

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 550.388

**Температура области мезопаузы по измерениям
спутника AURA MLS и эмиссии OH(3-1) в Маймаге**

В.И. Сивцева, П.П. Аммосов, Г.А. Гаврильева, И.И. Колтовской*

*Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН
677027, г. Якутск, пр. Ленина, 31*

Поступила в редакцию 12.02.2021 г.

Представлены результаты исследования температуры области мезопаузы (~87 км) по измерениям эмиссии OH(3-1) на высокоширотной ст. Маймага (63,04° с.ш., 129,51° в.д.) и их сопоставления с температурными данными Aura MLS, полученными при пролете над ст. Маймага на уровне 0,002 гПа в течение 2013–2018 гг. Среднечасовая вращательная температура OH(3-1) сравнивалась с измеренными Aura MLS температурами и выделенными из них фоновыми температурами. Полученный результат свидетельствует о большей корректности сравнения температуры OH(3-1) с фоновой, рассчитанной по данным Aura MLS. Повышенные температуры в области мезопаузы зимой 2014/2015 гг. наблюдались как в данных наземных измерений, так и спутниковых. В целом вариации температуры, измеренные двумя различными методами, качественно совпадают и отражают характер сезонных изменений. Расхождения значений могут быть объяснены многими факторами, например различиями в высоте и методах измерений.

Ключевые слова: область мезопаузы, вращательная температура, гидроксил, спутник Aura; mesopause region, rotational temperature, hydroxyl, Aura satellite.

Введение

Область мезопаузы вызывает большой интерес исследователей, так как активно взаимодействует с солнечным радиационным излучением, приходящим сверху, и с широким спектром атмосферных волн, распространяющихся снизу вверх [1].

Температуру атмосферы на высоте мезопаузы исследуют с помощью спутниковых измерений и наземных наблюдений. Наиболее распространенными и надежными среди наземных методов являются спектральные наблюдения эмиссий гидроксила OH(3-1), которые возникают в области мезопаузы.

Научно-исследовательский спутник Aura имеет околополярную орбиту с углом наклона 98,2° [2] и в отличие от большинства исследовательских спутников предоставляет почти непрерывные температурные данные для высокоширотных зон. В настоящей работе исследованы температуры атмосферы в области мезопаузы (~87 км) по измерениям на высокоширотной ст. Маймага (63,04° с.ш., 129,51° в.д.), проведено их сопоставление с температурными данными Aura MLS (Microwave Limb Sounder), полученными при пролете над ст. Маймага на уровне 0,002 гПа в течение 2013–2018 гг.

**Сравнение среднечасовой температуры
OH(3-1) с измеренными Aura MLS
температурами**

На ст. Маймага с 17 января 2013 г. ведутся наблюдения температуры мезопаузы с помощью спектрографа Shamrock (Andor), регистрирующего полосу OH(3-1) в ночное время суток (при угле погружения Солнца >9°). Время экспозиции спектрографа для получения одного измерения составляет 60 с. Прибор позволяет измерять температуру мезопаузы с точностью ~2 К при рабочей температуре охлаждения камеры спектрографа –50° С. Разработанное программное обеспечение позволяет прибору работать в автономном режиме [3].

Научно-исследовательский спутник Aura, предназначенный для изучения атмосферы Земли, был запущен 15 июля 2004 г. Так как его орбита является солнечно-синхронной, измерения MLS на определенной широте на восходящей или нисходящей сторонах орбиты проводятся примерно в одно и то же местное солнечное время (с точностью до нескольких минут) на протяжении всей миссии. Над ст. Маймага спутник снимает показания два раза в сутки – в ~03:00 и ~12:30 по местному солнечному времени [4]. Для анализа выбираются результаты ночных измерений Aura MLS.

На рис. 1, а приведены данные наземных измерений температуры OH(3-1) в сравнении со значениями температуры, измеренными Aura MLS над ст. Маймага на ближайшем (0,002 гПа (48 слой))

* Вера Исаевна Сивцева (verasivtseva@gmail.com); Петр Петрович Аммосов (ammosov@ikfia.ysn.ru); Галина Алексеевна Гаврильева (gagavriylieva@mail.ru); Игорь Иннокентьевич Колтовской (koltigor@mail.ru).

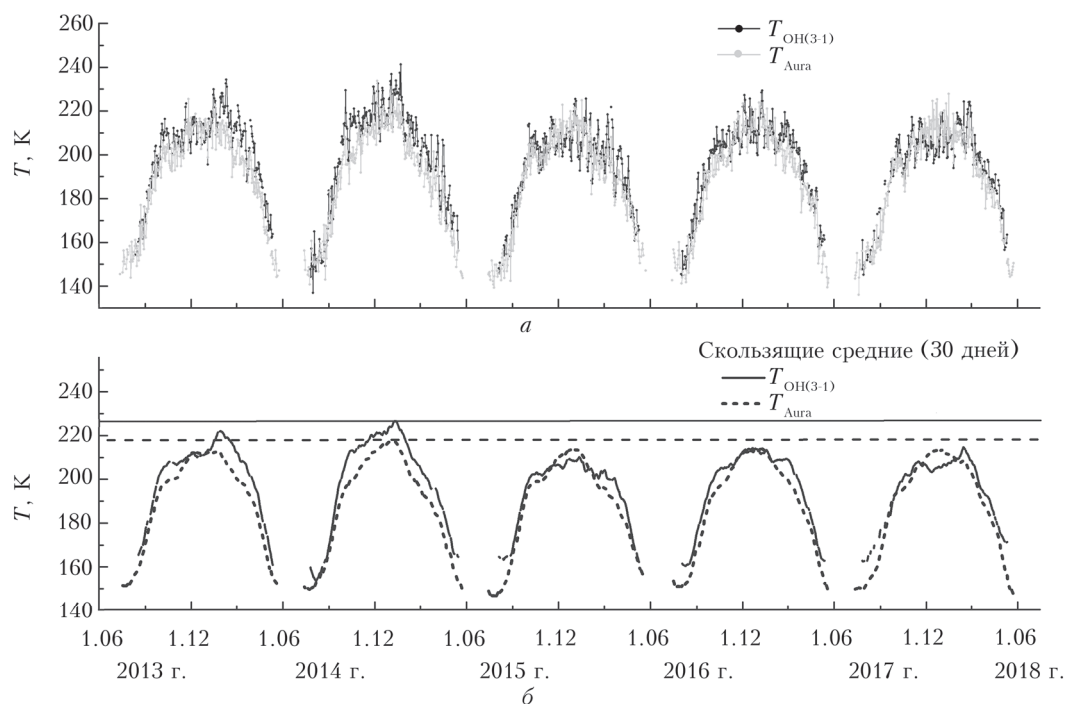


Рис. 1. Средненочные вращательные температуры ОН (3-1) и данные измерений Aura MLS на уровне 0,002 гПа над ст. Маймага (*а*) и их сезонный ход (*б*) в 2013–2018 гг. (горизонтальные линии – максимальные средние сезонные значения $T_{\text{ОН(3-1)}}$ и T_{Aura})

уровне к высоте эмиссии ОН (3-1) (~87 км), в 2013–2018 гг.

На рис. 1, *б* кривые представляют собой скользящие средние с окном пропускания 30 дней и показывают сезонный ход (средние сезонные значения) температуры ОН (3-1) и результатов измерений Aura MLS температуры в этот же период.

В зимний период 2014/2015 гг. температура ОН (3-1) превышает соответствующие температуры в другие года измерений. Хотя и менее выражено, повышение температуры атмосферы зимой 2014/2015 гг. также наблюдается в измерениях Aura MLS (рис. 1, *б*). С 2015 по 2018 г. вариации температуры, измеренные двумя методами, близки. В зимние периоды 2013–2015 гг. средние сезонные значения температуры, измеренные наземным методом, в среднем на ~10 К превышают соответствующие спутниковые значения. Подобный сдвиг на ~10 К относительно значений температуры ОН (6-2) упоминается в [2, 5, 6]. В целом вариации температуры, измеренной двумя различными методами, качественно совпадают и отражают межгодовые изменения. В частности, графики качественно подтверждают повышение температуры зимой 2014/2015 гг. на высотах, близких к высоте эмиссии ОН (3-1).

Определение фоновой температуры из данных Aura MLS

Одним из наиболее значимых факторов, влияющих на расхождение температур, является то, что сравнивается средненочная температура ОН (3-1)

и температура, измеренная Aura MLS один раз за ночь над ст. Маймага. При вычислении средненочной температуры сглаживаются ее колебания с периодом меньше длительности ночи наблюдения, чего не происходит при единичном измерении температуры спутником. Для более корректного сравнения необходимо выделить и вычистить пертурбации температуры вследствие распространения относительно короткопериодических атмосферных волн. С этой целью исследовались данные ночных измерений Aura MLS, соответствующие всему широтному кольцу, на котором находится ст. Маймага (63,04° с.ш.).

Атмосферные волны анализируются аналогично методу из [7–9]. Компоненты температуры, соответствующие зональным волновым числам 1–6 (соответствующие волнам Россби), оцениваются путем подгонки методом наименьших квадратов. Сумма зональных средних температур (T) (волновое число 0) и вклада компонент зональных волновых чисел 1–6 (T_{pw}) рассматриваются как «фоновые температуры» (T_{bg}):

$$T_{\text{bg}} = \bar{T} + T_{\text{pw}} = \bar{T} + A_1 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_1}(x - \varphi_1)\right) + \dots + A_6 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_6}(x - \varphi_6)\right),$$

где A_1, \dots, A_6 – амплитуды волн Россби, соответствующие волновым числам 1–6; $\lambda_1, \dots, \lambda_6$ – длины волн Россби; $\varphi_1, \dots, \varphi_6$ – фазы волн Россби; x – координата (долгота).

При измерениях в фиксированное местное солнечное время вклад всех приливных компонент включается во вклад компонент волновых чисел 0–6 и не может быть выделен. Следовательно, фоновые температуры, оцениваемые вышеуказанным методом, должны содержать T , T_{pw} и приливные волны. Остаточные температурные возмущения T_{gw} рассчитываются путем вычитания фоновой температуры из наблюдаемой: $T_{gw} = T - T_{bg}$, и рассматриваются как короткопериодические температурные возмущения, вызванные преимущественно внутренними гравитационными волнами (ВГВ).

Данные Aura для одного широтного кольца состоят из рядов температур по долготам для 55 различных высотных уровней. Чтобы построить вертикальный профиль температуры, расчет T_{bg} должен повторяться для каждого уровня. На рис. 2 (цв. вкладка) приведен график вертикальных профилей фоновой температуры T_{bg} над ст. Маймага в течение 2013–2018 гг. Вертикальные линии соответствуют пробелам в данных Aura MLS.

На рис. 2 заметно различие в температурах зимой 2014/2015 гг. в отличие от остальных сезонов на уровнях вблизи области мезопаузы и стратопазузы (повышенная и пониженная соответственно). Наблюдаемая особенность в области мезопаузы может быть объяснена тем, что значительная часть энергии ВГВ была поглощена на высоте, близкой к высоте эмиссионного слоя гидроксила, в пользу чего свидетельствует пониженная активность ВГВ в этой области в тот период [10, 11]. Возможно, условия, сложившиеся в нижележащих слоях ат-

мосферы в этот сезон, способствовали такому поведению ВГВ, и пониженная температура области стратопазузы отражает эти условия.

Сравнение средненочной температуры ОН (3-1) с фоновой (Aura MLS)

На рис. 3, *a* представлены вращательная температура ОН (3-1) и фоновая температура T_{bg} , выделенная из результатов измерений температуры Aura MLS на уровне 0,002 гПа над ст. Маймага. Зимой в большинстве своем совпадают фазы вариаций температуры с периодами длительностью от нескольких дней, которые соответствуют распространению планетарных волн. На рис. 3, *a* наблюдается лучшее соответствие сравниваемых температур, чем на рис. 1, *a*.

Регрессионные зависимости между средненочными температурами ОН (3-1) ($T_{ОН(3-1)}$) и данными измерений температуры Aura MLS на уровне 0,002 гПа (T_{Aura}), а также фоновыми температурами, выделенными из результатов измерений Aura MLS, приведены на рис. 4, *a* и *b* соответственно. Уровень корреляции во втором случае (0,948) выше, чем в первом (0,914).

На рис. 3, *b* видно, что в зимние периоды 2013–2015 гг. средние сезонные значения $T_{ОН(3-1)}$ также на ~10 К превышают средние сезонные значения T_{bg} . В зимние периоды 2015–2018 гг. вариации температур близки по значениям, но средние сезонные температуры ОН (3-1) продолжают пре-

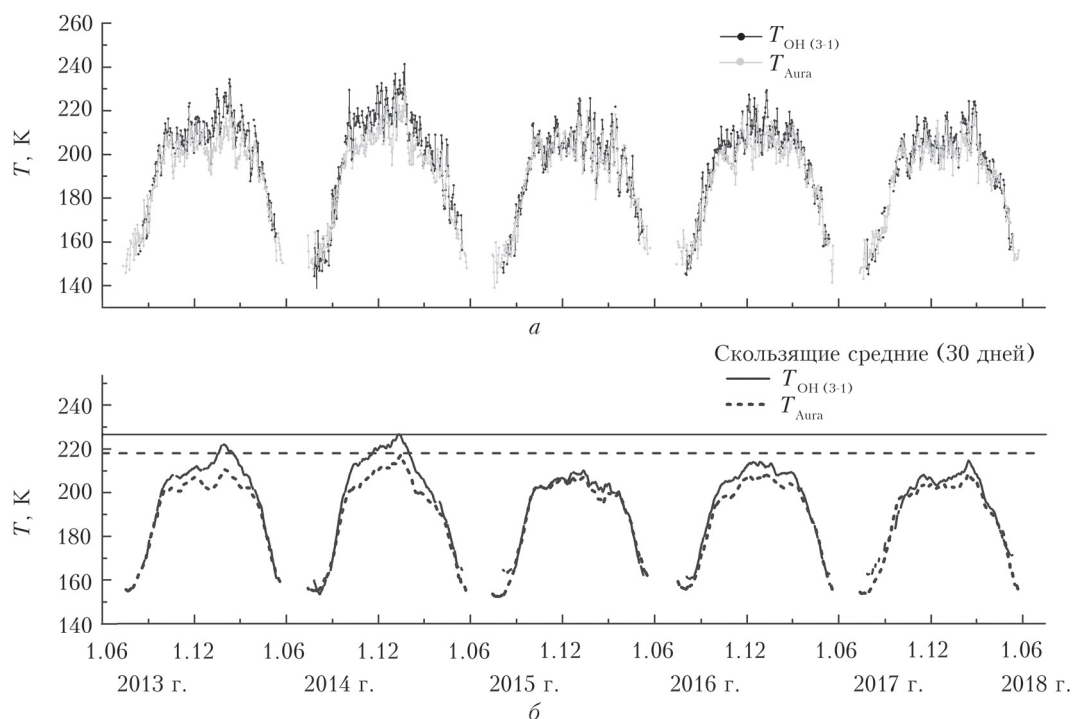


Рис. 3. Средненочная вращательная температура ОН (3-1) и фоновая температура, выделенная из результатов измерений Aura MLS на уровне 0,002 гПа над ст. Маймага (*a*), и их сезонный ход (*b*) в течение 2013–2018 гг.

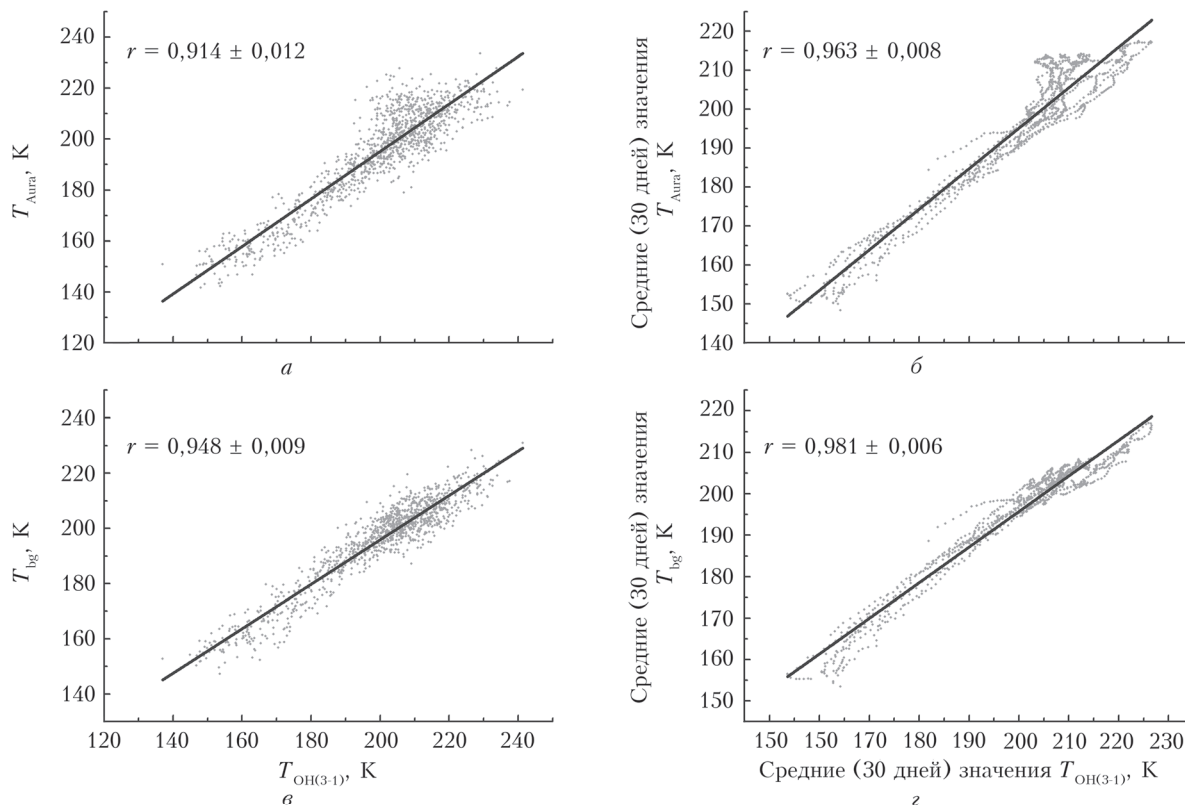


Рис. 4. Регрессионные зависимости между: средненочными температурами ОН (3-1) и результатами измерений Aura MLS на уровне 0,002 гПа (а); средними сезонными значениями $T_{\text{ОН}(3-1)}$ и T_{Aura} (б); средненочными температурами $T_{\text{ОН}(3-1)}$ и значениями T_{bg} , выделенными из измерений Aura MLS на уровне 0,002 гПа (в); средними сезонными значениями $T_{\text{ОН}(3-1)}$ и T_{bg} (г)

вышать средние сезонные фоновые температуры. Графики на рис. 3, б лучше показывают совпадение характера сезонных вариаций температуры и в большей степени подтверждают повышенные температуры зимой 2014/2015 гг., чем на рис. 1, б. Регрессионные зависимости между средними сезонными значениями $T_{\text{ОН}(3-1)}$, T_{Aura} и T_{bg} приведены на рис. 4, б и г. Уровень корреляции во втором случае (0,981) выше, чем в первом (0,963).

Полученный результат свидетельствует в пользу большей корректности сравнения температуры ОН (3-1) и фоновой температуры, рассчитанной из данных Aura MLS. Сравнение данных взаимно подтверждает повышенные температуры, наблюдавшиеся в области мезопаузы зимой 2014/2015 гг. Оставшиеся расхождения температур могут быть объяснены такими факторами, как различия в высоте и методах измерений.

Заключение

Исследованы температуры области мезопаузы по наблюдениям эмиссии ОН (3-1) на ст. Маймага и по результатам измерений температуры Aura MLS, полученным при пролете над ст. Маймага на уровне 0,002 гПа в течение 2013–2018 гг. Проведено сравнение средненочной вращательной температуры ОН (3-1) с измеренными Aura MLS температурами и выделенными из них фоновыми тем-

пературами. Полученный результат свидетельствует в пользу большей корректности сравнения температуры ОН (3-1) с фоновой температурой, чем с измеренной Aura MLS.

Сравнение данных взаимно подтверждает повышенные температуры, наблюдавшие в области мезопаузы зимой 2014/2015 гг. В зимние периоды 2013–2015 гг. средние сезонные значения температуры ОН (3-1) на ~10 К превышают средние сезонные значения фоновой температуры. В 2015–2018 гг. в зимнее время, хотя вариации температуры близки по значению, средние сезонные значения температуры ОН (3-1) продолжают превышать средние сезонные значения фоновой температуры. Подобные пониженные значения упоминаются в [2, 5, 6]. В целом вариации температуры, измеренные двумя различными методами, качественно совпадают и отражают характер сезонных изменений. Расхождения температур могут быть объяснены такими факторами, как различия в высоте и методах измерений.

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ АААА-А21-121011990007-1).

1. Brasseur G.P., Solomon S. *Aeronomy of the Middle Atmosphere*. Dordrecht: Springer, 2005. 646 p.
2. Schwartz M.J., Lambert A., Manney G.L., Read W.G., Livesey N.J., Froidevaux L., Ao C.O., Bernath P.F., Boone C.D., Cofield R.E., Daffer W.H., Drouin B.J., Fetzer E.J., Fuller R.A., Jarnot R.F., Jiang J.H.,

- Jiang Y.B., Knosp B.W., Krüger K., Li J.-L.F., Mlynczak M.G., Pawson S., Russell J.M., Santee M.L., Snyder W.V., Stek P.C., Thurstans R.P., Tompkins A.M., Wagner P.A., Walker K.A., Waters J.W., Wu D.L. Validation of the Aura Microwave Limb Sounder temperature and geopotential height measurements // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113, N D15. P. D15S11.
3. Koltovskoi I.I., Ammosov P.P., Gavrilyeva G.A., Ammosova A.M., Sivtseva V.I. New infrared spectrograph for the investigation of the mesopause region // *Proc. SPIE*. 2017. V. 10466. P. 1046645.
 4. Waters J.W., Froidevaux L., Harwood R.S., Jarnot R.F., Pickett H.M., Read W.G., Siegel P.H., Cofield R.E., Filipiak M.J., Flower D.A., Holden J.R., Lau G.K., Livesey N.J., Manney G.L., Pumphrey H.C., Santee M.L., Wu D.L., Cuddy D.T., Lay R.R., Loo M.S., Perun V.S., Schwartz M.J., Stek P.C., Thurstans R.P., Boyles M.A., Chandra K.M., Chavez M.C., Gun-Shing Chen, Chudasama B.V., Dodge R., Fuller R.A., Girard M.A., Jiang J.H., Yibo Jiang, Knosp B.W., LaBelle R.C., Lam J.C., Lee K.A., Miller D., Oswald J.E., Patel N.C., Pukala D.M., Quintero O., Scaff D.M., Van Snyder W., Tope M.C., Wagner P.A., Walch M.J. The Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS MLS) on the Aura satellite // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2006. V. 44, N 5. P. 1075–1092.
 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. V. 10. P. 11439–11446.
 6. Medvedeva I.V., Semenov A.I., Perminov V.I., Beletsky A.B., Tatarnikov A.V. Comparison of ground-based OH temperature data measured at Irkutsk (52° N, 103° E) and Zvenigorod (56° N, 37° E) stations with Aura MLS v3.3 // *Acta Geophys.* 2014. V. 62, N 2. P. 340–349.
 7. Fetzer E.J., Gille J.C. Gravity wave variance in LIMS temperatures. Part I: Variability and comparison with background winds // *J. Atmos. Sci.* 1994. V. 51, N 17. P. 2461–2483.
 8. Preusse P., Schroeder S., Hoffmann L., Ern M., Friedl-Vallon F., Ungermann J., Oelhaf H., Fischer H., Riese M. New perspectives on gravity wave remote sensing by spaceborne infrared limb imaging // *Atmos. Meas. Tech.* 2009. V. 2. P. 299–311.
 9. Preusse P., Dornbrack A., Eckermann S.D., Riese M., Schaeler B., Bacmeister J., Broutman D., Grossmann K.U. Space-based measurements of stratospheric mountain waves by CRISTA 1. Sensitivity, analysis method, and a case study // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2002. V. 107, N D23. P. CRI 6-1–23.
 10. Sivtseva V.I., Ammosov P.P., Gavrilyeva G.A., Koltovskoi I.I., Ammosova A.M. Comparison of internal gravity waves variations in the mesopause region according to observations at Maimaga station with EOS MLS (Aura) temperature data // *Proc. SPIE*. 2019. V. 11208. P. 112089B.
 11. Сивцева В.И., Аммосов П.П., Гаврильева Г.А., Колтовской И.И., Аммосова А.М. Сопоставление волновой активности в области мезопаузы на станции Маймага с температурными данными EOS MLS (AURA) и активностью планетарных волн на станции Тикси // *Вестн. КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2019. Т. 29, № 4. С. 182–89.

V.I. Sivtseva, P.P. Ammosov, G.A. Gavrilyeva, I.I. Koltovskoi. Atmospheric temperature from AURA (MLS) satellite and OH (3-1) measurements in Maimaga.

This paper presents a study of the temperature of the mesopause region (~ 87 km) by measuring the emission of OH (3-1) at high latitude station Maimaga (63.04° N, 129.51° E) and comparing the results with the temperature data Aura (MLS) at 0.002 hPa during 2013–2018. The average rotational temperature of OH (3-1) was compared with Aura (MLS) measured temperatures (T) and the background temperatures (T_{bg}) calculated from them. The obtained result indicates in favor of more correct comparison of the temperature OH (3-1) and temperature T_{bg} calculated from Aura (MLS) data. Comparison of the data mutually confirms the observation of elevated temperatures in the mesopause in the winter period 2014–2015. In the winter periods of 2013–2015, the seasonal course of the temperature OH (3-1) is ~ 10 K higher than the seasonal course of the temperature T_{bg} . During the winter periods of 2015–2018, although the temperature variations are close in value, the seasonal course of the temperature OH (3-1) continues to exceed the values of the seasonal course of temperature T_{bg} . In general, the temperature variations measured by two different methods are qualitatively consistent and reflect the nature of seasonal changes. Temperature differences can be explained by many factors, such as differences in measurement heights and methods.

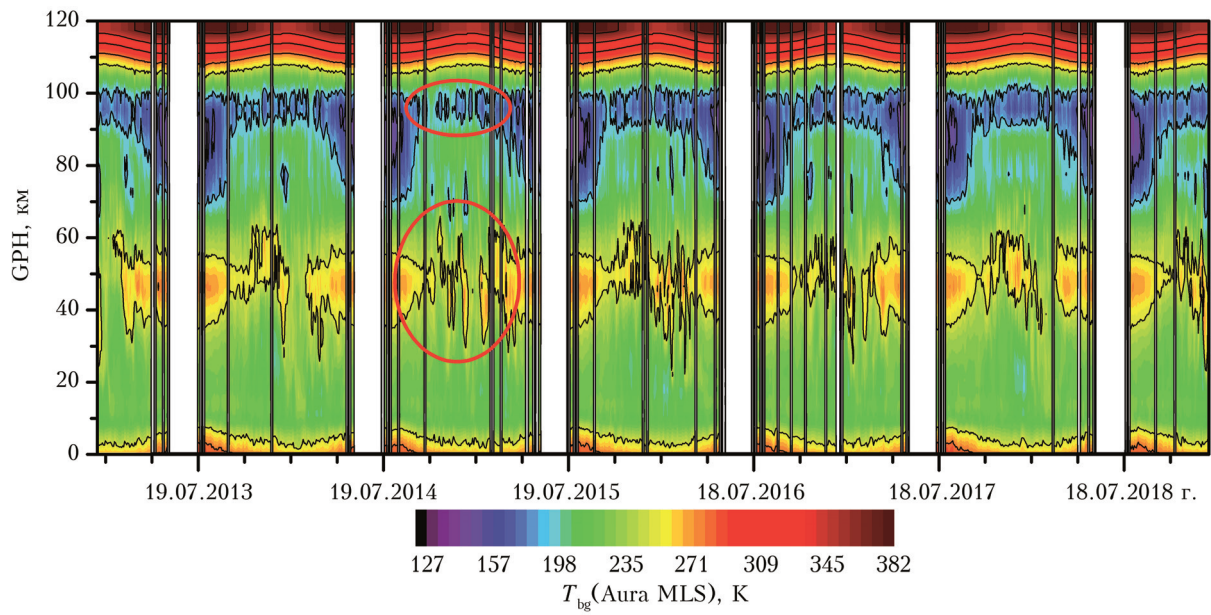


Рис. 2. Вертикальные профили фоновой температуры атмосферы над ст. Маймага в течение 2013–2018 гг. (вертикальные линии соответствуют пробелам в данных Aura MLS)