

УДК 550.388

ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВАРИАЦИЙ ЭМИССИИ ИНФРАКРАСНОЙ АТМОСФЕРНОЙ СИСТЕМЫ МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА.

3. ТЕМПЕРАТУРА

© 2013 г. В. И. Перминов, К. В. Липатов

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

e-mail: anasemenov@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.04.2011 г.

После доработки 11.07.2011 г.

Выполнены систематизация и анализ измеренных в Звенигороде (56° N, 36° E) вращательных температур полосы (0–1) 1.58 мкм Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода (ИКАО₂). Выявлена эмпирическая зависимость изменения температуры эмиссии 1.58 мкм от зенитного угла Солнца. Использование характеристик высотного распределения интенсивности эмиссии 1.27 мкм по данным ракетных и спутниковых измерений и высотных профилей температуры средней атмосферы, полученных с помощью спутника AURA, позволило исследовать характер суточных вариаций температуры эмиссии 1.58 мкм. Обнаружено, что характер этих вариаций соответствует суточным вариациям температуры атмосферы на высотах излучающего слоя эмиссии ИКАО₂, полученных спутником AURA.

DOI: 10.7868/S0016794013030176

1. ВВЕДЕНИЕ

В проводившихся ранее исследованиях излучения Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода (ИКАО₂) рассматривалось только поведение интенсивности ее полос (0–0) 1.27 мкм и (0–1) 1.58 мкм для различных условий освещения верхней атмосферы Солнцем при его зенитных углах $\chi < 97^\circ$. Во многом это было вызвано возможностями используемой в то время для наземных измерений спектрофотометрической аппаратуры, обладавшей малой спектральной разрешающей способностью и низкой чувствительностью приемников излучения. Это обстоятельство отразилось и на качестве ракетных и спутниковых измерений высотных распределений интенсивности эмиссии 1.27 мкм.

Известно, что у всякой вращательно-колебательной полосы двухатомных молекул распределение интенсивности вращательных линий в ней определяется температурой среды, в которой возникает излучение. Для метастабильных переходов с большим радиационным временем жизни возбужденных состояний равновесное распределение населенностей вращательных уровней устанавливается надежно даже при малой плотности атмосферы на высотах мезопаузы.

В последние годы на научной станции Звенигород (Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН) с помощью светосильных спектрографов, снабженных современными матричными приемниками, проводятся регулярные наземные изме-

рения интенсивности излучения полос ИКАО₂ (0–0) 1.27 мкм и (0–1) 1.58 мкм с экспозициями 1 мин для зенитных углов Солнца χ от 90° до 150° [Семенов и др., 2011; Липатов и Перминов, 2011]. Полученные спектрограммы полосы 1.58 мкм позволяли определять вращательную температуру, которая отображает температуру атмосферы на высотах излучающего слоя этой эмиссии.

В настоящей работе представлены результаты исследований суточных вариаций температуры атмосферы на высотах излучающего слоя ИКАО₂.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Вращательно-колебательные полосы электронной системы молекулы кислорода состоят из 9-ти ветвей, обусловленных переходами между электронными состояниями $a^1\Delta_g$ и $X^3\Sigma_g^-$: SR , RR , QR , RQ , QQ , PQ , QP , PP , OP , с взаимно перекрывающимися длинами волн линий различных ветвей.

Для построения спектральной структуры полосы (0–1) 1.58 мкм были произведены вычисления длин волн для линий ветвей этой полосы на основе волновых чисел, опубликованных в работе [Herzberg and Herzberg, 1947]. При помощи этих данных были построены графики структур ветвей, входящих в полосу 1.58 мкм. При спектрографических измерениях излучения верхней атмосферы в Звенигороде спектральная разрешающая способность используемой аппаратуры составляла ~1 нм. Регистрируемая структура полос

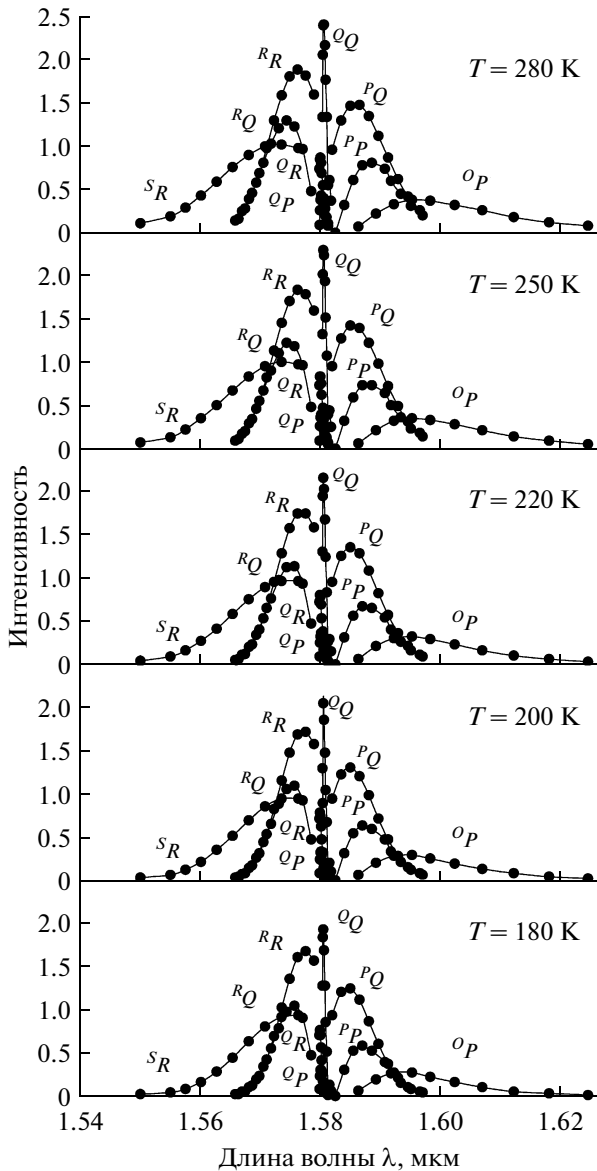


Рис. 1. Спектральная структура полосы (0–1) 1.580 мкм Инфракрасной Атмосферной системы молекулы кислорода для различных значений температуры.

имеет главный максимум интенсивности, обусловленный линиями ветвей R_Q , Q_Q , P_Q , и два соседних, связанных с более слабыми по интенсивности ветвями, с коротковолновой стороны (слева на рисунках 1 и 2) – S_R , R_R , Q_R и с длинноволновой стороны (справа на рисунках 1 и 2) – Q_P , P_P , O_P [Herzberg and Herzberg, 1947]. При наземных измерениях из-за ограниченности спектрального разрешения на спектрограммах видно, что длинноволновая часть полосы (0–1) 1.58 мкм (перекрывается) блендируется излучением ветви Q полосы (4–2) гидроксила (рис. 1 в работе [Семенов и др., 2011]). В этом случае полная интенсивность полосы O_2 (0–1) оценивалась на основе соотноше-

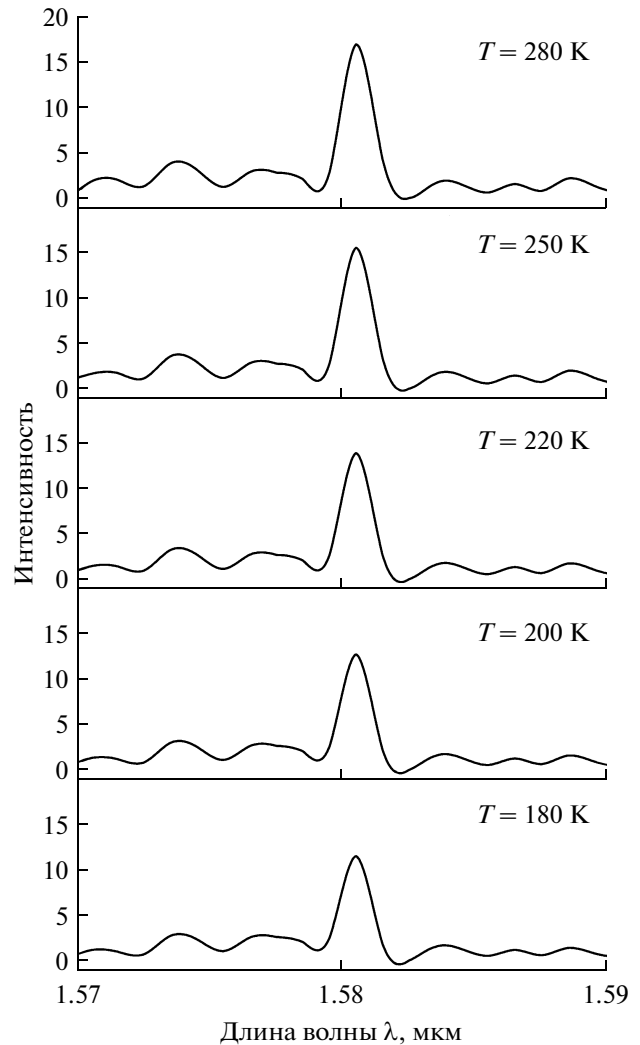


Рис. 2. Распределение интенсивности в полосе (0–1) 1.580 мкм Инфракрасной Атмосферной системы молекулы кислорода.

ния между ее основным максимумом и коротковолновой частью этой полосы.

Распределения интенсивности в полосах с разрешением 1 нм показаны на рис. 2. Факторы интенсивностей для излучения даны в работах [Van Vleck, 1934; Kovács, 1969]. На основе этих данных были рассчитаны интенсивности отдельных вращательных линий излучения различных ветвей и определены суммарные интенсивности для спектральных интервалов 10 нм.

В таблице приведены суммарные интенсивности ветвей $Q(1.58)$ и $R(1.577)$ полосы (0–1) 1.58 мкм и их расчетные отношения для различных температур. Полная интенсивность полосы (0–1) 1.58 мкм, которая используется для измерений, может быть определена по той части полосы, которая не перекрывается излучением полосы молекулы гидроксила $OH(4–2)$. Эта свободная от блендирования

Соотношение интенсивностей ветви Q и участка ветви R полосы (0–1) 1.58 мкм Инфракрасной Атмосферной системы молекулы кислорода

Ветви	(0–1)	T, K				
	$\Delta\lambda$, мкм	180	200	220	250	280
$Q(1.580)/R(1.577)$	1.576–1.581	1.076	1.158	1.236	1.340	1.439

часть полосы излучения (0–1) O_2 1.58 мкм имеет интенсивность, составляющую 75% от полной интенсивности полосы. И этот фактор практически не зависит от температуры в имеющемся диапазоне ее вариации на высотах свечения рассматриваемой эмиссии.

Следует иметь в виду, что в условиях земной атмосферы в области спектра излучения полосы (0–1) 1.58 мкм имеются слабые линии поглощения, обусловленные нижними слоями атмосферы [Mohler et al., 1950]. Этот эффект был учтен при расчете вращательных температур на основе анализа спектральных участков полосы (0–1) на зарегистрированных спектрограммах.

С учетом поправки на поглощение измеренных интенсивностей формула для определения температуры имеет вид

$$T_r = 92.6 \frac{I(1.580)}{I(1.577)} - 161.5,$$

где T_r – измеряется в К; $I(1.580)$ и $I(1.577)$ – интенсивности участков полосы (0–1), измеренные на спектрограммах.

Для определения вращательной температуры молекулярных полос ИКАО₂, в случае недостаточной спектральной разрешенности их структуры, существует еще один метод – использование корреляционного сопоставления между измеренными спектральными распределениями интенсивностей и их расчетными профилями для различных значений температуры T . Это возможно потому, что значение коэффициента корреляции не зависит от постоянного слагаемого в сопоставляемых параметрах, которыми являются уровни фоновой интенсивности для измеряемого распределения интенсивности на участке спектра полосы (0–1) 1.58 мкм. Для каждого такого сопоставления вычисляются коэффициенты корреляции $r(T)$, на основе которых строится эмпирическая аппроксимация распределения $r(T)$. Значение температуры определяется для максимального значения коэффициента корреляции. Если в данном случае приемлема квадратичная аппроксимация

$$r(T) = r_0 + \Delta r T + \delta r T^2,$$

то значение температуры в К может быть вычислено по формуле

$$T = -\frac{\Delta r}{2\delta r}.$$

Погрешность температуры в К

$$\sigma(T) = \frac{\sigma(r)}{\Delta r},$$

где погрешность коэффициента корреляции

$$\sigma(r) = \frac{1-r^2}{\sqrt{n-1}},$$

n – число отсчетов значений интенсивности в расчетном и измеренном профилях полосы ИКАО₂. В случае аппроксимации кубичным полиномом

$$r(T) = r_0 + \Delta r T + \delta r T^2 + dr T^3,$$

$$T = \frac{\delta r}{3dr} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{3\Delta r dr}{(\delta r^2)}} \right],$$

где T измеряется в К.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В предшествующей работе [Липатов, 2011] был представлен типичный высотный профиль объемной интенсивности эмиссии 1.27 мкм. При построении временных зависимостей интенсивности эмиссии 1.58 мкм от зенитного угла Солнца ξ , чтобы снизить неопределенность, обусловленную взаимовлиянием интенсивностей излучения при смене зенитных углов, возникающем при экспозициях в 1 мин, полученные данные усреднялись за 5 мин. Полученные таким образом спектрограммы полосы 1.58 мкм позволили определять вращательную температуру, которая отображает температуру атмосферы на высотах излучающего слоя эмиссии ИКАО₂.

Эффективная температура такого высотного распределения излучения будет определяться как высотным распределением температуры атмосферы, так и параметрами излучающего слоя. В этом случае температура может быть вычислена с помощью формулы

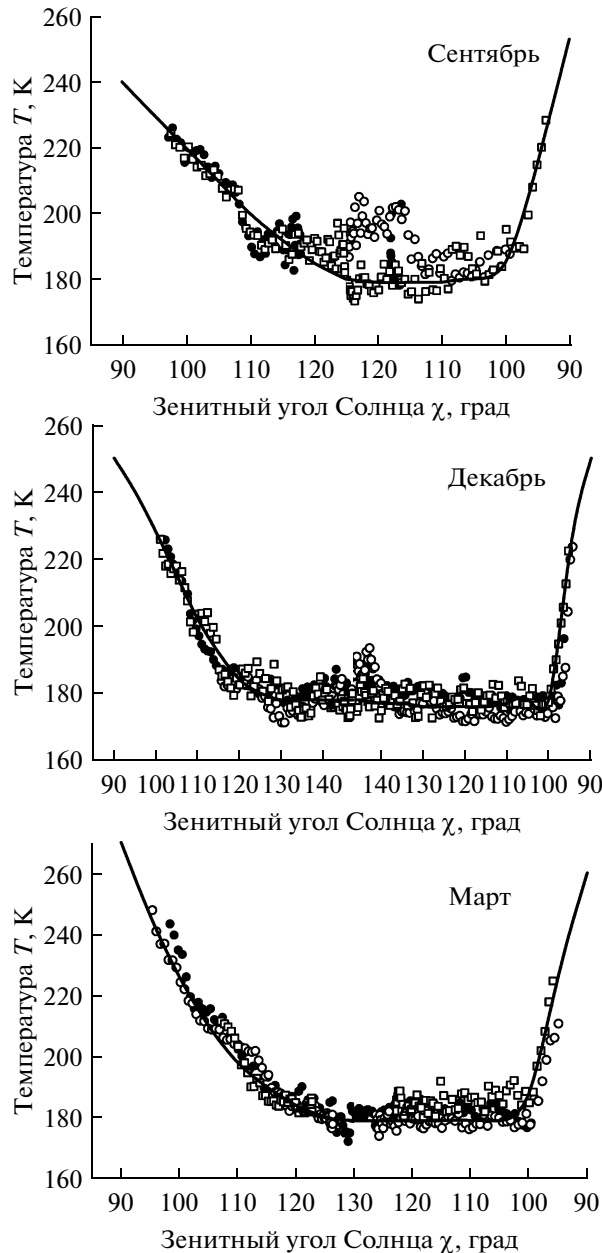


Рис. 3. Примеры вариации температуры полосы (0–1) 1.58 мкм ИКАО₂ для трех месяцев: сентябрь, декабрь, март 2010 г. Значки – данные измерений для различных дат, сплошные линии – вариации температуры мезосферы для указанных месяцев по данным спутника AURA.

$$T(Z) = \frac{\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{\pi} W} \left\{ \frac{1}{1-P} \int_{30}^{Z_M} T(Z) \exp \left[-\frac{\ln 2 (Z-Z_M)^2}{(1-P)^2 W^2} \right] \times \right. \\ \left. \times dZ + \frac{1}{P} \int_{Z_M}^{90} T(Z) \exp \left[-\frac{\ln 2 (Z-Z_M)^2}{P^2 W^2} \right] dZ \right\}.$$

различных географических районов при помощи спутника AURA, [<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/MLS/index.shtml>]. Проведенный анализ показал, что для значений высоты максимума интенсивности излучающего слоя Z_{ML} от 45 до 80 км вычисленные значения температуры в пределах нескольких Кельвинов полностью соответствуют высоте максимума объемной интенсивности эмиссии Z_{ML} .

В настоящее время температурные профили средней атмосферы регулярно определяются для

Наблюдения, выполненные на ст. Звенигород в течение 2010–2011 гг., позволили создать базу

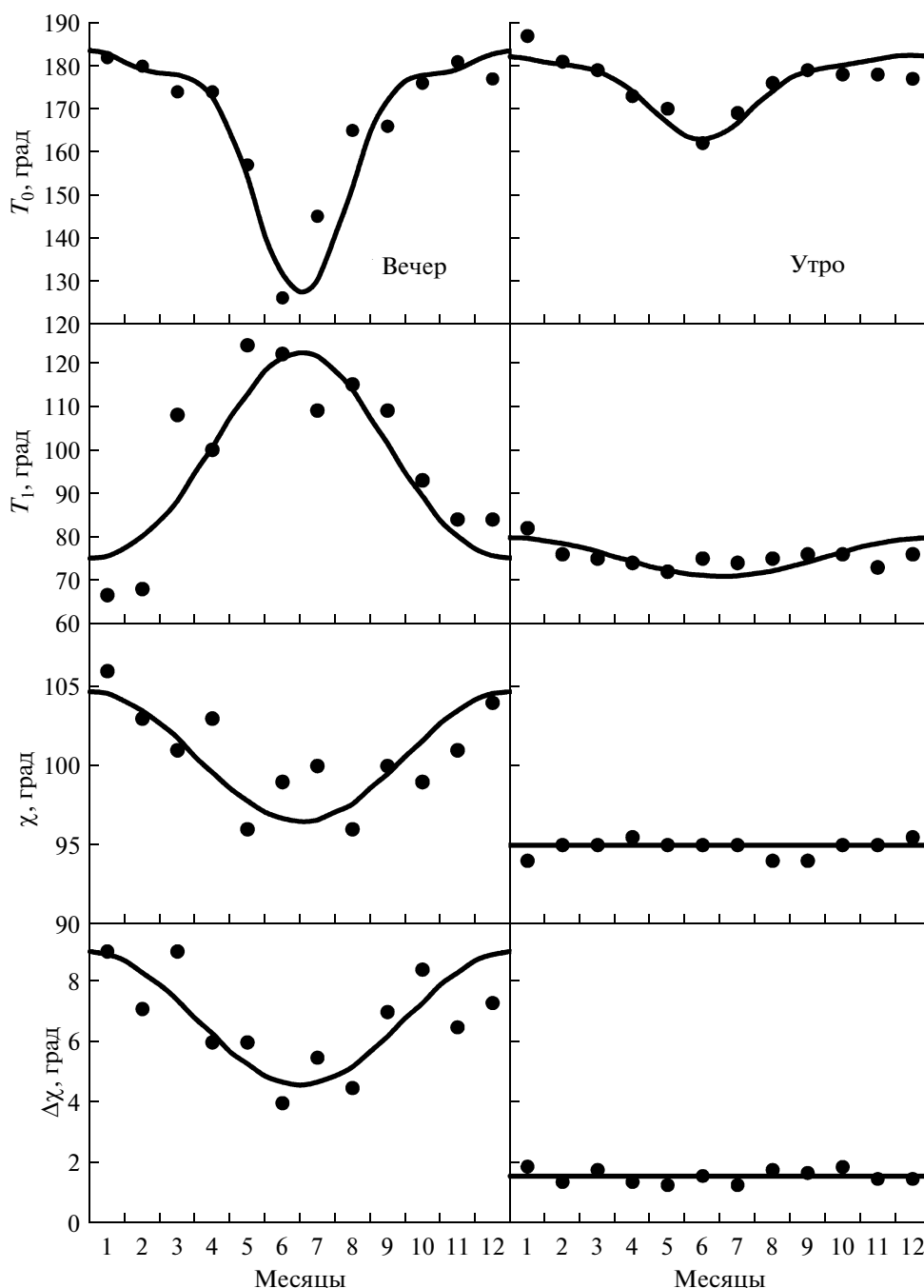


Рис. 4. Сезонные вариации параметров аппроксимации суточных изменений (в ночное время) температуры излучающего слоя эмиссии ИКАО₂.

данных интенсивности и вращательной температуры излучения ИКАО₂, охватывающую большое количество ночей различных месяцев года. Результаты анализа подтвердили, что суточные вариации температуры имеют большое сходство с вариациями логарифма измеренных интенсивностей. Примеры вариаций температуры для трех месяцев года показаны на рис. 3. Ранее полученные результаты о зависимости высоты максимума излучающего слоя от зенитного угла Солнца [Ли-

патов, 2011] позволили сопоставить измеренные значения температуры (рис. 3) с данными высотных профилей температуры средней атмосферы, полученными в районе наблюдений (ст. Звенигород) спутником AURA. Они показаны сплошными линиями на рис. 3.

Сезонные вариации температуры для ночных интервалов могут быть представлены формулами для вечерних (ev)

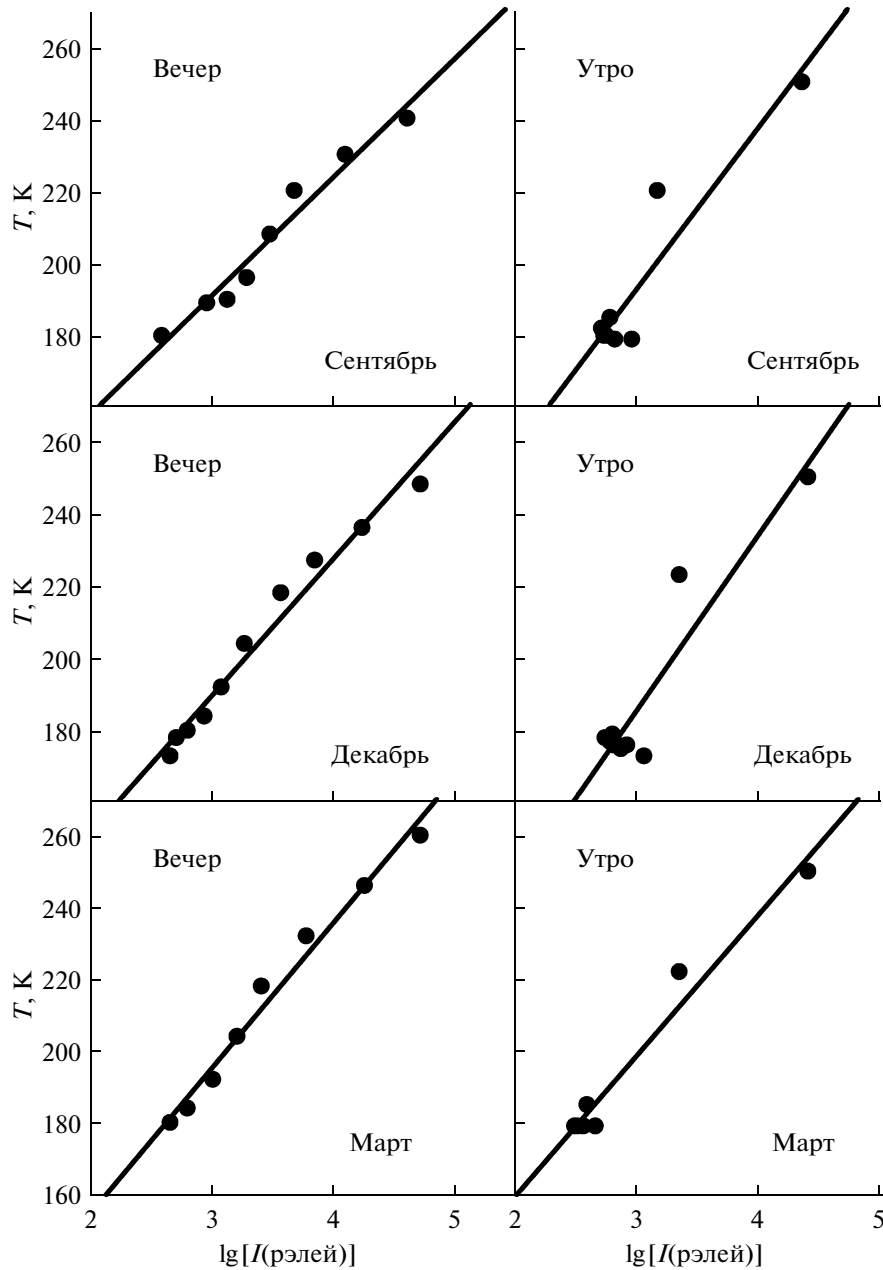


Рис. 5. Сопоставление средних вариаций логарифма интенсивности и температуры эмиссии ИКАО₂ (0–1) 1.58 мкм в интервале зенитных углов $\chi = 90–125^\circ$ для вечернего и утреннего периодов суток.

$$T_{ev}(t_d, \chi) = T_{0ev}(t_d) + \frac{T_{1ev}}{1 + \exp\left[\frac{\chi - \chi_{ev}(t_d)}{\Delta\chi_{ev}(t_d)}\right]},$$

и утренних сумерек (*mo*)

$$T_{mo}(t_d, \chi) = T_{0mo}(t_d) + \frac{T_{1mo}}{1 + \exp\left[\frac{\chi - \chi_{mo}(t_d)}{\Delta\chi_{mo}(t_d)}\right]},$$

Сезонные вариации параметров этих формул в зависимости от дня года t_d показаны на рис. 4. Они также имеют аппроксимацию:

$$\begin{aligned} T_{0ev}(t_d) &= 166 + 23.5 \cos \frac{2\pi}{365} t_d + 10.5 \cos \frac{4\pi}{365} \times \\ &\quad \times (t_d - 91) + 4.6 \cos \frac{6\pi}{365} t_d, \\ T_{1ev}(t_d) &= 97 + 23.6 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 182) + \\ &\quad + 1.9 \cos \frac{4\pi}{365} (t_d - 182), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\chi_{ev}(t_d) &= 101 + 4.1 \cos \frac{2\pi}{365} t_d, \\ \Delta\chi_{ev}(t_d) &= 6.8 + 2.2 \cos \frac{2\pi}{365} t_d, \\ T_{0mo}(t_d) &= 176 + 8.6 \cos \frac{2\pi}{365} t_d + 3.0 \cos \frac{4\pi}{365} \times \\ &\times (t_d - 74) + 1.2 \cos \frac{6\pi}{365} (t_d - 105), \\ T_{1mo}(t_d) &= 75 + 4.4 \cos \frac{2\pi}{365} t_d,\end{aligned}$$

где T_{0ev} ; T_{1ev} ; T_{0mo} ; T_{1mo} измеряются в К.

$$\chi_{mo} t_d = 95, \quad \Delta\xi\chi_{mo}(t_d) = 1.6.$$

Сопоставление средних вариаций логарифма измеренной интенсивности (рэлей) с температурой эмиссии (0–1) 1.58 мкм в течение вечерних и утренних сумерек позволили выявить высокую степень их соответствия, для которой коэффициенты корреляции превышали значения 0.9. Примеры для сентября, декабря и марта месяцев показаны на рис. 5. Уравнения регрессии

$$T(t_d, \chi) = T_0(t_d) + T_1(t_d) \lg[I(\chi)],$$

для сезонных вариаций параметров вечерних сумерек ($\chi = 90$ –125) таковы:

$$\begin{aligned}T_{ev}(\chi, t_d) &= \left[82 + 10 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 56) + 23 \cos \frac{4\pi}{365} \times \right. \\ &\times (t_d - 39) + 13 \cos \frac{6\pi}{365} (t_d - 17) + 6 \cos \frac{8\pi}{365} \times \\ &\times (t_d - 8) + 2 \cos \frac{10\pi}{365} (t_d - 15) + 3 \cos \frac{12\pi}{365} (t_d - 21) \left. \right] + \\ &+ \left[35 + 2 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 213) + 7 \cos \frac{4\pi}{365} \times \right. \\ &\times (t_d - 126) + 4 \cos \frac{6\pi}{365} (t_d - 78) + 2 \cos \frac{8\pi}{365} \times \\ &\times (t_d - 58) + \cos \frac{10\pi}{365} (t_d - 46) + 0.7 \cos \frac{12\pi}{365} \times \\ &\left. \times (t_d - 37) \right] \lg[I(\chi)];\end{aligned}$$

для утренних сумерек ($\chi = 125$ –90):

$$\begin{aligned}T_{mo}(\chi, t_d) &= \left[66 + 8 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 31) + 19 \cos \frac{4\pi}{365} \times \right. \\ &\times (t_d - 59) + 5 \cos \frac{6\pi}{365} (t_d - 29) + 6 \cos \frac{8\pi}{365} \times \\ &\times (t_d - 24) + 3 \cos \frac{10\pi}{365} (t_d - 13) + 2 \cos \frac{12\pi}{365} (t_d - 14) \left. \right] + \\ &+ \left[40 + 2 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 172) + 5 \cos \frac{4\pi}{365} \times \right. \\ &\times (t_d - 143) + 2 \cos \frac{6\pi}{365} (t_d - 98) + 2 \cos \frac{8\pi}{365} \times \\ &\times (t_d - 67) + \cos \frac{10\pi}{365} (t_d - 55) + 0.5 \cos \frac{12\pi}{365} \times \\ &\left. \times (t_d - 42) \right] \lg[I(\chi)].\end{aligned}$$

Таким образом, наземные измерения температуры по эмиссии ИКАО₂ 1.58 мкм в течение сумеречных периодов суток (зенитные углы Солнца $\chi \geq 90^\circ$) позволяют, при использовании ранее выявленных закономерностей вариаций высоты максимума объемной интенсивности излучающего слоя [Липатов, 2011], определять высотное распределение температуры средней атмосферы на высотах 60–90 км.

Кроме этого, выявленная корреляция температуры эмиссии 1.58 мкм с логарифмом измеренной ее интенсивности, также позволяет производить оценку температуры излучающего слоя этой эмиссии по измеренной интенсивности для заданного зенитного угла Солнца.

Лимбовые измерения интенсивности эмиссии 1.27 мкм проводились на спутнике SABER при помощи фотометра в интервале спектра 1.254–1.298 мкм [Mlynczak et al., 2007]. Сканирование охватывало диапазон высот от поверхности Земли до высоты 400 км. На основе этих данных был сделан вывод об отсутствии термодинамического равновесия для эмиссии 1.27 мкм на высотах выше стратосферы, при котором значения температуры эмиссии изменялись на высотах от стратосферы до мезопаузы от 1400 до 1000 К.

Совершенно очевидно, что при лимбовых измерениях фотометр регистрирует излучение вдоль линии визирования на высотах, значительно превышающих интервал высот средней атмосферы. Поэтому наблюдаемый эффект был обусловлен излучением на высотах выше 100 км. Аналогичные явления уже регистрировались при измерениях излучения высоковозбужденных вращательных линий эмиссии гидроксидов как по наземным наблюдениям ($N = 9$) [Перминов и Семенов, 1992], так и на космическом корабле Space

Shuttle ($N = 33$) [Smith et al., 1992; Dodd et al., 1993; Шефов и др., 2006].

Как следует из изложенных данных наземных спектрофотометрических измерений, температура излучающего слоя эмиссии 1.27 мкм полностью соответствует температуре средней атмосферы.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые на основе регулярных спектрофотометрических наблюдений излучения полосы (0–1) 1.58 мкм ИКАО₂ в течение 2010 г. произведено определение ее вращательной температуры. На основе систематизации и анализа результатов исследований вариаций параметров излучающего слоя ИКАО₂ по данным ракетных и спутниковых исследований получены взаимосвязанные соотношения всех параметров излучающего слоя эмиссии 1.27 мкм.

Авторы благодарны А.И. Семенову за советы и внимание при обработке полученного нового материала, активное обсуждение результатов, а также И.В. Медведевой за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Липатов К.В., Перминов В.И.* Эмпирическая модель вариаций эмиссии Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода. 1. Интенсивность // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 4. С. 541–553. 2012.
- *Липатов К.В.* Эмпирическая модель вариаций эмиссии Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода. 2. Высота излучающего слоя // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. № 1. С. 110–118. 2013.
- *Перминов В.И., Семенов А.И.* Неравновесность вращательной температуры полос ОН с высоким колебательным возбуждением // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 32. № 2. С. 175–178. 1992.
- *Семенов А.И., Перминов В.И., Липатов К.В., Хомич В.Ю.* Оценка сезонных изменений интенсивности Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51. № 3. С. 419–424. 2011.
- *Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю.* Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 741 с. 2006.
- *Dodd J.A., Blumberg W.A.M., Lipson S.J., Lowell J.R., Armstrong P.S., Smith D.R., Nadile R.M., Wheeler N.B., Huppi E.R.* OH(v, N) column densities from high-resolution Earthlimb spectra // Geophys. Res. Lett. V. 20. № 4. P. 305–308. 1993.
- *Herzberg L., Herzberg G.* Fine structure of the Infrared Atmospheric oxygen bands // Astrophys. J. V. 105. № 3. P. 353–359. 1947.
- *Kovács I.* Rotational structure in the spectra of diatomic molecules. Budapest: Akadémiiai Kiadó, 320 p. 1969.
- *Mlynczak M.G., Marshall B.T., Martin-Torres F.J., Russell III J.M., Thompson R.E., Remsburg E.E., Gordley L.L.* Sounding of the atmosphere using broadband emission radiometry observations of daytime mesospheric O₂(¹Δ) 1.27 μm emission and derivation of ozone, atomic oxygen, and solar and chemical energy deposition rates // J. Geophys. Res. V. 112. № D15306. 11 p. doi:10.1029/2006JD008355. 2007.
- *Molher O.C., Pierce A.M., McMath R.R., Goldberg L.* Photometric atlas of the infra-red solar spectrum λ 8465 to λ 25242 Å. Ann Arbor: Michigan Univer. Press, 196 p. 1950.
- *Smith D.R., Blumberg W.A.M., Nadile R.M., Lipson S.J., Huppi E.R., Wheeler N.B.* Observation of high-N hydroxyl pure rotation lines in atmospheric emission spectra by the CIRRIS 1A Space Shuttle experiment // Geophys. Res. Lett. V. 19. № 6. P. 593–596. 1992.
- *Van Vleck J.H.* Magnetic dipole radiation and the Atmospheric absorption bands of oxygen // Astrophys. J. V. 80. № 3. P. 161–170. 1934.