

УДК: 551.583:551.510.413.3

DOI: 10.26907/rwp29.2025.456-459

## МНОГОЛЕТНЯЯ ТЕНДЕНЦИЯ УСИЛЕНИЯ ФЛУКТУАЦИЙ С ПЕРИОДАМИ 0.3–8 ЧАСОВ В ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕЗОСФЕРЫ – НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЫ

Н. Н. Перцев<sup>1</sup>, В.И. Перминов<sup>1</sup>, П.А. Далин<sup>2</sup>, М.Д. Орехов<sup>1</sup>, В.А. Семенов<sup>1</sup>, В.А. Суходоев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3  
E-mail: n.pertsev@bk.ru, v.i.perminov@yandex.ru

<sup>2</sup>Институт космической физики, Кируна, Швеция, Box 812, SE-981 28 Kiruna, Sweden  
E-mail: pdalin@irf.se

**Аннотация.** Рассматриваются флуктуации диапазона 0.04–1 мГц при измерениях характеристик инфракрасного излучения гидроксильного слоя области мезопаузы, проведенных на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН с 2000 по 2024 гг. Обнаружено значительное усиление (положительный временной тренд) интенсивности флуктуаций двух измеряемых величин за 2000–2024 годы. Интенсивности флуктуаций обладают значимым положительным трендом, вычисленным как по их среднегодовым значениям, так и по отдельности за зимний и летний сезоны в каждом из четырех поддиапазонов указанного интервала частот. Обнаруженное усиление флуктуаций, по-видимому, связанное с возрастанием гравитационно-волновой активности в области мезопаузы, имеет большое значение для изучения изменчивости климата и требует дальнейшего исследования, как в области мезопаузы, так и в других слоях атмосферы.

**Ключевые слова:** дистанционные измерения; область мезопаузы; гидроксильный слой; интенсивность флуктуаций; многолетние тренды

## LONG-TERM ENHANCEMENT TENDENCY FOR FLUCTUATIONS WITH PERIODS 0.3 – 8 HOURS IN REMOTE MEASUREMENTS OF MESOSPHERE – LOWER THERMOSPHERE CHARACTERISTICS

N.N. Pertsev, V.I. Perminov, P.A. Dalin, M.D. Orekhov, V.A. Semenov, V.A. Sukhodoev

**Abstract.** Fluctuations in the 0.04–1 mHz range are considered in characteristics of infrared radiation of the mesopause region hydroxyl layer, measured at the Zvenigorod Scientific Station of the A.M.Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS from 2000 to 2024. A significant increase (positive time trend) in the intensity of fluctuations of two measured values over the years 2000–2024 was found. Fluctuations have a significant positive trend both for yearly mean and separately for winter and summer seasons in each of four sub-bands of the specified frequency range. The detected increase in fluctuations is apparently associated with an increase in atmospheric gravity wave activity in the mesopause region. It is of great importance for studying climate variability and requires further research, both in the mesopause and other atmospheric layers.

**Keywords:** remote measurements; mesopause region; hydroxyl layer; fluctuations intensity; long-term trends

### Введение

В последние годы появилось много публикаций о климатических изменениях в характеристиках различных слоев атмосферы. В то же время вопрос о том, сопровождаются ли эти изменения изменениями ансамбля флуктуаций измеряемых величин на разных пространственно-временных масштабах, остается практически неисследованным, как по линии анализа данных измерений, так и по линии моделирования.

В настоящей публикации приводятся убедительные результаты анализа локальных дистанционных измерений характеристик излучающих слоев области мезопаузы за 2000–2024 гг., свидетельствующих о заметном росте интенсивности флуктуаций в диапазоне частот 0.04–1 мГц (периоды 0.3–8 ч) за эти годы.

### Цель работы

Изучение трендов величины флуктуаций температуры и отношения интенсивностей полос инфракрасного излучения области мезопаузы в указанном частотном диапазоне.

### Используемые данные

Анализируются данные спектрофотометрических измерений излучающего ОН\*-слоя области мезопаузы (высота ~87 км, полуширина ~9 км) с 2000 по 2024 гг., проводимых на Звенигородской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН (56° с.ш., 37° в.д.); область спектра 720–920 нм [1]. Анализируются временные ряды двух величин, не подверженных влиянию тропосферного поглощения:  $T$  – температуры ОН\*-слоя, вычисляемая по соотношению интенсивностей линий полосы ОН(6-2);  $\zeta = I(\text{ОН}(7-3))/I(\text{ОН}(9-4))$  – отношения интенсивностей ( $I$ ) двух полос гидроксила.

Измерения проводились в ночное время; временные ряды составлены из фрагментов длиной от 3 до 14 часов с интервалом накопления сигнала и шагом по времени 10 мин. Доступный диапазон периодов флуктуаций: 0.3–8 ч. На рис. 1 показано распределение количества 10-минутных измерений по годам.

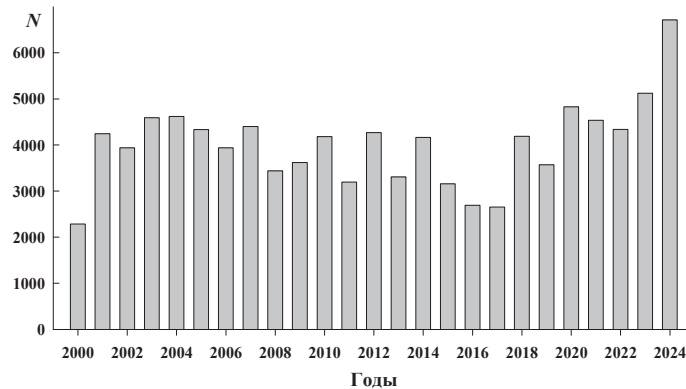


Рис. 1. Количественное распределение 10-минутных измерений.  $N$  – число измерений за год

### Методика обработки данных

Для анализа рассчитываются несколько оценок интенсивности внутрисуточных флуктуаций:  $\text{rsd}_{1h}(T)$ ,  $\text{rsd}_{1h}(\zeta)$  – относительные стандартные отклонения за 1 час (т.е. отношение стандартного отклонения за 1 час к среднему за 1 час);  $\text{rsd}(\Delta t, T)$  – относительные стандартные отклонения температуры  $T$  в нескольких диапазонах периодов на выходе цифровой фильтрации [2, 3] с разностными шагами  $\Delta t = 30, 60, 90$  и 120 мин:

$$\text{rsd}(\Delta t, T) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{(T(t_i) - T(t_i + \Delta t))/2}{(T(t_i) + T(t_i + \Delta t))/2} \right)^2}{n}}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество значений в выборке данных. В (1) цифровая фильтрация позволяет выделить флуктуации, возникающие вследствие волновых возмущений преимущественно с периодами в диапазонах 0.7–2.0 (при  $\Delta t = 30$  мин), 1.4–4.1 ( $\Delta t = 60$  мин), 2–6 ( $\Delta t = 90$  мин) и 2.7–8.2 ч ( $\Delta t = 120$  мин), центрированными на 1, 2, 3 и 4 ч.

### Результаты анализа данных

Анализ флуктуаций был выполнен на основе как среднегодовых, так и среднесезонных – летних (май–июль) и зимних (октябрь–март) значений  $\text{rsd}(\Delta t, T)$ . На рис. 2 показаны их многолетние изменения. Оценка линейного тренда  $\text{rsd}(\Delta t, T)$  проводилась путем аппроксимации их значений формулой (2) методом мультирегрессионного анализа:

$$f(t, Ly_\alpha) = A_0 + A_{tr} \times (t - 2012) + A_{sol} \times (Ly_\alpha - 4.5), \quad (2)$$

где  $f(t, Ly\alpha)$  – анализируемое  $rsd$ ;  $A_{tr}$  – линейный тренд,  $A_{sol}$  – отклик на солнечную активность, в качестве индикатора которой использовался поток солнечного Лайман-альфа излучения в единицах  $sfu$  ( $1 sfu = 10^{11}$  фотон  $см^{-2} с^{-1}$ );  $A_0$  – значение  $rsd$  для 2012 г. при  $Ly\alpha = 4.5 sfu$ , в реальности оно соответствует среднему  $rsd$  для 2000–2024 гг. Результаты регрессий приведены в табл. 1.

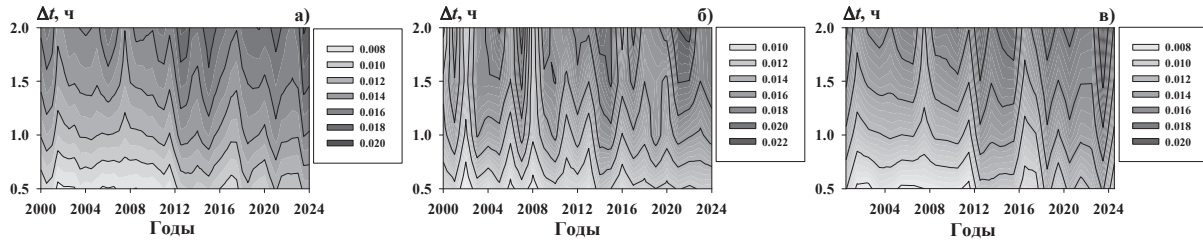


Рис. 2. Многолетние изменения  $rsd(\Delta t, T)$ , полученные на основе круглогодичных (а), летних (б) и зимних (в) данных. Шкалы уровней  $rsd(\Delta t, T)$  показаны справа от карт распределений

Таблица 1. Результаты мультирегрессионного анализа многолетних рядов  $rsd(\Delta t, T)$ .

Жирным шрифтом выделены статистически значимые значения с вероятностью более 95%. В скобках указаны значения временных трендов и солнечного отклика в процентах от средних значений  $rsd$ , т.е. от  $A_0$

$\Delta t$ , мин	Волновой диапазон, ч	$A_0, 10^{-2}$	$A_{tr}, 10^{-4} \text{ год}^{-1}$	$A_{sol}, 10^{-4} sfu^{-1}$
Круглый год				
30	0.7–2.0	<b>0.972±0.011</b>	<b>1.76±0.14 (1.81±0.14 %)</b>	<b>6.66±1.57 (6.85±1.62 %)</b>
60	1.4–4.1	<b>1.323±0.011</b>	<b>1.57±0.15 (1.19±0.11 %)</b>	<b>6.18±1.59 (4.67±1.20 %)</b>
90	2.0–6.0	<b>1.554±0.012</b>	<b>1.33±0.16 (0.86±0.10 %)</b>	<b>5.87±1.76 (3.78±1.13 %)</b>
120	2.7–8.2	<b>1.714±0.014</b>	<b>1.19±0.19 (0.69±0.11 %)</b>	<b>4.17±2.02 (2.43±1.18 %)</b>
Лето				
30	0.7–2.0	<b>1.111±0.018</b>	<b>0.84±0.24 (0.76±0.22 %)</b>	1.39±2.71
60	1.4–4.1	<b>1.506±0.034</b>	<b>0.97±0.44 (0.64±0.29 %)</b>	0.22±5.00
90	2.0–6.0	<b>1.737±0.042</b>	<b>1.06±0.51 (0.61±0.29 %)</b>	2.67±6.22
120	2.7–8.2	<b>1.807±0.059</b>	<b>1.73±0.78 (0.96±0.43 %)</b>	–5.52±8.72
Зима				
30	0.7–2.0	<b>0.981±0.027</b>	<b>1.98±0.36 (2.02±0.37 %)</b>	5.82±3.76
60	1.4–4.1	<b>1.327±0.028</b>	<b>1.54±0.38 (1.16±0.29 %)</b>	5.03±3.89
90	2.0–6.0	<b>1.567±0.029</b>	<b>1.21±0.39 (0.77±0.25 %)</b>	4.87±4.03
120	2.7–8.2	<b>1.743±0.033</b>	<b>1.06±0.44 (0.61±0.25 %)</b>	3.94±4.59

Из табл. 1 видно, что статистически значимый линейный тренд в  $rsd(\Delta t, T)$  наблюдается как для среднегодовых данных, так и в зимний и летний периоды года, причем среднегодовые и зимние  $rsd(\Delta t, T)$  показывают отчетливую зависимость от волнового диапазона – значение тренда убывает со смещением  $\Delta t$  в более длиннопериодную область. По среднегодовым данным наблюдался статистически значимый солнечный отклик в  $rsd(\Delta t, T)$  с уменьшением его величины с ростом периода флуктуаций.

Выявленная тенденция многолетнего роста флуктуаций обнаруживается также по часовым стандартным отклонениям величин  $T$  и  $\zeta$ . Так, на рис. 3 видны многолетние положительные тренды  $rsd_{1h}(T)$ ,  $rsd_{1h}(\zeta)$  по зимним данным.

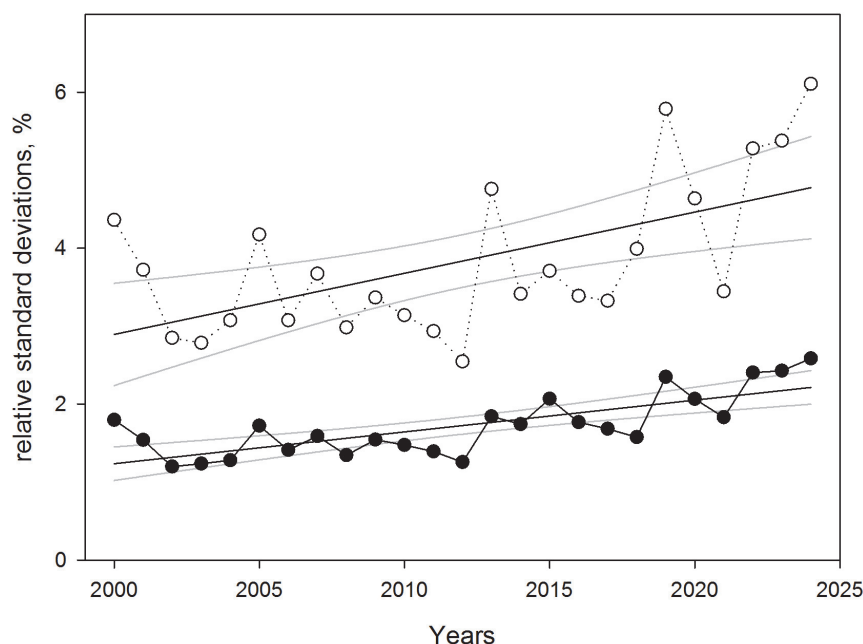


Рис. 3. Средние за зимний сезон значения  $rsd_{1h}(T)$  – черные кружки,  $rsd_{1h}(\zeta)$  – белые кружки, показаны также их линейные тренды с 95% доверительными интервалами

### Выводы

1. На временном интервале 2000–2024 гг. локальные дистанционные измерения по крайней мере двух характеристик области мезопаузы (гидроксильной температуры и отношения интенсивности полос ОН\* излучения) демонстрируют заметный рост их относительных стандартных отклонений в диапазоне периодов 0.3–8 ч.
2. Это усиление флуктуаций статистически значимо как для среднегодовых данных, так и отдельно для зимнего и летнего сезонов.
3. Указанные выводы справедливы и в применении к более узким диапазонам периодов: 0.7–2.0, 1.4–4.1, 2–6 и 2.7–8.2 ч.
4. Для выяснения тенденций энергообмена между атмосферными слоями большое значение имеют поиски аналогичных трендов в других слоях атмосферы.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки по теме 17.1.

### Список литературы

1. Семенов Ф.И., Баканас В.В., Перминов В.И., Железнов Ю.А., Хомич В.Ю. Спектр излучения ночной верхней атмосферы Земли в ближней инфракрасной области // Геомаг. аэрон. – 2002. – Т. 42. – № 3. – С. 407–414.
2. Popov A.A., Gavrilo N.M., Perminov V.I., Pertsev N.N., Medvedeva I.V. Long-term changes in the mesoscale variations of hydroxyl rotational temperature near the mesopause at Tory and Zvenigorod // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2020. – Vol. 205. – Art. 105311.
3. Gavrilo 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. – Vol. 73. – No. 7. – P. 3408–3422.