



ИНСТИТУТ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНОЙ ФИЗИКИ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

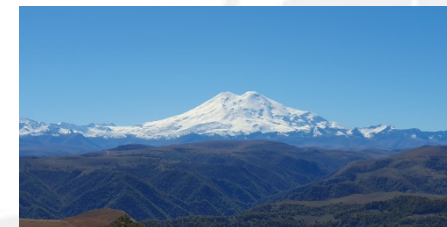
Многолетние изменения характеристик верхней атмосферы в Восточной Сибири: зависимость от солнечной, геомагнитной и атмосферной активности

Медведева И.В.^{1,2}, Ратовский К.Г.¹

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

²Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН, Москва

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





Цель:

Анализ межгодовых вариаций температуры мезопаузы T_m и максимума электронной концентрации $NmF2$ и их изменчивостей в различных временных периодах: межсуточные вариации ($T > 24$ ч), приливные вариации ($8 \text{ ч} \leq T \leq 24 \text{ ч}$), а также вариации с периодами внутренних гравитационных волн ($T < 8$ ч), рассчитаны по методике, представленной в (Перминов и др., 2014, Medvedeva and Ratovsky, 2015; Медведева и Ратовский, 2017).

Анализируемые данные

- Данные спектрометрических измерений вращательной температуры молекулы гидроксила (834.0 нм, (6-2), ~87 км), (51.8°N, 103.1°E, Торы);
- Данные вертикального зондирования о максимуме электронной концентрации $NmF2$, полученные на иркутском (52.3° N, 104.3° E) дигизонде DPS-4;
- Данные F 10.7 и Ap индексов солнечной и геомагнитной активности были получены через интерфейс GSFC/SPDF OMNIWeb на веб-сайте <https://omniweb.gsfc.nasa.gov>;
- Данные о вариациях индексов Южной (SOI), Арктической (AO) и Североатлантической (NAO) осцилляций атмосферы:
- https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/soi/soi_3dp.dat;
- <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/ao/>,
- <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/nao/>

Анализируемый период 2008-2020 гг.



Метод оценки атмосферной и ионосферной изменчивости на высотах мезопаузы и F2-области ионосферы

В качестве характеристики атмосферной изменчивости использованы стандартные отклонения температуры мезопаузы в годовом и ночном ходе, с помощью которых можно анализировать проявление активности волновых процессов различного временного масштаба (планетарных волн, приливов, внутренних гравитационных волн) в верхней атмосфере (Перминов и др., 2014, Medvedeva and Ratovsky, 2015; Медведева и Ратовский, 2017).

Для расчета изменчивости максимума электронной концентрации использовались относительные возмущения NmF2 ($\Delta NmF2$), представляющие собой относительную разницу между наблюдаемыми значениями (NmF2OBS) и значениями скользящей 27-дневной медианы (NmF2MED). Анализировались компоненты $\Delta RNmF2$: межсуточная ($T > 24$ час), с периодами приливов ($8 \leq T \leq 24$ час), и с периодами ВГВ ($T < 8$ час).

$$\Delta NmF2 = NmF2OBS - NmF2MED; \Delta RNmF2(\%) = \Delta NmF2 / NmF2MED \cdot 100\%$$

$$\sigma_{RNmF2} = \sqrt{\langle \Delta_{RNmF2}^2 \rangle} \quad - \text{анализируемый параметр, характеризующий изменчивость NmF2}$$

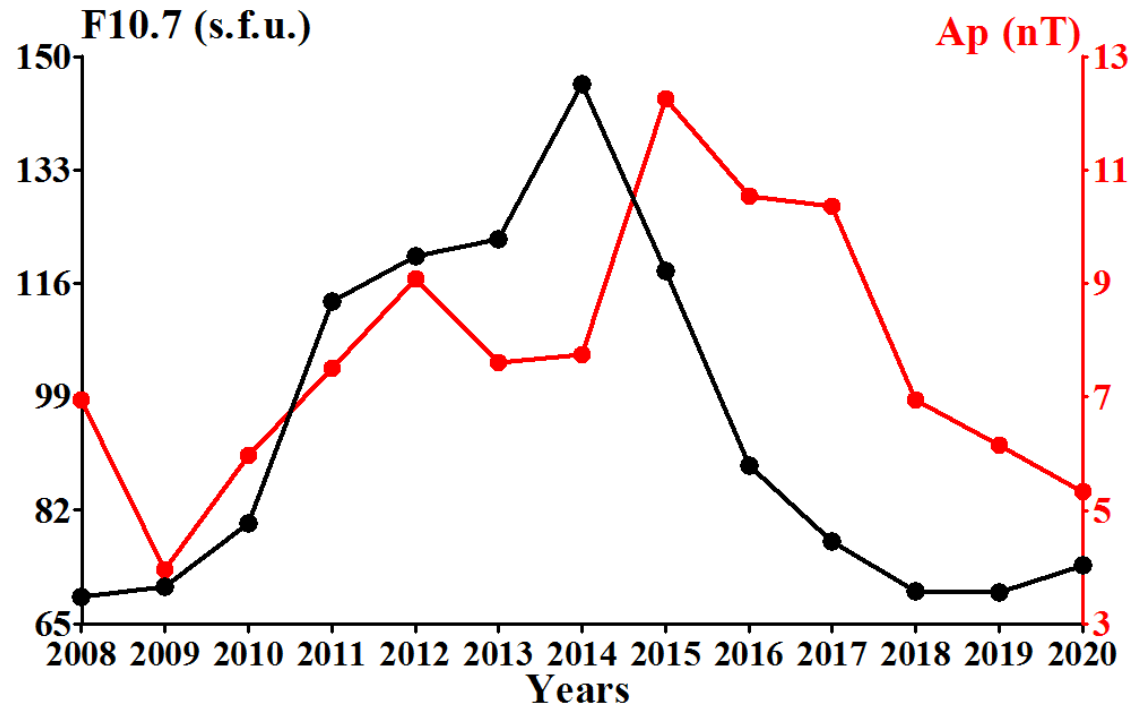


Рис.1. Межгодовые вариации индексов F10.7 (черный) и Ap (красный) в 24-м солнечном цикле. Вариации F10.7 опережают вариации Ap (приблизительно на 1 год на фазе роста и приблизительно на 2 года на фазе спада).

Для анализа ионосферных характеристик использованы множественные регрессии $\sigma N m F_2$ и $N m F_2$ на F10.7 и Ap, а также простые регрессии на F10.7 и Ap.



Межгодовые вариации ионосферной изменчивости

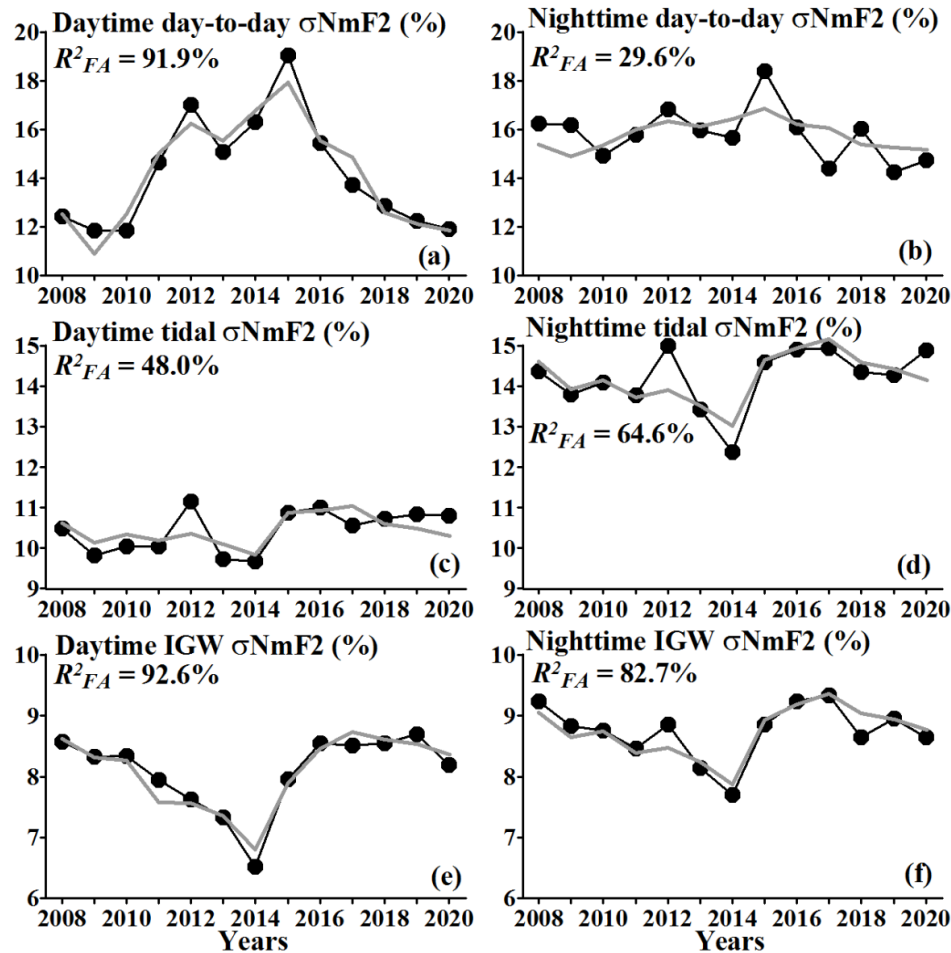


Рис. 2. Межгодовые вариации σNmF2 (черные линии, кружки) и их аппроксимация при помощи множественной регрессии на F10.7 и A_p (серый цвет) для дневного (слева) и ночного времени (справа). Сверху вниз: межсуточная изменчивость, с периодами приливов, с периодами ВГВ.

R^2 - коэффициент детерминации, показывает, какая доля (в процентах) межгодовых вариаций σNmF2 может быть объяснена вариациями солнечной и геомагнитной активности.

$$\sigma\text{NmF2} = \sigma_0 + \sigma_F \cdot (F10.7 - 69)/10 + \sigma_A \cdot (A_p - 4) \quad (1)$$

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 σNmF2 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) .



Type	R^2_{FA} (%)	R^2_F (%)	R^2_A (%)
Daytime			
Day-to-day	91.9	65.6	66.0
Tidal	48.0	8.8	19.1
IGW	92.6	83.2	1.3
Nighttime			
Day-to-day	29.6	19.1	23.1
Tidal	64.6	27.4	10.6
IGW	82.7	47.7	5.6

Таблица 1. Коэффициенты детерминации для множественной (R^2_{FA}) и простой регрессий (R^2_F , R^2_A).

Множественная регрессия существенно увеличивает коэффициент детерминации по сравнению с простой регрессией для 4 из 6 типов изменчивости (желтый цвет). Это указывает на то, что вклады солнечной и геомагнитной активности для этих типов изменчивости сопоставимы. Для дневных значений $\sigma NmF2$ с периодами ВГВ, коэффициент детерминации простой регрессии на F10.7 составляет (83%), а множественная регрессия дает прирост на 10%, что означает доминирование вклада солнечной активности. Для ночных значений межсуточной $\sigma NmF2$ ни одна из регрессий не дает коэффициента детерминации $> 30\%$, что указывает на небольшой вклад как солнечной, так и геомагнитной активности.



Межгодовые вариации NmF2

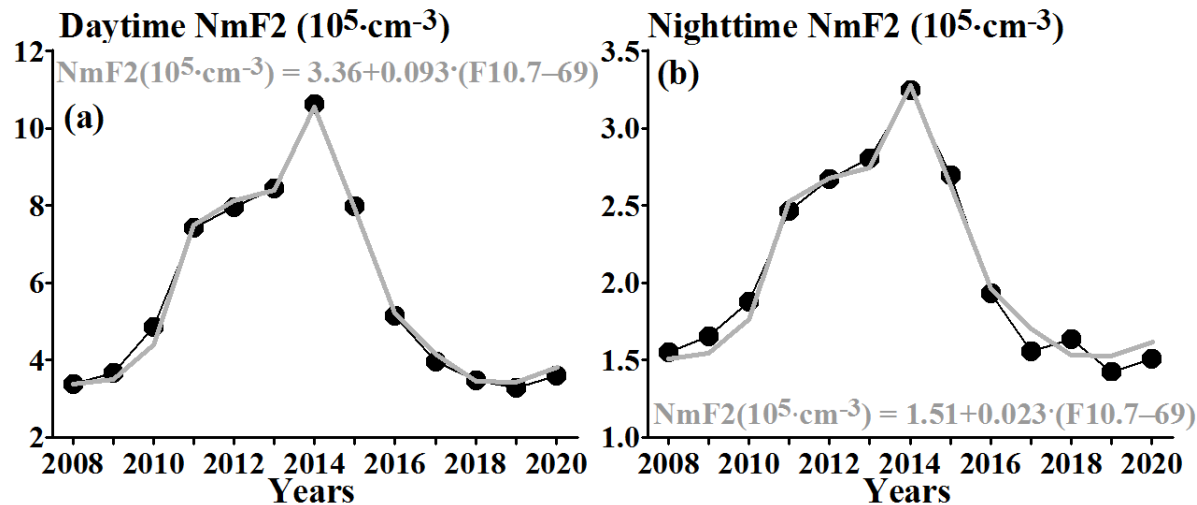
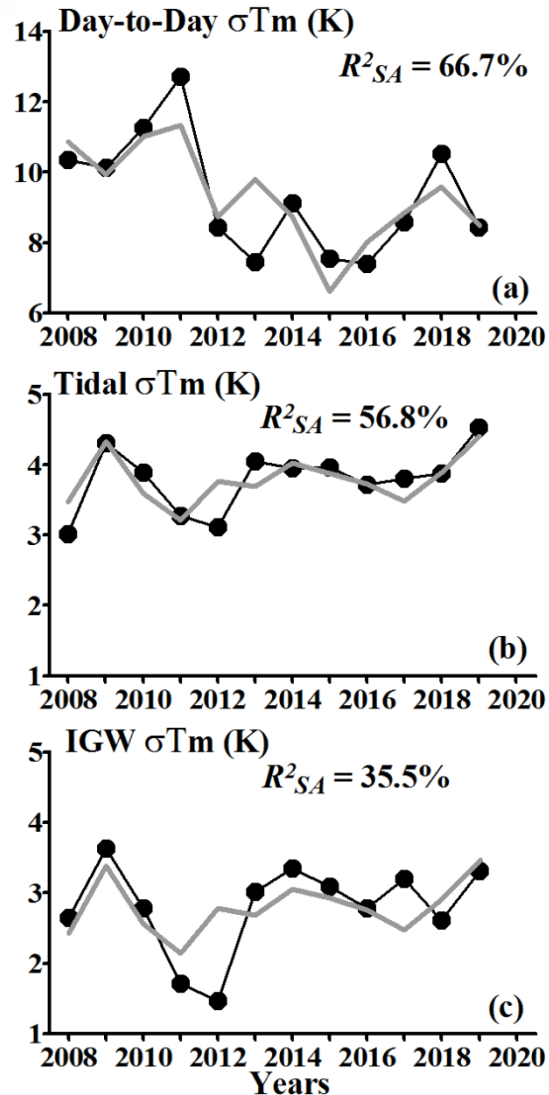


Рис. 3. Вариации от года к году среднегодовых значений NmF2 (черные кружки) с наложенными результатами линейной регрессии на среднегодовые значения F10.7 (серым) для дневных условий (слева) и ночных условий (справа).

Регрессия практически идеальна.

Асимметрия солнечной и геомагнитной активности (Рис. 1) не ухудшила регрессию. Коэффициент детерминации простой регрессии среднегодового значения NmF2 на F10.7 очень высок (99,5% для дневного времени и 98% для ночного времени). В отличие от среднегодовых значений σNmF2 , коэффициенты детерминации для простой и множественной регрессий одинаковы с точностью до 0,1%. Это означает, что вклад геомагнитной активности в межгодовые вариации среднегодового NmF2 за 2008–2020 гг. пренебрежимо мал по сравнению с вкладом солнечной активности.



$$\sigma T_m = \sigma_0 + \sigma_S \cdot \text{SOI} + \sigma_A \cdot (\text{Ar} - 4)$$

SOI – индекс Южного колебания

Межгодовые вариации изменчивости температуры мезопаузы

Рис. 4. Межгодовые вариации изменчивости температуры мезопаузы σT_m (черные линии, кружки) и их аппроксимации при помощи множественной регрессии на SOI и Ar (серые линии). Сверху вниз: межсуточная изменчивость (а), с периодами приливов (б), с периодами ВГВ (с).

Сначала был проведен множественный регрессионный анализ между T_m и σT_m и индексами солнечной и геомагнитной активности (F10.7 и Ar), как и для ионосферных характеристик (уравнение 1). В отличие от NmF2, в вариациях среднегодовых значений T_m и ее изменчивости значимой связи с F10.7 и Ar не обнаружено. Было решено привлечь к анализу дополнительные параметры, характеризующие состояние нижележащей атмосферы: индексы Южной (SOI), Арктической (AO) и Североатлантической (NAO) осцилляций атмосферы.

Наиболее высокие коэффициенты детерминации получены для множественной регрессии на SOI и Ar; результаты этой регрессии показаны на рис. 4. По сравнению с регрессией σT_m на F10.7 и Ar, 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.

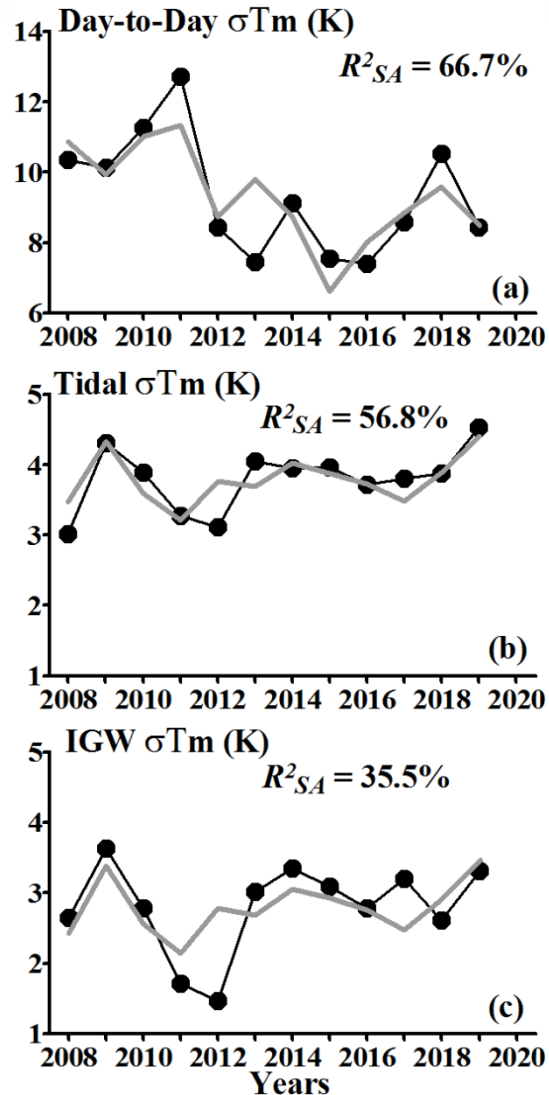


Рис. 5. Межгодовые вариации изменчивости температуры мезопаузы σT_m (черные линии, кружки) и их аппроксимации при помощи множественной регрессии на SOI и Ap (серые линии). Сверху вниз: межсуточная изменчивость (a), с периодами приливов (b), с периодами ВГВ (c).

Было обнаружено, что межсуточная температурная изменчивость, обусловленная влиянием мигрирующих планетарных волн, коррелирует с вариациями SOI, с пиком изменчивости в фазе Ла Нинья (максимум SOI в 2011 г.) и минимумом в фазе Эль Ниньо (Рис. 5, а). Внутрисуточная изменчивость, обусловленная приливами и ВГВ (рис. 5b, c) демонстрирует отрицательную корреляцию с индексом SOI, причем наименьшая изменчивость наблюдается вблизи фазы Ла-Нинья (2011–2012 гг.).

$$\sigma T_m = \sigma_0 + \sigma_S \cdot \text{SOI} + \sigma_A \cdot (\text{Ap} - 4)$$

SOI – индекс Южного колебания



Межгодовые вариации средней температуры мезопаузы

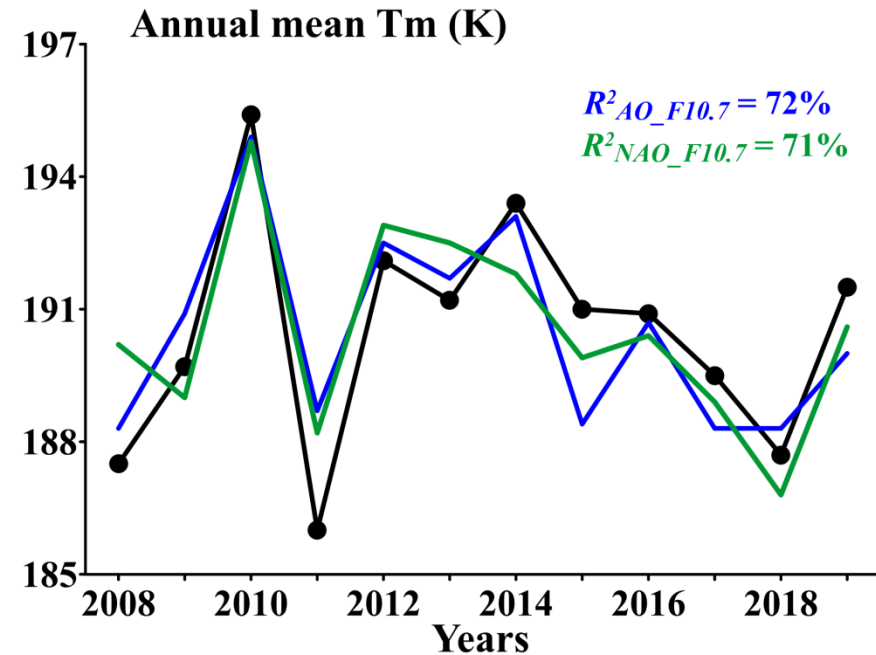
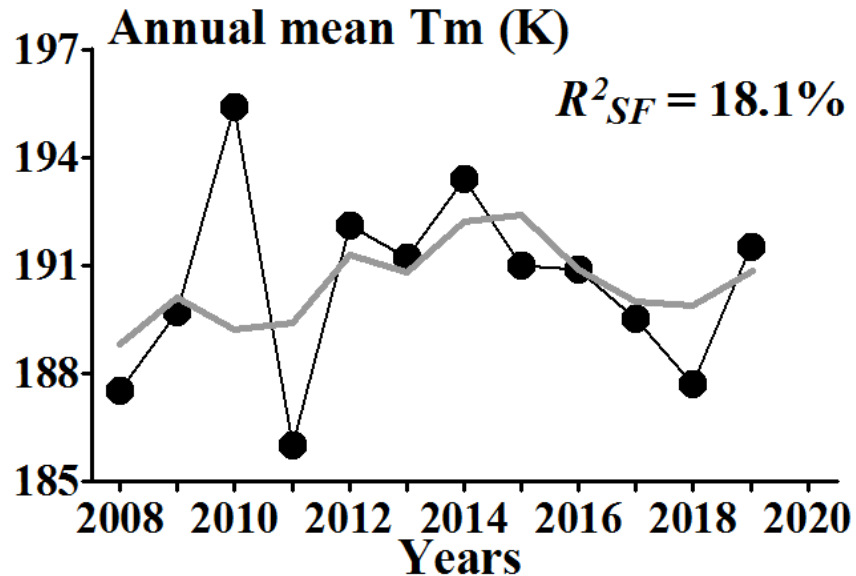


Рис. 6. Вариации усредненных за год значений температуры мезопаузы Tm (черная линия, кружки) и их аппроксимация при помощи множественной регрессии: слева - на SOI и F10.7, справа - на AO и F10.7 (синий) и на NAO и F10.7 (зеленый).

Множественный регрессионный анализ среднегодовой температуры мезопаузы и индексами солнечной и геомагнитной активности (F10,7 и Ap) не выявил их значимой корреляции (коэффициент детерминации 9,1%). Множественная регрессия среднегодовых значений Tm и индексов SOI и F10,7 дала коэффициент детерминации (18,1%) (Рис.6, левая панель), для регрессии Tm и индексов AO и F10,7 ~ 72% и для регрессии Tm и индексов NAO и F10,7 ~ 71%.



Заключение:

По данным спектрометрических и радиофизических измерений на комплексе инструментов ИСЗФ СО РАН проведен анализ межгодовых вариаций характеристик верхней нейтральной атмосферы и ионосферы в 24-м солнечном цикле.

В результате множественного регрессионного анализа обнаружено следующее.

Основной вклад в межгодовые вариации среднегодовых значений $NmF2$ за 2008–2020 гг. вносит солнечная активность, вклад геомагнитной активности пренебрежимо мал. Для 4 из 6 типов ионосферной изменчивости вклады солнечной и геомагнитной активности сопоставимы. Для дневных значений $\sigma NmF2$ с периодами ВГВ, преобладает влияние солнечной активности. Для ночных значений межсуточной $\sigma NmF2$ вклад как солнечной, так и геомагнитной активности является незначительным.

Анализ температуры мезопаузы и ее изменчивости показал, что включение индексов атмосферных осцилляций в множественный регрессионный анализ привело к значительному увеличению коэффициентов детерминации. Это может указывать на превалирующее влияние нижележащей атмосферы на характеристики верхней атмосферы средних широт в анализируемый временной интервал. Для температурной изменчивости наилучшие коэффициенты детерминации получены для аппроксимации с использованием индексов SOI и Ap. Для среднегодовых значений температуры мезопаузы, наилучшие коэффициенты детерминации дает множественная регрессия на индексы AO и F10,7 (~72%) и NAO и F10,7 (~71%).



Литература:

- **Медведева И. В., Ратовский К. Г. Сравнительный анализ атмосферной и ионосферной изменчивости по измерениям температуры области мезопаузы и максимума электронной концентрации NmF2 // Геомагнетизм и аэрномия. 2017. Т.57. №2. С.236–248. DOI: 10.7868/S0016794017020109.**
- **Medvedeva, I., and K. Ratovsky (2015), Studying atmospheric and ionospheric variabilities from long-term spectrometric and radio sounding measurements, J. Geophys. Res. Space Physics, 120, Issue 6, J. Geophys. Res. Space Physics, 120, 5151–5159, doi:10.1002/2015JA021289.**
- **Перминов В. И., Семенов А. И., Медведева И. В., Перцев Н. Н. Изменчивость температуры в области мезопаузы по наблюдениям гидроксильного излучения на средних широтах // Геомагнетизм и аэрномия. Том: 54 , №: 2. 2014. С. 246-256. DOI: 10.7868/S0016794014020151.**

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



ИНСТИТУТ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНОЙ ФИЗИКИ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Спасибо за внимание!





- **Арктическая осцилляция (АО)** — это крупномасштабный режим климатической изменчивости, также называемый кольцевым режимом Северного полушария. АО — это климатическая картина, характеризующаяся ветрами, циркулирующими против часовой стрелки вокруг Арктики на широте около 55° с. ш. Когда АО находится в своей положительной фазе, кольцо сильных ветров, циркулирующих вокруг Северного полюса, ограничивает более холодный воздух в полярных регионах. Этот пояс ветров становится слабее и более искаженным в отрицательной фазе АО, что позволяет более холодным арктическим воздушным массам легче проникать на юг.
- **Североатлантическое колебание (NAO)** — это погодное явление над Северной Атлантикой, представляющее собой колебания разницы атмосферного давления на уровне моря (SLP) между Исландским минимумом и Азорским максимумом. Колебания силы Исландского минимума и Азорского максимума определяют силу и направление западных ветров и расположение штормовых траекторий в Северной Атлантике. Это одно из важнейших проявлений климатических колебаний в Северной Атлантике и прилегающих регионах с влажным климатом. Североатлантическое колебание тесно связано с арктическим колебанием (АО).
- **Индекс южной осцилляции (SOI)** показывает отклонение разности атмосферного давления от среднего между островом Таити и городом Дарвин в Австралии. 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.



Type	σ_0 (%)	σ_F (%/10 s.f.u.)	σ_A (%/nT)	R^2_{FA} (%)	R^2_F (%)	R^2_A (%)
Daytime						
Day-to-day	10.85	0.492	0.568	91.9	65.6	66.0
Tidal	10.16	-0.116	0.155	48.0	8.8	19.1
IGW	8.36	-0.248	0.091	92.6	83.2	1.3
Nighttime						
Day-to-day	14.87	0.118	0.172	29.6	19.1	23.1
Tidal	13.97	-0.230	0.218	64.6	27.4	10.6
IGW	8.68	-0.167	0.129	82.7	47.7	5.6

Table 1. Coefficients of multiple regression of $\sigma NmF2$ on F10.7 and Ap (σ_0 , σ_F , σ_A) and coefficients of determination for multiple (R^2_{FA}) and simple regressions (R^2_F , R^2_A).