

Изменчивость температуры в области мезопаузы по среднеширотным измерениям гидроксильного излучения

В.И. Перминов¹, И.В. Медведева², А.И. Семенов¹

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

119017 Москва, Пыжевский пер., 3

E-mail: v.perminov@rambler.ru

² *Институт солнечно-земной физики СО РАН*

664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291

E-mail: ivmed@iszf.irk.ru

Представлена сезонная изменчивость температуры в области мезопаузы (80–100 км), полученная по спектральным наблюдениям гидроксильного излучения (полоса ОН (6–2) 834,0 нм) на Звенигородской станции ИФА РАН (56N, 37E) и Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (52N, 103E) в течение 2008–2011 гг. В качестве характеристик изменчивости температуры взяты статистически значимые первые три гармоники ее сезонных вариаций и стандартные отклонения, которые в зависимости от взятого временного интервала для анализа температурных вариаций могут быть индикатором активности различных атмосферных волн, распространяющихся в верхней атмосфере. Результаты анализа показывают в основном некоторое превышение значений температуры и параметров ее изменчивости, полученных на Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН, над звенигородскими данными.

Ключевые слова: мезопауза, температура, гидроксильное излучение, наземные оптические наблюдения.

Введение

В настоящее время мезопауза как область атмосферы 80–100 км с наиболее низкими температурами в атмосфере в течение всего года вызывает все больший интерес к ее исследованию. Это связано с тем, что данная область атмосферы является местом активных преобразований энергии поглощенного ультрафиолетового излучения Солнца и сопоставимой с ней энергии, транспортируемой из нижних слоев атмосферы широким спектром волн, включающих внутренние гравитационные, приливные и планетарные волны. В результате этих процессов температура мезопаузы – одна из наиболее изменчивых характеристик атмосферы. Спектр ее вариаций включает периоды от нескольких десятков минут до многих лет. Вариации с временными масштабами до месяца в основном вызываются волнами различной природы. Многолетние вариации (квазидвухлетние, 11-летние и, по-видимому, с большими периодами) связаны с подобными осцилляциями солнечной активности (Шефов и др., 2006). Однако все они уступают по амплитуде сезонным вариациям температуры мезопаузы, которые происходят вследствие сезонных изменений в динамике и энергетике средней атмосферы (20–100 км).

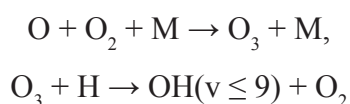
Основным способом исследования термического режима области мезопаузы являются косвенные методы ее зондирования, к которым относятся как спутниковые (Bovensmann et al., 1999; Remsberg et al., 2008), так и наземные измерения (Шефов и др., 2006; Chen et al., 2000; Bittner et al., 2002; Lopez-Gonzalez et al., 2004; Gerding et al., 2008). Среди наземных методов наиболее удобными и точными являются спектральные наблюдения

гидроксильного излучения мезопаузы. В данное время этот метод является одним из основных в международной сети станций мониторинга состояния мезопаузы – NDMC (Network for the Detection of Mesopause Change).

В настоящей работе исследуются сезонные вариации температуры мезопаузы и ее межсуточной и ночной изменчивости на основе спектральных наблюдений гидроксильного излучения на Звенигородской станции ИФА РАН (55,7 °N, 36,8 °E) и Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (52 °N, 103 °E), расположенной в 150 км от Иркутска в п. Торы, в течение 2008–2011 гг.

Измерения температуры мезопаузы

Атмосферные эмиссии гидроксила (ОН) возникают в результате химических процессов нечетного кислорода (Bates and Nicolet, 1950):



и образуют излучающий слой с максимумом его интенсивности на высоте ~87 км и толщиной ~9 км (Baker and Stair, 1988). Спектр эмиссий гидроксила представляет собой совокупность инфракрасных колебательно-вращательных полос, на основе наиболее ярких линий которых определяется вращательная температура молекул ОН. Данная вращательная температура отражает температуру окружающей атмосферы (Шефов и др., 2006).

На Звенигородской станции ИФА РАН и Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН для наблюдений атмосферного излучения в ближней ИК-области (0,8–1,0 мкм) используются светосильные дифракционные спектрографы (Герасимова и Яковлева, 1956), оснащенные высокочувствительными цифровыми ПЗС-камерами. Детальное описание спектральных приборов дано в (Шефов и др., 2006). Их оптические характеристики позволяют получать спектры с разрешением 0,2–0,5 нм. Образец спектра и методика его обработки представлены в (Перминов, 2009). Охлаждение ПЗС-матрицы регистрирующих камер приборов до –50 °C и время накопления сигнала до 10 минут обеспечивало достаточно высокое отношение сигнала к шуму (более 80). Это, в свою очередь, позволяло определять интенсивности линий полос ОН с погрешностью 1–2%, а температуры – с точностью около 2 К.

Вращательная температура гидроксила вычислялась по распределению интенсивности по первым трем линиям Р1-ветви колебательно-вращательной полосы ОН(6–2) 834,0 нм. Методика ее определения дана в (Перминов, 2009). Она основана на том, что при термодинамическом равновесии возбужденных молекул ОН(v' , J') с окружающими молекулами воздуха их распределение по вращательным состояниям описывается функцией Больцмана. Отсюда интенсивности колебательно-вращательных линий $I(v', J' \rightarrow v'', J'')$ определяются как

$$I(v', J' \rightarrow v'', J'') = N(v') A(v', J' - v'', J'') \frac{2(2J'+1)}{Q_{v'}(T_{rot}(v'))} \times \exp(-hcF(J'')/(kT_{rot}(v'))),$$

где $N(v')$ – населенность колебательного уровня v' , $A(v', J' - v'', J'')$ – вероятность колебательно-вращательного перехода ($v', J' \rightarrow v'', J''$) (с^{-1}), h – постоянная Планка, c – скорость света, k – константа Больцмана, $F(J')$ – энергия вращательного уровня J' (см^{-1}) и $Q_{v', T_{rot}}(v')$ – вращательная сумма по состояниям. Вращательная температура находится решением регрессионного линейного уравнения

$$\ln (I(v', J' \rightarrow v'', J'') / (A(v', J' - v'', J'') 2(2J'+1))) = -hc / (kT_{rot}(v')) + \text{const}$$

(*const* – константа) методом наименьших квадратов. В данной работе при определении вращательных температур использованы вероятности переходов согласно (Langhoff et al., 1987).

Результаты наблюдений и их анализ

В настоящей работе использованы наблюдения гидроксильной температуры с января 2008 по январь 2011 г., проведенные в течение 338 ночей на Звенигородской станции ИФА РАН и 341 ночи на Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН в п. Торы. На *рис. 1* представлены их средненочные значения (точки), а также средние сезонные вариации (сплошные линии), которые получены на основе гармонического анализа всей совокупности данных для места наблюдения. Статистически значимые характеристики сезонных гармоник даны в *табл. 1*. Как видно, некоторое расхождение в характеристиках гармоник для разных регионов наблюдения имеется, и, скорее всего, оно обусловлено их широтно-долготным различием. Так, для п. Торы среднее значение температуры и амплитуда первой гармоники сезонных вариаций выше на ~ 2 К, амплитуда второй гармоники ниже на 1,5 К и амплитуда третьей гармоники опять выше на 4 К.

Таблица 1. Характеристики сезонных вариаций гидроксильной температуры по наблюдениям на Звенигородской станции и Геофизической обсерватории (п. Торы) в течение 2008–2011 гг.

Место наблюдения	Средняя температура, К	Годовая гармоника		Полугодовая гармоника		4-месячная гармоника	
		Амплитуда, К	Фаза максимума, день года	Амплитуда, К	Фаза первого максимума, день года	Амплитуда, К	Фаза первого максимума, день года
Звенигород	191,3±0,4	23,8±0,6	354,7±1,3	8,3±0,6	73,2±2,0	1,7±0,6	115,7±6,2
Торы	193,5±0,6	25,6±0,9	354,5±2,0	6,7±0,9	72,5±3,7	5,7±0,9	121,8±2,8

Фазы всех гармоник 1,5 К и амплитуда третьей гармоники опять выше на 4 К. Фазы всех гармоник совпадают в пределах ошибок их определения. Известно, что сезонные вариации в области мезопаузы обусловлены изменениями в ее тепловом балансе, формируемым процессами разогрева/охлаждения за счет поглощения ультрафиолетового солнечного излучения молекулами O_2 и O_3 , экзотермических реакций нечетного кислорода, радиационного излучения CO_2 , диссипации внутренних гравитационных волн и их влияния

на динамику вертикального движения. Последние два процесса согласно (Брасье и Соломон, 1987; Vlasov and Kelly, 2010, 2012) являются наиболее сильными. В результате их сезонного действия наблюдаются холодное лето (около 160 К) и относительно теплая зима (около 215 К). Региональные различия в спектре внутренних гравитационных волн и сезонных изменениях интенсивности их распространения в атмосфере, по-видимому, являются одной из основных причин в наблюдаемом расхождении характеристик сезонных вариаций температуры мезопаузы по измерениям в Звенигороде и п. Торы.

Рис. 1 показывает значительные межсуточные вариации средненочных значений температуры гидроксила, которые в основном обусловлены влиянием планетарных волн на температурное состояние мезопаузы. В работах (Bittner et al., 2000; Offerman et al., 2009) для анализа проявления активности планетарных волн в атмосфере были взяты среднемесячные отклонения температуры (σ_{pw}) от ее годового хода. Используя данный подход к температурам, показанным на рис. 1, были получены сезонные изменения среднемесячных температурных отклонений для Звенигорда и п. Торы. На рис. 2а их значения представлены в процентах от соответствующей температуры на ее годовом ходе. Можно отметить, что межсуточная изменчивость гидроксильной температуры по наблюдениям в п. Торы в 1,5 раза выше ее значений, полученных в Звенигороде. Также видно, что в п. Торы наблюдаются более значительные сезонные вариации σ_{pw} , чем в Звенигороде.

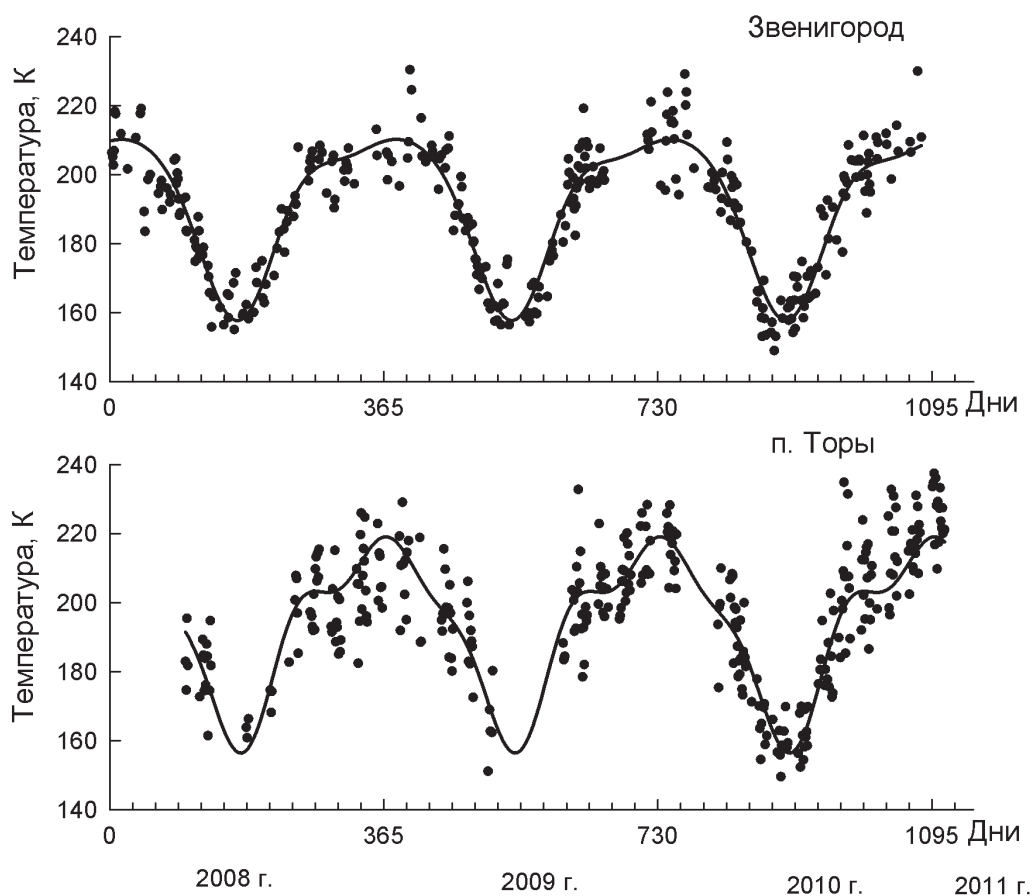


Рис. 1. Сезонные вариации вращательной температуры гидроксила по наблюдениям в Звенигороде и п. Торы в течение 2008–2011 гг. Точки – средненочные значения температуры. Линии – реконструкция сезонного хода на основе гармоник, представленных в табл. 1. Нумерация дней дана с 1 января 2008 г.

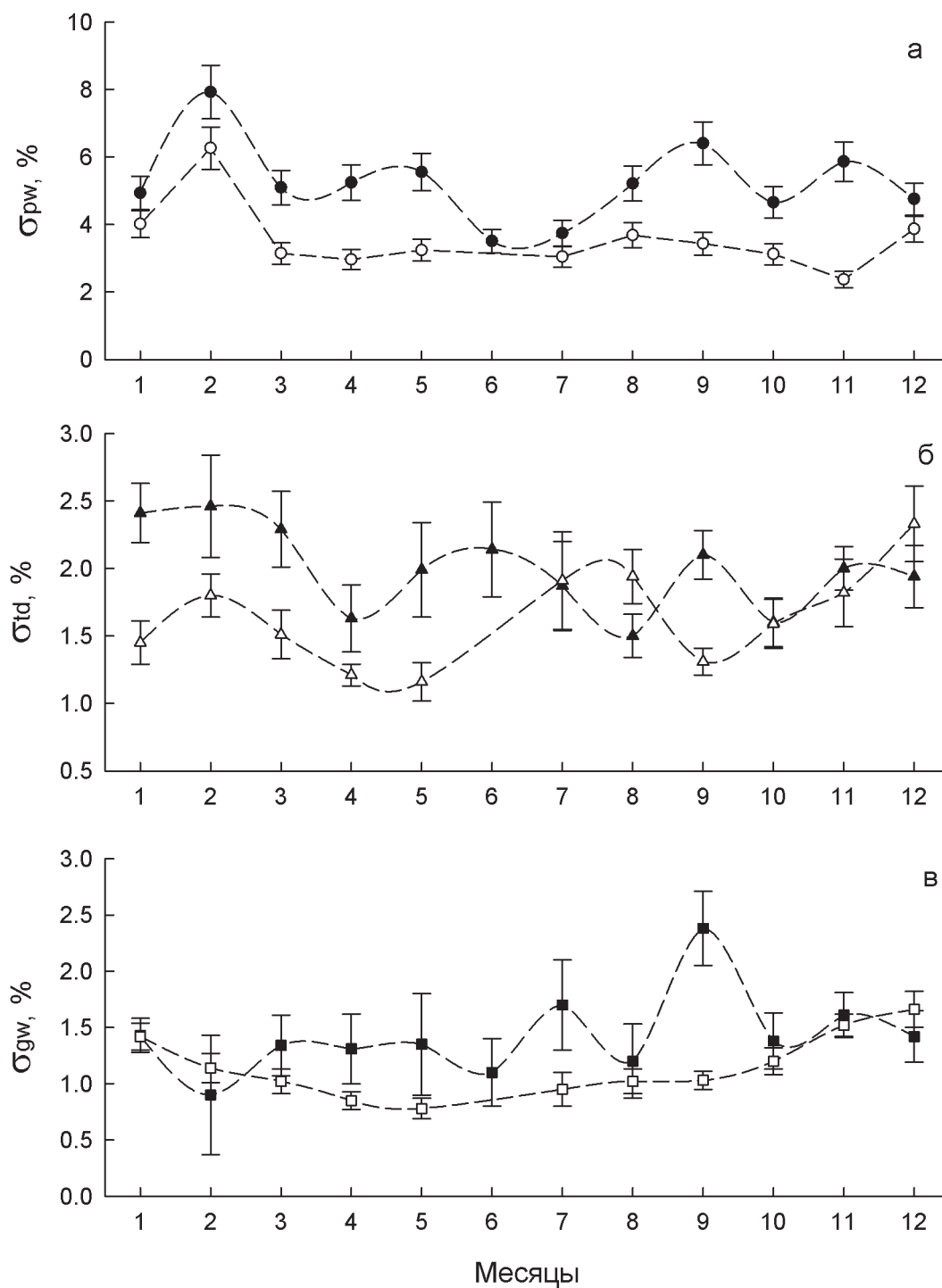


Рис. 2. Сезонные изменения стандартных отклонений температуры, вызванных планетарными волнами (а), приливами (б) и внутренними гравитационными волнами (в). Черными значками показаны стандартные отклонения для п. Торы, белыми значками – для Звенигорода. Вертикальные линии – стандартные ошибки

В качестве характеристики ночной изменчивости температуры гидроксила принято ее стандартное отклонение от среденочной температуры (σ). Согласно (Offerman et al., 2009) квадрат данного стандартного отклонения (т.е. дисперсию ночной температуры) можно представить как сумму дисперсий

$$\sigma^2 = \sigma_{td}^2 + \sigma_{gw}^2 + \sigma_n^2,$$

характеризующих активность в течение ночи приливов (σ_{td}^2), внутренних гравитационных волн (σ_{gw}^2) и флуктуаций темнового тока ПЗС-матрицы регистрирующей камеры спектрографа (σ_n^2). Дисперсия σ_n^2 определяется экспериментально по отдельным измерениям темнового тока. Величины σ_{gw} и σ_{td} определялись последовательно после выделения из ночного температурного ряда методом наименьших квадратов гармоник, соответствующих 24-, 12- и 8-часовой компонентам суточного прилива. На *рис. 2б и 2в* показаны сезонные вариации относительных (т.е. в процентах средненочных значений температуры) стандартных отклонений σ_{td} и σ_{gw} . Как и в случае с σ_{pw} ночные стандартные отклонения для п. Торы в основном превышают соответствующие звенигородские характеристики (в отдельные месяцы в 1,5–2 раза), что свидетельствует о большей активности приливных и внутренних гравитационных волн в области мезопаузы над сибирским регионом.

Заключение

Представлена сезонная изменчивость температуры в области мезопаузы (80–100 км) по спектральным наблюдениям гидроксильного излучения на Звенигородской станции ИФА РАН и Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН в п. Торы, проведенных в течение 2008–2011 гг. Для обоих мест наблюдения выявлены среднегодовые значения и статистически значимые характеристики годовых гармоник. В качестве характеристик межсуточной и внутрисуточной изменчивости температуры приняты стандартные отклонения, которые в зависимости от взятого временного интервала для анализа температурных вариаций могут быть индикатором активности различных атмосферных волн, распространяющихся в верхней атмосфере. Результаты анализа показывают в основном превышение значений температуры и параметров ее изменчивости, полученных в п. Торы, над звенигородскими данными.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №10-05-00062 и №12-05-01163.

Литература

1. Брасье Г., Соломон С. Аэрономия средней атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 414 с.
2. Герасимова Н.Г., Яковлева А.В. Комплект светосильных спектрографов с дифракционными решетками // Приборы и техника эксперимента. 1956. № 1. С. 83–86.
3. Перминов В.И. Сезонные вариации температуры вблизи мезопаузы по измерениям гидроксильного излучения в Звенигороде // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т. 49. № 6. С. 835–842.
4. Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение атмосферы как индикатор структуры и динамики верхней атмосферы. М.: Геос, 2006. 741 с.
5. Baker D.J., Stair A.T. Rocket measurements of the altitude distributions of the hydroxyl air-glow // Physica Scripta. 1988. No. 37. P. 611–622.

6. *Bates D.R., Nicolet M.* The photochemistry of atmospheric water vapour // *J. Geophys. Res.* 1950. V. 55. P. 301–327.
7. *Bittner M., Offermann D., Graef H.-H., Donner M., Hamilton K.* An 18-year time series of OH rotational temperatures and middle atmosphere decadal variations // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 64. P. 1147–1166.
8. *Bovensmann H., Burrows J.P., Buchwitz M., Frerick J., Noel S., Rozanov V.V., Chance K.V., Geode A.P.H.* SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes // *J. Atmos. Sci.* 1999. V. 56. P. 127–150.
9. *Chen S., Hu Z., White M. A., Chen H., Krueger D. A., She C.-Y.* Lidar observations of seasonal variation of diurnal mean temperature in the mesopause region over Fort Collins, Colorado (41° N, 105° W) // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. P. 12371–12379.
10. *Gerding M., Höffner J., Lautenbach J., Rauthe M., Lübken F.-J.* Seasonal variation of nocturnal temperatures between 1 and 105km altitude at 54° N observed by lidar // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8. P. 7465–7482.
11. *Langhoff S.R., Werner H.J., Rosmus P.* Theoretical transition probabilities for the OH Meinel system // *J. Molecular Spectrosc.* 1986. V. 118. No. 4. P. 507–529.
12. *Lopez-Gonzalez M.J., Rodriguez E., Wiens R.H., Shepherd G.G., Sargoytchev S., Brown S., Shepherd M.G., Aushev V.M., Lopez-Moreno J.J., Rodrigo R., Cho Y.-M.* Seasonal variations of O₂ atmospheric and OH(6-2) airglow and temperature at mid-latitudes from SATI observations // *Ann. Geophys.* 2004. V. 22. P. 819–828.
13. *Offermann D., Gusev O., Donner M., Forbes J.M., Hagan M., Mlynczak M.G., Oberheide J., Preusse P., Schmidt H., Russel III J.M.* Relative intensities of middle atmosphere waves // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. D06110, doi:10.1029/2008JD010662.
14. *Remsberg E.E., Marshall B.T., Garcia-Comas M., Krueger D., Lingenfelter G.S., Martin-Torres J., Mlynczak M.G., Russell J.M., Smith A.K., Zhao Y., Brown C., Gordley L.L., Lopez-Gonzalez M.J., Lopez-Puertas M., She C.Y., Taylor M.J., Thompson R.E.* Assessment of the quality of the Version 1.07 temperature-versus-pressure profiles of the middle atmosphere from TIMED/SABER // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. D17101, doi: 10.1029/2008JD010013.
15. *Vlasov M.N., Kelly M.C.* Estimates of eddy turbulence consistent with seasonal variations of atomic oxygen and its possible role in the seasonal cycle of mesopause temperature // *Ann. Geophys.* 2010. V. 28. P. 2103–2110.
16. *Vlasov M.N., Kelly M.C.* Eddy turbulence, the double mesopause, and the double layer of atomic oxygen // *Ann. Geophys.* 2012. V. 30. P. 251–258.

Variability of temperature in the mesopause region according to the mid-latitudinal measurements of the hydroxyl airglow

V.I. Perminov¹, I.V. Medvedeva², A.I. Semenov¹

¹ *Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences
119017 Moscow, Pyzhevsky 3*

E-mail: v.perminov@rambler.ru

² *Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
664033 Irkutsk, Lermontov Str. 126a, box 291*

E-mail: ivmed@iszf.irk.ru

Seasonal variability of temperature in the mesopause region (80-100 km), obtained from spectral observations of the hydroxyl emission (band OH(6-2) 834.0 nm) at the Zvenigorod station (56N, 37E) of Obukhov Institute of Atmospheric Physics (IAP) and the Geophysical Observatory (52N, 103 E) of the Institute of Solar-Terrestrial Physics (ISTP) during 2008–2011 is presented. The statistically significant first three harmonics of the seasonal variations of temperature and its standard deviations are taken as characteristics of temperature variability. Depending on the time interval taken for the analysis of temperature variations, the standard deviations can be an indicator of activity of various atmospheric waves propagating in the upper atmosphere. The analysis carried out show the greater temperature and its variability parameters obtained at the ISTP Geophysical Observatory.

Keywords: mesopause, temperature, hydroxyl airglow, ground-based optical observation.