

УДК 550.388

## ОЦЕНКА СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ИНФРАКРАСНОЙ АТМОСФЕРНОЙ СИСТЕМЫ МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА

© 2011 г. А. И. Семенов, В. И. Перминов, К. В. Липатов, В. Ю. Хомич

*Учреждение РАН Институт физики атмосферы*

*им. А.М. Обухова, Москва*

*e-mail: anasemenov@yandex.ru*

Поступила в редакцию 05.08.2010 г.

После доработки 07.09.2010 г.

На основе данных измерений интенсивности эмиссии 1.58 мкм Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода (ИКАО<sub>2</sub>), выполненных на Звенигородской научной станции ИФА РАН ( $\varphi = 55.7^\circ\text{N}$ ,  $\lambda = 36.8^\circ\text{E}$ ), сделана оценка сезонных вариаций для различных зенитных углов Солнца. Их амплитуда имеет максимальное значение при зенитных углах Солнца  $\chi_S \sim 105 - 110^\circ$ , при  $\chi_S \sim 125 - 130^\circ$  она уменьшается, и стремится к нулю при  $\chi_S \sim 80 - 85^\circ$ . Сопоставление измеренных в настоящее время значений интенсивности эмиссии 1.58 мкм Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода с опубликованными данными об интенсивностях этой эмиссии, полученных в 1961–1966 гг., выявили их уменьшение в течение ~50-ти лет. Этот факт хорошо согласуется с аналогичным поведением интенсивности эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм за рассматриваемый период.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

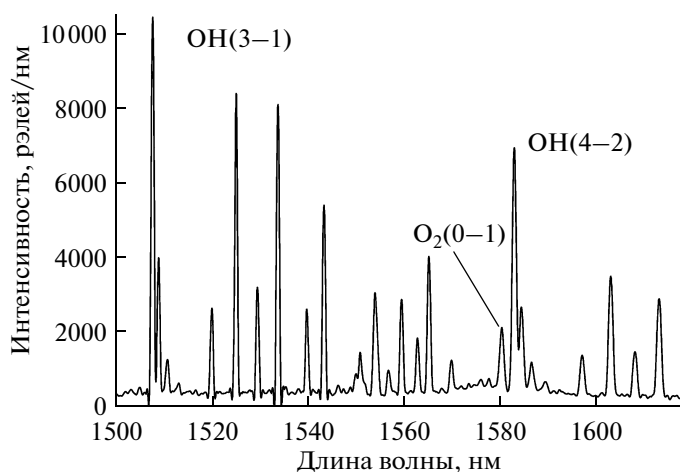
В дневном излучении при помощи приборов, поднятых на аэростатах, полоса (0–0) 1.27 мкм Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода (ИКАО<sub>2</sub>) впервые была зарегистрирована в собственном излучении атмосферы в 1956 г. [Гопштейн и Кушпиль, 1964; Gopshtein and Kushpil, 1965]. Необходимо отметить, что в то время авторами этих измерений зарегистрированный инфракрасный спектр не был отождествлен как Инфракрасная Атмосферная система молекулярного кислорода. В дальнейшем, исследования Инфракрасной Атмосферной системы проводились в основном с помощью эмиссии в полосе (0–1) 1.58 мкм, которая уверенно регистрируется при наземных измерениях, в то время как полоса (0–0) 1.27 мкм испытывает сильное поглощение в нижних слоях атмосферы. Первые наземные наблюдения инфракрасной эмиссии (0–1) 1.58 мкм в сумеречных условиях были проведены в начале 1957 г. в Канаде [Vallance Jones and Harrison, 1958; Noxon and Vallance Jones, 1962], где в дальнейшем и проводились ее основные исследования [Vallance Jones and Gattinger, 1963; Evans et al., 1970; Gattinger and Vallance Jones, 1966; 1973]. Вследствие трудностей наблюдений в этой области спектра измерения полосы (0–0) 1.27 мкм осуществлялись эпизодически при помощи приборов, поднимаемых на баллонах и самолетах. Полоса (0–1) 1.58 мкм мерялась преимущественно в наземных условиях. В дневных условиях эмиссия 1.27 мкм достигает интенсивности почти 60 мегарэлей при зенитном угле

Солнца  $\chi_S = 0^\circ$ , [Wraight and Gadsden, 1975], эмиссия 1.58 мкм – 720 килорэлей. Кроме того, из-за недостаточной чувствительности приемников излучения в те годы наблюдения удавалось проводить в сумеречных условиях до зенитных углов Солнца не более чем до  $110^\circ$ . Попытка систематизации разрозненных данных измерений при различных зенитных углах Солнца, в различные годы, при различных условиях солнечной активности и приведения их к однородным гелио-геофизическим условиям была предпринята в работе [Noxon, 1982], которая, к сожалению, не была доведена до конца. С середины 1990-х годов никаких публикаций о результатах измерений этого излучения больше не было.

### 2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Спектрофотометрические измерения Инфракрасной Атмосферной системы молекулы кислорода имеют существенные трудности, обусловленные необходимостью применения высокочувствительных приемников излучения в области спектра 1–2 мкм. Это обусловило определенную ограниченность таких исследований в течение нескольких десятков лет.

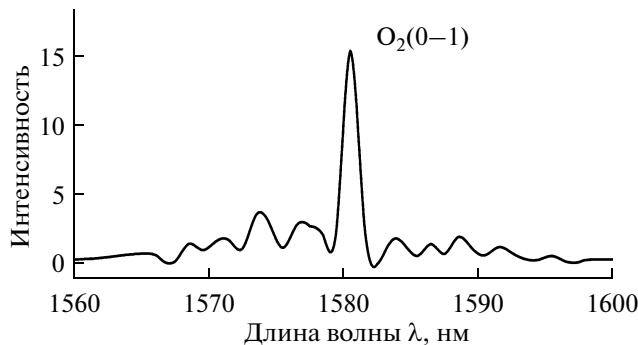
В начальный период исследований этих эмиссий, как при наземных [Gush and Vallance Jones, 1955; Harrison and Vallance Jones, 1957; Hunten et al., 1967], так и самолетных [Noxon and Vallance Jones, 1962], баллонных [Gush and Vuijs, 1964], ракетных [Evans et al., 1972; Yamamoto et al., 1989] и спутниковых [Thomas et al., 1984] измерениях, в качестве



**Рис. 1.** Регистрограмма полосы (0–1) 1.58 мкм Инфракрасной Атмосферной системы молекулы кислорода. Данные измерений в Звенигороде 16.02.2010 г., 18:55, экспозиция 1 мин.  $\delta_S = -12.3^\circ$ ,  $\chi_S = 114.1^\circ$ . В полночь  $\chi_S = 136.6^\circ$ .

приемников излучения использовались охлаждаемые фотосопротивления PbS или Ge. Для наземных измерений использовались спектрометры, имеющие разрешающую способность 10 нм. Время сканирования области спектра 1–2 мкм составляло 5 мин. При баллонных и ракетных измерениях применялись фотометры, в которых попеременно при помощи прерывателя измерялись потоки через широкий светофильтр с полушириной 100 нм и затем этот же поток через узкий светофильтр с полушириной 12 нм. В этом случае в измеряемый поток излучения эмиссии ИКАО<sub>2</sub> неизбежно добавлялось излучение соседних полос гидроксила.

С 2009 г. измерения эмиссии Инфракрасной Атмосферной системы O<sub>2</sub> (0–0) 1.27 мкм и (0–1) 1.58 мкм были начаты в Звенигороде при помощи спектрографов СП-50 [Герасимова и Яковлева, 1956; Шефов и др., 2006], использующих линейные приемники, оснащенные ПЗС, имеющих максимум чувствительности в инфракрасной области спектра (0.8–1.7 мкм) Andor DU492A-1.7 (InGaAs) [Oriel, 1999]. Это давало возможность осуществлять одновременную регистрацию всей измеряемой области спектра, что исключало влияния возможных естественных вариаций интенсивности различных участков спектра за время экспозиции и позволяло выделять необходимые участки спектра с эмиссией ИКАО<sub>2</sub> без блендирования полосами ОН. Экспозиция для зенитных углов Солнца  $\chi_S \sim 90$ – $150^\circ$  составляла 1 мин. Поскольку полоса 1.27 мкм значительно искажена поглощением в нижних слоях атмосферы, то ее регистрация была нецелесообразна из-за сложностей учета поглощения в атмосфере. Поэтому регулярные измерения проводились прак-



**Рис. 2.** Регистрограмма полосы (0–1) 1.58 мкм Инфракрасной Атмосферной системы молекулы кислорода по результатам расчета,  $T = 250$  К.

тически только для полосы 1.58 мкм. Примеры наземных измерений полосы (0–1) 1.58 мкм и рассчитанных спектральных распределений интенсивности излучения для рассматриваемых спектральных интервалов для температуры  $T_r = 250$  К представлены на рис. 1 и 2.

Особенность спектрального состава вращательно-колебательных полос этой электронной системы молекулы кислорода состоит в том, что они имеют 9 ветвей, обусловленных переходами между электронными состояниями  $a^1\Delta_g$  и  $X^3\Sigma_g^-$ :  $^S R$ ,  $^R R$ ,  $^Q R$ ,  $^R Q$ ,  $^Q Q$ ,  $^P Q$ ,  $^Q P$ ,  $^P P$ ,  $^O P$  с взаимно перекрывающимися линиями. Поэтому при разрешающей способности регистрограмм  $\sim 10$  нм структура имеет главный максимум, обусловленный линиями ветвей  $^R Q$ ,  $^Q Q$ ,  $^P Q$  и соседними более слабыми ветвями с коротковолновой стороны (слева на рис. 2)  $^S R$ ,  $^R R$ ,  $^Q R$  и с длинноволновой стороны (справа на рис. 2)  $^Q P$ ,  $^P P$ ,  $^O P$  [Herzberg and Herzberg, 1947]. При наземных измерениях на полученных спектрограммах видно, что длинноволновая часть полосы (0–1) блендируется излучением ветви Q полосы (4–2) гидроксила. Поэтому оценка полной интенсивности полосы O<sub>2</sub> (0–1) может быть сделана на основе главного максимума и соотношения его с коротковолновой частью этой полосы. Это соотношение зависит от вращательной температуры, которая соответствует температуре внутри излучающего слоя. Соответствующая расчетная зависимость от отношения интенсивностей участков спектра полосы (0–1) 1580 нм представлена на рис. 3. Коэффициенты корреляции  $r = 0.999$ .

$$T_r = 213.2 + 192.1 \left[ \frac{I(1580)}{I(1574) + I(1577)} - 2 \right],$$

где  $T_r$  выражена в К.

Использование этого выражения для определения температуры по данным измерений интенсив-

ности эмиссии 1.58 мкм позволяет оценивать температуру с погрешностью ~10–15 К.

Расчет отношений суммарных интенсивностей ветвей к полной интенсивности полосы показал, что практически в пределах 1–1.5% они не изменяются в интервале температур 180–280 К, и относительные доли составляют: ветвь  $\Sigma R = 41\%$ , ветвь  $\Sigma Q = 34\%$ , ветвь  $\Sigma P = 25\%$ . Таким образом, реально регистрируемая часть колебательно-вращательной полосы 1.58 мкм составляет 75% от полной ее интенсивности.

Согласно данным измерений высот излучающих слоев молекулярного кислорода для различных зенитных углов Солнца в течение сумерек они изменяются в интервале 50–100 км. Поэтому вычисленное значение температуры дает возможность оценить высоту излучающего слоя Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода для конкретных условий измерений.

Для правильной оценки интенсивности полосы (0–0) 1.27 мкм важно знание соотношения вероятностей переходов (0–0) и (0–1). Этому было посвящено много работ, в том числе и теоретических [Mlynczak and Nesbitt, 1995]. В одной из них [Newman et al., 1999] представлены результаты новейших измерений указанного соотношения в лабораторных условиях и их сопоставление со всеми известными данными. Было показано, что наиболее вероятным значением является  $A_{(0-0)} = 2.19 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ . Согласно работам [Haslett and Fehsenfeld, 1969; Pick et al., 1971] отношение  $\frac{A_{(0-0)}}{A_{(0-1)}} = 80$ . Отсюда вероятность для перехода (0–1)  $A_{(0-1)} = 2.7 \times 10^{-6} \text{ c}^{-1}$ .

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В многочисленных работах, в которых приводятся непосредственные данные об измеренных вариациях интенсивности эмиссий 1.27 мкм и 1.58 мкм, основное внимание уделялось сопоставлению полученных данных с результатами теоретических расчетов, с целью выявления наиболее предпочтительных фотохимических механизмов образования эмиссий и определения их характеристик.

Вариации интенсивности эмиссии 1.27 мкм в течение ночного времени суток в большинстве случаев тесно коррелируют с вариациями интенсивности гидроксильного излучения и эмиссии 557.7 нм [Vallance Jones, 1973; Gattinger and Vallance Jones, 1973]. В вечерние сумерки при изменении зенитного угла Солнца  $\chi_S$  от 70 до 100° интенсивность резко уменьшается от 20 мегарэлей до 250 килорэлей. Причем скорость этого уменьшения больше в летнее время, чем в зимнее время. В сезонном поведении летом наблюдается глубокий минимум сумеречной интенсивности и ее максимум в середине зимы. В

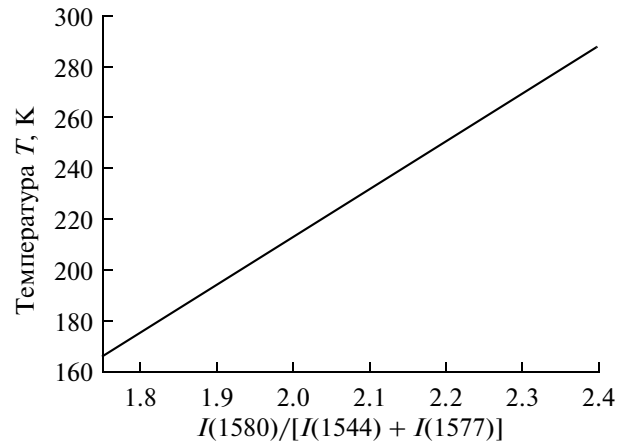


Рис. 3. Зависимость вращательной температуры полосы (0–1) 1.58 мкм от соотношения интенсивностей ветвей  $Q$  и суммы двух участков ветви  $R$ .

дневное время интенсивность мало меняется в течение года.

В настоящей работе на основе данных регулярных измерений эмиссии  $\text{O}_2$  1.58 мкм исследуются закономерности временных изменений интенсивности ее излучения в зависимости от соответствующих гелио-геофизических условий. Для этого были использованы данные спектрофотометрических измерений, выполненных на станции Звенигород в период декабрь 2009 г.—июль 2010 г.

Уже первые результаты регистрации эмиссии 1.58 мкм с экспозициями 1 мин показали, что наблюдаются существенные флуктуации интенсивности с увеличением зенитного угла Солнца. Вблизи полноты эти флуктуации усиливаются, часто имеется максимум интенсивности. Такой результат, по-видимому, обусловлен тем, что излучающий слой эмиссии находится на высотах около 100 км и отображает турбулентную структуру на тех высотах, где имеется излучение атомарного кислорода 557.7 нм. В силу этого обстоятельства при построении временных вариаций в ночное время суток было произведено предварительное сглаживание с интервалом 5 мин. Пример характерных вариаций для зенитного угла Солнца  $\chi_S = 100^\circ$  для марта (15 и 24) 2010 г. показан на рис. 4. Следует отметить, что геометрическая высота тени Земли при условии учета высоты экранирования ~10 км для указанного значения  $\chi_S = 100^\circ$  соответствует 108 км. Тем не менее, эффективная высота излучающего слоя перемещается медленнее, чем высота тени Земли, что и проявляется в характере вариаций в течение вечерних сумерек [Gattinger and Vallance Jones, 1966]. Согласно ракетным измерениям слабые интенсивности эмиссий  $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$  прослеживаются до 115 км [Bishop et al., 1972; Yamamoto et al., 1992].

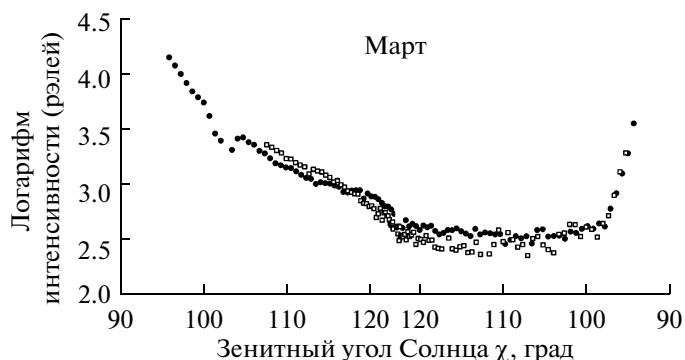


Рис. 4. Среднемесячные вариации интенсивности эмиссии (0–1) 1.58 мкм в ночное время. Точки – 15.03.2010 г., полые квадраты – 24.03.2010 г.

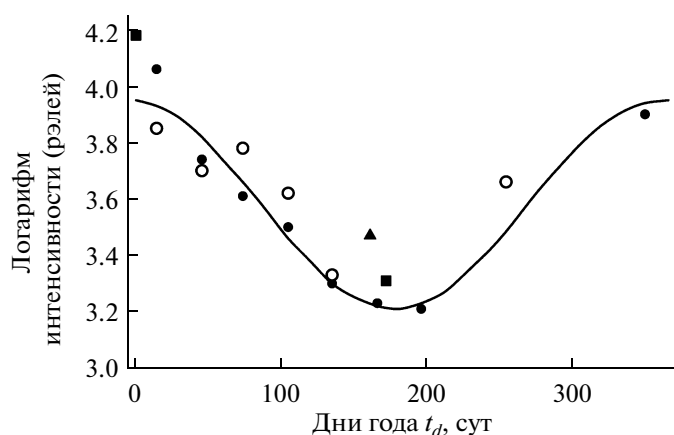


Рис. 5. Среднемесячные вариации интенсивности эмиссии (0–1) 1.58 мкм в ночное время для зенитного угла Солнца  $\chi = 100^\circ$ . Точки – Звенигород, полые кружки [Vallance Jones and Gattinger, 1963], квадраты [Gattinger, 1968], треугольник [Noxon, 1982].

Полученные данные позволили выявить вариации среднемесячных значений интенсивности для различных значений зенитного угла Солнца. Они показаны на рис. 5. Одновременно показаны отдельные данные измерений в период 1961–1973 гг. для  $\chi_S = 100^\circ$ , которые наиболее информативно сопровождалась сведениями об условиях измерений. Аппроксимация сезонного поведения интенсивности может быть представлена в виде

$$\lg I_{1.58}(\text{рэлей}) = 3.58 + 0.37 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d + 5),$$

где  $t_d$  – день года.

Особенность суточных вариаций интенсивности для различных месяцев года обнаруживается при их анализе для различных зенитных углов Солнца.

В работе [Noxon, 1982] была предпринята попытка систематизации накопленных данных за истекший период 1957–1973 гг. на основе исследова-

ний эмиссии 1.27 мкм. Представленные в ней сезонные вариации, приведенные для зенитного угла Солнца  $\chi_S = 90^\circ$ , были составлены из небольшого количества данных измерений в различных широтных интервалах в диапазоне  $40^\circ\text{S}–75^\circ\text{N}$  с неравномерным распределением по месяцам, и с отсутствием указания на годы измерений, для которых были характерны определенные уровни солнечной активности. Поэтому их сопоставление с другими данными имеет некоторые ограничения.

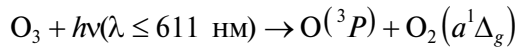
#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов измерений интенсивностей эмиссии  $\text{O}_2$  1.58 мкм для различных зенитных углов Солнца  $\chi_S$  показывает, что амплитуды сезонных вариаций зависят от  $\chi_S$ . Данные работы [Noxon, 1982], указанные выше, хотя и не дают возможности для уверенного получения сезонной зависимости интенсивности из-за существенной дисперсии данных и наличия только одного значения для января месяца, все же указывают, что для условий  $\chi_S = 90^\circ$  амплитуда косинусоидального характера вариаций интенсивности составляет в логарифмической шкале не более 0.11. Построение сезонных закономерностей, аналогично тем, которые представлены на рис. 5 для  $\chi_S = 100^\circ$ , для зенитных углов Солнца  $95^\circ \leq \chi_S \leq 120^\circ$ , а также использование данных работы [Noxon, 1982], показало, что амплитуды сезонных вариаций в логарифмической шкале имеют максимум от 0.34 до 0.43 для зенитных углов Солнца  $\chi_S \sim 105–110^\circ$ , уменьшаются для  $\chi_S \sim 120–130^\circ$  и стремятся к нулю для значений  $\chi_S \sim 80–85^\circ$  [Llewellyn et al., 1973]. Поскольку механизмы образования эмиссии метастабильных молекул кислорода и эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм в ночное время определяются одними и теми же реакциями, то вероятные сезонные изменения интенсивности эмиссии 1.58 нм (интенсивность составляет 500–600 рэлей) для этих условий должны, по-видимому, совпадать с поведением эмиссии 557.7 нм для соответствующей географической широты. Характерный максимум интенсивности 557.7 нм в середине ночи [Шефов и др., 2006] прослеживается в этих же условиях и для эмиссии 1.58 нм.

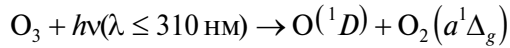
Сравнение на рис. 5 данных измерений на станции Звенигород в 2009–2010 гг. и опубликованных измерений в Саскатуне ( $\varphi = 52.1^\circ\text{N}$ ,  $\lambda = 253.3^\circ\text{E}$ ), проводившихся в течение ряда лет 1961–1966 гг. [Vallance Jones and Gattinger, 1963; Gattinger, 1968; Noxon, 1982] для зенитного угла  $\chi_S = 100^\circ$ , отчетливо свидетельствуют об уменьшении интенсивности эмиссии 1.58 мкм за прошедший интервал лет. В указанные периоды были небольшие изменения в индексах солнечной активности. К сожалению, имеющиеся в работе [Gattinger and Vallance Jones, 1966] сведения о влиянии солнечной активности на интенсивность эмиссии 1.58 мкм не позволяют

привести наблюдаемые вариации интенсивности к одному уровню солнечной активности, поскольку не имеют связи с абсолютной интенсивностью эмиссии.

В дневное время образование возбужденных метастабильных молекул кислорода происходит в результате реакций фотолиза озона [Nicolet, 1971]



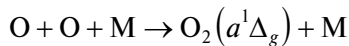
$$j_{\text{O}_3}(a^1\Delta_g) = 1 \times 10^{-2}, \text{ с}^{-1},$$



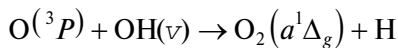
$$j_{\text{O}_3}(a^1\Delta_g) = 1 \times 10^{-2}, \text{ с}^{-1},$$

которые обуславливают свечение на высотах выше 50 км.

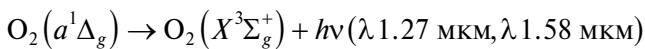
Возникновение эмиссии  $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$  в ночное время, т.е. для зенитных углов Солнца  $\chi_S \geq 100^\circ$ , обуславливается реакциями [Gattinger, 1971]



$$\alpha_{\text{OOM}}(a^1\Delta_g) = 2.2 \times 10^{-14} (200/T)^2, \text{ см}^3 \text{ с}^{-1},$$



$$\alpha_{\text{O-OH}} = 3 \times 10^{-12} \times \sqrt{T}, \text{ см}^3 \text{ с}^{-1},$$

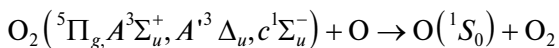


$$A_{1.27} = 2.19 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}.$$

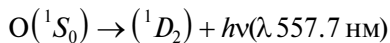
Такой же фотохимический процесс обуславливает и возникновение эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм [Barth and Hildebrandt, 1961]



$$\alpha_{\text{O}_2} = 5.5 \times 10^{-33} \times (200/T)^2, \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$$



$$\alpha_{\text{O}} = 1 \times 10^{-12}, \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$$



$$A_{557.7} = 1.215 \text{ с}^{-1}$$

Поэтому сходство суточных и сезонных вариаций интенсивностей и температур этих эмиссий в ночное время для указанных выше условий является вполне естественным.

При сопоставлении данных измерений в Канаде в начале 1960-х годов и в Звенигороде в 2009–2010 гг. обнаруживается систематическое уменьшение интенсивности, которое составляло приблизительно  $-3\%$  год $^{-1}$ . На основе многолетних измерений в Абастумани ( $\varphi = 41.8^\circ \text{ N}$ ,  $\lambda = 42.8^\circ \text{ E}$ ) [Фишкова и др., 2001] аналогичный тренд за период 1969–1990 гг. составил  $-(1-2)\%$  год $^{-1}$ . По-види-

мому, имеется также и сезонная изменчивость выявленного тренда эмиссии ИКАО $_2$ , имеющая сходство с данными для эмиссии 557.7 нм. Дальнейшее накопление данных о характеристиках эмиссии 1.58 мкм ИКАО $_2$  даст возможность для анализа и уточнения сезонных вариаций тренда ее интенсивности для различных зенитных углов Солнца.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные на станции Звенигород наблюдения интенсивности эмиссии молекулярного кислорода (0–1) 1.58 мкм позволили установить новые закономерности вариаций в течение года в зависимости от зенитного угла Солнца, а также их многолетние отрицательные тренды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Герасимова Н.Г., Яковлева А.В. Комплект светосильных спектрографов с дифракционными решетками // Приборы и техника эксперимента. 1956. № 1. С. 83–86.
- Гопштейн И.М., Кушпиль В.И. Дневное свечение верхних слоев атмосферы Земли в области 1.25 мкм // Космич. исслед. Т. 2. № 4. С. 619–622. 1964.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС. 741 с. 2006.
- Bishop R.H., Baker K.D., Han R.Y. Altitude profile of  $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$  at night // J. Atmos. Terr. Phys. V. 34. № 9. P. 1477–1482. 1972.
- Barth C.A., Hildebrandt A.F. The 557.7 Å airglow emission mechanism // J. Geophys. Res. V. 66. № 3. P. 985–986. 1961.
- Evans W.F.J., Wood H.C., Llewellyn E.J. Ground-based photometric observations of the 1.27 μ band of  $\text{O}_2$  in the twilight airglow // Planet. Space Sci. V. 18. № 7. P. 1065–1073. 1970.
- Gattinger R.L., Vallance Jones A. The  ${}^1\Delta_g - {}^3\Sigma_g^-$   $\text{O}_2$  bands in the twilight and day airglow // Planet. Space Sci. V. 14. № 1. P. 1–14. 1966.
- Gattinger R.L. Observation and interpretation of the  $\text{O}_2({}^1\Delta_g - {}^3\Sigma_g^-)$  airglow emissions // Canad. J. Phys. V. 46. № 14. P. 1613–1626. 1968.
- Gattinger R.L. Interpretation of airglow in terms of excitation mechanisms // The radiating atmosphere / ed. B.M. McCormac. Dordrecht-Holland: D. Reidel Publ. Co. P. 51–63. 1971.
- Gattinger R.L., Vallance Jones A. Observation and interpretation of hydroxyl airglow emission // Physics and chemistry of atmosphere / ed. B.M. McCormac. Boston: D. Reidel Publ. Co. P. 184–192. 1973.
- Gopshtein N.M., Kushpil V.I. Dayglow of the upper layers of the Earth's atmosphere in the 1.27 μ region // Planet. Space Sci. V. 13. № 5. P. 457–460. 1965.
- Gush H.P., Vallance Jones A. Infrared spectrum of the night sky from 1.0 μ to 2.0 μ // J. Atmos. Terr. Phys. V. 7. № 3. P. 285–291. 1955.

- *Gush H.P., Buijs H.L.* The near infrared spectrum of the night airglow observed from high altitude // *Canad. J. Phys.* V. 42. № 6. P. 1037–1045. 1964.
- *Harrison A.W., Vallance Jones A.* Measurements of the absolute intensity of the aurora and night airglow in the 0.9–2.0  $\mu$  region // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 11. № 2. P. 192–199. 1957.
- *Haslett J.C., Fehsenfeld F.C.* Ratio of the  $O_2(^1\Delta_g - ^3\Sigma_g^-)$  (0, 0), (0, 1) transitions // *J. Geophys. Res.* V. 74. № 7. P. 1878–1879. 1969.
- *Herzberg L., Herzberg G.* Fine structure of the Infrared Atmospheric oxygen bands // *Astrophys. J.* V. 105. № 3. P. 353–359. 1947.
- *Hunten D.M., Rundle H.N., Shepherd G.G., Vallance Jones A.* Optical upper atmospheric investigations of the University of Saskatchewan // *Appl. Optics.* V. 6. № 10. P. 1609–1623. 1967.
- *Llewellyn E.J., Evans W.E.J., Wood H.C.*  $O_2(^1\Delta)$  in the atmosphere // *Physics and chemistry of upper atmosphere* / ed. B.M. McCormac. Dordrecht-Holland: D. Reidel Publ. Co. P. 193–202. 1973.
- *Llewellyn E.J., McDade I.C.* Singlet molecular oxygen in planetary atmospheres // *J. Photochem.* V. 25. № 4. P. 379–388. 1984.
- *Mlynczak M.C., Nesbitt D.J.* The Einstein coefficient for spontaneous emission of the  $O_2(a^1\Delta_g)$  state // *Geophys. Res. Lett.* V. 22. № 11. P. 1381–1384. 1995.
- *Newman S.M., Lane I.C., Orr-Ewing A.J., Newnham D.A., Ballard J.* Integrated absorption intensity and Einstein coefficients for the  $O_2 a^1\Delta_g - X^3\Sigma_g^-$  (0, 0) transition: a comparison of cavity ring-down and high resolution Fourier transform spectroscopy with a long-path absorption cell // *J. Chem. Phys.* V. 110. № 22. P. 10749–10757. 1999.
- *Nicolet M.* Aeronomic reactions of hydrogen and ozone // *Mesospheric model and related experiments* / ed. G. Fiocco. Dordrecht-Holland: D. Reidel Publ. Co. P. 1–51. 1971.
- *Noxon J.F.* A global study of  $O_2(^1\Delta_g)$  airglow: day and twilight // *Planet. Space Sci.*, V. 30. № 6. P. 545–557. 1982.
- *Noxon J.F., Vallance Jones A.* Observation of the (0, 0) band of the  $(^1\Delta_g - ^3\Sigma_g^-)$  system of oxygen in the day and twilight airglow // *Nature.* V. 196. № 4850. P. 157–158. 1962.
- *Oriel.* The book of photon tools. Stratford: Oriel Instruments. 800 p. 1999.
- *Pick D.R., Llewellyn E.J., Vallance Jones A.* Twilight airglow measurements of the OH and  $O_2$  bands by means of balloon-borne instruments // *Can. J. Phys.* V. 49. № 7. P. 897–905. 1971.
- *Thomas R.J., Barth C.A., Rusch D.W., Sanders R.W.* Solar Mesosphere Explorer near-infrared spectrometer: measurements of 1.27- $\mu m$  radiances and the inference of mesospheric ozone // *J. Geophys. Res.* V. 89. № D6. P. 9569–9580. 1984.
- *Vallance Jones A., Harrison A.W.*  $^1\Delta_g - ^3\Sigma_g^- O_2$  Infrared emission band in the twilight airglow spectrum // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 13. № 1/2. P. 45–60. 1958.
- *Vallance Jones A., Gattinger R.L.* The seasonal variation and excitation mechanism of the 1.58  $\mu$   $^1\Delta_g - ^3\Sigma_g^-$  twilight airglow band // *Planet. Space Sci.* V. 11. № 8. P. 961–974. 1963.
- *Vallance Jones A.* The infrared spectrum of the airglow // *Space Sci. Rev.* V. 15. № 2–3. P. 355–400. 1973.
- *Wraight P.C., Gadsden M.* Dayglow of the infrared atmospheric band system of  $O_2$  during a total eclipse of the Sun // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 87. № 5. P. 717–730. 1975.
- *Yamamoto H., Makino T., Naito I., Sekiguchi H.* Ground transmission and emission intensity of the  $O_2$  1.27  $\mu m$  nightglow // *J. Geomag. Geoelectr.* V. 41. № 12. P. 1043–1056. 1989.
- *Yamamoto H., Naito I., Makino T., Sekiguchi H.* Altitude distribution of the  $O_2$  1.27  $\mu m$  nightglow emission observed by a rocket-borne radiometer // *J. Geomag. Geoelectr.* V. 44. № 3. P. 207–221. 1992.