

И.В. Медведева, М.А. Черниговская, А.В. Михалев

Исследование температурной зависимости интенсивности атмосферной эмиссии 557,7 нм

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 29.08.2007 г.

Проведен анализ временных вариаций интенсивности эмиссии верхней атмосферы 557,7 нм и вариаций высотного распределения температуры атмосферы за период с августа 2004 по февраль 2007 г. Использовались экспериментальные данные об интенсивности эмиссии атомарного кислорода на длине волны 557,7 нм (высоты высвечивания ~85–115 км), полученные в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (52° с.ш., 103° в.д.), и спутниковые данные по вертикальным профилям температуры в стратосфере–мезосфере, зарегистрированные зондом MLS (Microwave Limb Sounder), установленным на борту космического аппарата EOS Aura. Анализировались усредненные за ночь значения интенсивности атмосферной эмиссии и ночные профили распределения температуры атмосферы.

Предпринята попытка выявления регрессионной связи интенсивности эмиссии верхней атмосферы с температурой атмосферы на высотах стратосферы и мезосферы. Обсуждаются возможные механизмы влияния температуры на интенсивности атмосферной эмиссии 557,7 нм.

Введение

Собственное свечение верхней атмосферы зависит от плотности, температуры и состава атмосферы на высотах излучения, от солнечной и геомагнитной активностей, от координат пункта наблюдения; имеет суточную и сезонную периодичности.

Зеленая линия атомарного кислорода [OI] с длиной волны излучения 557,7 нм является интегральной характеристикой высотных распределений температуры и атмосферных составляющих, участвующих в процессах возбуждения этой эмиссии на высотах ее высвечивания (85–115 км). В этой области атмосферы могут проявляться как внешнее влияние солнечной и геомагнитной активности, воздействие параметров окружающей атмосферы на высотах высвечивания эмиссии, так и эффекты динамики и возмущений различной природы со стороны нижележащих слоев атмосферы.

До настоящего времени остается не выясненным, каким образом влияет температура окружающей атмосферного газа на высотах высвечивания эмиссии 557,7 нм на интенсивность свечения. Так, в работе [1] говорится о росте интенсивности эмиссии 557,7 нм (I_G) с уменьшением температуры, а в [2, 3] — об их положительной зависимости.

С точки зрения взаимодействия верхней и нижней атмосферы представляет интерес связь вариаций собственного свечения атмосферы и возмущений температуры в зимней стратосфере (стратосферных потеплений). Авторы ряда работ [4, 5] отмечали, в частности, увеличение интенсивности эмиссии 557,7 нм на 50–100% во время стратосферных потеплений и объясняли этот эффект активизацией вертикальной циркуляции атмосферы, достигающей в ряде случаев

высот мезосферы и нижней термосферы (область высвечивания атмосферной эмиссии 557,7 нм).

Нами ранее проводился анализ вариаций интенсивности эмиссии 557,7 нм во время стратосферных потеплений за период 1997–2001 гг. В качестве индикатора возникновения стратосферных потеплений использовались данные по стратосферной температуре на высоте 30 км. Было отмечено [6], что вклад этого эффекта в среднемесячные значения I_G для региона Восточной Сибири может быть более значимым, чем для других среднеширотных станций.

В настоящей статье предпринята попытка выявления регрессионной связи интенсивности зеленой эмиссии верхней атмосферы по данным Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН с температурой атмосферы на отдельных высотных уровнях.

Данные наблюдений

Для анализа были использованы:

— экспериментальные данные наблюдения эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм, полученные в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (52° с.ш., 103° в.д.). Оптические измерения проводились с помощью зенитного фотометра «Феникс», рабочие длины волн 557,7 и 630 нм и спектральные интервалы 360–410 и 720–810 нм;

— данные о вертикальных профилях температуры атмосферы, которые были получены с помощью сканирующего сверхвысокочастотного (СВЧ) лимбового зонда MLS (Microwave Limb Sounder), установленного на борту космического аппарата Aura EOS [7]. 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 сутки осуществляется примерно 13 пролетов спутника. 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 профилей химического состава, относительной влажности и температуры для областей атмосферы от тропосферы, стратосферы, до верхней мезосферы как функций давления в гектопаскалях.

Нами анализировались данные за период с августа 2004 (запуск спутника Aura EOS состоялся 15 июля 2004 г.) по февраль 2007 г.

В Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН проводятся регулярные наблюдения собственного свечения атмосферы в ночное время суток, в среднем 1–2 нед в месяц. Измерения выполняются, как правило, в ясные безлунные ночи. Общее число ночей наблюдения за анализируемый период составило 252.

Температурная зависимость атмосферного свечения анализировалась по спутниковым данным измерений температуры атмосферы на изобарических поверхностях 10 и 0,001 гПа (соответственно высоты ~ 30 и 95 км). Использовались температурные профили для траектории нисходящих витков спутника (ночные условия) над регионом Иркутска с заданным радиусом поиска 500 км. Анализируемая высота 30 км соответствует уровню наиболее вероятного возникновения и локализации стратосферных потеплений, высота 95 км выбрана как наиболее близкая к высоте максимума излучающего слоя эмиссии 557,7 нм, которая согласно [8] составляет ~ 97 км.

Анализ данных наблюдений, результаты и обсуждение

Были рассмотрены межсуточные вариации значений средней за ночь интенсивности эмиссии 557,7 нм и соответствующие ночным пролетам спутника над исследуемым регионом значения температуры атмосферы на высотах 30 и 95 км за период с августа 2004 по февраль 2007 г. (рис. 1), а также среднегодовой ход интенсивности эмиссии 557,7 нм по среднемесячным значениям, вычисленным для лет с низкой солнечной активностью (а); значения ночной температуры атмосферы (значки) и среднегодовые вариации температур (сплошные линии), полученные усреднением для каждого дня года за исследуемый период. Из рис. 1 четко видны сезонные вариации исследуемых параметров. Вместе с тем присутствует сильная межсуточная изменчивость. Отклонения от среднегодовых значений имеют как положительные, так и отрицательные значения.

Дальнейший анализ температурной зависимости интенсивности эмиссии 557,7 нм мы проводили для отклонений исследуемых параметров от их средних значений, т.е. из временных рядов удалены регулярные сезонные колебания.

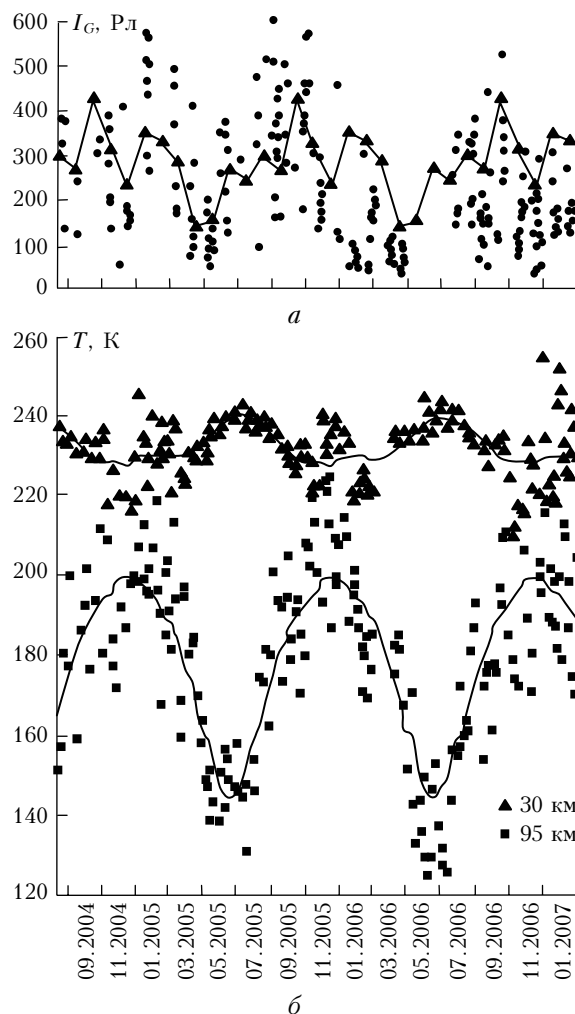


Рис. 1. Межсуточные вариации значений средней за ночь интенсивности эмиссии 557,7 нм (точки) и среднегодовой ход интенсивности эмиссии 557,7 нм (сплошная линия) по среднемесячным значениям, вычисленным для лет с низкой солнечной активностью (а); значения ночной температуры атмосферы (значки) и среднегодовые вариации температур (сплошные линии), полученные усреднением для каждого дня года за период с августа 2004 по февраль 2007 г., на высотах 30 и 95 км (б)

Высота 95 км

На рис. 2 приведена зависимость ΔI_G от отклонений температуры ΔT на высоте 95 км. На рис. 2, а представлены все данные за исследуемый временной период. На рис. 2, б выделен отдельно зимний период (с ноября по март), на рис. 2, в — летний период (с апреля по октябрь). Для выявления взаимосвязи интенсивности эмиссии 557,7 нм и температуры мы использовали наиболее простой метод линейной регрессии. На рис. 2 приведены линии регрессии, полученные по методу наименьших квадратов. Коэффициенты регрессии составляют соответственно 5,2 по всем данным; 5,9 для зимы и 3,4 для лета. Таким образом, прямая регрессионная связь отклонений I_G и температуры на высоте 95 км для зимних месяцев сильнее, чем для летних. Это может

быть связано с тем, что высота максимума излучающего слоя эмиссии 557,7 нм имеет сезонные вариации. В зимние месяцы для долготы места наблюдения согласно [3] высота излучающего слоя наиболее близка к высоте 95 км, на которой мы анализировали вариации температуры. Для летнего периода высота максимума излучающего слоя опускается несколько ниже анализируемого уровня.

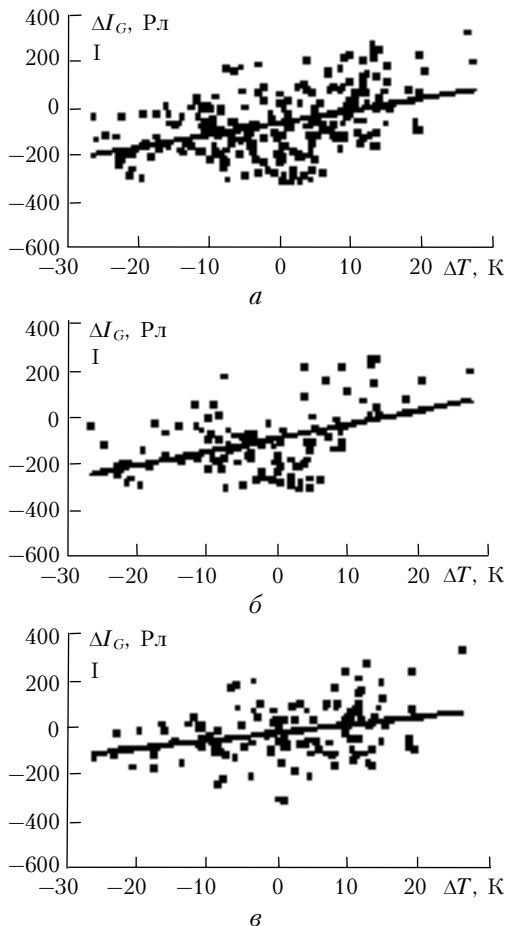
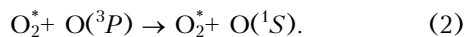
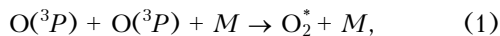


Рис. 2. Зависимость отклонений интенсивности эмиссии 557,7 нм ΔI_G от отклонений температуры ΔT (значки) и линии регрессии для высоты 95 км: *a* – весь исследуемый период; *б* – зимний период; *в* – летний период. Приведены дисперсии экспериментальных точек от линий регрессий

Эмиссия 557,7 нм возникает в результате запрещенного перехода атомарного кислорода ${}^1S \rightarrow {}^1D$. Считается, что эта эмиссия возбуждается согласно механизму С. Барта [9, 10] и представляет собой двухступенчатый процесс:



Константа скорости реакции с тройными столкновениями (1) пропорциональна коэффициенту $(300/T)^2$ [11–13], и производство $O(^1S)$ должно уменьшаться с повышением температуры. Следовательно, интенсивность эмиссии, с учетом вклада отрицательной температурной зависимости константы скорости реакции (1), должна уменьшаться с повы-

шением температуры. Однако анализ экспериментальных данных показывает обратное.

Поскольку за производство эмиссии 557,7 нм ответственна реакция с тройными соударениями атомарного кислорода с молекулами атмосферного газа, эффективность этой реакции должна возрастать с повышением концентраций атмосферных составляющих, участвующих в реакции (1). Эффективность возбуждения в данном случае может определяться как увеличением концентрации атмосферных составляющих, обуславливающих заселение уровня 1S атомарного кислорода (например, O и O_2), так и уменьшением концентрации атмосферных составляющих, дезактивирующих заселение уровня 1S атомарного кислорода (т.е. изменением соотношения между атмосферными составляющими, участвующими в возбуждении и гашении уровня 1S).

В работе [10] была проведена численная оценка эффекта изменения концентраций атмосферных составляющих, участвующих в производстве кислородных эмиссий, с использованием модели MSIS-86. Авторы рассматривали совместные вариации концентраций как основных атмосферных составляющих (O_2 , N_2 , O), так и отдельно атомарного кислорода. Нами установлено, что возрастание концентрации основных атмосферных составляющих (O_2 , N_2 , O) приводит к росту интенсивности эмиссии OI 557,7 нм.

Особенности поля температуры в мезосфере – нижней термосфере нельзя объяснить только влиянием радиационных факторов. Существенное значение имеют динамические факторы (в частности, разогревание или охлаждение при опускании или подъеме воздуха), а также возможные источники тепла, возникающие в результате фотохимических реакций.

Таким образом, можно предположить, что вклад в увеличение интенсивности свечения, обусловленный ростом концентраций основных атмосферных составляющих, вызванный повышением температуры на высотах вблизи мезопаузы, превосходит по значимости вклад отрицательной температурной зависимости константы скорости реакции (1).

Высота 30 км

Интересным является вопрос о наблюдаемых корреляциях вариаций I_G и температуры в стратосфере, где в зимние месяцы развиваются процессы стратосферных потеплений. На рис. 3 представлены зависимости ΔI_G от вариаций температуры на высоте 30 км (10 гПа).

Экспериментальные данные представлены для всего периода (рис. 3, *a*), зимнего (рис. 3, *б*) и летнего (рис. 3, *в*) периодов. Для исследуемых параметров также был проведен регрессионный анализ по методу наименьших квадратов. Из рассматриваемого массива экспериментальных данных для зимы и всего периода установлена прямая линейная регрессия с коэффициентами 6,6 и 7,6 соответственно. Для летних месяцев значимая регрессионная зависимость вариаций температуры на рассматриваемом стратосферном высотном уровне и I_G не выявлена (см. рис. 3, *в*).

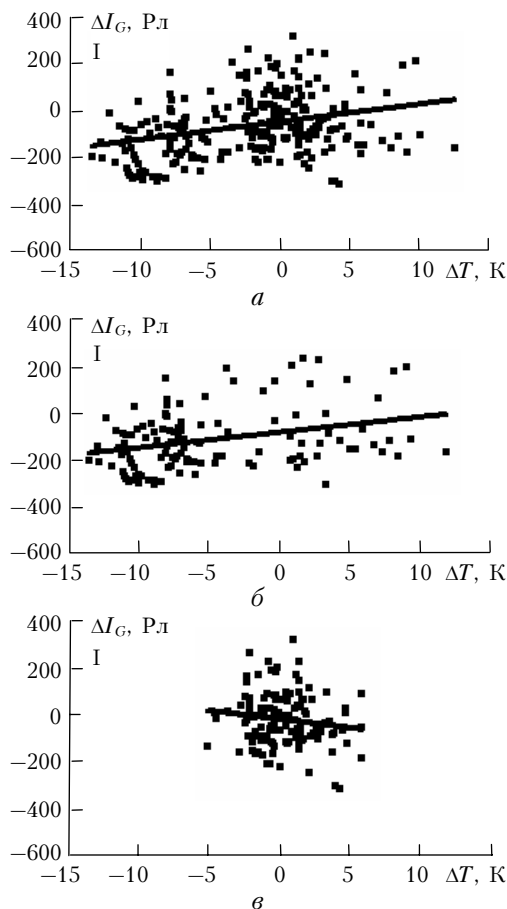


Рис. 3. Зависимость отклонений интенсивности эмиссии 557,7 нм ΔI_G от отклонений температуры ΔT (значки) и линии регрессии для высоты 30 км: *а* – весь исследуемый период; *б* – зимний период; *в* – летний период. Приведены дисперсии экспериментальных точек от линий регрессий

Относительно выявленной положительной связи I_G и температуры стратосферы на высоте 30 км в зимний период можно сказать следующее. В данном случае, вероятно, нельзя говорить о прямой зависимости I_G от вариаций стратосферной температуры. Анализ температурного режима стратомезосферы и данных свечения верхней атмосферы в эмиссии 557,7 нм указывает на проявление известного эффекта повышенной зимней изменчивости параметров мезосферы [14] в рассматриваемый период. Этот эффект выражается в усилении волновой активности различных временных масштабов в средней и верхней атмосфере и, как правило, сопровождается комплексом явлений – внезапными зимними стратосферными потеплениями, усилением вертикального переноса, турбулентных процессов, нарушением атмосферной циркуляции и др.

Вариации интенсивности эмиссии 557,7 нм в этом случае можно рассматривать как индикатор того, что в данный временной период в атмосфере распространяется возмущение, которое вызывает вариации температуры на высотах стратосферы и распространяется выше в мезосферу и нижнюю термосферу, т.е. до высот возникновения эмиссии 557,7 нм. В зимний период во время стратосферных потеплений наблю-

даются сильные вариации динамического режима в средней атмосфере [15], усиливаются генерация и распространение вверх волновых возмущений различного масштаба, что может приводить к значительным вариациям интенсивности эмиссии 557,7 нм. Летом, когда наблюдается относительно стабильная картина высотного распределения температуры и отсутствуют благоприятные условия для вертикального распространения возмущений снизу, значимая регрессионная связь I_G и температуры на высоте 30 км не обнаружена (см. рис. 3, *в*).

Заключение

Регрессионный анализ данных усредненных за ночь интенсивностей эмиссии 557,7 нм по экспериментальным данным, полученным в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (52° с.ш., 103° в.д.), и температуры атмосферы на высоте 95 км выявил их положительную связь, которая не соответствует температурной зависимости реакции (1), отвечающей за возникновение этой эмиссии. Наблюдаемая положительная регрессионная связь может быть результатом коррелированных вариаций концентраций основных атмосферных составляющих и температуры на высотах вблизи мезопаузы.

Проведенный анализ значений средних за ночь интенсивностей эмиссии 557,7 нм и температуры стратосферы на высоте 30 км позволил определить величину положительной регрессионной связи в зимний период, которую можно интерпретировать известным эффектом зимней неустойчивости мезосферы – нижней термосферы, обусловленной усилением атмосферной волновой активности и возможностью формирования благоприятных условий для вертикального распространения возмущений. В летний период значимая регрессионная связь I_G с температурой стратосферы на высоте 30 км не выявлена.

Настоящая работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 16 (часть 3).

1. Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 271 с.
2. Фишкова Л.М., Марицаладзе Н.М., Шефов Н.Н. Закономерности вариаций эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм // Геомагнетизм и аэрон. 2000. Т. 40. № 6. С. 107–111.
3. Шефов Н.Н., Семенов А.И. Долготные вариации эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм // Геомагнетизм и аэрон. 2004. Т. 44. № 5. С. 671–674.
4. Фишкова Л. М. О колебаниях интенсивности ночного излучения верхней атмосферы в периоды стратосферных потеплений // Геомагнетизм и аэрон. 1978. Т. 8. № 3. С. 549–550.
5. Fukuyama K. Airglow variations and dynamics in the lower thermosphere and upper mesosphere – III. Variations during stratospheric warming events // J. Atmos. and Terr. Phys. 1977. V. 39. N 3. P. 317–331.
6. Медведева И.В., Белецкий А.Б., Михалев А.В., Черниговская М.А., Абушенко Н.А., Тацилин С.А. Поведение атмосферной эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм в периоды стратосферных потеплений в регионе Восточной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 2. С. 143–147.

7. <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/MLS/index.shtml>
8. Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
9. McDade I.C., Murtagh D.P., Greer R.G.H., Dickinson P.H.G., Witt G., Stegman J., Llewellyn E.J., Thomas L., Jenkins D.B. ETON 5: Quenching parameters for the proposed precursors of $O_2(b_1\Sigma_g^+)$ and $O(^1S)$ in the terrestrial nightglow // *Planet. Space Sci.* 1986. V. 34. N 9. P. 789–800.
10. Clemesha B.R., Takahashi H., Batista P.P. et al. The temperature dependence of airglow emissions from the upper mesosphere and lower thermosphere // *Planet. Space Sci.* 1991. V. 39. N 10. P. 1397–1404.
11. Campbell I.M., Gray C.N. Rate constants for $O(^3P)$ recombination with $N(^4S)$ // *Chem. Phys. Lett.* 1973. V. 8. P. 259.
12. Snively J.B., Pasko V.P. Antiphase OH and OI airglow emissions induced by a short-period ducted gravity wave // *Geoph. Res. Lett.* V. 32, doi: 10.1029/2004GL022221, 2005.
13. Murtagh D.P., Witt G., Stegman J., McDade I.C., Llewellyn E.J., Harris F., Greer R.G.H. An assessment of proposed $O(^1S)$ and $O_2(b_1\Sigma_g^+)$ nightglow excitation parameters // *Planet. Space Sci.* 1990. V. 38. N 1. P. 43–53.
14. Гинзбург Э.И., Гуляев В.Т., Жалковская Л.В. Динамические модели свободной атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 292 с.
15. Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д. Движения в ноносфере. Новосибирск: Наука, 1979. 344 с.

I.V. Medvedeva, M.A. Chernigovskaya, A.V. Mikhalev. Investigation of the temperature dependence of the 557.7 nm upper atmospheric airglow intensity.

The analysis of the temporal variations of the 557.7 nm atmospheric emission intensity and variations of altitude distribution of the atmosphere temperature for the period from August, 2004 till February, 2007 was carried out. We used the experimental data on the atomic oxygen 557.7 nm airglow (emitting layer height is 85–115 km) obtained at ISTP Geophysical observatory near Irkutsk (52°N, 103°E). Also we included in analysis the satellite data of vertical temperature distribution in a stratosphere-mesosphere by MLS (Microwave Limb Sounder) aboard the spacecraft EOS Aura. We analyzed the 557.7 nm airglow intensity averaged per night together with night altitude profiles of the atmosphere temperature.

We made an attempt to reveal the regression coupling of the atmospheric 557.7 nm emission intensity with the temperature of the atmosphere at heights of stratosphere and mesosphere. Possible mechanisms of the influence of the atmosphere temperature on the 557.7 nm airglow intensities are discussed.