

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.583:551.510.413.3

## МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ АКТИВНОСТИ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ОБЛАСТИ МЕЗОПАУЗЫ

© 2024 г. В. И. Перминов<sup>1,\*</sup>, Н. Н. Перцев<sup>1</sup>, академик РАН В. А. Семенов<sup>1</sup>,  
П. А. Далин<sup>2,3</sup>, В. А. Суходоев<sup>1</sup>

Поступило 15.07.2024 г.

После доработки 16.07.2024 г.

Принято к публикации 16.07.2024 г.

По вариациям температуры, полученных на основе спектральных наблюдений гидроксильного излучения на Звенигородской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН в течение 2000–2024 гг., а также на основе статистических методов анализа, были получены многолетние тренды и зависимости от солнечной активности для волновых возмущений на высотах мезопаузы (80–100 км). С помощью цифровой частотной фильтрации их активность определялась в трёх областях волновых периодов 0.7–2.0, 1.4–4.1 и 2.7–8.2 ч с максимумами 1, 2 и 4 ч. В качестве индикатора волновой активности служили среднеквадратические значения температурных полуразностей. Анализировались как их круглогодичные, так и среднесезонные (зима, лето) значения. В результате установлено, что волновая активность имеет положительные тренды с их зависимостью от частотной области возмущений (зимой тренд больше в высокочастотной области, летом – в низкочастотной). Зависимость от солнечной активности – положительна. Её значения больше для высокочастотной области возмущений, а также в зимний период.

**Ключевые слова:** мезопауза, волны, температура, тренд, солнечная активность, климатология

**DOI:** 10.31857/S2686739724110186

### ВВЕДЕНИЕ

В середине 1990-х годов экспериментально было обнаружено, что на фоне глобального потепления на поверхности Земли средние и верхние слои атмосферы испытывают существенное охлаждение [1, 2], которое продолжается по настоящее время и на высотах стратосферы и мезосферы составляет  $-(0.03 \div 0.1)$  К/год в широтной области от  $50^\circ$  ю.ш. до  $50^\circ$  с.ш. [3] и  $-(0.1 \div 0.2)$  К/год в полярных областях [4]. Предполагается, что рост концентрации углекислого газа во многом ответственен за данные климатические изменения в атмосфере. Процесс охлаждения верхних слоёв атмосферы вызывает их оседание. Так, по данным спутниковых измерений оно составляет 150–200 м за 10 лет в области полярной мезосферы [4]. Охлаждение и оседание верхних слоёв атмосферы имеет практическое значение

для деятельности человека: эти процессы в области ближнего космоса приводят к уменьшению аэродинамического сопротивления для космических аппаратов и мусора. В последнем случае возникает проблема их долговечности.

Область мезопаузы, разделяющая мезосферу и термосферу, является одной из важнейших частей верхней атмосферы при исследованиях химических и термодинамических процессов, происходящих во всей толще земной атмосферы. Она представляет собой слой атмосферы 80–100 км с наиболее низкими температурами и высокой чувствительностью как к влиянию сверху – солнечному излучению, так и снизу – вследствие динамических процессов, ответственных за атмосферный перенос. Область мезопаузы привлекает к себе внимание возможностью наземного мониторинга её состояния пассивными методами без существенных экономических затрат. Собственное излучение мезопаузы служит хорошим индикатором изменений в её газовом составе и термодинамическом режиме. Всё это позволило к настоящему времени получить наиболее длинные ряды её характеристик по наблюдениям на ряде как отечественных, так

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской Академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Swedish Institute of Space Physics, Kiruna, Sweden

<sup>3</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

\*E-mail: v.permenov@rambler.ru

и зарубежных станций мониторинга атмосферного излучения [5–7].

Наиболее информативным и удобным способом наземного мониторинга состояния области мезопаузы являются спектральные наблюдения полос излучения колебательно-воздужённых молекул гидроксила ( $\text{OH}^*$ ). Их излучающий слой имеет максимум интенсивности на высоте  $\sim 87$  км и полуширину  $\sim 9$  км [8]. Полосы излучения  $\text{OH}^*$  позволяют определять температуру, содержание атомарного кислорода, озона и водорода в окрестности мезопаузы, а также судить об их вариациях различного временного масштаба.

По результатам многолетних спектральных наблюдений гидроксильного излучения в Звенигороде ( $56^\circ$  с.ш.,  $37^\circ$  в.д.) на научной станции ИФА им. А. М. Обухова РАН (далее ЗНС ИФА РАН) было показано, что область мезопаузы на протяжении последних 65 лет охлаждается со средней скоростью  $-0.23 \pm 0.04$  К/год [5]. При этом в первые 20 лет (1957–1976 гг.) охлаждение происходило с более значительной скоростью ( $-0.53 \pm 0.17$  К/год), чем в последние два десятилетия ( $-0.16 \pm 0.10$  К/год). Полученные количественные значения тренда температуры в области мезопаузы для разных временных интервалов оказались больше по абсолютной величине результатов исследований на основе климатических моделей (от нуля до  $-0.1$  К/год [9–11]). Одной из причин расхождения результатов экспериментальных и модельных исследований могла бы быть недооценка в моделях долговременных изменений в атмосферной динамике. В связи с этим в [5] было указано на необходимость исследований многолетних изменений активности волн.

Роль волн в области мезопаузы является одной из ключевых, поскольку динамика на её высотах во многом определяется взаимодействием ветра и волн – от крупномасштабных планетарных до мелкомасштабных внутренних гравитационных волн. Последние генерируются орографией, конвекцией, сдвигом ветра, а также взаимодействием волн. Большинство из них возникают в тропосфере и распространяются вверх. Достигая мезопаузы они разрушаются и создают импульс, вследствие воздействия которого на ветровую циркуляцию летом возникают восходящие потоки, а зимой – нисходящие. Такая циркуляция воздуха способствует формированию холодной летней и более тёплой зимней мезопаузы [12]. Таким образом, тепловой режим области мезопаузы является чувствительным к внутренним гравитационным волнам. Чтобы адекватно учесть их влияние на многолетнюю эволюцию

теплового состояния мезопаузы, особенно в свете климатических изменений в атмосфере вследствие роста парниковых газов, становятся необходимыми исследования соответствующих изменений их активности.

В настоящей работе представлены результаты анализа активности волновых возмущений, вызванных преимущественно распространением внутренних гравитационных волн в области мезопаузы, по наблюдениям температуры излучающего гидроксила на ЗНС ИФА РАН в 2000–2024 гг.

## ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Описание спектральной аппаратуры, методики наблюдений, обработки спектров и определения температуры  $\text{OH}^*$  дано в работах [13, 14]. В данном случае температура  $\text{OH}^*$  определялась по спектру колебательно-вращательной полосы  $\text{OH}(6-2)$  835 нм. Измерения велись с помощью светосильного спектрографа СП-50, оснащённого камерой электронной регистрации, в безоблачные ночи на ЗНС ИФА РАН. Время регистрации одного спектра составляло 10 мин, что давало достаточно высокое соотношение сигнала к шуму, позволяющее определять температуру с точностью 1–2 К. В течение 2000–2024 гг. был получен температурный ряд из 96360 значений, т.е. в среднем в течение одного года температура измерялась около 3850 раз.

Анализ волновой активности по температурному ряду был основан на применении цифровой частотной фильтрации для выделения волновых возмущений в определённых частотных областях и статистических методов, примененных в [15]. Суть цифровой частотной фильтрации в том, что предварительно определяются температурные полуразности по формуле  $\Delta T(t, \Delta t) = (T(t) - T(t + \Delta t)) / 2$ , где  $T(t)$  и  $T(t + \Delta t)$  – температуры, привязанные к моментам времени  $t$  и  $t + \Delta t$ . Это эквивалентно цифровой фильтрации с функцией пропускания  $H^2(\tau)$  мощности возмущений в температуре, вызванных волнами с периодами  $\tau$ :

$$H^2(\tau) = \frac{\sin^2(\pi\Delta t / \tau)\sin^2(\pi\delta t / \tau)}{(\pi\Delta t / \tau)^2}, \quad (1)$$

где  $\delta t$  – время регистрации одного спектра, которое составляло 10 мин. Как и в [15], в настоящей 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 (см. рис. 1 в [15]).

Изменения в температурном ряде происходят не только вследствие термодинамических процессов в атмосфере, но и также вследствие флюктуаций темнового тока регистрирующей камеры спектрального прибора. Методика оценки их вклада в наблюдаемые изменения температуры ОН\* детально представлена в [16]. В настоящей работе он учитывался и вычитался как в [15].

Волновая активность анализировалась на основе абсолютных ( $S_{\Delta T(\Delta t)}$ ) и относительных ( $S_{\Delta T(\Delta t)}/T$ ) среднеквадратических температурных полуразностей (СКТП), определённых для годовых (январь–декабрь и июль одного года–июнь последующего года) и сезонных интервалов времени (зима (октябрь–март) и лето (май–июль)). В работе [15] показано, что значительный вклад (до 90%) в СКТП вносят внутренние гравитационные волны, источники которых имеют преимущественно тропосферное происхождение. В случае относительного СКТП температура определялась как средняя за интервал времени, для которого рассчитывалось  $S_{\Delta T(\Delta t)}/T$ . Относительные СКТП имеют более практическое значение. Их квадрат прямо пропорционален потенциальной энергии волн [17], тогда как абсолютные значения СКТП являются индикатором абсолютных возмущений температуры, вызванных совокупностью волн.

**Таблица 1.** Абсолютные и относительные СКТП для годового интервала и двух сезонов, полученные усреднением данных за 2000–2024 гг. В скобках указаны стандартные отклонения среднего

Временной интервал	$\Delta t$ , ч	$S_{\Delta T(\Delta t)}$ , К	$S_{\Delta T(\Delta t)}/T, 10^{-2}$
Год	0.5	1.89 ( $\pm 0.04$ )	0.98 ( $\pm 0.02$ )
	1	2.56 ( $\pm 0.04$ )	1.34 ( $\pm 0.02$ )
	2	3.39 ( $\pm 0.42$ )	1.77 ( $\pm 0.02$ )
Зима (октябрь–март)	0.5	2.04 ( $\pm 0.08$ )	0.99 ( $\pm 0.04$ )
	1	2.73 ( $\pm 0.07$ )	1.32 ( $\pm 0.03$ )
	2	3.57 ( $\pm 0.06$ )	1.73 ( $\pm 0.03$ )
Лето (май–июль)	0.5	1.86 ( $\pm 0.04$ )	1.12 $\pm$ (0.02)
	1	2.52 ( $\pm 0.06$ )	1.52 $\pm$ (0.04)
	2	3.09 ( $\pm 0.10$ )	1.87 $\pm$ (0.06)

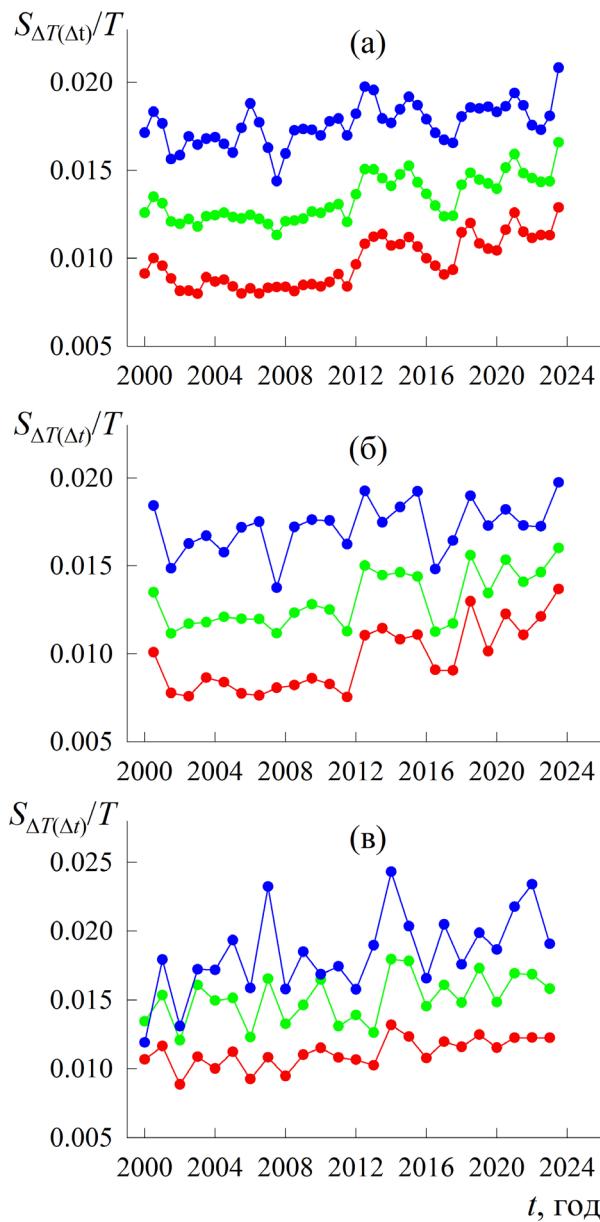
## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены многолетние изменения полученных относительных СКТП, обусловленных активностью волн в трёх частотных диапазонах. Их средние значения, как и средние абсолютные СКТП, за период наблюдений (2000–2024 гг.) – в табл. 1. Здесь интересно отметить, что абсолютные значения зимних СКТП выше летних, а в случае относительных значений наблюдается обратная картина. Как видно на рис. 1, ряды СКТП на фоне положительных трендов показывают значительные межгодовые вариации. Как правило, основной составляющей таких вариаций является воздействие 11-летнего цикла солнечной активности. Учитывая высказанное, все ряды СКТП были проанализированы с помощью метода множественной регрессии моделируя их изменения двухаргументной формулой

$$f(t, I_{Ly-\alpha}) = a \times t + b \times I_{Ly-\alpha} + c, \quad (2)$$

где  $f(t, I_{Ly-\alpha})$  – исследуемая характеристика ( $S_{\Delta T(\Delta t)}$  или  $S_{\Delta T(\Delta t)}/T$ ),  $t$  – время (годы),  $I_{Ly-\alpha}$  – поток солнечного излучения в линии Лайман-альфа ( $Ly-\alpha$ ) (в единицах sfu, 1 sfu =  $10^{-11}$  фотон  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ ). Коэффициент  $a$  показывает значение тренда  $\delta f(t, I_{Ly-\alpha})/\delta t$ ,  $b$  – отклик  $\delta f(t, I_{Ly-\alpha})/\delta I_{Ly-\alpha}$  на изменения потока излучения  $Ly-\alpha$  и  $c$  – константа. Данные по излучению  $Ly-\alpha$  взяты из базы данных LASP Interactive Solar Irradiance Data Center (<https://lasp.colorado.edu/lisird>).

Результаты регрессионного анализа представлены в таблицах 2 и 3. Видно, что, во-первых, все тренды исследуемых СКТП статистически



**Рис. 1.** Многолетний ход средних годовых (а), зимних (б) и летних (в) среднеквадратических полуразностей температуры ОН\* относительно температуры СКТП, определённые при  $\Delta t = 0.5$  ч обозначены красным цветом,  $\Delta t = 1$  ч – зелёным цветом и  $\Delta t = 2$  ч – синим цветом.

значимы и имеют положительные значения; во-вторых, для среднегодовых и зимних СКТП присутствует их частотная зависимость: чем выше частотная область волновых возмущений (т.е. чем меньше  $\Delta t$  в цифровом фильтре), тем больше тренд; в-третьих, для лета, отмечается обратная зависимость: тренд СКТП, вызванных низкочастотными волнами (цифровая

фильтрация с применением  $\Delta t = 2$  ч), значительно выше значений трендов СКТП, вызванных волнами двух частотных диапазонов.

Анализ трендовой составляющей многолетнего хода СКТП свидетельствует о значительном их росте с 2000 по 2024 гг.: среднегодовых  $S_{\Delta T(\Delta t)}$  ( $S_{\Delta T(\Delta t)} / T$ ) – на 50% (53%) при  $\Delta t = 0.5$  ч, на 28% (30%) при  $\Delta t = 1$  ч, на 13% (15%) при  $\Delta t = 2$  ч; зимних  $S_{\Delta T(\Delta t)}$  ( $S_{\Delta T(\Delta t)} / T$ ) – на 68% (71%) при  $\Delta t = 0.5$  ч, на 31% (33%) при  $\Delta t = 1$  ч, на 11% (13%) при  $\Delta t = 2$  ч; летних  $S_{\Delta T(\Delta t)}$  ( $S_{\Delta T(\Delta t)} / T$ ) – на 22% (26%) при  $\Delta t = 0.5$  ч, на 16% (19%) при  $\Delta t = 1$  ч и на 32% (35%) при  $\Delta t = 2$  ч. Учитывая, что потенциальная энергия волн пропорциональна квадрату СКТП, то можно сказать, что приток волновой энергии из нижней в верхнюю атмосферу за рассматриваемый период времени увеличился на отдельных частотных интервалах в 2–3 раза.

Зависимость от солнечной активности положительна для всех статистически значимых среднегодовых и двух зимних СКТП. Как и в случае с трендами, имеется зависимость от частотной области волн: более высокие значения отклика СКТП на изменения солнечной активности выделяются в диапазоне высокочастотных волн. Размах изменений статистически значимых СКТП от минимума к максимуму солнечной активности (т.е. от  $\sim 3.5$  sfu до  $\sim 5.5$  sfu) составляет от 5 до 20% от средних значений  $S_{\Delta T(\Delta t)}$  и  $S_{\Delta T(\Delta t)} / T$ .

К настоящему времени представленный анализ многолетнего хода активности волн на внутрисуточном масштабе по измерениям полуразностей температуры ОН\* верхней атмосферы является единственным в мире. Ранее только по ветровым данным для 1984–2007 гг. удалось проанализировать межгодовые изменения активности волн в области среднеширотной мезопаузы [18]. В качестве её индикатора была взята внутрисуточная дисперсия. Она показала положительный многолетний тренд в зимний период и отрицательный в летний. Её зависимость от солнечной активности – положительная во все времена года.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведённого анализа средних квадратических полуразностей температуры ОН\*, являющихся индикатором волновой активности в области мезопаузы, показывают, что на фоне охлаждения данной области атмосферы [3–5] идёт рост активности волн внутрисуточного масштаба: в зимний период – наибольший

**Таблица 2.** Результаты регрессионного анализа абсолютных значений СКТП согласно модели (2). Жирным шрифтом отмечены статистически значимые величины

СКТП	$\Delta t$ , ч	Коэффициенты регрессии	
		$\delta S_{\Delta T(\Delta t)}/\delta t, 10^{-2}$ К/год	$\delta S_{\Delta T(\Delta t)}/\delta I_{Ly-\alpha}, 10^{-2}$ K/sfu
Среднегодовое $S_{\Delta T(\Delta t)}$	0.5	<b>3.18</b> ( $\pm 0.30$ )	<b>17.66</b> ( $\pm 3.52$ )
	1	<b>2.66</b> ( $\pm 0.32$ )	<b>16.58</b> ( $\pm 3.58$ )
	2	<b>1.71</b> ( $\pm 0.42$ )	<b>12.14</b> ( $\pm 4.63$ )
Зимнее $S_{\Delta T(\Delta t)}$	0.5	<b>4.35</b> ( $\pm 0.72$ )	<b>21.40</b> ( $\pm 7.54$ )
	1	<b>3.06</b> ( $\pm 0.74$ )	<b>17.42</b> ( $\pm 7.76$ )
	2	<b>1.60</b> ( $\pm 0.80$ )	12.83 ( $\pm 9.35$ )
Летнее $S_{\Delta T(\Delta t)}$	0.5	<b>1.56</b> ( $\pm 0.43$ )	7.33 $\pm$ (4.90)
	1	<b>1.56</b> ( $\pm 0.73$ )	3.54 $\pm$ (9.54)
	2	<b>3.47</b> ( $\pm 1.37$ )	-2.20 $\pm$ (15.74)

**Таблица 3.** Результаты регрессионного анализа относительных СКТП согласно модели (2). Жирным шрифтом отмечены статистически значимые величины

СКТП	$\Delta t$ , ч	Коэффициенты регрессии	
		$\delta(S_{\Delta T(\Delta t)}/T)/\delta t, 10^{-4}$ год $^{-1}$	$\delta(S_{\Delta T(\Delta t)}/T)/\delta I_{Ly-\alpha}, 10^{-4}$ sfu $^{-1}$
Среднегодовое $S_{\Delta T(\Delta t)}/T$	0.5	<b>1.73</b> ( $\pm 0.16$ )	<b>7.94</b> ( $\pm 1.79$ )
	1	<b>1.49</b> ( $\pm 0.16$ )	<b>6.93</b> ( $\pm 1.81$ )
	2	<b>1.02</b> ( $\pm 0.21$ )	<b>4.06</b> ( $\pm 1.96$ )
Зимнее $S_{\Delta T(\Delta t)}/T$	0.5	<b>2.17</b> ( $\pm 0.34$ )	<b>9.10</b> ( $\pm 3.53$ )
	1	<b>1.57</b> ( $\pm 0.35$ )	<b>6.74</b> ( $\pm 3.35$ )
	2	<b>0.89</b> ( $\pm 0.42$ )	3.96 ( $\pm 4.37$ )
Летнее $S_{\Delta T(\Delta t)}/T$	0.5	<b>1.07</b> ( $\pm 0.27$ )	3.48 ( $\pm 3.05$ )
	1	<b>1.11</b> ( $\pm 0.50$ )	0.95 ( $\pm 5.78$ )
	2	<b>2.29</b> ( $\pm 0.81$ )	-2.63 ( $\pm 9.32$ )

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 возмущённости этого профиля являются взаимозависимыми и, в то же время, зависят от режима крупномасштабной циркуляции средней атмосферы. С одной стороны, изменение высотных градиентов температуры

способствует созданию благоприятных условий прохождения атмосферных гравитационных волн в эту область, в том числе и возможных условий для волноводного распространения. С другой стороны, диссилирующие вблизи мезопаузы гравитационные волны, трансформируясь в турбулентность, модифицируют фоновый температурный профиль как за счёт изменения энергии турбулентной диссипации, так и за счёт изменения направленного вниз турбулентного потока тепла [19–21]. Более детальная

проработка этих процессов требует дальнейших эмпирических и модельных исследований.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Данная работа выполнена в рамках Госзадания по теме 17.1.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов А.И., Шефов Н.Н., Фишикова Л.М., Лысенко Е.В., Перов С.П., Гивишивили Г.В., Лещенко Л.Н., Сергеенко Н.П. Об изменении климата верхней и средней атмосферы // Доклады АН СССР. 1996. Т. 349. № 1. С. 108–110.
2. Golitsyn G.S., Semenov A.I., Shefov N.N., Fishkova L.M., Lysenko E.V., Perov S.P. Long-term temperature trends in atmosphere // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23. № 14. P. 1741–1744.
3. 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.
4. 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.
5. Перминов В.И., Перцев Н.Н., Далин П.А., Семенов В.А., Суходоеев В.А., Железнов Ю.А., Орехов М.Д. Многолетний тренд температуры в области мезопаузы по наблюдениям гидроксильного излучения в Звенигороде // Геомагнетизм и аэрономия. 2024. Т. 64. № 1. С. 101–112.
6. French W.J.R., Mulligan F.J., Klekociuk A.R. Analysis of 24 years of mesopause region OH rotational temperature observations at Davis, Antarctica – Part 1: long-term trends // Atmos. Chem. Phys. 2020. V. 20. P. 6379–6394.
7. Kalicinsky C., Kirchhoff S., Knieling P., Zlotos L.O. Long-term variations in the mesopause region derived from OH\*(3,1) rotational temperature observations at Wuppertal, Germany, from 1988–2022 // Adv. Space Res. 2024. V. 73. № 7. P. 3398–3407.
8. Baker D.J., Stair A.T. Rocket measurements of the altitude distributions of the hydroxyl airglow // Physica Scripta. 1988. № 37. P. 611–622.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Andrews D.G., Holton J.R., Leovy C.B. Middle Atmosphere Dynamics. San Diego: Academic Press, 1987. 489 p.
13. Перминов В.И., Семенов А.И., Шефов Н.Н. О вращательной температуре гидроксильной эмиссии // Геомагнетизм и аэрономия. 2007. Т. 47. № 6. С. 798–805.
14. Pertsev N., Perminov V. Response of the mesopause airglow to solar activity inferred from measurements at Zvenigorod, Russia // Ann. Geophysicae. 2008. V. 26. № 5. P. 1049–1056.
15. 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.
16. 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 аэрономия. 2014. Т. 54. № 2. С. 246–256.
17. Gossard E.E., Hook W.H. Waves in the atmosphere. New York: Elsevier Scientific Pub. Co. 1975. 456 p.
18. Jacobi Ch. Long-term trends and decadal variability of upper mesosphere/lower thermosphere gravity waves at midlatitudes // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2014. V. 118. P. 90–95.
19. Yigit E., Medvedev A.S. Heating and cooling of the thermosphere by internal gravity waves // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. L14807. <https://doi.org/10.1029/2009GL038507>
20. Hickey M.P., Walterscheid R.L., Schubert G. Gravity wave heating and cooling of the thermosphere: sensible heat flux and viscous flux of kinetic energy // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. A12326. <https://doi.org/10.1029/2011JA016792>
21. Gavrilov N.M., Kshevetskii S.P., Koval A.V. Thermal effects of nonlinear acoustic-gravity waves propagating at thermospheric temperatures matching high and low solar activity // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2020. V. 208. 105381. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105381>

## LONG-TERM CHANGES IN THE ACTIVITY OF WAVE DISTURBANCES IN THE MESOPAUSE REGION

V. I. Perminov<sup>a, #</sup>, N. N. Pertsev<sup>a</sup>, academician of the RAS V. A. Semenov<sup>a</sup>,  
P. A. Dalin<sup>a,b</sup>, V. A. Sukhodoev<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Swedish Institute of Space Physics, Kiruna, Sweden*

<sup>c</sup>*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

#*E-mail: v.perminov@rambler.ru*

According to temperature variations obtained on the basis of spectral observations of hydroxyl airglow at the Zvenigorod scientific station of A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS during 2000–2024, as well as on the basis of statistical analysis methods, long-term trends and dependences on solar activity were obtained for wave disturbances at mesopause altitudes (80–100 km). Using digital frequency filtering, their activities were determined in three regions of wave periods 0.7–2.0, 1.4–4.1 and 2.7–8.2 hours with maxima at 1, 2 and 4 hours. The root-mean-square values of temperature half-differences served as an indicator of wave activity. Both year-round and average seasonal (winter, summer) values were analyzed. As a result, it was established that wave activity has positive trends with their dependence on the frequency band of disturbances (in winter the trend is greater in the high-frequency band, in summer the trend is greater in the low-frequency band). The dependence on solar activity is positive. Its values are greater for the high-frequency band of disturbances, as well as in winter.

*Keywords:* mesopause, waves, temperature, trend, solar activity, climatology