

Сравнительный анализ данных наземных измерений температуры мезопаузы на средних широтах со спутниковыми данными MLS Aura, v3.3

И.В. Медведева¹, А.И. Семенов², В.И. Перминов², А.В. Татарников¹, А.Б. Белецкий¹

¹Учреждение Российской академии наук Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН); Иркутск 664033, ул. Лермонтова 126 а, а/я 291
E-mail: ivmed@iszf.irk.ru

²Учреждение Российской академии наук Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН (ИФА РАН); 119017, Москва, Пыжевский пер., 3

Представлены результаты исследования температуры атмосферы на высотах мезопаузы по данным наземных и спутниковых измерений. Для анализа использованы данные наземных спектрометрических измерений температуры мезопаузы (~87 км) по эмиссии гидроксила, полоса (6-2) 834.0 нм, за период 2008-2011 гг, выполненных в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (ГО ИСЗФ СО РАН, 52N, 103E) и на Звенигородской научной станции ИФА РАН (56N, 37E). Приводится описание спектрометрической аппаратуры и методики обработки регистрируемых спектров излучения гидроксила. Проведено сравнение результатов наземных измерений с данными измерений температуры в мезосфере для исследуемых регионов, полученными с помощью зонда MLS, установленного на борту космического аппарата Aura EOS. Анализируются температурные данные MLS AURA, версия v3.3, для двух высотных геопотенциальных уровней: 0,005 гПа (~84 км) и 0,002 гПа (~88 км). С помощью гармонического анализа получены средние значения температуры мезопаузы за период 2008-2011 гг для регионов Иркутска и Звенигорода по наземным и спутниковым данным. Обнаружено, что значения измеренных со спутника температур меньше температур, измеренных с земной поверхности в подспутниковых точках. Величина выявленной поправки составляет для высотного уровня 0,002 гПа 10.1 К и 9.4 К для Иркутска и Звенигорода, соответственно.

Ключевые слова: температура, эмиссия гидроксила, мезопауза, наземные и спутниковые измерения

Введение

В настоящее время для контроля состояния температурного режима средней и верхней атмосферы и ее состава активно используется спутниковое зондирование, позволяющее получать картину их глобального пространственного распределения. Например, температурные данные, получаемых с помощью космических аппаратов Aura EOS, Saber широко используются в исследованиях атмосферы на различных высотных уровнях. Для восстановления необходимых данных из спутниковых измерений разрабатываются сложные аналитические программы. Однако, результаты вычислений с их помощью, в свою очередь, нуждаются в контроле от независимых прямых измерений исследуемых параметров в подспутниковых точках, находящихся на поверхности Земли. Поэтому, сопоставление спутниковых данных измерений с данными близких к ним во времени и пространстве наземных наблюдений представляет важную задачу для оценки реальной точности спутниковых измерений. О занижении спутниковых температурных данных MLS Aura версии v1.5 на 11.5 ± 5.8 К, выявленном с помощью наземных измерений температуры атмосферы по эмиссии OH(6-2), говорится в (French et al., 2006). В работе (Schwartz et al., 2008) представлены результаты валидации температурных данных MLS Aura версии v.2.2, показавшие, что и в этом случае, на высоте атмосферы ~90 км значения спутниковых измерений занижены на 5-10 К. French and Mulligan (2010) также обнаружили, что температурные данные MLS Aura версии v2.2 ниже на 9.9 ± 0.4 К, чем температура, полученная по эмиссии OH(6-2).

Настоящая работа посвящена сравнительному анализу данных наземных измерений температуры мезопаузы, полученных с помощью спектрофотометрических измерений спектров излучения гидроксила на средних широтах на станциях, разнесенных по долготе на пять часовых поясов, в течение 2008-2011 гг, со спутниковыми данными MLS Aura недавно вышедшей версии v3.3.

Анализируемые данные

Для анализа были использованы:

- данные наземных спектрографических измерений температуры мезопаузы (~87 км) по эмиссии гидроксила, полоса (6-2) 834.0 нм, выполненных в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (52°N, 103°E, п. Торы, 150 км от Иркутска) и на Звенигородской научной станции ИФА РАН (56° N, 37° E);
- данные спутниковых измерений вертикальных профилей температуры в стратосфере–мезосфере, полученные с помощью СВЧ зонда MLS Aura [<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/overview/data-holdings/MLS/index.shtml>].
- Анализируемый период: апрель 2008-январь 2011.

Методика определения температуры мезопаузы по данным наземных спектральных измерений

Температура в мезопаузе определялась с помощью спектра излучения молекул ОН (Чемберлен, 1963; Перминов и др., 2007). Регистрация спектров в ГО ИСЗФ СО РАН и на Звенигородской научной станции осуществлялась с помощью одинаковых светосильных дифракционных спектрографов. В спектрографах использованы приемники излучения на ПЗС матрицах, позволяющих регистрировать с высоким спектральным (~ 2-3 Å) и временным (~2-5 мин) разрешениями спектр излучения ночного неба в ближней ИК области.

На рис. 1 представлен пример регистрации спектра излучения ночной верхней атмосферы в ближней ИК области спектра. Полученный спектр позволяет с точностью ~2 К определять вращательную температуру гидроксила, которая соответствует кинетической температуре атмосферы на высотах свечения ОН (~87 км) (Шефов и др., 2006). Для анализа в работе используются усредненные за ночь значения температуры.

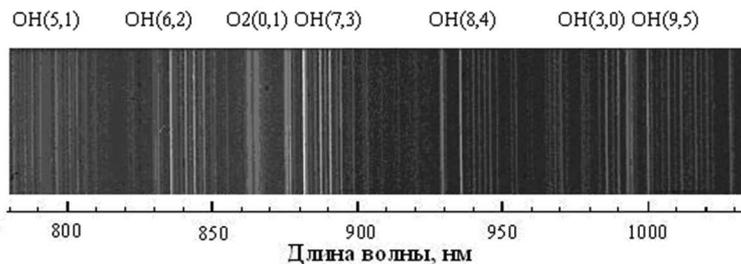


Рис. 1. Спектр излучения ночной верхней атмосферы в ближней ИК области спектра. Вверху указаны полосы излучения молекул ОН и О2

Для определения вращательной температуры используются первые линии Р-ветвей колебательно-вращательных полос ОН. Эти линии возникают при квантовых переходах с низких вращательных уровней ($N \leq 5$) ($J=N-1/2$ для $^2\Pi_{1/2}$, $J=N+1/2$ для $^2\Pi_{3/2}$), населенности которых находятся в термодинамическом равновесии, и их распределение описывается функцией Больцмана.

Отсюда интенсивности $I(\nu', J' \rightarrow \nu'', J'')$ (фотон·см⁻²·сек⁻¹) линий в колебательно-вращательной полосе можно представить как

$$I(\nu', J' \rightarrow \nu'', J'') = N_{\nu'} A \frac{2(2J+1)}{Q_{\nu}(T_{rot})} \exp\left[-\frac{hc}{k} \cdot \frac{F(J')}{T_r}\right],$$

где $N(\nu')$ – населенность колебательного уровня ν' , h – постоянная Планка, c – скорость света, k – константа Больцмана, $Q_{\nu}(T_{rot}(\nu'))$ – сумма по вращательным состояниям колебательного

уровня v' , $F(J')$ – энергия вращательного уровня J' , $A(v', J' \rightarrow v'', J'')$ – вероятность колебательно-вращательного перехода ($v', J' \rightarrow v'', J''$):

$$A = \frac{64\pi^4}{3h(2J' + 1)\lambda^3(J', J'')} S(v', v'') \cdot i(J', J'') \cdot f_{v',v''}^2(J')$$

где $\lambda(J', J'')$ – длина волны колебательно-вращательной линии, $S(J', J'')$ – сила колебательного перехода, $i(J', J'')$ – фактор интенсивности для соответствующей линии и $f_{v',v''}(J')$ – фактор колебательно-вращательного взаимодействия.

Предполагая слабую степень взаимодействия колебательного и вращательного движений, интенсивность линии можно представить как

$$I(v', J' \rightarrow v'', J'') = C\lambda^{-3}(J', J'') \cdot i(J', J'') \cdot \exp\left[-\frac{hc}{k} \cdot \frac{F(J')}{T_r}\right].$$

Таким образом, процедура определения вращательной температуры состоит в построении корреляционного соотношения

$$\ln\left[\frac{I(v', J' \rightarrow v'', J'') \cdot \lambda^3}{i(J', J'')}\right] = -\frac{hc}{k} \cdot \frac{F(J')}{T_r} + C = -1.4388 \cdot \frac{F(J')}{T_r} + C$$

Спутниковые данные о вертикальных профилях температуры атмосферы

Запуск спутника Aura EOS состоялся 15 июля 2004 г. Для анализа использованы данные, полученные с помощью сканирующего сверхвысокочастотного (СВЧ) лимбового зонда MLS (Microwave Limb Sounder), установленного на борту космического аппарата Aura EOS. Спутник имеет полярную орбиту с периодом примерно 100 мин и высотой 705 км. Пространственный охват почти глобален (от -82 до $+82^\circ$ по широте). Вертикальные профили измеряются с интервалом ~ 25 с через каждые $1,5^\circ$ (~ 165 км) вдоль траектории орбиты. В течение суток осуществляется примерно 13 оборотов спутника вокруг Земли. Зонд MLS сканирует земной лимб в направлении полета, регистрируя микроволновое излучение на частотах 118, 190, 240, 640 ГГц и 2,5 ТГц. Данные измерений зонда MLS используются для восстановления высотных профилей различных атмосферных компонентов, относительной влажности и температуры для областей атмосферы от тропосферы до верхней мезосферы, как функций давления в гектопаскалях. В версии v3.3. данные восстанавливаются на 51 высотных уровнях в регистрируемой области высот.

Для анализа использовались данные ночных пролетов спутника над исследуемыми регионами, радиус поиска 900 км. При отборе температурных профилей учитывались параметры контроля качества данных Quality, Convergence и Status Спутниковые данные анализировались на высотных геопотенциальных уровнях: 0,005 гПа (~ 84 км) и 0,002 гПа (~ 88 км), как наиболее близких к высоте максимума излучающего слоя ОН (~ 87 км).

Результаты

На рис. 2 представлено распределение координат пролетов спутника над исследуемыми регионами. Кружками обозначены расположения указанных выше обсерваторий. Количество анализируемых ночей наблюдения приведено в Табл. 1. Большое число пропусков спутниковых данных для региона Звенигорода, по-видимому, обусловлено траекториями пролетов спутника Aura.

Таблица 1. Количество анализируемых ночей наблюдения для исследуемых регионов по наземным (Т(ОН)) и спутниковым (Т(Aura)) данным

	Т(ОН)	Т(Aura)
Иркутск	338	1004
Звенигород	316	733

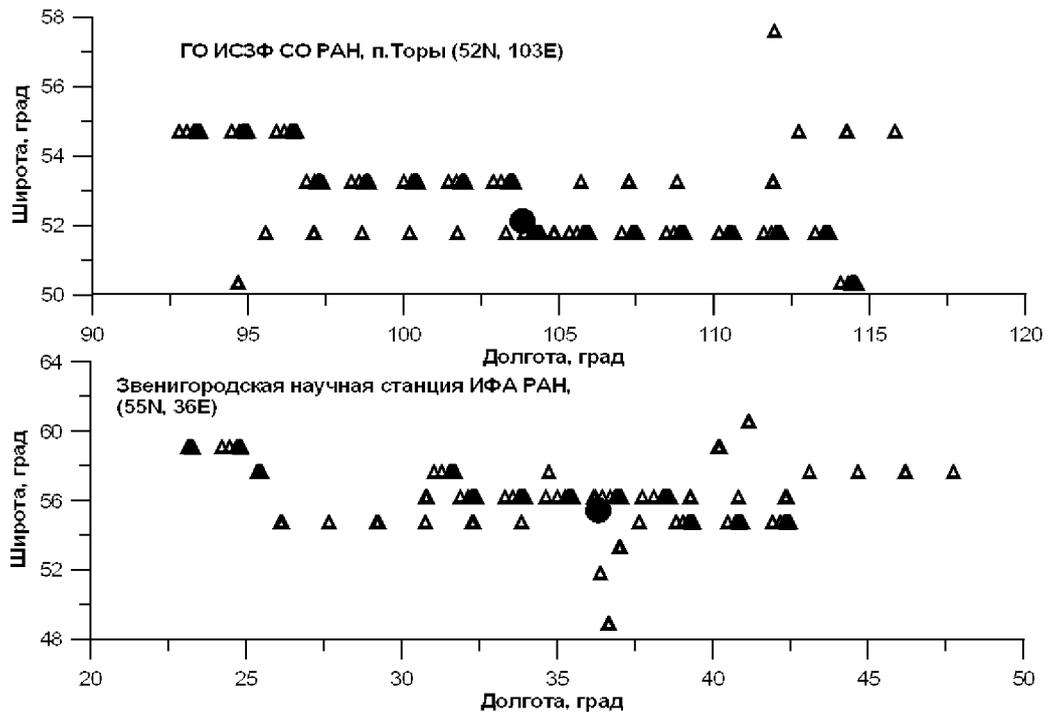


Рис.2. Распределение координат пролетов спутника над регионами Иркутска и Звенигорода за анализируемый период. Кружками обозначены расположения обсерваторий

На рис.3 представлены вариации температуры атмосферы на высотах мезопаузы по наземным и спутниковым данным для региона Иркутска (а) и Звенигорода (б). Спутниковые данные представлены для двух высотных геопотенциальных уровней: 0,005 гПа (~84 км) и 0,002гПа (~88 км). Обращает на себя внимание тот факт, что для обоих исследуемых регионов спутниковые данные MLS Aura показывают более низкие значения температуры, чем наземные измерения. В летний период это отличие более выражено. Средние значения температуры определялись с помощью гармонического анализа, результаты которого представлены на рис. 4. Точки на графиках соответствуют измеренным значениям температуры, линии – аппроксимация сезонных вариаций температуры суммой трех гармоник.

С помощью гармонического анализа были получены средние значения температуры мезопаузы за период апрель 2008 - январь 2011 гг. для регионов Иркутска и Звенигорода по наземным ($fT(OH)$) и спутниковым ($fT(Aura)$) данным (Табл.2). Для обоих анализируемых высотных уровней над регионами Иркутска и Звенигорода обнаружено, что средними значениями температуры по спутниковым данным ниже, чем по данным наземных измерений. Был выполнен расчет необходимой поправки: $dT = fT(OH) - fT(Aura)$. Значение этой поправки для высотного уровня 0,005 гПа меньше, чем для 0,002 гПа, что связано, очевидно, с близостью этой высоты к высоте излучаемого слоя ОН.

Таблица 2. Средние значения температуры мезопаузы за период апрель 2008 - январь 2011 гг. по наземным ($fT(OH)$) и спутниковым ($fT(Aura)$) данным, полученные с помощью гармонического анализа, и отличие между спутниковыми и наземными температурными данными (dT) для регионов Иркутска (а) и Звенигорода (б)

	Средняя температура, К	dT, К
$fT(OH)$	193.6±0.6	
$fT(Aura)$, 0,005 гПа	183.10±0.2	10.5
$fT(Aura)$, 0,002 гПа	183.5±0.2	10.1

а)

	Средняя температура, К	dT, К
$fT(OH)$	191.9±0.4	
$fT(Aura)$, 0,005 гПа	181.7±0.3	10.2
$fT(Aura)$, 0,002 гПа	182.5±0.3	9.4

б)

При учете вычисленных поправок спутниковые температурные данные хорошо совпали с измеренными по эмиссии гидроксила (рис.5).

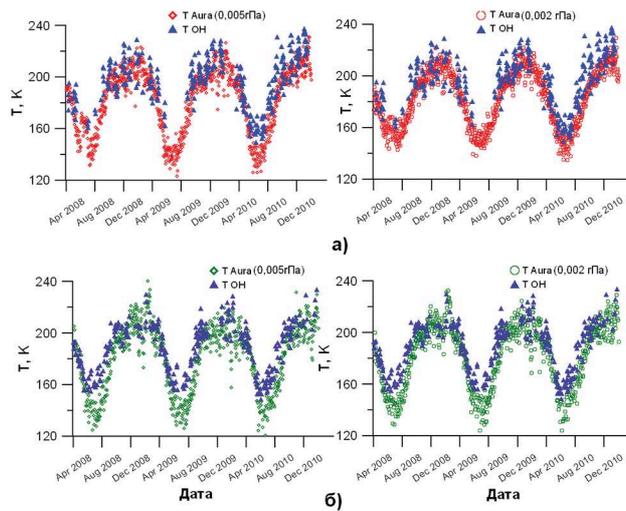


Рис.3. Температура мезопазузы по наземным и спутниковым данным в регионах Иркутска (а) и Звенигорода (б)

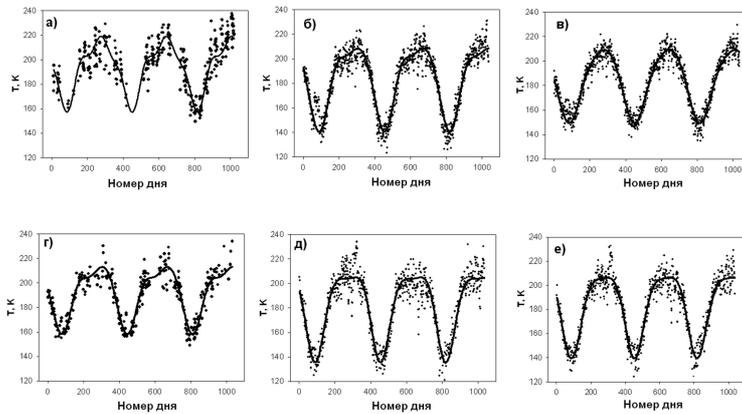


Рис. 4. Температура мезопазузы в регионах Иркутска и Звенигорода по наземным ($T(OH)$) и спутниковым ($T(MLS\ Aura)$) данным за анализируемый период апрель 2008- январь 2011 гг.:
 а) $T(OH)$, Иркутск; б) $T(MLS\ Aura, 0,005\ гПа)$, Иркутск; в) $T(MLS\ Aura, 0,002\ гПа)$, Иркутск;
 г) $T(OH)$, Звенигород; д) $T(MLS\ Aura, 0,005\ гПа)$, Звенигород; е) $T(MLS\ Aura, 0,002\ гПа)$, Звенигород.
 Точки – измеренные значения температуры. Линии – аппроксимация сезонных вариаций температуры суммой трех гармоник. Начало отсчета – 01.04.2008г.

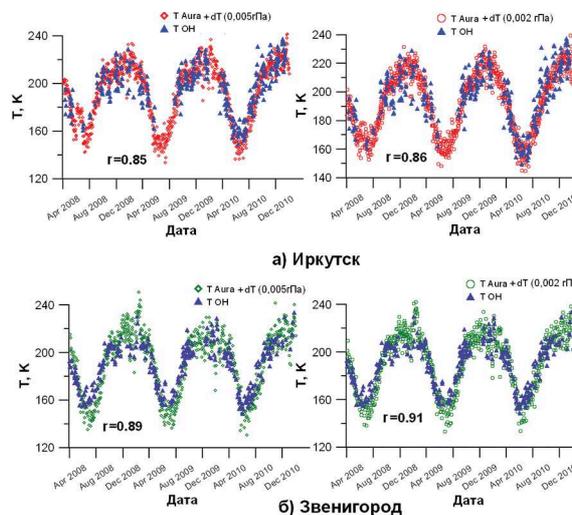


Рис. 5. Сравнение температуры мезопазузы по наземным и спутниковым данным в регионах Иркутска (а) и Звенигорода (б) с учетом вычисленных поправок. r – коэффициенты корреляции

Заключение

Проведено сопоставление спутниковых температурных данных MLS Aura, v.3.3, на двух высотных геопотенциальных уровнях 0,005 гПа и 0,002 гПа, соответствующих высотам атмосферы ~84 км и ~88 км соответственно, с данными наземных измерений температуры мезопаузы по эмиссии ОН (6-2) (высота максимума излучающего слоя ~87 км) для географических регионов вблизи Иркутска и Звенигорода.

С помощью гармонического анализа получены средние значения температуры мезопаузы за период апрель 2008-январь 2011 гг. для регионов Иркутска и Звенигорода по наземным и спутниковым данным. Выявлено систематическое занижение спутниковых данных по сравнению с наземными. Величина выявленной поправки составляет для высотного уровня 0,002 гПа 10.1 К и 9.4 К для Иркутска и Звенигорода, соответственно.

Учет вычисленных поправок в спутниковых данных приводит к хорошему совпадению с данными наземных измерений по эмиссии гидроксила в обоих рассматриваемых географических пунктах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-05-00062-а и Проекта № 16.518.11.7097 Министерства образования и науки РФ.

Литература

1. *Перминов В.И., Шефов Н.Н., Семенов А.И.* Вращательная температура гидроксильного излучения // Геомагнетизм и Аэронавигация, 2007. Т. 47. № 6. С. 798-805.
2. *Чемберлен Дж.* Физика полярных сияний и излучения атмосферы. М.: Иностранная литература, 1963. 778 с.
3. *Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю.* Излучение верхней атмосферы - индикатор ее структурных и динамических характеристик. М.: ГЕОС. 2006. 741 с.
4. *French W.J., Klekociuk A.R., Burns G.B.* Antarctic lidar and hydroxyl rotational temperatures compared with Aura/MLS satellite measurements // Proc. AGU 2006 Joint Assembly, Baltimore, Maryland, USA, 23-26 May 2006.
5. *French W.J.R., Mulligan F.J.* Stability of temperatures from TIMED/SABER v1.07 (2002–2009) and Aura/MLS v2.2 (2004–2009) compared with OH(6-2) temperatures observed at Davis Station, Antarctica // Atmos. Chem. Phys. 2010, 10, 11439–11446, doi:10.5194/acp-10-11439-2010.
6. *Schwartz M.J., Lambert A., Manney G.L. et al.* Validation of the Aura Microwave Limb Sounder temperature and geopotential height measurements // J. Geophys. Res., 2008, 113, D15S11, doi:10.1029/2007JD008783.

Comparison of ground-based OH temperature data measured at mid-latitudes with Aura MLS v3.3

I.V. Medvedeva¹, A.I. Semenov², V.I. Perminov², A.V. Tatarnikov¹, A.B. Beletsky¹

¹*Institute of Solar-Terrestrial Physics (ISTP), Siberian Branch,*

Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

²*Obukhov Institute of Atmospheric Physics (IAP),*

Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

e-mail: ivmed@iszf.irk.ru

We analyzed the data of ground-based spectrometer measurements of the mesopause temperature (~87 km) obtained from ground-based spectrographic measurements of the hydroxyl emission (834.0 nm, band (6,2)) at the ISTP Geophysical observatory (52N, 103E) and Zvenigorod station (56N, 37E), the period under analyses is 2008-2011. The description of spectrometer equipment and the processing technique of registered OH emission spectrum is provided. Comparison of the results of ground-based measurements with the satellite data on the atmospheric temperature obtained by the EOS Aura Microwave Limb Sounder (MLS) was carried out. Using the Fourier analysis, mean values of the mesopause temperature during 2008-2011 for Irkutsk and Zvenigorod regions according to ground-based and satellite data were obtained. It was revealed that at the 0,002hPa height level Aura MLS has a cold bias of 10.1 K and 9.4 K compared with OH (6-2) at Irkutsk and Zvenigorod stations respectively

Keywords: temperature, OH emission, mesopause, ground-based and satellite measurements