

Мезосферно-термосферные проявления стратосферных потеплений: совместное использование спутниковых и наземных измерений

Н.Н. Перцев¹, А.Б. Андреев², Е.Г. Мерзляков³, В.И. Перминов¹

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

119017 Москва, Пыжевский пер., 3

E-mail: n.pertsev@bk.ru

² ДТОО «Институт ионосферы», АО «НЦКИТ» Национального космического агентства Республики Казахстан, 050020, Республика Казахстан, г. Алматы, Каменское плато

E-mail: imtara-zum@rambler.ru

³ Институт экспериментальной метеорологии, ФГБУ НПО «Тайфун», Росгидромет 249038, Обнинск, ул. Победы 4

E-mail: eugmer@typhoon.obninsk.ru

На основе среднеширотных наземных и спутниковых измерений температуры и ветра в верхней мезосфере и нижней термосфере (МНТ) в течение зим 2007/08 и 2009/10 гг. исследуются особенности поведения динамики и энергетики в данной области атмосферы во время внезапных стратосферных потеплений (ВСП). Показано, что температурная реакция в области МНТ на ВСП имеет долготную зависимость, обусловленную наложением планетарных волн различных периодов. Для МНТ в данные периоды времени обнаружена зависимость между приливными вариациями температуры и изменениями зонального ветра.

Ключевые слова: стратосферные потепления, мезосфера, нижняя термосфера, температура, ветер, планетарные волны, приливы.

Введение

Еще в 70–80-е годы было обращено внимание на то, что во время стратосферных потеплений меняется температурный и ветровой режимы в области мезопаузы (80–100 км). В результате были построены первые эмпирические модели отклика характеристик данной области атмосферы на стратосферное потепление (Shefov, 1973; Schminder and Kürschner, 1981). Никакой законченной концепции этого явления в те годы построено не было, поскольку отдельные методы измерения с ограниченными пространственно-временными возможностями использовались поодиночке. Ситуация в исследованиях изменилась в последние два десятилетия с развитием спутниковых методов измерения температуры средней атмосферы, в том числе, с помощью радиометров, установленных на борту таких спутников, как UARS (прибор MLS, 1991–2005 гг.) (Barath et al., 1993), TIMED (SABER с 2002 г. по н/в) (Mlynczak, 1997), AURA (MLS, 2004 г. по н/в) (Schwartz et al., 2008). Спутниковые данные, успешно дополняя наземные, ведут к увеличению объема информации и возможности более детального анализа исследуемых геофизических явлений.

В настоящей статье приводятся некоторые результаты одновременного анализа спутниковых и нескольких наземных методов для двух зим (2007/08 и 2009/10 гг.) с целью выявления отклика области верхней мезосферы и нижней термосферы (МНТ) – мезопаузы – на стратосферные потепления.

Используемые данные

В настоящей работе используются данные, полученные с помощью спутниковых и наземных измерений в течение зимних месяцев 2007/08 и 2009/10 гг., сопровождавшихся стратосферными потеплениями: 1) температура гидроксильного слоя (с максимумом излучения на высоте ~87 км и полушириной около 10 км), полученная по регулярным наземным спектрофотометрическим измерениям атмосферного ИК-излучения на Звенигородской обсерватории Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН ($55,7^{\circ}\text{N}$, $36,8^{\circ}\text{E}$) (Семенов и др., 2002) и с помощью интерферометра SATI Института ионосферы в Алма-Ате ($43,3^{\circ}\text{N}$, $76,9^{\circ}\text{E}$) (Sargoitchev et al., 2004); 2) зональная и меридиональная компоненты скорости ветра на высоте ~90 км, определенные из регулярных наземных радиометеорных измерений в Обнинске, Институт Экспериментальной Метеорологии НПО «Тайфун» (Портнягин и др., 2010); 3) температура, полученная для барических уровней 0,5 и 0,2 Па (примерно соответствующих геометрическим высотам 83,5 км и 88 км) с помощью радиометра MLS околомиллиметрового диапазона со спутника Aura (Schwartz et al., 2008). Для сравнения с наземными данными измерения брались по всей параллели на широтах $\Phi = 56^{\circ}$ и 43° с. ш. Стратосферные потепления определялись по средней температуре на барической высоте 10 гПа в широтной области более 60° с. ш. по данным NOAA (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/temperature>). Пространственно-временные особенности используемых типов данных представлены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение возможностей используемых измерительных методов

Измеряемая величина	Охват времени суток (LT-местное время)	Охват широты и долготы	Центральная высота и вертикальная полуширина слоя измерения, км	Зависимость от погодных условий
Радиометеорная скорость ветра (две горизонтальных компоненты)	24 часа	$\Phi = 55^{\circ}, \Lambda = 36^{\circ}$	90 ± 7	Независимо
Температура гидроксильного слоя: Звенигород Алма-Ата	8–12 часов ночью	$\Phi = 57^{\circ}, \Lambda = 36^{\circ}$ $\Phi = 43^{\circ}, \Lambda = 77^{\circ}$	87 ± 5	В малооблачные ночи
Температура MLS/Aura	Два LT: 2 часа 30 мин и 13 часов	Все широты и долготы	$88 \pm 5;$ $83,5 \pm 5$	Независимо

Как видно, используемые методы выдают данные в близком высотном диапазоне и дополняют друг друга по широтно-долготному и временному охвату. Комбинация нескольких методов наблюдений позволяет отслеживать поведение всех основных составляющих динамики в области МНТ: преобладающего ветра, средней температуры, планетарных, приливных и гравитационных волн во время стратосферных потеплений.

Результаты анализа

Ниже представлены некоторые важные результаты совместного анализа данных по МНТ, относящиеся к периодам стратосферных потеплений. На *рис. 1* (слева) показаны значения температуры в данной области атмосферы для зимы 2009/10 г., полученные из наземных и спутниковых измерений вблизи Звенигородской обсерватории ($\Phi = 56,1 \pm 1,5^\circ$ с. ш., $\Lambda = 35,5 \pm 7^\circ$ в. д.). Значения температуры гидроксильного излучения, показанные черными точками, относятся к диапазону местного времени (LT) от 2 до 3 часов, взятому для сравнения с ночных спутниковых измерениями, для которых $LT \approx 2$ часа 30 минут. Цветными точками обозначены температуры, полученные прибором MLS/Aura. Как показывает *рис. 1*, наземные и спутниковые температуры достаточно удовлетворительно согласуются друг с другом, что позволяет анализировать их совместно. Также на данном рисунке по данным MLS/Aura приведена среднезональная температура (красная сплошная линия – ее дневное значение, синяя кривая – ее ночное значение). Хорошо видно, что реакция среднезональной температуры на ВСП слабее, чем вариации температуры, наблюдаемые наземными и спутниковыми методами вблизи Москвы. Сказанное выше справедливо и для области Алма-Аты (*нижняя часть рис. 1*), хотя между московским и алма-атинским графиками можно отметить некоторые различия, связанные, по-видимому, с широтным ослаблением отклика области МНТ на ВСП от Москвы к Алма-Ате.

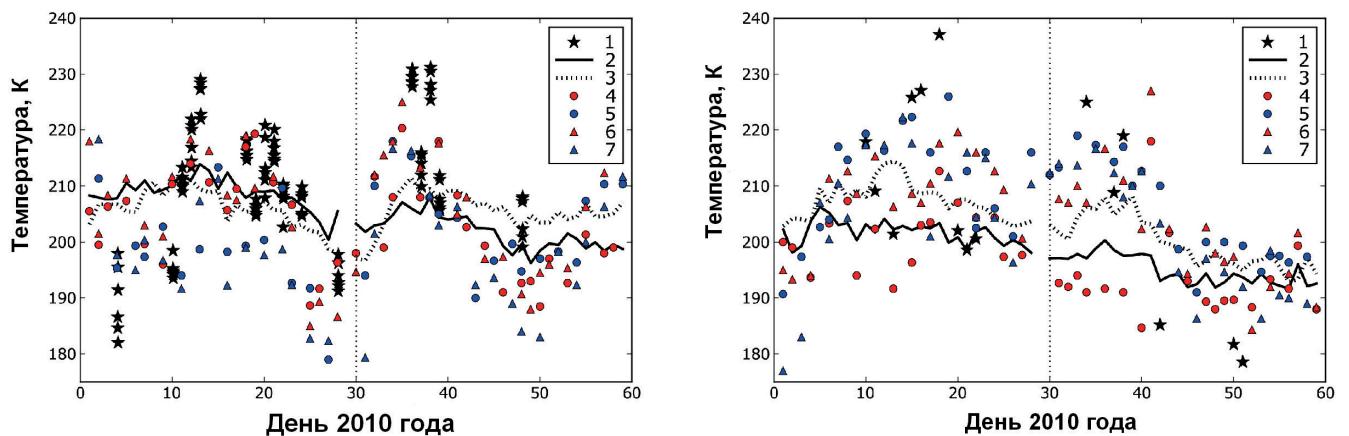


Рис. 1. Температура в области МНТ вблизи Москвы (слева) и Алма-Аты (справа) в январе–феврале 2010 г.

Обозначения: 1 – температура по измерениям гидроксильного излучения;
2 – зонально-осредненная дневная кривая полу суммы температур на барических высотах 0,2 Па (88 км) и 0,5 Па (83,5 км) по данным MLS/Aura;
3 – то же, но ночная кривая; 4 – дневные значения температуры на барической высоте 0,2 Па согласно MLS/Aura вблизи Москвы и Алма-Аты;
5 – то же, но ночные значения; 6 – то же, что (4), но для барической высоты 0,5 Па; 7 – то же, что (6), но ночные значения;
вертикальная пунктирная линия соответствует максимуму стратосферного потепления на уровне 10 гПа (30 января 2010 г.)

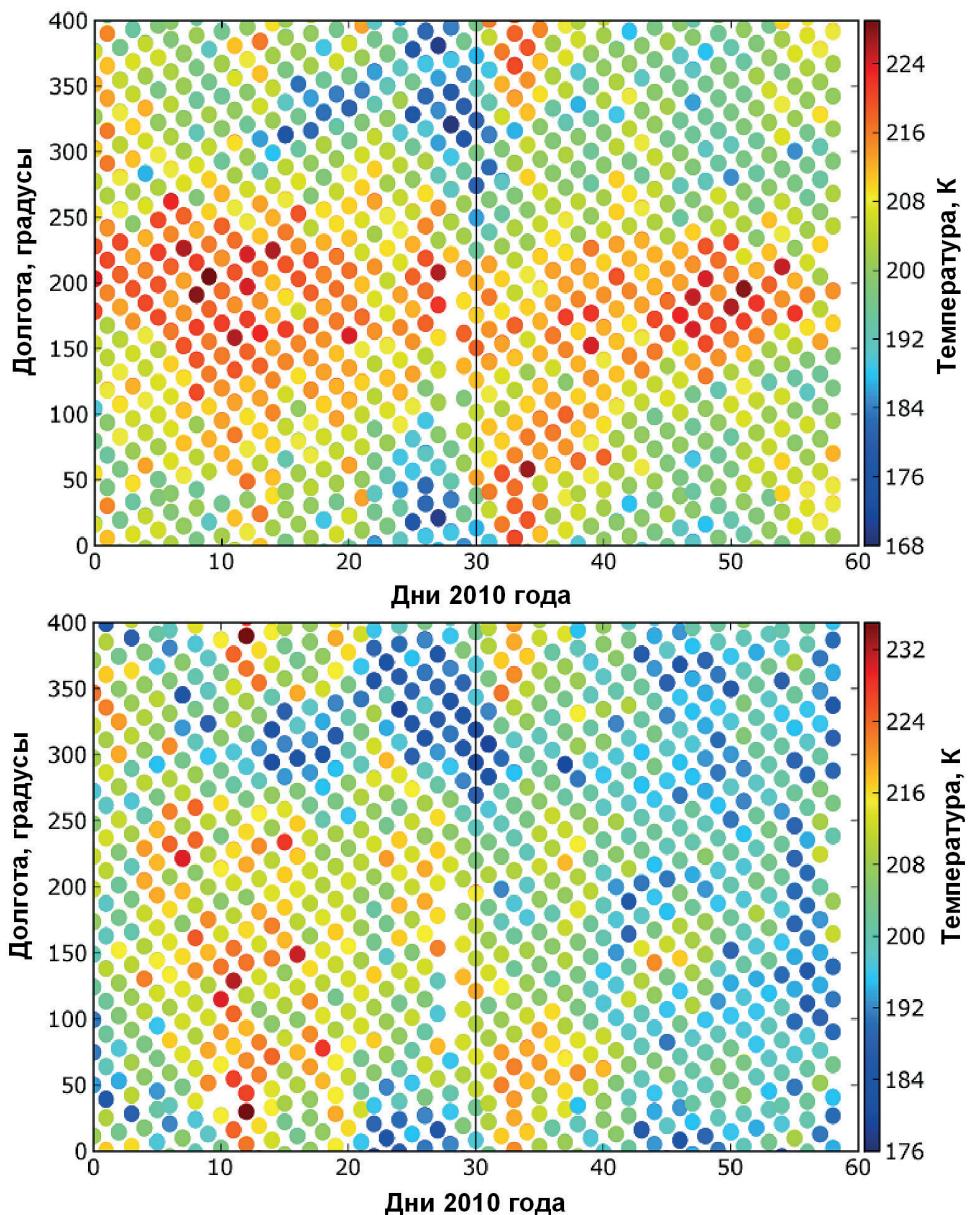


Рис. 2. Долготно-временной разрез температуры по данным MLS/Aura на широте Москвы (сверху) и Алма-Аты (снизу) и барической высоте 0,2 Па в январе–феврале 2010 г. Вертикальная линия соответствует максимуму стратосферного потепления на уровне 10 гПа.

Для удобства прослеживания волновых возмущений полоса долгот 360–400° повторяет полосу 0–40°

С целью анализа различий между среднезональным и локальным поведением температуры были построены ее долготно-временные разрезы по измерениям MLS/Aura в течение зимы 2010 г. для широт, на которых расположены Москва и Алма-Ата (рис. 2). Разрезы на данном рисунке демонстрируют сильные неоднородности температуры, связанные с квазистационарными и бегущими планетарными волнами. На широте Москвы квазистационарная волна с зональным волновым числом 1 располагается в начале года гребнем температуры около 200° в. д., а на широте Алма-Аты около 150° в. д. Кроме нее, анализ позволяет выделить бегущие на запад волны с зональным числом 1 и периодом около 10 суток. В результате суперпозиции данных двух волн (при участии нескольких более слабых

планетарных волн) на различных долготах получается разный временной ход температуры, который при этом заметно отличается от среднезонального. Так, сильное отрицательное возмущение температуры в области мезопаузы во время ВСП 2010 г., зафиксированное наземным спектрофотометрическим методом в Звенигороде, существовало лишь в довольно узкой полосе долгот и смещалось пространственно к западу. Таким образом, можно сделать вывод, что совокупность планетарных волн в верхней атмосфере ответственно за локальные особенности температурного отклика мезопаузы на ВСП.

Более короткопериодные волны – приливные и гравитационные – также проявляют себя в период стратосферных потеплений. О масштабе изменения температуры вследствие приливов можно судить по различию между ночных и дневными температурами, измеренными MLS/Aura (*рис. 1*). Детальный анализ приливов по ветровым и температурным данным в период стратосферных потеплений предполагается представить в будущем в отдельной работе. Мерой активности внутренних гравитационных волн (ВГВ) для наземных температурных и ветровых измерений является их внутрисуточное или внутриночное стандартное отклонение измеряемой величины (найденное после исключения основных приливных гармоник). Как было показано в (Перминов и Перцев, 2013) методом наложения эпох, ВГВ-активность в области мезопаузы возрастает на несколько суток после стратосферных потеплений. В ходе настоящего анализа было замечено, что существует корреляция между стандартным отклонением температуры, обусловленным приливами (24-, 12- и 8-часовыми гармониками), и преобладающим зональным ветром. Она продемонстрирована на *рис. 3* по данным наблюдений температуры гидроксильного излучения на Звенигородской обсерватории и радиометеорных измерений ветра в области мезопаузы над Обнинском для зим 2007/08 и 2009/10 гг. Каждая точка соответствует одной ночи измерений. Регрессионная зависимость значима с вероятностью около 0,9 для каждой из зим и около 0,95 для объединения двух зим. Существование такой корреляции позволяет предположить тесную взаимосвязь между преобладающим ветром и приливными движениями, которая может возникать, в частности, из-за зависимости изменения амплитуд и фаз приливных и гравитационных волн с высотой

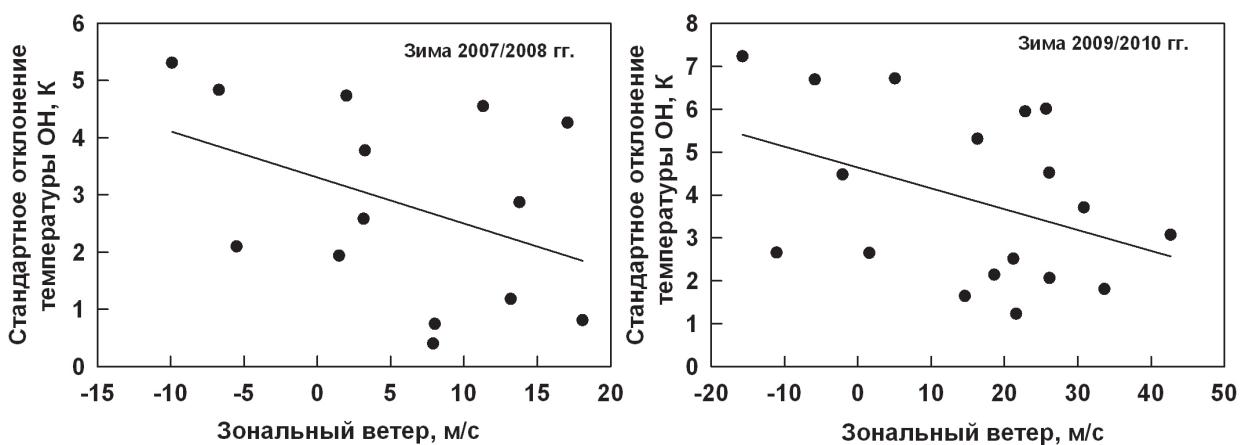


Рис. 3. Корреляция между стандартным отклонением температуры OH (по наблюдениям на Звенигородской обсерватории), обусловленным внутрисуточными приливами, и преобладающим зональным ветром (радиометеорные измерения в Обнинске) для зим 2007/08 (слева) и 2009/10 гг. (справа)

от средней скорости ветра и температурного градиента. Изменения последнего, как показано на *рис. 4*, соответственно для широт 56° и 43° , действительно сопровождают период стратосферных потеплений и, по всей видимости, должны особенно заметно влиять на распространение гравитационных волн. Мерой температурного градиента на *рис. 4* служит разница между температурами на барических высотах 0,2 и 0,5 Па по данным MLS/Aura. Данные рисунки представляют собой такие же долготно-временные разрезы, что и *рис. 2*, с теми же планетарно-волновыми структурами, но гребни и ложбины для разности температур оказываются в других местах. Таким образом, планетарные волны осуществляют пространственно-временную модуляцию распространения гравитационных волн, а гравитационные, в свою очередь, передают импульс и энергию среднему течению, изменяя его и влияя на картину планетарных и приливных волн.

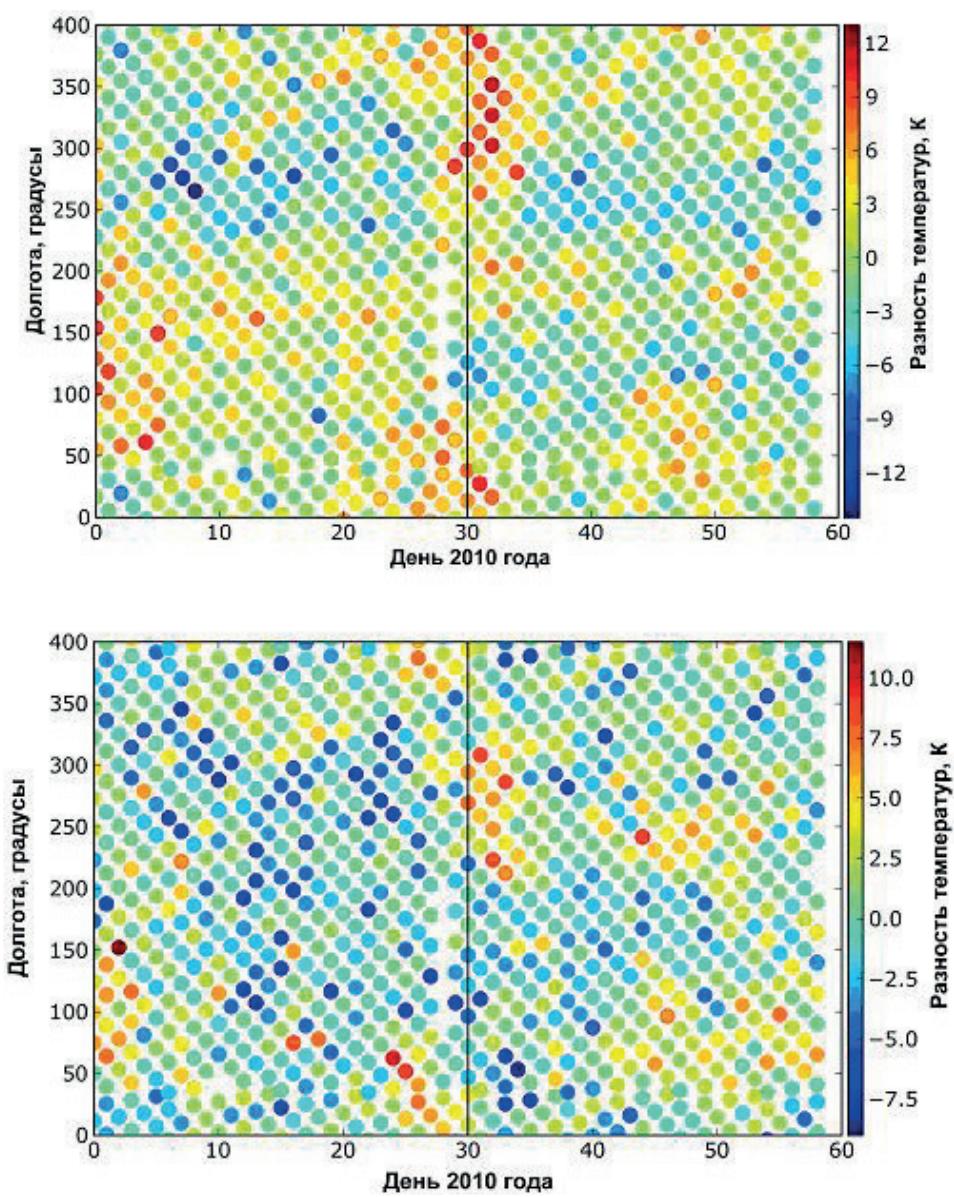


Рис. 4. Долготно-временной разрез разности температур между барическими высотами 0,2 и 0,5 Па по данным MLS/ Aura на широте Москвы (сверху) и Алма-Аты (снизу) в январе–феврале 2010 г. Вертикальная линия соответствует максимуму стратосферного потепления на уровне 10 гПа

Выводы

1. Спутниковые температурные данные на высотах мезопаузы при ночных измерениях MLS/Aura вблизи Москвы довольно хорошо согласуются с температурой гидроксильного излучения.

2. В периоды стратосферных потеплений ночные стандартные отклонения гидроксильной температуры, обусловленные атмосферными приливами, коррелируют с изменениями зонального ветра в области мезопаузы.

3. Реакция температурного режима в локальной области верхней мезосфера – нижней термосфера на стратосферное потепление определяется как поведением среднезональной температуры, так и, в большой степени, наложением планетарных волн разного периода.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №10-05-00198.

Литература

1. *Перминов В.И., Перцев Н.Н.* Поведение эмиссий и температуры мезопаузы во время стратосферных потеплений по наблюдениям в Звенигороде // Геомагнетизм и аэрономия. 2013 (в печати).
2. *Портнягин Ю.И., Мерзляков Е.Г., Соловьева Т.В., Макаров Н.А.* Исследование динамических процессов в верхней атмосфере методом радиолокации метеорных следов // Проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды. 2010. Т. 1. С. 201–217.
3. *Семенов А.И., Баканас В.В., Перминов В.И., Железнов Ю.А., Хомич В.Ю.* Спектр излучения ночной верхней атмосферы Земли в ближней инфракрасной области // Геомагнетизм и аэрономия. 2002. Т. 42. № 3. С. 407–414.
4. *Barath F.T., Chavez M.C., Cofield R.E., Flower D.A., Frerking M.A., Gram M.B., Harris W.M., Holden J.R., Jarnot R.F., Kloezenman W.G., Klose G.J., Lau G.K., Loo M.S., Maddison B.J., Mattauch R.J., McKinney R.P., Peckham G.E., Pickett H.M., Siebes G., Soltis F.S., Suttie R.A., Tarsala J.A., Waters J.W., Wilson W.J.* The Upper Atmosphere Research Satellite Microwave Limb Sounder Instrument // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P. 10751–10762.
5. *Mlynczak M. G.* Energetics of the mesosphere and lower thermosphere and the SABER experiment // Adv. Space Res. 1997. V. 20. No. 6. P. 1177–1183.
6. *Sargoytchev S. I., Brown S., Solheim B. H., Cho Y., Shepherd G. G., López-González M.J.* Spectral Airglow Temperature Imager (SATI): a Ground-Based Instrument for the Monitoring of Mesosphere Temperature // App. Opt. 2004. V. 43. No. 30. P. 5712–5721.
7. *Schminder R., Kürschner D.* Wind field anomalies in the upper mesopause region over Central Europe and the major stratospheric warming in February 1981 // J. Atmos. Terr. Phys. 1981. V. 43. No. 7. P. 735–736.
8. *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. V. 113. D15S11, doi:10.1029/2007JD008783.

9. Shefov N.N. Relations between the hydroxyl emission of the upper atmosphere and the stratospheric warmings // Gerlands Beitr. Geophysik. 1973. V. 82. No. 2. P. 111–114.

Mesosphere-thermosphere manifestations of stratospheric warmings: joint use of satellite and ground-based measurements

N.N. Pertsev¹, A.B. Andreev², E.G. Merzlyakov³, V.I. Perminov¹

¹ *Obukhov Institute for Atmospheric Physics, RAS
Russia, 119017, Moscow, 3 Pyzhevsky Per.*

E-mails: n.pertsev@bk.ru; v.perminov@rambler.ru

² *Ionospheric Institute, NCSIT, National Space Agency of the Republic of Kazakhstan
Republic of Kazakhstan, 050020 Almaty, Kamenskoe plato*

E-mail: umzara-zum@rambler.ru

³ *Institute of Experimental Meteorology, RPA “Typhoon”, Roshydromet
Russia, 249038, Obninsk, 4 Pobedy Str.*

E-mail: eugmer@typhoon.obninsk.ru

The features of the behavior of the dynamics and energy in the upper mesosphere and lower thermosphere (MLT) during sudden stratospheric warming (SSW) are investigated on the basis of the mid-latitude ground and satellite measurements of temperature and wind around MLT for winters 2007/2008 and 2009/2010. It is shown that the temperature response of the MLT on the SSW has longitude dependence, which is due to the superposition of planetary waves with different periods. For given winters in the MLT region the founded is the relationship between the tide activity and changes in the zonal wind.

Keywords: stratospheric warming, mesopause, temperature, wind, planetary waves, tides.