

УДК 550.388

ПОВЕДЕНИЕ ЭМИССИЙ И ТЕМПЕРАТУРЫ МЕЗОПАУЗЫ ВО ВРЕМЯ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ

© 2013 г. В. И. Перминов, Н. Н. Перцев

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва

e-mail: v.perminov@rambler.ru, n.pertsev@bk.ru

Поступила в редакцию 25.11.2011 г.

После доработки 25.01.2012 г.

По многолетним наблюдениям в Звенигороде получены закономерности изменений интенсивности излучений гидроксила (полоса (6-2) $\lambda 834.4$ нм) и Атмосферной системы молекулярного кислорода (полоса A(0-1) $\lambda 864.5$ нм) мезопаузы, температуры гидроксила и ее ночной изменчивости во время зимних внезапных стратосферных потеплений.

DOI: 10.7868/S0016794013060102

1. ВВЕДЕНИЕ

Внезапные стратосферные потепления (ВСП) являются наиболее масштабными событиями в зимней средней атмосфере, длящиеся от нескольких суток до нескольких недель. Согласно Matsuno [1971] природа ВСП связана с распространением вверх крупномасштабных планетарных волн, возникающих в тропосфере, и их взаимодействием с зимним страто-мезосферным циркумполярным вихрем. В результате происходит замедление вращения (с запада на восток) этого вихря, а в случае достаточно мощной планетарной волны — его реверс. После этого в стратосфере начинается значительный рост температуры (>25 К).

Модельные расчеты, представленные в работе [Liu and Roble, 2002], показывают, что замедление вращения страто-мезосферного полярного вихря и его последующее обращение благоприятствует проникновению внутренних гравитационных волн (ВГВ) направленных с запада на восток из тропосферы в верхние слои атмосферы. Привносимый ими туда импульс ведет в итоге к изменению меридионально-вертикальной циркуляции и температурного режима верхней атмосферы. Выполненные в работе расчеты свидетельствуют, что в периоды стратосферных потеплений должно происходить существенное охлаждение мезосферы и разогрев в нижней термосфере. Кроме того, в данных областях атмосферы меняется вертикальный перенос газовых компонент. Особенно это касается атомарного кислорода, имеющего большое химическое время жизни выше 80 км. Атомарный кислород является активным атмосферным элементом. Участвуя во многих химических реакциях, он играет через радиационные процессы существенную роль в балансе энергии верхней атмосферы.

Однако, представленная в публикации [Liu and Roble, 2002] модель, показывает как согласие с отдельными экспериментальными наблюдениями [Матвеева и Семенов, 1986; Cho et al., 2004], так и расхождение [Shefov, 1973; Sigernes et al., 2003; Siskind et al., 2005]. Поэтому неоднозначность полученных выводов требует дополнительных исследований.

Целью данной работы является анализ изменений таких характеристик мезопаузы как интенсивности и температуры гидроксильного излучения, максимум которого находится на 87 км, и интенсивности Атмосферной системы молекулярного кислорода (~ 95 км) во время сильных зимних стратосферных потеплений. Известно, что рассматриваемые эмиссии мезопаузы связаны с рекомбинационными процессами атомарного кислорода. В анализе использованы данные многолетних (2000–2010 гг.) спектральных наблюдений колебательно-вращательных полос $O_2A(0-1)$ $\lambda 864.5$ нм и $OH(6-2)$ $\lambda 834.4$ нм, ведущихся вблизи Звенигорода.

2. ИЗМЕРЕНИЯ ЭМИССИЙ И ТЕМПЕРАТУРЫ МЕЗОПАУЗЫ

На Звенигородской обсерватории (55.7° N, 36.8° E) Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН для наблюдений атмосферного излучения в области 0.8–1.0 мкм используется дифракционный спектрограф СП-50 [Герасимова и Яковлева, 1956] с высокочувствительной инфракрасной цифровой ПЗС-камерой. Детальное описание характеристик спектрального прибора дано в работах [Семенов и др., 2002; Перминов, 2009]. Зарегистрированные за 10-минутные экспозиции

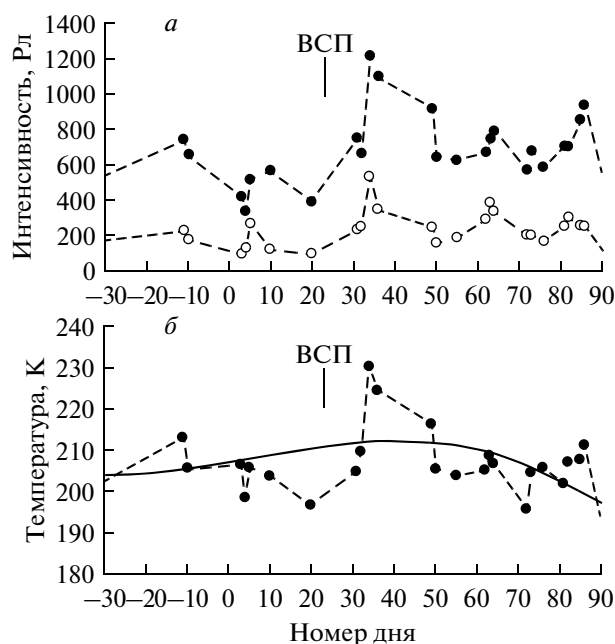


Рис. 1. Поведение интенсивностей (а) полос ОН(6-2) (черные кружки), О₂А(0-1) (белые кружки) и температуры (б) гидроксила в течение зимнего периода 2008–2009 гг. Точки – средненочные значения. Вертикальной чертой обозначен момент максимума ВСП (23 января 2009 г.). Сплошной линией показан сезонный ход температуры. Нумерация дней дана относительно 00 ч 1 января 2009 г.

спектры излучения ОН и О₂А(0-1) позволяют определять интенсивности отдельных вращательных линий и полос исследуемых атмосферных эмиссий с погрешностью 1–2%, а температуры – с точностью ~2 К. Методика определения интенсивностей полос атмосферных эмиссий гидроксила и молекулярного кислорода, а также вращательной температуры гидроксила дана в статьях [Перминов и Перцев, 2009; Перминов, 2009]. Общепринято [Шефов и др., 2006; Перминов и др., 2007], что вращательная температура гидроксила, определяемая по первым 3–4-м линиям ветвей его полос, находится в термодинамическом равновесии с окружающей средой и отражает температуру атмосферы на высоте максимума излучающего слоя ОН (~87 км). Абсолютная калибровка регистрируемых спектров атмосферного излучения позволяла получать интенсивности полос в абсолютных единицах – рэлей (1 Рл = = 10⁶ фотон см⁻² с⁻¹). Для анализа использованы данные, полученные только в ясные ночи с декабря по март, общее число которых за 2000–2010 гг. составило 325.

3. АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа значения интенсивностей полос О₂А(0-1) и ОН(6-2), а также вращательной температуры гидроксила, полученные с экспозицией

10 мин, усреднялись за ночь. Кроме того, в результате статистической обработки были получены стандартные отклонения температуры (σ_T) от ее средненочного значения для каждой ночи. Хотя влияние флуктуаций темнового тока на точность определения вращательной температуры было не велико, тем не менее, его вклад при определении стандартного отклонения температуры учитывался. Полученные стандартные отклонения являются результатом вариаций температуры вследствие приливных колебаний и распространения ВГВ и могут быть взяты как индикатор волновой активности в течение ночи [Offermann et al., 2009]. Для анализа были взяты σ_T только для ночей, в течение которых длительность измеряемого температурного ряда была не менее трех часов.

В настоящем анализе внезапные стратосферные потепления определялись по среднезональным температурным и ветровым данным для полярной области (60–90° N) стратосферы, представленными в Интернете Центром климатического прогнозирования Национальной службы погоды США (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere>). За период 2000–2010 гг. можно отметить 18 стратосферных потеплений, половина из которых классифицируется как значительные внезапные стратосферные потепления. Такие потепления характеризуются положительным широтным градиентом роста температуры на высотах ~30 км (10 гПа) и изменением на широте 60° N направления зонального ветра с восточного (т.е. к востоку) на западное.

На рисунке 1 в качестве примера показаны вариации интенсивностей полос ОН(6-2) и О₂А(0-1) и температуры гидроксила в течение зимнего периода 2008–2009 гг. В этот период в стратосфере наблюдалось мощное внезапное потепление (на ~50 К на высоте ~30 км в период 22–24 января 2009 г.), сопровождавшееся сильным реверсом зонального ветра. Представленные графики показывают резкое увеличение значений исследуемых характеристик в межсуточном их поведении, возникающее через неделю после максимума ВСП. Кроме этого, на графиках также виден и некоторый минимум в температуре гидроксила в ходе развития стратосферного потепления. Однако, следует отметить, что данные выводы, полученные на основании изучения только одного зимнего сезона, могут оказаться не совсем адекватными, в случае анализа откликов характеристик наблюдаемых эмиссий на мощные ВСП для других зимних периодов. Поэтому, целесообразно было произвести усреднение эмиссионных данных, полученных в периоды ВСП за 11 лет, методом наложенных эпох [Shefov, 1973]. Полученные результаты представлены на рис. 2. На шкале времени за ноль принят день температурного максимума ВСП на высоте ~30 км (10 гПа). Поскольку усреднение проводилось с временным окном 3

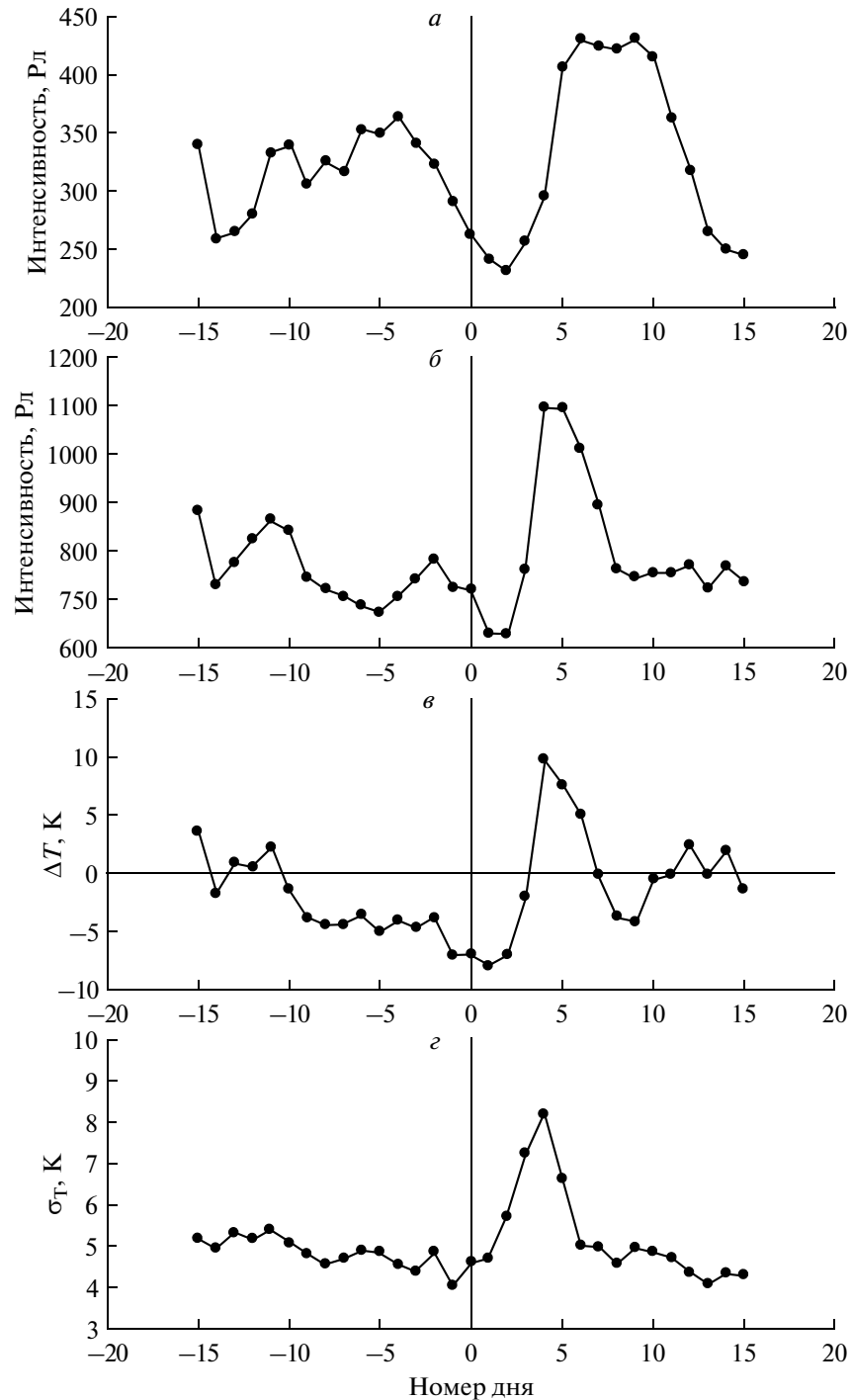


Рис. 2. Вариации интенсивностей полос $O_2A(0-1)$ (а), $OH(6-2)$ (б), температуры гидроксила (в) и стандартного отклонения данной температуры от ее среднего значения за ночь (г) во время стратосферного потепления по наблюдения в Звенигороде в 2000–2010 гг. Температурные вариации даны как отклонения (ΔT) от сезонного хода температуры.

дня, то каждой точке на рисунке соответствует более 15 среднечасовых значений измеренных эмиссионных характеристик. На рисунке 2 (в) для удобства анализа показаны отклонения температуры относительно ее многолетнего (2000–2010 гг.) сезонного хода. Поскольку ВСП развиваются

достаточно длительное время, то чтобы проследить закономерности поведения эмиссионных характеристик в данный период, для их анализа взят 30-дневный промежуток – 15 дней до и 15 дней после максимума ВСП. На рисунке видно, что период времени, относящийся к максимуму

ВСП, сопровождается минимумами в температуре (понижение на 12 К относительно ее значения для начала анализируемого временного интервала) и интенсивностях эмиссий (понижение на 100 Рл для $O_2A(0-1)$ и на 200 Рл для $OH(6-2)$). Через 4–6 дней после максимума ВСП во всех случаях наблюдаются максимумы в характеристиках мезопаузы: интенсивностях ее эмиссий (1.7–2 раза относительно их минимальных значений), температуре (~17 К относительно минимума) и волновой активности в течение ночи (повышение в 1.5 раза).

Полученный результат в некоторой степени расходится с опубликованными ранее выводами, представленными в работах [Liu and Roble, 2002; Miyoshi, 2003], в которых проводилось моделирование отклика верхней атмосферы на ВСП. В этих работах показано, что одновременно с ВСП должно происходить сильное охлаждение в области мезосферы/мезопаузы, при котором среднезональная температура может понизиться на несколько десятков градусов с последующим восстановлением ее значений до среднесезонных, а также разогрев в области нижней термосферы. В интенсивностях эмиссий мезопаузы, обусловленных рекомбинационными процессами атомарного кислорода, должно наблюдаться их понижение [Liu and Roble, 2002]. Согласно этим модельным исследованиям, в средней атмосфере во время ВСП происходит фильтрация ВГВ, в результате которой, в верхнюю атмосферу проникают ВГВ, направленные преимущественно с запада на восток. Отсюда, типичная зимняя ситуация в средней и верхней атмосфере, когда в них доминируют волны, направленные на запад, меняется на обратную. Известно, что волны в верхней атмосфере играют существенную роль в формировании ее ветрового и температурного режимов [Госсард и Хук, 1978]. Так, изменение направленности волн ведет в итоге к обращению направления вертикальной компоненты ветра в верхней атмосфере. Вертикальное движение воздуха в мезосфере и мезопаузе становится направленным вверх, в результате которого возникают условия для их адиабатического охлаждения [Holton, 1983; Miyoshi, 2003]. В нижней термосфере должна наблюдаться противоположная картина [Liu and Roble, 2002]. После стратосферного потепления происходит восстановление ветровой структуры и температурного режима верхней атмосферы. С такими модельными предсказаниями достаточно хорошо согласуется ряд результатов, полученных как по наземным измерениям температуры мезопаузы [Матвеева и Семенов, 1986; Cho et al., 2004], так и по спутниковым наблюдениям (MIPAS/Envisat) температуры в высотной области 20–170 км [Funke et al., 2010]. Часть экспериментальных работ, включающих также наземные [Sigernes et al., 2003] и спутниковые [Siskind et al., 2005], температурные измерения демонстрирует отсутствие или

слабый отклик мезопаузы на ВСП. Результаты настоящей работы в отличие от вышеупомянутых показывают, что после минимума в температуре гидроксила и интенсивностях эмиссий мезопаузы во время стратосферных потеплений через 3–4 дня наблюдается их значительный максимум. Ранее подобный характер возмущений в характеристиках мезопаузы во время ВСП выявлен также в интенсивностях эмиссий $\lambda 557.7$ нм атомарного кислорода (высота максимума излучения ~97 км) и 589.0–589.6 нм натрия (высота максимума излучения ~92 км) [Фишкова, 1978].

Как видно, экспериментальные исследования показывают различные варианты отклика характеристик мезопаузы на стратосферные потепления. Возможно, причиной этого является фильтрация волн в стратомезосфере. Недавние модельные исследования [Yamashita et al., 2010] показывают, что параметры областей охлаждения и разогрева и их граница в верхней атмосфере должны быть чувствительны к спектральному составу ВГВ и высоте их диссипации. Так известно, что высота разрушения (и максимального воздействия на динамику атмосферы) волн зависит от их характеристик: более короткие (по горизонтали) волны разрушаются на больших высотах, чем длинные волны [Holton, 1983]. Таким образом, преобладание длинных волн, проникающих в верхнюю атмосферу, ведет к понижению границы между ее областями охлаждения и разогрева. Во время ВСП спектр волн, вследствие их фильтрации в страто/мезосфере, наиболее изменчив, и его динамика во времени дает то разнообразие вариаций характеристик мезопаузы, которое получено в измерениях. Поскольку, изменения характеристик мезопаузы во время ВСП, приведенное на рис. 2, являются средними за 11 лет, то их можно принимать за наиболее вероятный сценарий развития отклика мезопаузы над Звенигородом на ВСП.

4. ВЫВОДЫ

По многолетним наблюдениям в Звенигороде проведено исследование изменений интенсивности эмиссий гидроксила и Атмосферной системы молекулярного кислорода, возникающих в области мезопаузы в ходе рекомбинационных процессов атомарного кислорода, температуры гидроксила и ее ночной изменчивости во время внезапных зимних стратосферных потеплений. Результаты исследований показывают, что поведение температуры и интенсивности эмиссий характеризуется их уменьшением в период максимума внезапного стратосферного потепления и последующим (через 4–6 дней) увеличением, длящимся от 2-х до 6-ти дней. Межсуточный ход ночной изменчивости температуры, то есть ее стандартного отклонения, обусловленного в основном приливами и ВГВ, имеет только макси-

мум, возникающий синхронно с максимумами других характеристик гидроксильного излучения. Полученные в настоящей работе экспериментальные данные не совсем согласуются с результатами моделирования влияния ВСП на верхнюю атмосферу: в модельных представлениях отклика температурного режима мезопаузы на ВСП не отображается увеличение температуры мезопаузы через 4–6 сут после максимума стратосферного потепления. Этот эффект необходимо учитывать при разработках новых версий моделей отклика верхней атмосферы на ВСП, в которых должны быть рассмотрены более реальные распределения спектра атмосферных волн, распространяющихся из тропосферы в верхние слои атмосферы, и его динамики во время развития ВСП.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Герасимова Н.Г., Яковлева А.В. Комплект светосильных спектрографов с дифракционными решетками // Приборы и техника эксперимента. № 1. С. 83–86. 1956.
- Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. М.: Мир, 526 с. 1978.
- Матвеева О.А., Семенов А.И. Вариации температуры мезопаузы во время стратосферного потепления // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 26. № 2. С. 331–332. 1986.
- Перминов В.И., Семенов А.И., Шефов Н.Н. О вращательной температуре гидроксильной эмиссии // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. № 6. С. 798–805. 2007.
- Перминов В.И. Сезонные вариации температуры вблизи мезопаузы по измерениям гидроксильного излучения в Звенигороде // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 6. С. 835–842. 2009.
- Перминов В.И., Перцев Н.Н. Сезонные особенности отклика температуры и интенсивностей эмиссий мезопаузы на вариации солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 1. С. 91–99. 2009.
- 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. Т. 42. № 3. С. 407–414. 2002.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 740 с. 2006.
- Фишкова Л.М. О колебаниях интенсивности ночного излучения верхней атмосферы в периоды стратосферных потеплений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 18. № 3. С. 549–550. 1978.
- Cho Y.-M., Shepherd G.G., Won Y.-I., Sargoytchev S., Brown S., Solheim B. MLT cooling during stratospheric warming events // Geophys. Res. Lett. V. 31. L10104, doi:10.1029/2004GL019552. 2004.
- Funke B., Lopez-Puertas M., Bermejo-Pantaleon D., Garcia-Comas M., Stiller G.P., von Clarmann T., Kiefer M., Linden A. Evidence for dynamical coupling from the lower atmosphere to the thermosphere during a major stratospheric warming // Geophys. Res. Lett. V. 37. L13803, doi:10.1029/2010GL043619. 2010.
- Holton J.R. The influence of gravity wave breaking on the general circulation of the middle atmosphere // J. Atmos. Sci. V. 40. № 10. P. 2497–2507. 1983.
- Liu H.-L., 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. Geophys. Res. V. 107. №. D23. P. 4695–4722, doi: 10.1029/2001JD001533. 2002.
- Matsuno T. A dynamical model of the stratospheric sudden warming // J. Atmos. Sci. V. 28. № 8. P. 1479–1494. 1971.
- Miyoshi Y. Effects of the stratospheric sudden warming on the temperature in the MLT region // Advances in Polar Upper Atmosphere Research. № 17. P. 1–12. 2003.
- Offermann D., Gusev O., Donner M., Forbes J.M., Hagan M., Mlynczak M.G., Oberheide J., Preusse P., Schmidt H., Russell III J.M. Relative intensities of middle atmosphere waves // J. Geophys. Res. V. 114. D06110, doi: 10.1029/2008JD010662. 2009.
- Shefov N.N. Relations between the hydroxyl emission of the upper atmosphere and the stratospheric warmings // Gerlands Beiträge zur Geophysik. V. 82. № 2. P. 111–114. 1973.
- Sigernes F., Shumilov N., Deehr C.S., Nielsen K.P., Svenøe T., Havnes O. Hydroxyl rotational temperature record from the auroral station in Adventdalen, Svalbard (78° N, 15° E) // J. Geophys. Res. V. 108. № A9. 1342, doi: 10.1029/2001JA009023. 2003.
- Siskind D.E., Coy L., Espy P. Observations of stratospheric warmings and mesospheric coolings by the TIMED SABER instrument // Geophys. Res. Lett. V. 32. L09804, doi:10.1029/2005GL022399. 2005.
- Yamashita C., Liu H.-L., Chu X. Responses of mesosphere and lower thermosphere temperatures to gravity wave forcing during stratospheric sudden warming // Geophys. Res. Lett. V. 37. L09803, doi:10.1029/2009GL042351. 2010.