

# Вариации температуры атмосферы на высотах мезопаузы и нижней термосферы в периоды стратосферных потеплений по данным наземных и спутниковых измерений в различных долготных секторах

И.В. Медведева<sup>1</sup>, А.Б. Белецкий<sup>1</sup>, В.И. Перминов<sup>2</sup>, А.И. Семенов<sup>2</sup>,  
М.А. Черниговская<sup>1</sup>, Н.Н. Шефов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Учреждение Российской академии наук Институт солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН;  
Иркутск 664033, ул. Лермонтова 126 а, а/я 291

E-mail: ivmed@iszf.irk.ru

<sup>2</sup>Учреждение Российской академии наук Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН;  
119017, Москва, Пыхлевский пер., 3

Представлены результаты исследований вариаций температуры атмосферы на высотах мезопаузы и нижней термосферы (МНТ) в различных долготных секторах во время зимних внезапных стратосферных потеплений (ВСП) в 2008, 2009 и 2010 гг. по данным наземных и спутниковых измерений.

Для анализа привлекались температурные данные, полученные с помощью наземных спектрографических измерений эмиссии гидроксила (~87 км) на Геофизической обсерватории (ГО) ИСЗФ СО РАН (52° с.ш., 103° в.д.) и Звенигородской научной станции ИФА РАН (56° с.ш., 37° в.д.). Кроме этого использовались вертикальные профили температуры в стратосфере–мезосфере, полученные с помощью космического аппарата EOS Aura. Проведено сопоставление вариаций среднеширотных значений температуры в области мезопаузы и вариаций температуры стратосферы в периоды ВСП. Показано, что стратосферные потепления оказывают влияние на температурный режим атмосферы в области МНТ. Однако, характер этого проявления, выявленный на разных долготных станциях, не всегда одинаковый. В Европейской долготной зоне в периоды СП происходило понижение температуры мезопаузы. В Восточно-Азиатской – реакция температуры мезопаузы на СП не проявляла такой устойчивой тенденции.

Характер и величина понижения температуры мезопаузы зависит от интенсивности стратосферного потепления. Практически во всех рассматриваемых случаях стратосферных потеплений, когда стратосферная температура увеличивалась на ~30 К, температура в мезопаузе понижалась на ~20 К.

**Ключевые слова:** температура, стратосферные потепления, мезопауза, наземные и спутниковые измерения.

## Введение

Внезапные стратосферные потепления (ВСП) представляют собой особенно значительные метеорологические возмущения в зимней атмосфере. Возмущения термодинамического режима, происходящие во время сильных зимних стратосферных потеплений, не ограничиваются стратосферой, а охватывают большой высотный диапазон от тропосферы до верхней мезосферы и нижней термосферы (Labitzke, 1972). Во время ВСП происходят значительные вариации атмосферных параметров на высотах мезосферы и нижней термосферы (МНТ). В настоящее время одной из основных гипотез возникновения стратосферных потеплений считают волновую теорию, в которой основным механизмом развития стратосферных потеплений считают волновые возмущения планетарного масштаба (Matsuno, 1971). Механизм заключается в усилении планетарных волн, распространяющихся вверх из тропосферы, и взаимодействии их со средним зональным ветровым

потоком. Это взаимодействие приводит к ослаблению или реверсу восточного зимнего стратосферного потока и также индуцирует направленную вниз циркуляцию в стратосфере, приводящую к адиабатическому нагреву и направленную вверх циркуляцию в мезосфере, приводящую к адиабатическому охлаждению. Авторами работы (Liu, Roble, 2002) проведены модельные расчеты реакции атмосферы на высотах мезосфера и термосфера на стратосферное потепление, согласно которым во время ВСП происходит охлаждение области МНТ до высот  $\sim$ 110 км.

Первые экспериментальные результаты, подтверждающие влияние стратосферных потеплений на область мезосфера и нижней термосфера (МНТ), были представлены в работах (Myrabo et al., 1984; Matveeva, Semenov, 1985; Walterscheid, 2000). На основе анализа вариаций вращательной температуры молекул гидроксила (она отображает температуру атмосферы на высотах эмиссионного слоя OH, максимум которого локализован на высоте  $\sim$  87 км) в периоды стратосферных потеплений было выявлено понижение температуры мезопаузы. В работе (Sigernes et al., 2003) на основании 20-летних наземных измерений вращательной температуры OH зарегистрированы периоды понижения температуры в полярной зимней мезосфере, которые совпадали с периодами развития стратосферных потеплений. Авторами работы (Siskind et al., 2005) был проведен анализ вариаций температуры мезосфера и стратосфера во время стратосферных потеплений 2002-2003 гг. по спутниковым данным прибора SABER TIMED. В результате, была также обнаружена отрицательная корреляционная зависимость между вариациями температуры стратосфера и мезосфера (0,3-0,01 гПа ( $\sim$ 80 км)). Более того, они показали, что эта зависимость на больших высотах ослабевает и даже становится положительной. Данный результат противоречил модельным расчетам (Liu, Roble, 2002), которые предсказывали понижение температуры до высот 110 км.

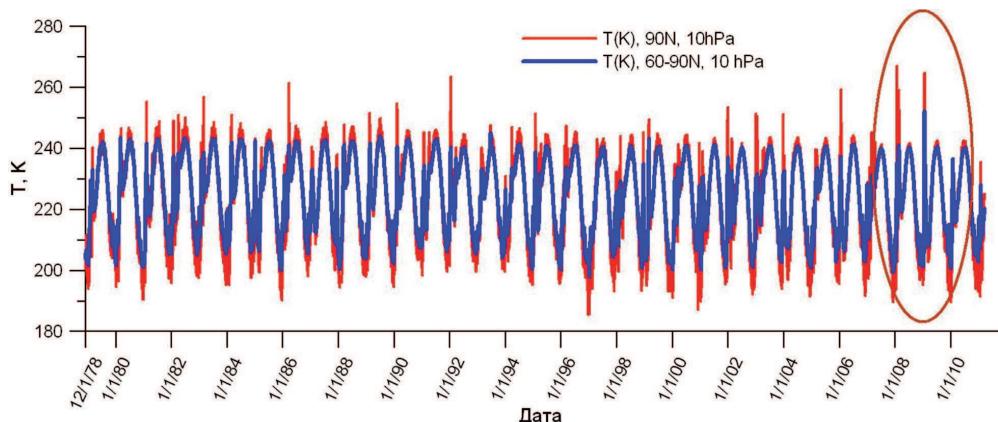
Вопросы о фазовых соотношениях вариаций возмущений температур стратосфера и мезосфера также остаются открытыми. В работе (Myrabo et al., 1984; Matveeva, Semenov, 1985) приводятся сведения о запаздывании отклика мезосфера на стратосферное потепление в 1-2 дня; Hernandez (2004) предположил, что возмущения в мезосфере предваряют потепление в стратосфере на 1-2 месяца, в то время как модельные расчеты (Liu, Roble, 2002) обнаруживают небольшой фазовый сдвиг между температурными аномалиями в мезосфере и стратосфере в сторону запаздывания или опережения.

С середины января по конец февраля 2008, в январе 2009, а также в январе 2010 гг. наблюдались очень интенсивные, длительные по времени стратосферные потепления, простирающиеся на значительной части Северного полушария. В период ВСП в январе 2009 г. на высотном уровне 10 гПа наблюдалось изменение меридионального градиента температуры между 60 с.ш. и полюсом, а также реверс зонального ветра с западного на восточное направление на 60 с.ш., что является признаками ВСП типа “*majors*”. В Табл. 1 приведены максимальные значения температуры стратосфера для высотного изобарического уровня 10 гПа ( $\sim$  31 км) для каждого анализируемого стратосферного потепления.

Таблица 1. Максимальные значения температуры стратосфера для высотного изобарического уровня 10 гПа ( $\sim$  31 км) для стратосферных потеплений 2008-2010 гг.

Год	T <sub>max</sub>	Дата	Координаты очага T <sub>max</sub>
2008	283 К	23.01.08	72.5° с.ш., 90° в.д.
2009	287 К	23.01.09	77.5° с.ш., 40° з.д.
2010	272 К	25.01.10	62.5° с.ш., 122.5° в.д.

Для спокойных условий, при отсутствии СП, температура стратосферы на данной высоте в зимний период составляет  $\sim 210$ - $220$  К. Необходимо отметить, что анализируемые в данной работе стратосферные потепления в 2008-2010 гг., являются одними из самых интенсивных, произошедших в Северном полушарии за период с 1978 г. (рис. 1). Особенно знаменательным было ВСП в январе 2009 г. когда были достигнуты рекордные значения температуры стратосферы. Этому событию посвящен целый ряд публикаций (Labitzke, 2009; Harada et al., 2009).



*Рис. 1. Температура стратосферы на высотном уровне 10 гПа для 90 с.ш. и для 60-90 с.ш. по данным ([http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov/Data\\_services/met/ann\\_data.html](http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/ann_data.html)). Красным эллипсом выделены аналиzuемые в данной работе периоды ВСП*

Целью настоящей работы является исследование вариаций температуры атмосферы на высотах мезопаузы и нижней термосферы во время зимних стратосферных потеплений в 2008, 2009 и 2010 гг. Главной особенностью проводимых исследований является то, что они основаны на данных измерений характеристик атмосферы, полученных в разных долготных зонах – Иркутск ( $52^{\circ}$  с.ш.,  $103^{\circ}$  в.д.) и Звенигород ( $56^{\circ}$  с.ш.,  $37^{\circ}$  в.д.). К анализу привлечены данные наземных и спутниковых измерений температуры атмосферы.

### Анализируемые данные

Для анализа были использованы:

- данные врачающейся температуры гидроксила OH (6-2), полученные в ГО ИСЗФ СО РАН ( $52^{\circ}$  с.ш.,  $103^{\circ}$  в.д.) и на Звенигородской научной станции ИФА РАН ( $56^{\circ}$  с.ш.,  $37^{\circ}$  в.д.);
- данные спутниковых измерений вертикальных профилей температуры в стратосфере–мезосфере, полученные с помощью СВЧ зонда MLS Aura [<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/MLS/index.shtml>];
- данные по температуре для Северного полушария ([http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov/Data\\_services/met/ann\\_data.html](http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/ann_data.html)).

### Данные наземных спектральных измерений температуры мезопаузы

Температура в области мезопаузы определялась с помощью спектра излучения молекул OH. Регистрация спектров в ГО ИСЗФ СО РАН и на Звенигородской научной станции

осуществлялась с помощью одинаковых светосильных дифракционных спектрографов, использующих приемники на ПЗС матрицах, позволяющих регистрировать с высоким спектральным (~ 2-3 Å) и временными (~2-5 мин) разрешениями спектр излучения ночного неба в ближней ИК области. Полученный спектр позволяет определить вращательную температуру OH (6-2), которая соответствует температуре атмосферы на высотах свечения OH (~87 км). Для определения вращательной температуры используются первые 3-4 линии Р-ветви регистрируемой колебательно-вращательной полосы OH.

#### *Спутниковые данные о вертикальных профилях температуры атмосферы*

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° по широте). Вертикальные профили измеряются с интервалом ~25 с через каждые 1,5° (~165 км) вдоль траектории орбиты. Зонд MLS сканирует земной лимб в направлении полета, регистрируя микроволновую эмиссию на частотах 118, 190, 240 и 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, стратосферы, до верхней мезосферы как функций давления в гектопаскалях.

## Результаты

На рис. 2 представлены карты высотно-временного распределения температуры по данным MLS AURA для регионов Иркутска и Звенигорода, радиус поиска 900 км.

Из графиков видно, что во время стратосферных потеплений в январе-феврале 2008, январе 2009 и январе 2010 гг. наблюдались сильные возмущения температуры стратосферы на больших пространственных масштабах. Следует обратить внимание на тот факт, что в анализируемые периоды стратосферных потеплений наблюдались возмущения практически по всей толще средней атмосферы и значительные изменения в вертикальном распределении температурного режима атмосферы. Наибольшие повышения температуры стратосферы наблюдались в интервале высот 40-50 км. Зарегистрированное охлаждение атмосферы на высотах МНТ распределено крайне неравномерно как по высоте, так и по времени.

Для количественного анализа связи между наблюдаемым повышением температуры стратосферы и поведением температуры мезопаузы было проведено сопоставление их вариаций. Результаты этого сопоставления приведены на рис. 3.

Представленные на рис. 3 температурные данные MLS AURA соответствуют ночных пролетам спутника над исследуемыми регионами. Спутниковые данные температуры усреднялись по нескольким высотным уровням и соответствуют интервалу высот стратосферы 3.16-1 гПа (~39-49 км), мезосферы – 0.005-0.002 гПа (~84-88 км). Данные наземных измерений температуры мезопаузы по вращательной температуре OH (6-2) соответствуют высоте ~87 км. В анализе использовались данные температуры вблизи местной полуночи,

усредненные в интервале 23-01 часов местного солнечного времени. В ГО ИСЗФ СО РАН в январе-феврале 2008 г. наземные спектрографические измерения эмиссии гидроксила не проводились.

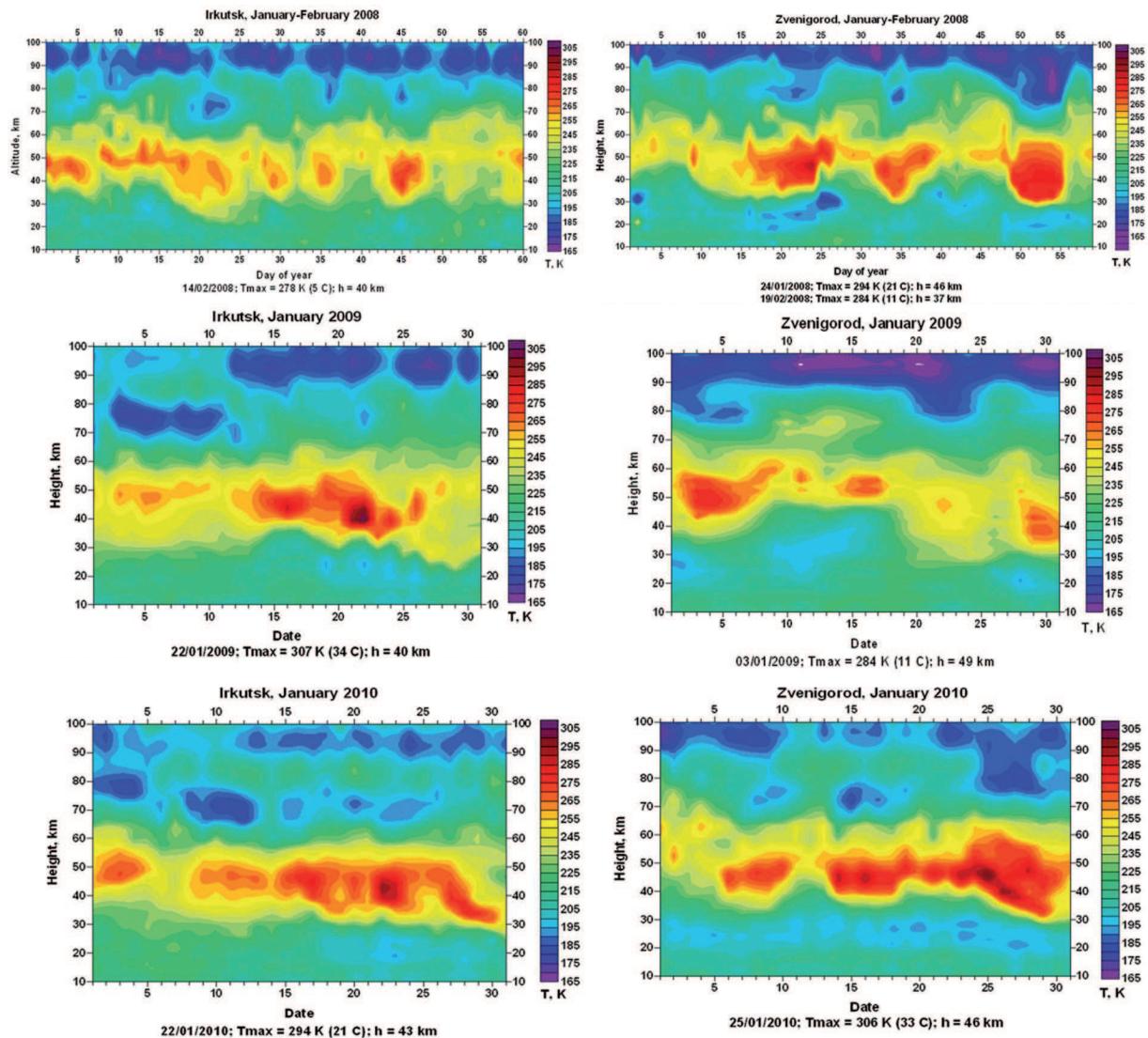


Рис. 2. Высотно-временное распределение температуры по данным MLS AURA для регионов Иркутска и Звенигорода

Временной анализ поведения вариаций температуры в мезопаузе и стратосфере показывает, что понижение температуры в мезопаузе происходит практически одновременно или с небольшим запаздыванием от повышения температуры в стратосфере.

Обращает на себя внимание тот факт, что во время всех рассматриваемых стратосферных потеплений наблюдалось понижение температуры в мезопаузе для региона Звенигорода, тогда как для региона Иркутска картина не столь однозначна. Так, в период действия ВСП 2008 г. над Иркутском наблюдались осцилляции температуры атмосферы на высотах стратосферы и мезопаузы с периодами порядка 6-8 дней, причем, в общем случае вариации температуры в мезопаузе происходили в противофазе с некоторым запаздыванием, хотя, необходимо отметить, в отдельные периоды времени эта противофазность отсутствовала.

Использование данных одновременных наземных и спутниковых измерений позволило провести их сопоставление в различных долготных регионах. Как видно из рис. 3, данные спутниковых измерений температуры в области мезопаузы в разнесенных долготных участках находятся в достаточно хорошем согласии с наземными спектрофотометрическими измерениями.

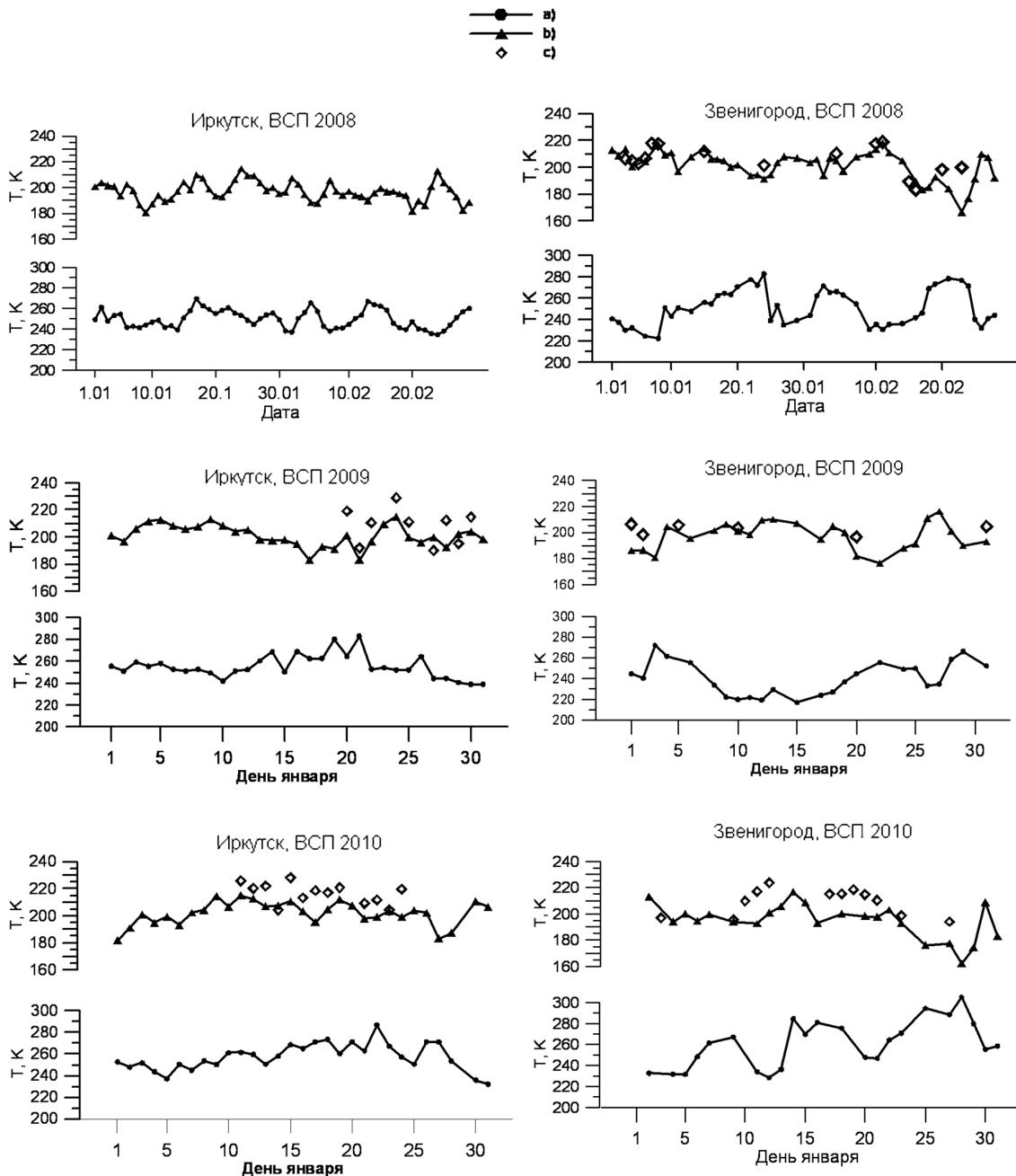


Рис. 3. Вариации температуры атмосферы на разных высотных уровнях:  
 a) температура стратосферы (39-49 км), спутниковые данные;  
 b) температура мезопаузы (84-88 км), спутниковые данные;  
 c)  $T_{OH}$  (~87 км), наземные измерения

Количественные характеристики связи межсуточных значений температуры стратосферы и мезопаузы в периоды ВСП были получены с помощью регрессионного анализа только по данным спутниковых измерений, результаты которого приведены на рис. 4. Там

же показаны и полученные уравнения регрессии. К сожалению, данных наземных измерений, вследствие погодных условий, недостаточно, чтобы провести аналогичный анализ. Поэтому они просто нанесены на графики квадратами, чтобы показать, что они достаточно хорошо соответствуют наблюдаемым зависимостям, полученным по спутниковым данным.

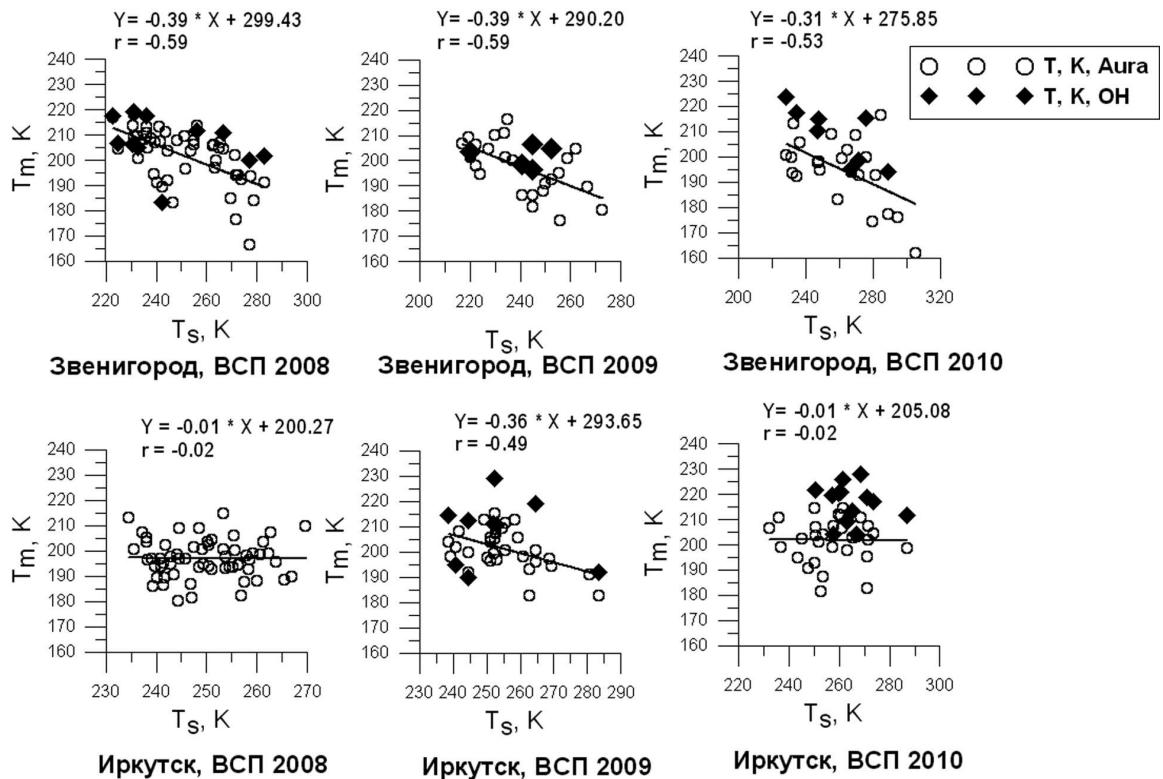


Рис. 4. Зависимость температуры мезопаузы  $T_m$  (84-88 км) от температуры стратосферы  $T_s$  (39-49 км), измеренных с помощью спутника  
Прямые – линии регрессии. Квадраты – данные наземных измерений

Представленные на рис. 4 тенденции поведения межсуточных значений температуры мезопаузы от температуры стратосферы, выявленные для всех трех анализируемых стратосферных потеплений в Звенигороде и для ВСП 2009 в Иркутске позволили обнаружить их общий характер, который описывается уравнением:

$$T_m = -(0.35 \pm 0.04) * T_s + 288 \pm 12, \quad r = -0.55,$$

где  $r$  – коэффициент корреляции.

Необходимо отметить, что для ВСП 2008 и 2010 гг. в регионе Иркутска связь между межсуточными вариациями температуры мезопаузы (84-88 км) и стратосферы (39-49 км) не выявлена. Возможно, это обусловлено тем, что согласно рис.2 охлаждение атмосферы в периоды ВСП происходило на больших высотах (~90-100 км), что может свидетельствовать о более сложном характере взаимодействия в Восточно-Азиатском регионе динамических и температурных процессах в эти периоды. В любом случае, данный результат, как и результат работы (Siskind et al., 2005), не соответствует модельным расчетам (Liu, Roble, 2002), согласно которым во время ВСП должно наблюдаться устойчивое понижение температуры в области МНТ вплоть до высот 110 км.

## **Заключение**

Проведенный анализ вариаций среднеширотных значений температуры в различных долготных секторах во время зимних стратосферных потеплений 2008-2010 гг. выявил возмущения температурного распределения по всей толще средней атмосферы, от стратосферы до нижней термосферы.

Выявленный характер и величина понижения температуры атмосферы на высотах МНТ зависит от интенсивности стратосферного потепления. Практически во всех рассматриваемых случаях стратосферных потеплений, когда стратосферная температура увеличивалась на ~30 К, температура в мезопаузе понижалась на ~20 К.

Показано, что характер этого проявления, выявленные на разных долготных станциях, не всегда одинаковый. В Европейской долготной зоне в периоды СП происходило понижение температуры мезопаузы. В Восточно-Азиатской – реакция температуры мезопаузы на СП не проявляла такой устойчивой тенденции.

Оценка временного поведения вариаций температуры в мезопаузе и стратосфере показывает, что понижение температуры в мезопаузе происходит практически одновременно или небольшим запаздыванием от повышения температуры в стратосфере.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 10-05-0062-а и 09-05-00757-а.

## **Литература**

1. *Harada Y., Goto A., Hasegawa H., Fujikawa N., Naoe H., Hirooka T.* A major stratospheric sudden warming event in January 2009 // J. Atmos. Sci., 2010. doi: 10.1175/2009JAS3320.1.
2. *Hernandes G.* Winter mesospheric temperatures above South Pole (90S): Mesospheric cooling during 2002 // Geophys. Res. Lett., 31, L07109, doi: 10.1029/2004GL019414. 2004.
3. *Labitzke K., Kunze M.* On the remarkable Arctic winter in 2008/2009 // J. Geoph. Res., 2009. V. 114, D00I02. doi:10.1029/2009JD012273.
4. *Labitzke K.* Temperature changes in the mesosphere and stratosphere connected with circulation changes in winter // J. Atmos. Sci., 1972. V. 29. № 4. P. 756–766.
5. *Liu H.-L. and Roble R.G.* A study of a self-generated stratospheric sudden warming and its mesospheric–lower thermospheric impacts using the coupled TIME-GCM/CCM3 // J. Geoph. Res., 2002. V. 107, № D23, 4695, doi:10.1029/2001JD001533.
6. *Matsuno T.* A dynamical model of the Stratospheric Sudden Warming // J. Atmos. Sci., 1971. V. 28. P. 1479-1494.
7. *Matveeva O.A., Semenov A.I.* The results of hydroxyl emission observations during MAP/WINE period; stratospheric warmings (February, 1984) // MAP/WINE Newsletters. 1985. 3, 4-5.
8. *Myrabo H.K., Deehr C.S., and Lybekk B.* Polar cap OH airglow rotational temperature at the mesopause during a stratospheric warming event // Planet. Space Sci., 1984. 32. P. 853-856.
9. *Walterscheid R.L., Sivjee G.G., Roble R.G.* Mesospheric and lower thermospheric manifestations of a stratospheric warming event over Eureka, Canada (80N) // Geophys. Res. Lett., 2000. 27(18), 2897.

# **Variations in atmospheric temperature at the mesopause and lower thermosphere heights during periods of stratospheric warming according to the data of ground-based and satellite measurements at different longitudinal sectors**

**I.V. Medvedeva<sup>1</sup>, A.B. Beletsky<sup>1</sup>, M.A. Chernigovskaya<sup>1</sup>,  
V.I. Perminov<sup>2</sup>, A.I. Semenov<sup>2</sup>, N.N. Shefov<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Institute of Solar-Terrestrial Physics (ISTP), Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia*

*<sup>2</sup>Obukhov Institute of Atmospheric Physics (IAP), Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
e-mail: ivmed@iszf.irk.ru*

The results of studies of variations in atmospheric temperature at the mesopause and lower thermosphere (MLT) heights in different longitudinal sectors during the sudden stratospheric warming (SSW) events in 2008-2010 are presented. The research are made on the data of ground-based and satellite measurements.

The data about the variations 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) were analyzed. Satellite data on atmospheric temperature vertical profiles obtained by the EOS Aura Microwave Limb Sounder (MLS) were involved.

Temperature variations at the mesopause height were compared with those at stratospheric height during SSWs. It was shown that SSWs affect on the temperature regime of the atmosphere at the MLT height. However, the character of the manifestations at different longitudinal stations was not always identical. In the European longitudinal zone the mesopause temperature decreased during all analyzed SSWs. In East Asia – reaction of the mesopause temperature on SSW did not show such a stable tendency.

The nature and magnitude of the mesopause temperature decrease depends on the intensity of stratospheric warming. Practically during all analyzed SSW events, when the stratospheric temperature increased by ~30 K, the mesopause temperature decreased by ~20 K.

**Keywords:** temperature, stratospheric warming, mesopause, ground-based and satellite measurements.