

Волновая возмущенность в области мезопаузы: многолетний тренд и зависимость от солнечной активности

**В. И. Перминов^{1*}, Н. Н. Перцев¹, В. А. Семенов¹, П. А. Далин^{2, 3},
Ю.А. Железнов⁴, В. А. Суходоев¹, М.Д. Орехов¹**

¹ *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва*

² *Swedish Institute of Space Physics, Kiruna, Sweden*

³ *Институт космических исследований РАН, Москва*

⁴ *Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург*

***E-mail: v.i.perminov@yandex.ru**

Актуальность

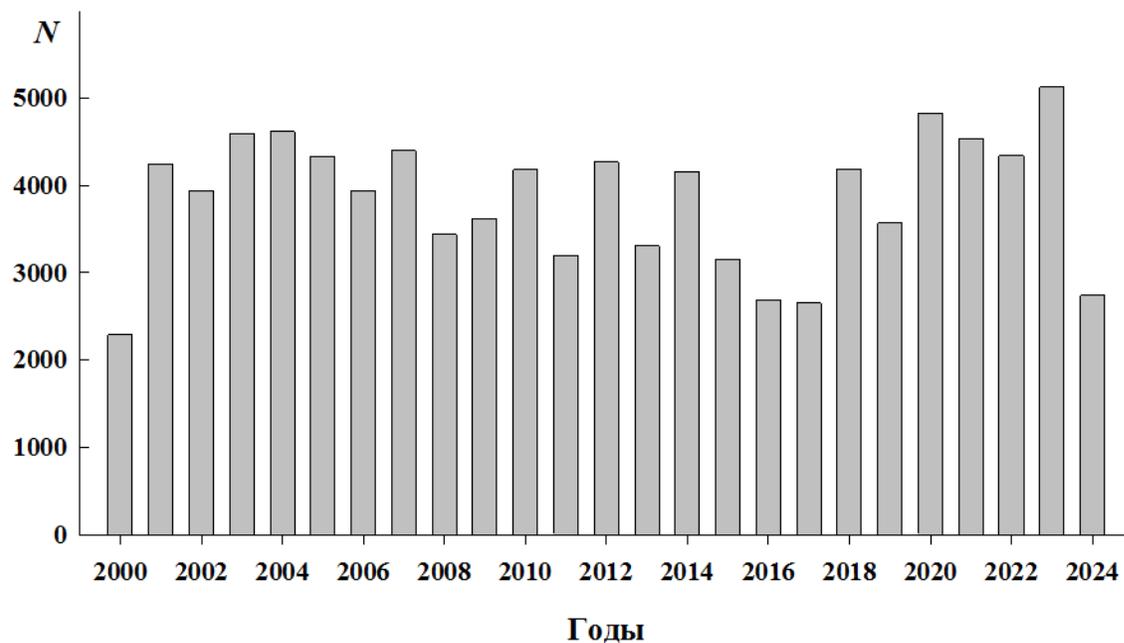
Роль атмосферных внутренних гравитационных волн в области мезопаузы (80–100 км) является ключевой при формировании ее теплового режима. Возникая преимущественно в тропосфере и распространяясь вверх, волны разрушаются в верхних слоях атмосферы и переносят импульс в их ветровую систему. Вследствие этого в области мезопаузы летом возникают восходящие потоки, а зимой – нисходящие, что способствует формированию холодной летней и более теплой зимней мезопаузы. Многолетние наблюдения температуры в ее окрестности различными методами показывают значительное ее охлаждение: -0.5 К/год в период 1957–1975 гг. и $-(0.1\div 0.2)$ К/год в последние 50 лет [Перминов и др., 2024]. Предполагается, что за охлаждение слоев средней и верхней атмосферы в основном ответственен рост углекислого газа в них. Однако в случае мезопаузы модельные вычисления предсказывают, что ее радиационное охлаждение за счет роста CO_2 не должно быть сильнее -0.1 К/год [Garcia et al., 2019; Solomon et al., 2018; Qian et al., 2017]. Одной из причин расхождения результатов экспериментальных и модельных исследований может быть недооценка в моделях долговременных изменений в атмосферной динамике, которая в области мезопаузы определяется в основном волновыми процессами. Таким образом, в настоящее время становятся актуальными исследования их многолетней активности.

Цель работы

Статистический анализ активности волновых возмущений, вызванных преимущественно распространением внутренних гравитационных волн в области мезопаузы, по наблюдениям температуры излучающего гидроксила (OH^*) на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ЗНС ИФА РАН) в 2000–2024 гг. Излучающий слой OH^* имеет максимум интенсивности на высоте ~ 87 км и полуширину ~ 9 км.

ДАННЫЕ ДЛЯ АНАЛИЗА

Исходными данными для анализа волновой активности являются температуры OH^* , определяемые как вращательные температуры по спектру колебательно-вращательной полосы $\text{OH}(6-2)$ 835 нм. Измерения спектров ведутся на ЗНС ИФА РАН ($55^\circ 42'$ с.ш., $36^\circ 45'$ в.д.) с помощью светосильного спектрографа СП-50 [Герасимова и Яковлева, 1956], оснащенного камерой электронной регистрации, при зенитном угле 53° в северо-западном направлении (азимут 23° , отсчитывается от севера на запад) в безоблачные ночи. Время регистрации одного спектра составляет 10 мин, что дает достаточно высокое соотношение сигнала к шуму, позволяющее определять температуру с точностью 1–2 К. Всего в течение 2000–2024 гг. было получено 96360 значений температуры. Их распределение по годам – ниже на рисунке, где N – количество измерений в течение конкретного года.



МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Анализ волновой активности по температурному ряду основан на применении цифровой частотной фильтрации для выделения волновых возмущений в определенных частотных областях и статистических методов, примененных в работе [Gavrilov et al., 2024]. Суть цифровой частотной фильтрации в том, что предварительно определяются температурные полуразности по формуле

$$\Delta T(t, \Delta t) = (T(t) - T(t + \Delta t)) / 2, \quad (1)$$

где $T(t)$ и $T(t + \Delta t)$ – температуры, привязанные к моментам времени t и $t + \Delta t$, а $\Delta T(t, \Delta t)$ является отклонением от их средней температуры. Применение данной формулы при волновых возмущениях температуры эквивалентно их цифровой фильтрации с функцией пропускания $H^2(\tau)$ мощности возмущений в температуре с периодами τ :

$$H^2(\tau) = \frac{\sin^2\left(\frac{\pi \Delta t}{\tau}\right) \sin^2\left(\frac{\pi \delta t}{\tau}\right)}{\left(\frac{\pi \delta t}{\tau}\right)^2}, \quad (2)$$

где δt – время регистрации одного спектра, которое составляет 10 мин. В работе использованы $\Delta t = 0.5, 1$ и 2 ч, при которых максимумы пропускания волноподобных возмущений цифровыми фильтрами приходились соответственно на периоды $\tau = 1, 2$ и 4 ч с границами пропускания на уровне $H^2(\tau)/2$: $0.7-2.0, 1.4-4.1$ и $2.7-8.2$ ч.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Формула (1) дает возможность рассматривать отклонения $\Delta T(t, \Delta t)$ от внутрисуточного хода температуры, обусловленного преимущественно вариациями с периодами вне диапазона выбранного цифрового фильтра, а их среднеквадратичные значения ($S = \frac{\sum_t (\Delta T(t, \Delta t))^2}{N}$, где N – число значений ΔT в анализируемой выборке или число взятых значений t) могут служить индикатором волновой активности для выбранного промежутка времени. Помимо абсолютных значений данных среднеквадратичных отклонений (СКО, S) температуры имеет смысл рассматривать также их относительные значения S/T , где T – средняя температура по выборке (т.е. за год или сезон). В настоящем анализе СКО температуры ОН* определялись для годовых (январь–декабрь и июль одного года–июнь последующего года) и сезонных интервалов времени (зима (октябрь–март) и лето (май–июль)).

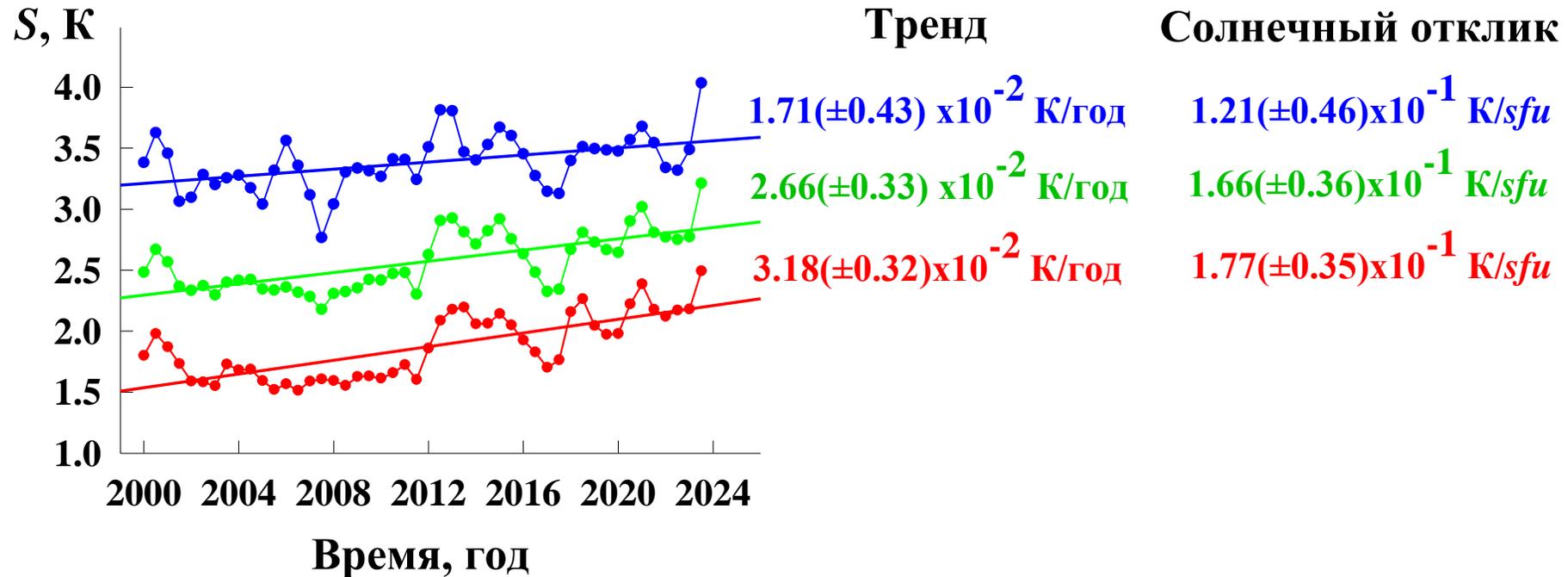
Все ряды СКО были проанализированы с помощью метода множественной регрессии моделируя их изменения двухаргументной формулой

$$f(t, Ly\alpha) = A_0 + A_{tr} \times (t - 2000) + A_{sol} \times (Ly\alpha - 4.5) \quad (3)$$

где $f(t, Ly\alpha)$ – исследуемая характеристика (S или S/T), t – время (годы), $Ly\alpha$ – поток ультрафиолетового излучения в линии Лайман-альфа (в единицах sfu , $1 sfu = 10^{11}$ фотон $cm^{-2} s^{-1}$), значения которого взяты из базы данных LASP Interactive Solar Irradiance Data Center (<https://lasp.colorado.edu/lisird>). A_{tr} и A_{sol} – коэффициенты регрессии (тренд и отклик на изменение солнечной активности).

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ВОЛНОВОЙ АКТИВНОСТИ:

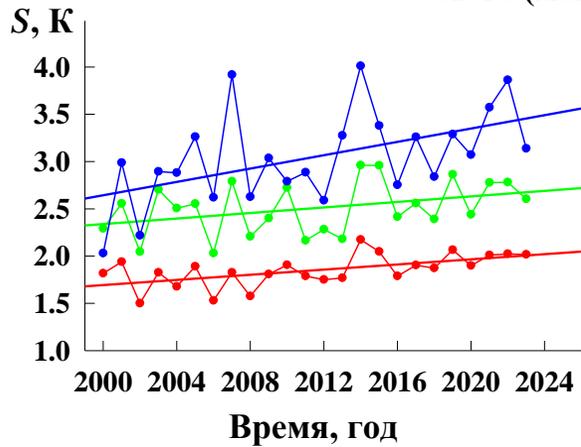
Многолетний ход среднегодовых среднеквадратичных отклонений температуры ОН* в 2000-2024 гг.



Красный цвет – абсолютные значения СКО (S) температуры ОН*, полученные при $\Delta t=0.5$ ч, зеленый цвет – при $\Delta t=1$ ч, синий цвет – при $\Delta t=2$ ч. Прямые линии – многолетние тренды. Справа – результаты регрессионного анализа. Средние значения СКО за весь период наблюдений (2000-2024 гг.): $1.89(\pm 0.04)$ К при $\Delta t=0.5$ ч, $2.56(\pm 0.04)$ К при $\Delta t=1$ ч, $3.39(\pm 0.04)$ К при $\Delta t=2$ ч. В скобках указаны стандартные отклонения среднего (1σ).

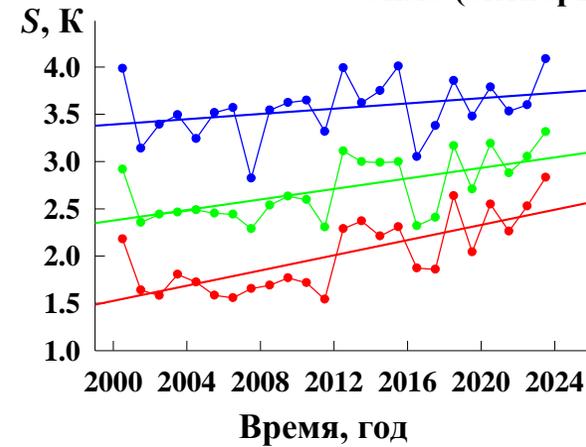
РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ВОЛНОВОЙ АКТИВНОСТИ: Многолетний ход среднесезонных среднеквадратичных отклонений температуры ОН*

Лето (май-июль)



Тренд	Солнечный отклик
$3.47(\pm 1.37) \times 10^{-2}$ К/год	$0.73(\pm 0.49) \times 10^{-1}$ К/sfu
$1.56(\pm 0.73) \times 10^{-2}$ К/год	$0.35(\pm 0.95) \times 10^{-1}$ К/sfu
$1.56(\pm 0.43) \times 10^{-2}$ К/год	$-0.22(\pm 1.57) \times 10^{-1}$ К/sfu

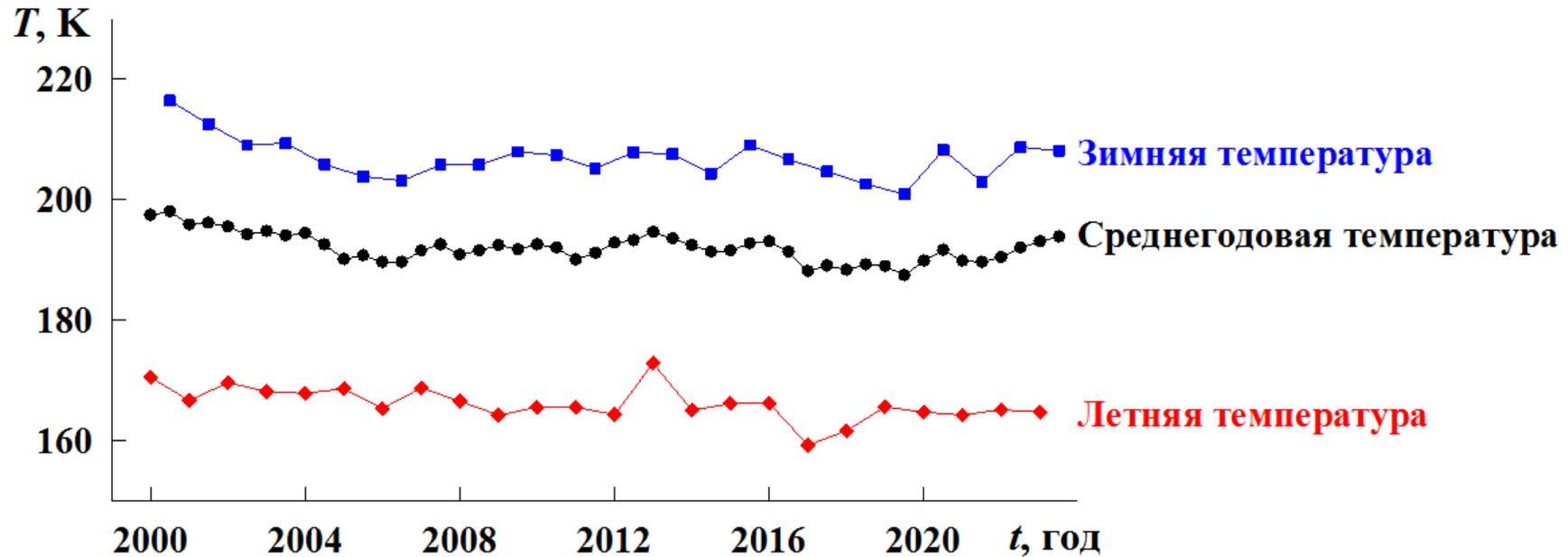
Зима (октябрь-март)



Тренд	Солнечный отклик
$1.60(\pm 0.80) \times 10^{-2}$ К/год	$1.28(\pm 0.94) \times 10^{-1}$ К/sfu
$3.06(\pm 0.74) \times 10^{-2}$ К/год	$1.74(\pm 0.85) \times 10^{-1}$ К/sfu
$4.35(\pm 0.72) \times 10^{-2}$ К/год	$2.14(\pm 0.75) \times 10^{-1}$ К/sfu

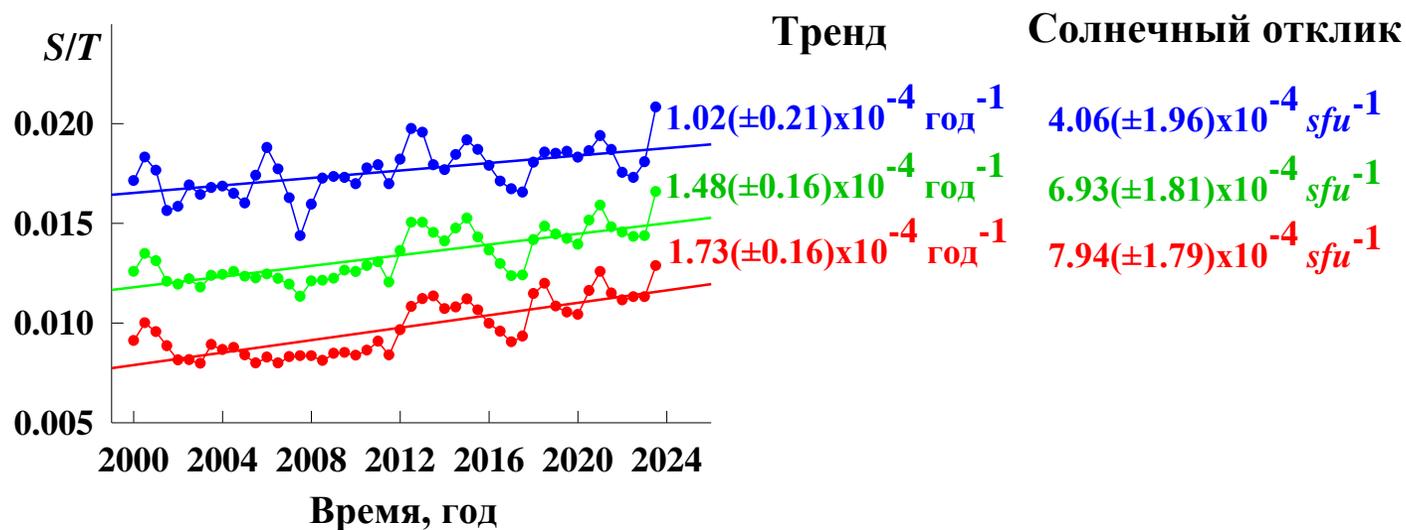
Красный цвет – абсолютные значения СКО (S) температуры ОН*, полученные при $\Delta t=0.5$ ч, зеленый цвет – при $\Delta t=1$ ч, синий цвет – при $\Delta t=2$ ч. Прямые линии – многолетние тренды. Справа от графиков – результаты регрессионного анализа. Средние значения СКО за весь период наблюдений (2000-2024 гг.) летом: $1.86(\pm 0.04)$ К при $\Delta t=0.5$ ч, $2.52(\pm 0.06)$ К при $\Delta t=1$ ч, $3.09(\pm 0.10)$ К при $\Delta t=2$ ч; зимой: $2.04(\pm 0.08)$ К при $\Delta t=0.5$ ч, $2.73(\pm 0.07)$ К при $\Delta t=1$ ч, $3.57(\pm 0.06)$ К при $\Delta t=2$ ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА: Многолетний ход температуры ОН*



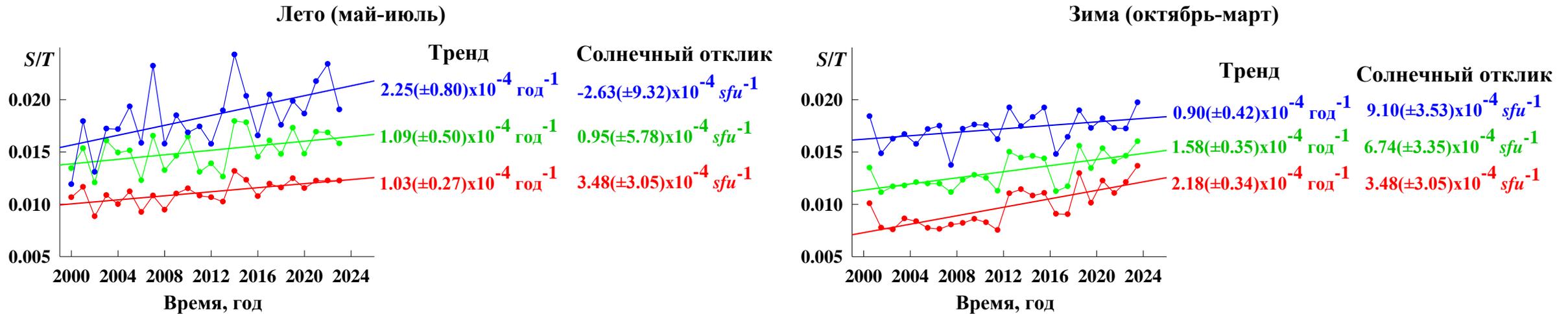
Среднегодовые и среднесезонные значения температуры ОН* определены с помощью гармонического анализа путем аппроксимации измерений функцией вида $T(t) = T_0 + \sum_{i=1}^2 A_i \cos\left(\frac{2\pi}{365.25/i}(t - f_i)\right)$ с помощью метода наименьших квадратов. T_0 – среднегодовое значение, t – время, A_i и f_i – амплитуды и фазы максимумов гармоник.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ВОЛНОВОЙ АКТИВНОСТИ: Многолетний ход среднегодовых относительных среднеквадратичных отклонений температуры ОН* в 2000-2024 гг.



Красный цвет – относительные значения СКО (S/T) температуры ОН*, полученные при $\Delta t=0.5$ ч, зеленый цвет – при $\Delta t=1$ ч, синий цвет – при $\Delta t=2$ ч. Прямые линии – многолетние тренды. Справа – результаты регрессионного анализа. Средние значения относительных СКО за весь период наблюдений (2000-2024 гг.): $0.98(\pm 0.02) \times 10^{-2}$ при $\Delta t=0.5$ ч, $1.34(\pm 0.02) \times 10^{-2}$ при $\Delta t=1$ ч, $1.77(\pm 0.02) \times 10^{-2}$ при $\Delta t=2$ ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ВОЛНОВОЙ АКТИВНОСТИ: Многолетний ход среднесезонных относительных среднеквадратичных отклонений температуры ОН*



Красный цвет – относительные значения СКО (S/T) температуры ОН*, полученные при $\Delta t=0.5$ ч, зеленый цвет – при $\Delta t=1$ ч, синий цвет – при $\Delta t=2$ ч. Прямые линии – многолетние тренды. Справа от графиков – результаты регрессионного анализа. Средние значения СКО за весь период наблюдений (2000-2024 гг.) летом: $1.12(\pm 0.02) \times 10^{-2}$ при $\Delta t=0.5$ ч, $1.52(\pm 0.04) \times 10^{-2}$ при $\Delta t=1$ ч, $1.87(\pm 0.06) \times 10^{-2}$ при $\Delta t=2$ ч.; зимой: $0.99(\pm 0.04) \times 10^{-2}$ при $\Delta t=0.5$ ч, $1.32(\pm 0.03) \times 10^{-2}$ при $\Delta t=1$ ч, $1.73(\pm 0.03) \times 10^{-2}$ при $\Delta t=2$ ч.

ВЫВОДЫ

1. Результаты проведенного анализа среднеквадратических отклонений температуры ОН*, являющихся индикатором волновой активности в области мезопаузы, показывают, что на фоне охлаждения данной области атмосферы [Перминов и др., 2024; Zhao et al., 2021; Bailey et al., 2021] идет многолетний рост активности волн внутрисуточного масштаба: в зимний период – наибольший рост активности короткопериодических (0.7–2.0 ч) волн, в летний – длиннопериодических (2.7–8.2 ч) волн. Однако пока неясно – усиливает ли обнаруженный тренд волновой активности охлаждение мезопаузы или же он работает на его сдерживание. Процессы изменения фонового температурного профиля области мезопаузы и волновой возмущенности этого профиля являются взаимозависимыми и, в то же время, зависят от режима крупномасштабной циркуляции средней атмосферы. Более детальная проработка этих процессов требует дальнейших эмпирических и модельных исследований.

2. Зависимость СКО температуры ОН* от солнечной активности статистически значима и положительна по среднегодовым и зимним данным. Для лета данная зависимость не обнаружена. Статистически значимый отклик СКО температуры ОН* от солнечной активности показал зависимость от частотной области волн: более высокие значения отклика СКО на изменения солнечной активности выделяются в диапазоне высокочастотных ВГВ. Размах изменений статистически значимых СКО от минимума к максимуму солнечной активности составляет от 5 до 20% от средних их значений в зависимости от частотной области волн.

Литература

- *Герасимова Н.Г., Яковлева А.В.* Комплект светосильных спектрографов с дифракционными решетками // Приборы и техника эксперимента. 1956. № 1. С. 83–86.
- *Перминов В.И., Перцев Н.Н., Далин П.А., Семенов В.А., Суходоев В.А., Железнов Ю.А., Орехов М.Д.* Многолетний тренд температуры в области мезопаузы по наблюдениям гидроксильного излучения в Звенигороде // Геомагнетизм и аэрномия. 2024. Т. 64. № 1. С. 101–112.
- *Gavrilov N.M., Popov A.A., Dalin P., Perminov V.I., Pertsev N.N., Medvedeva I.V., Ammosov P.P., Gavrilyeva G.A., Koltovskoi I.I.* Multiyear variations of time-correlated mesoscale OH temperature perturbations near the mesopause at Maymaga, Tory and Zvenigorod // Adv. Space Res. 2024. V. 73. No. 7. P. 3408–3422.
- *Garcia R.R., Yue J., Russell J.M.* Middle atmosphere temperature trends in the twentieth and twenty-first centuries simulated with the Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM) // J. Geophys. Res. – Space Physics. 2019. V. 124. P. 7984–7993.
- *Solomon S.C., Liu H.-L., Marsh D.R., McInerney J.M., Qian L., Vit F.M.* Whole atmosphere simulation of anthropogenic climate change // Geophys. Res. Lett. 2018. V. 45. P. 1567–1576.
- *Qian L., Burns A.G., Solomon S.C., Wang W.* Carbon dioxide trends in the mesosphere and lower thermosphere // J. Geophys. Res. – Space Phys. 2017. V. 122. P. 4474–4488.
- *Zhao X.R., Sheng Z., Shi H.Q., Weng L.B., He Y.* Middle atmosphere temperature changes derived from SABER observations during 2002–20 // J. Clim. 2021. V. 34. P. 7995–8012.
- *Bailey S.M., Thurairajah B., Hervig M.E., Siskind D.E., Russell III J.M., Gordley L.L.* Trends in the polar summer mesosphere temperature and pressure altitude from satellite observations // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2021. V. 220. 105650.