.98	0.99	0.98
Lyman- α	0.94	0.94	0.94	0.95	0.96	0.97

Таблица 3. Максимальные отклонения ΔfoF2 (МГц) для разных индексов солнечной активности и регрессионных моделей

Индексы солнечной активности	00 LT			12 LT		
	Линейная модель	Полиномиальная модель	Множественная модель	Линейная модель	Полиномиальная модель	Множественная модель
Ионосферная станция Якутск						
F10.7	0.35	0.35	0.31	0.87	0.77	0.85
F30	0.36	0.33	0.34	0.60	0.58	0.60
Mg II	0.37	0.38	0.35	0.55	0.61	0.56
He II	0.81	0.74	0.72	1.20	1.10	1.00
SSN	0.45	0.40	0.36	0.68	0.81	0.66
Lyman- α	0.48	0.46	0.41	0.85	0.90	0.74
ПГО Тикси						
F10.7	0.35	0.29	0.35	0.38	0.38	0.32
F30	0.31	0.26	0.31	0.50	0.36	0.45
Mg II	0.33	0.27	0.32	0.43	0.47	0.38
He II	0.38	0.36	0.38	0.49	0.58	0.40
SSN	0.34	0.30	0.32	0.34	0.28	0.33
Lyman- α	0.41	0.40	0.40	0.66	0.73	0.57

Таблица 2. Средняя абсолютная разница (MAD, МГц) для разных индексов солнечной активности и регрессионных моделей

Индексы солнечной активности	00 LT			12 LT		
	Линейная модель	Полиномиальная модель	Множественная модель	Линейная модель	Полиномиальная модель	Множественная модель
Ионосферная станция Якутск						
F10.7	0.13	0.11	0.12	0.21	0.19	0.21
F30	0.12	0.11	0.11	0.18	0.17	0.18
Mg II	0.12	0.12	0.12	0.19	0.19	0.19
He II	0.18	0.18	0.16	0.32	0.32	0.31
SSN	0.12	0.10	0.10	0.21	0.20	0.20
Lyman- α	0.14	0.14	0.12	0.24	0.23	0.21
ПГО Тикси						
F10.7	0.13	0.13	0.13	0.17	0.12	0.15
F30	0.13	0.13	0.13	0.16	0.14	0.13
Mg II	0.12	0.12	0.11	0.16	0.14	0.17
He II	0.13	0.13	0.13	0.16	0.14	0.16
SSN	0.12	0.12	0.11	0.13	0.12	0.12
Lyman- α	0.14	0.15	0.14	0.21	0.18	0.17

Таблица 4. Коэффициенты детерминации тренда $R^2_{\text{тренд}}$ для разных индексов солнечной активности и регрессионных моделей

Индексы солнечной активности	00 LT			12 LT		
	Линейная модель	Полиномиальная модель	Множественная модель	Линейная модель	Полиномиальная модель	Множественная модель
Ионосферная станция Якутск						
F10.7	0.08	0.15	0.16	0.03	0.07	0.05
F30	0.44	0.49	0.52	0.43	0.48	0.45
Mg II	0.34	0.37	0.42	0.28	0.32	0.30
He II	0.11	0.13	0.02	0.25	0.22	0.11
SSN	0.02	0.01	0.00	0.06	0.04	0.03
Lyman- α	0.12	0.13	0.27	0.07	0.08	0.17
ПГО Тикси						
F10.7	0.0001	0.005	0.0001	0.10	0.08	0.13
F30	0.10	0.09	0.10	0.38	0.38	0.49
Mg II	0.02	0.02	0.02	0.19	0.21	0.22
He II	0.0003	0.00	0.0003	0.11	0.10	0.13
SSN	0.07	0.08	0.07	0.00002	0.003	0.00002
Lyman- α	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.04

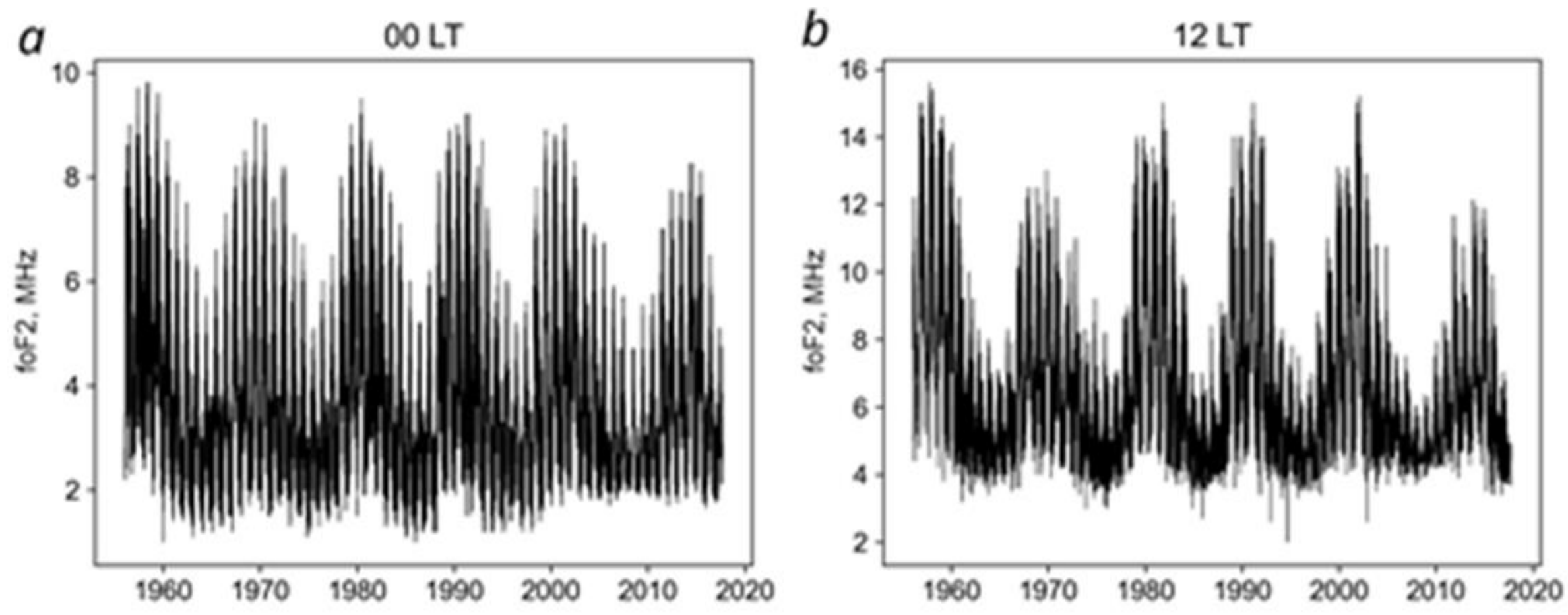


Рис. 1. Вариации (ежедневные значения) критической частоты foF2 в полуночные (а) и полуденные (б) часы местного времени по данным ионосферной станции Якутск за период с 1956 по 2017 гг.

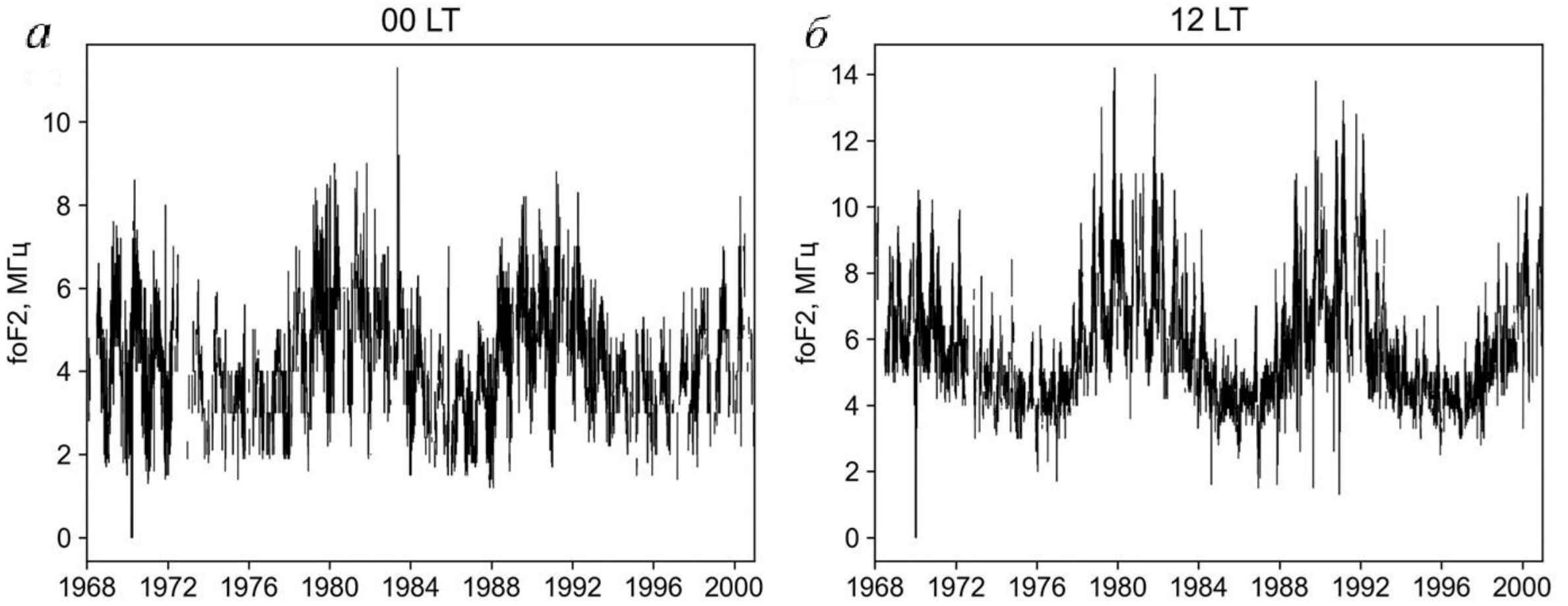


Рис. 2. Вариации (ежедневные значения) критической частоты foF2 в полуночные (а) и полуденные (б) часы местного времени по данным ПГО Тикси за период с 1969 по 2000 гг.

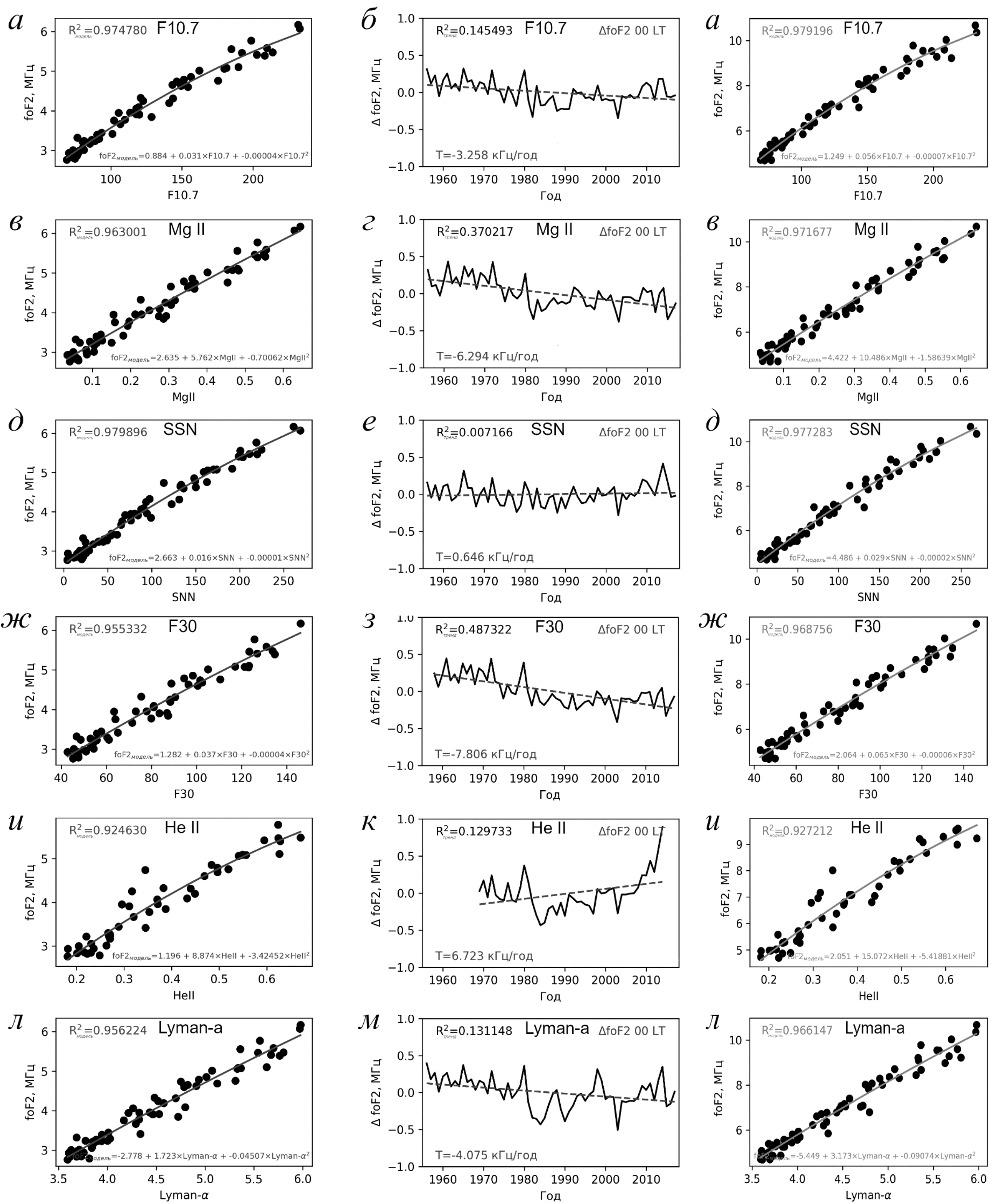


Рис. 3. Зависимости foF2 от индексов солнечной активности F10.7 (а), Mg II (б), SSN (д), F30 (ж), He II (и), Lyman- α (л): точки – экспериментальные данные, сплошная кривая – расчет по регрессионной модели, и вариации ΔfoF2 (б, г, е, з, к, м): сплошная кривая – расчет по полиномиальной регрессионной модели для 00 LT по данным станции Якутск, пунктирная линия – рассчитанный тренд (5).

Рис. 4. Корреляции foF2 с индексами солнечной активности F10.7 (а), Mg II (б), SSN (д), F30 (ж), He II (и), Lyman- α (л): точки – экспериментальные данные, расчет по регрессионной модели, и вариации ΔfoF2 (б, г, е, з, к, м): сплошная кривая – расчет по полиномиальной регрессионной модели для 12 LT по данным станции Якутск, пунктирная линия – рассчитанный тренд (5).

Рис. 5. Зависимости foF2 от индексов солнечной активности F10.7 (а), Mg II (б), SSN (д), F30 (ж), He II (и), Lyman- α (л): точки – экспериментальные данные, сплошная кривая – расчет по регрессионной модели, и вариации ΔfoF2 (б, г, е, з, к, м): сплошная кривая – расчет по полиномиальной регрессионной модели для 00 LT по данным ПГО Тикси, пунктирная линия – рассчитанный тренд (5).

Рис. 6. Корреляции foF2 с индексами солнечной активности F10.7 (а), Mg II (б), SSN (д), F30 (ж), He II (и), Lyman- α (л): точки – экспериментальные данные, расчет по регрессионной модели, и вариации ΔfoF2 (б, г, е, з, к, м): сплошная кривая – расчет по полиномиальной регрессионной модели для 12 LT по данным ПГО Тикси, пунктирная линия – рассчитанный тренд (5).

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- установлено, что для исследования долговременных трендов foF2 на субавроральных и авроральных широтах наиболее подходящими индексом солнечной активности является F30
- по данным станции Якутск между четырьмя индексами солнечной активности (F30, Mg II, F10.7, Lyman- α) наблюдается хорошее согласие, использование любого из них позволяет выявить устойчивый отрицательный тренд foF2. Применение же индексов He II и SSN приводит к преимущественно положительным трендам, что противоречит общепринятым представлениям.
- величина тренда существенно зависит от выбора индекса солнечной активности. Наибольшие по абсолютной величине отрицательные тренды получены с использованием индексов F30 и Mg II.

Библиография

- Данилов А.Д., Бербенева Н.А. Статистический анализ зависимости критической частоты FOF2 от различных индексов солнечной активности Геомагнетизм и аэронаука. 2023. Т. 63. № 5. С. 619–629. <https://doi.org/10.31857/S0016794023600588>
- Kobyakova S.E., Gololobov A.Yu., Karimov R.R., Stepanov A.E. Trends in the F2-layer critical frequency from data obtained at the ionospheric station Yakutsk during the period from 1956 to 2017 // Solar-Terrestrial Physics. 2025. Vol. 11. Iss. 4. P. 49–56. DOI: 10.12737/stp-114202505 <https://naukaru.ru/ru/nauka/article/109303/view>
- Mielich J., Bremer J. Long-term trends in the ionospheric F2 region with different solar activity indices. Annales Geophysicae. 2013. Vol. 31.No. 2. Pp. 291–303. <https://doi.org/10.5194/angeo-31-291-2013>.
- Laštovička J. The best solar activity proxy for long-term ionospheric investigations. Advances in Space Research. 2021. Vol. 68. No. 6. P. 2354–2360. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.06.032>.
- Laštovička J., Burešová D. Relationships between foF2 and various solar activity proxies Space Weather. 2023. Vol. 21. No. 4. Pp. e2022SW003359.1–13. <https://doi.org/10.1029/2022SW003359>.
- Urbár J., Laštovička J. Global long-term trends in the total electron content. Annales Geophysicae. 2025;43(1):67–72. <https://doi.org/10.5194/angeo-43-67-2025>.