

УДК 550.388

ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВАРИАЦИЙ ИНФРАКРАСНОЙ АТМОСФЕРНОЙ СИСТЕМЫ МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА.

1. ИНТЕНСИВНОСТЬ

© 2012 г. К. В. Липатов, В. И. Перминов

ФГБУ науки Институт физики атмосферы

им. А.М. Обухова РАН, Москва

e-mail: anasemenov@yandex.ru

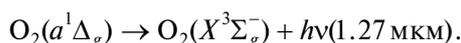
Поступила в редакцию 29.11.2010 г.

После доработки 11.08.2011 г.

На основе данных наземных спектрометрических наблюдений в Звенигороде (55.7° N, 36.8° E) и опубликованных результатов измерений интенсивности Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода, полученных на других станциях, рассчитаны эмпирические соотношения, описывающие вариации интенсивности эмиссии 1.58 мкм для различных гелио-геофизических условий.

1. ВВЕДЕНИЕ

Инфракрасная Атмосферная система молекулярного кислорода (ИКАО₂) первоначально была зарегистрирована в 1956 г. в дневном излучении при помощи приборов, поднятых на аэростатах [Гопштейн и Кушпиль, 1964; Gopshtein and Kushpil, 1965]. Справедливости ради, необходимо отметить, что авторами этой работы зарегистрированное ими излучение не было отождествлено как ИКАО₂. Результаты первых наблюдений ИКАО₂ в сумеречных условиях были представлены в работе [Vallance Jones and Harrison, 1958; Noxon and Vallance Jones, 1962]. Это излучение обуславливается переходом согласно [Herzberg and Herzberg, 1947]

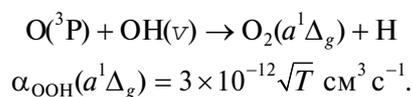
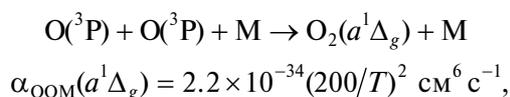


Реально наблюдаются только полосы (0–0) 1.27 мкм и (0–1) 1.58 мкм. Несмотря на малую величину вероятности перехода, коэффициент поглощения $\sigma_{1.27} = 6 \times 10^{-22} \text{ см}^2$ оказывается достаточным, чтобы оптическая толщина слоя атмосферы от поверхности до высот возникновения эмиссии ~80–100 км была велика $\tau_{1.27} \approx 10^4$. Вследствие этого излучение в полосе (0–0) 1.27 мкм сильно ослабляется при распространении к поверхности Земли (до земной поверхности достигает около 4% изначального излучения). При наземных измерениях регистрируется только часть полосы, обусловленная переходами между высокими вращательными уровнями, сильно искаженная в своем спектральном распределении. В ночных условиях интенсивность ИКА составляет ~100 килорэлей, в дневное время она достигает 60 мегарэлей. Для полосы (0–0) 1.27 мкм $A_{1.27}(aX) = 2.19 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ [Newman et al., 1999]. Из отноше-

ния вероятностей переходов $A_{1.27}(aX(0-0))/A_{1.58} \times (aX(0-1)) = 80$ [Haslett and Fehsenfeld, 1969; Pick et al., 1971] следует, что для полосы (0–1) 1.58 мкм $A_{1.58}(aX) = 2.7 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1}$. Это значение согласуется с данными измерений [Findlay, 1969]. Поэтому при наземных исследованиях характеристик излучения ИКАО₂ используется только эмиссия (0–1) 1.58 мкм.

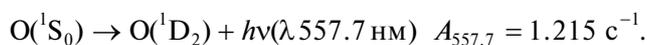
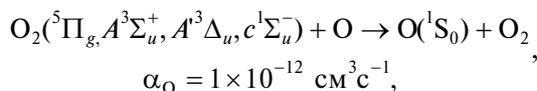
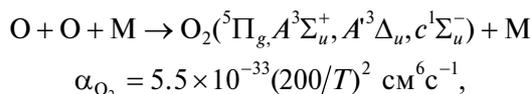
2. ФОТОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

В результате первых исследований были сделаны предположения о возможных механизмах возникновения этого излучения в ночное время, связанных с реакциями рекомбинации атомарного кислорода при тройных соударениях [Gattinger, 1971]



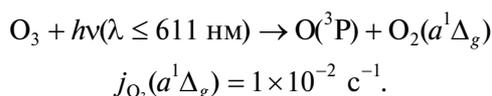
Один из механизмов возникновения возбужденных молекул $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$ в ночное время обусловлен переходами системы полос Чемберлена молекулы кислорода.

Фотохимический процесс, который обуславливает возникновение эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм [Barth and Hildebrandt, 1961; Barth, 1964] имеет большую общность с процессом эмиссии ИКАО₂ в ночное время

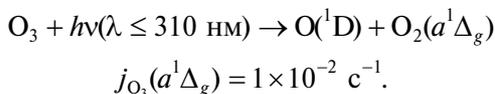


Поэтому сходство суточных и сезонных вариаций интенсивностей и температур этих эмиссий в ночное время для указанных выше условий является вполне естественным. Это дает основание использовать наблюдаемые вариации эмиссии 557.7 нм для поиска подобных вариаций и в поведении интенсивности эмиссии 1.58 нм в ночное время, когда последствия условий освещения средней атмосферы Солнцем приводят к затуханию процессов, связанных с фотолизом озона.

В дневных условиях основной механизм возбуждения свечения связан с реакцией фотолиза озона [Nicolet, 1971]



Однако реальный процесс фотолиза озона происходит за счет ультрафиолетового излучения Солнца в диапазоне полос Гартли



Это обуславливает существенное различие вариаций интенсивности эмиссии ИКАО₂ в течение вечерних и утренних сумерек [Шефов и др., 2006].

3. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭМИССИИ В СУМЕРЕЧНЫЕ ПЕРИОДЫ

При исследованиях характера поведения интенсивности эмиссии Инфракрасной Атмосферной системы молекулы кислорода в течение сумеречных измерений необходимо учитывать условия изменения высоты излучающего слоя эмиссии (0–0) 1.27 мкм или (0–1) 1.58 мкм.

При регистрации излучения в заданном направлении луча зрения прибора, измеряемая интенсивность определяется зенитным углом места измерения и азимутом, отсчитываемым от точки юга по часовой стрелке. Для этого случая горизонтальные координаты Солнца для места измерения – зенитный угол χ_0 и азимут A_0 определяются соотношениями

$$\cos \chi_0 = \sin \varphi_0 \sin \delta - \cos \varphi_0 \cos \delta \cos \tau_0,$$

$$\sin A_0 = -\frac{\cos \delta \sin \tau_0}{\sin \chi_0},$$

$$\cos A_0 = -\frac{\cos \varphi_0 \sin \delta + \sin \varphi_0 \cos \delta \cos \tau_0}{\sin \chi_0}.$$

Здесь δ – склонение Солнца, τ_0 – местное среднее солнечное время для географических координат места наблюдения широты φ_0 и долготы λ_0 . При необходимости более точных вычислений зенитного угла Солнца в формулах вместо местного среднего солнечного времени τ используется истинное местное солнечное время τ_{true} , для которого учитывается уравнение времени η , как указано ниже. Поскольку время исчисляется в часовой шкале, то при вычислениях, в которых используются аргументы тригонометрических функций в градусах, τ (градусы) = 15τ (часы).

Для зенитного направления линии визирования соотношение зенитного угла Солнца и регистрируемой геометрической высоты тени Земли Z с учетом высоты экранирующего слоя Z_0 , обуславливающей ослабление излучения преимущественно в коротковолновом диапазоне спектра, определяется формулой

$$1 + \frac{Z_0}{R_E} - \frac{R_E}{1 + \frac{Z}{R_E}} = \sin \chi,$$

где R_E – радиус Земли для средних широт, $R_E = 6374$ км. Отсюда

$$\frac{Z}{R_E} = \frac{1 + \frac{Z_0}{R_E}}{\sin \chi} - 1.$$

Географические координаты (φ_Z , λ_Z) точки на луче зрения, находящейся на высоте Z над поверхностью Земли, определяются угловым расстоянием ψ от места измерения согласно формулам

$$\cos \psi = \sin \varphi_0 \sin \varphi_Z + \cos \varphi_0 \cos \varphi_Z \cos(\lambda_0 - \lambda_Z),$$

$$\sin \psi = \frac{\cos \varphi_Z \sin(\lambda_0 - \lambda_Z)}{\sin A_0}.$$

Угол ψ связан с зенитным углом визирования ζ_0 и высотой Z формулой [Шефов и др., 2006]

$$\text{tg} \psi = \text{tg} \zeta_0 \frac{k \sqrt{1 + \left(1 - \frac{1}{k^2}\right) \text{tg}^2 \zeta_0 - 1}}{k \sqrt{1 + \left(1 - \frac{1}{k^2}\right) \text{tg}^2 \zeta_0 + \text{tg}^2 \zeta_0}},$$

где $k = 1 + \frac{Z}{R_E}$. Поскольку до высот $Z \sim 150$ км $k \leq 1.02$, то приблизительно

$$\operatorname{tg} \psi \approx \frac{(k-1) \operatorname{tg} \zeta_0}{1 + \operatorname{tg}^2 \zeta_0} = \frac{(k-1)Z}{2R_E} \sin 2\zeta_0.$$

Так как измерения производятся на высоте Z , вдоль луча зрения, то горизонтальные координаты Солнца для этого места будут определяться соотношениями, обусловленными географическими координатами (φ_Z, λ_Z)

$$\begin{aligned} \cos \chi_Z &= \sin \varphi_Z \sin \delta - \cos \varphi_Z \cos \delta \cos \tau_Z, \\ \sin A_Z &= -\frac{\cos \delta \sin \tau_Z}{\sin \chi_Z}, \\ \cos A_Z &= -\frac{\cos \varphi_Z \sin \delta + \sin \varphi_Z \cos \delta \cos \tau_Z}{\sin \chi_Z}. \end{aligned}$$

Местное солнечное время τ_Z для процессов на регистрируемой высоте Z связано с местным солнечным временем τ_0 места измерения

$$\tau_Z = \tau_0 - \frac{\lambda_0 - \lambda_Z}{15}.$$

Поскольку вариации интенсивности излучения эмиссий ИКАО₂ происходят очень быстро при изменении зенитного угла Солнца, то для их расчета необходимо использовать значения местного истинного солнечного времени.

Местное истинное солнечное время определяется соотношениями

$$\tau_0 = \tau_{D0} - m - n - 1 + \frac{\lambda_0}{15} - \eta.$$

Здесь τ_{D0} – местное декретное время часового пояса n , $m = 0$ для зимнего времени, $m = 1$ для летнего времени. Уравнение времени $\eta = \tau_{\text{mean}} - \tau_{\text{true}}$ не превышает ± 16 минут и определяется формулой [Бронштэн и др., 1981]

$$\eta = 0^{\text{h}}.12833 \sin(\lambda + 78^\circ) - 0^{\text{h}}.15833 \sin 2\lambda,$$

где λ – эклиптическая долгота Солнца. Таким образом,

$$\tau_{\text{true}} = \tau_{\text{mean}} - \eta.$$

На основе формул, обуславливающих зависимость $\cos \psi$ и $\sin \psi$ от координат места измерения и точки Z на луче зрения, координаты φ_Z и λ_Z определяются формулами

$$\begin{aligned} \sin^2 \varphi_Z &= \cos^2 \varphi_0 (1 - \sin^2 \psi \sin^2 A_0) - \\ &- \cos^2 \psi (1 - 2 \sin^2 \varphi_0) - \sin \psi \cos \psi \sin 2\varphi_0 \cos A_0, \\ \sin(\lambda_0 - \lambda_Z) &= \frac{\sin \psi \sin A_0}{\cos \varphi_Z}. \end{aligned}$$

Если использовать зависимость угла ψ от высоты Z , то для расчета зависимости географических координат точки на луче зрения от высоты, для которой определяется зенитный угол Солнца,

$$\begin{aligned} \sin^2 \varphi_Z &= \cos^2 \varphi_0 \left(1 - \frac{\left(\frac{Z}{R_E} \right)^2 \operatorname{tg}^2 \zeta_0 \sin^2 A_0}{1 + \left(\frac{Z}{R_E} \right)^2 \operatorname{tg}^2 \zeta_0} \right) - \\ &- \frac{1 - 2 \sin^2 \varphi_0}{1 + \left(\frac{Z}{R_E} \right)^2 \operatorname{tg}^2 \zeta_0} - \frac{\frac{Z}{R_E} \operatorname{tg} \zeta_0 \sin 2\varphi_0 \cos A_0}{1 + \left(\frac{Z}{R_E} \right)^2 \operatorname{tg}^2 \zeta_0}, \\ \sin(\lambda_0 - \lambda_Z) &= \frac{\frac{Z}{R_E} \operatorname{tg} \zeta_0 \sin A_0}{\cos \varphi_Z \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{R_E} \right)^2 \operatorname{tg}^2 \zeta_0}}. \end{aligned}$$

В пределах высот $50 \leq Z \leq 100$ км отношение составляет $0.008 \leq \frac{Z}{R_E} \leq 0.016$. В этом случае, учитывая, что в наших наблюдениях зенитный угол $\zeta_0 = 60^\circ$ и азимут $A_0 \sim 160^\circ$, подстановка значений этого отношения в два предшествующих выражения, позволяет привести их к виду

$$\begin{aligned} \sin^2 \varphi_Z &\approx \sin^2 \varphi_0 - 0.007 \sin 2\varphi_0 \cos A_0, \\ \sin(\lambda_0 - \lambda_Z) &= \frac{0.007 \sin A_0}{\cos \varphi_Z}. \end{aligned}$$

Для условий измерений в Звенигороде ($\varphi_0 = 55.7^\circ \text{ N}$, $\lambda_0 = 36.8^\circ \text{ E}$) указанное соотношение дает значения $\varphi_Z \sim 56.1^\circ \text{ N}$, $\lambda_Z \approx \lambda_0 - 0.25^\circ = 36.6^\circ \text{ E}$, $\tau_Z \approx \tau_0 - 1^{\text{m}}$. Для быстро меняющейся интенсивности в течение сумерек такой эффект может быть существенным. При различных значениях координат линии визирования это обуславливает необходимость расчета зенитных углов Солнца для конкретных значений широты места регистрации излучения ИКАО₂.

Одновременно, приведение измеренной интенсивности к зенитному значению необходимо осуществлять для зенитного угла ζ_Z той точки линии визирования, которая соответствует координатам высоты Z , а именно,

$$\zeta_Z = \zeta_0 - \psi,$$

или

$$\zeta_Z = \zeta_0 - \operatorname{arctg} \left(\frac{Z}{2R_E} \sin 2\zeta_0 \right).$$

Для рассмотренного примера $\zeta_Z = \zeta_0 - 0.4^\circ$, $\zeta_Z = 59.6^\circ$.

При анализе суточных вариаций интенсивностей эмиссий ИКАО₂, определяемых зенитным углом Солнца, необходимо знать их предельные значения для полудня и полуночи, которые зави-

сят от географической широты φ и склонения Солнца δ . Как следует из уже приведенной формулы

$$\cos \chi_0 = \sin \varphi_0 \sin \delta - \cos \varphi_0 \cos \delta \cos \tau_0,$$

при значении местного истинного солнечного времени $\tau = 0^h$ (полночь)

$$\cos \chi^{\text{mn}}(\tau = 0^h) = \cos[180 - (\varphi + \delta)].$$

Таким образом, в полночь $\chi^{\text{mn}}(\tau = 0^h) = 180 - (\varphi + \delta)$.

При значении местного истинного солнечного времени $\tau = 12^h$ (полдень)

$$\cos \chi^{\text{nn}}(\tau = 12^h) = \cos(\varphi - \delta).$$

Поэтому в полдень

$$\chi^{\text{nn}}(\tau = 12^h) = \varphi - \delta.$$

Для условий наблюдений в Звенигороде эти значения в полночь изменяются в течение года от 148° (декабрь) до 101° (июнь).

Склонение Солнца δ с точностью до нескольких десятых градуса может быть оценено по формуле

$$\begin{aligned} \sin \delta(t_d) = \\ = 0.3979 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 173) + 0.0064 \cos \frac{4\pi}{365} (t_d - 87). \end{aligned}$$

4. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Спектрофотометрические измерения ИКАО₂ имеют существенные трудности, обусловленные необходимостью применения высокочувствительных приемников излучения в области спектра 1–2 мкм. Это обусловило определенную ограниченность таких исследований в течение последних нескольких десятков лет.

С 2009 г. измерения эмиссии Инфракрасной Атмосферной системы О₂ (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 ПЗС приемники, имеющие максимум чувствительности в инфракрасной области спектра (0.8–1.7 мкм) Andor DU492A-1.7 (InGaAs). Это дало возможность осуществлять одномоментную регистрацию всей исследуемой области спектра, что исключало влияния возможных естественных вариаций интенсивности различных участков спектра за время экспозиции, и позволяло выделять необходимые участки спектра с эмиссией ИКАО₂ без блендирования их полосами излучения ОН. Экспозиция для условий зенитных углов Солнца $\chi \sim 90\text{--}150^\circ$ 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 практически регулярные измерения проводились только для полосы 1.58 мкм. Примеры наземных измере-

ний полосы (0–1) 1.58 мкм и рассчитанных спектральных распределений интенсивности излучения для рассматриваемых спектральных интервалов для температуры $T_r = 250$ К представлены в работе [Семенов и др., 2011].

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В многочисленных опубликованных работах в течение 1958–1986 гг., в которых приведены непосредственные данные о вариациях интенсивности эмиссии 1.27 мкм и 1.58 мкм, основное внимание уделялось сопоставлению полученных данных с результатами теоретических расчетов с точки зрения выявления наиболее предпочтительных 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 [Gattinger and Vallance Jones, 1973; Vallance Jones, 1973]. Данные эмпирической модели для эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм [Семенов и Шефов, 1997; Шефов и др., 2006] для условий средних широт и наибольших интенсивностей, например, для октября вблизи полуночи и условий минимума солнечной активности позволяют оценить соотношение интенсивностей эмиссий ИКАО₂ 1.58 мкм и атомарного кислорода 557.7 нм приблизительно равным 4.

В вечерние сумерки при изменении зенитного угла Солнца χ от 80° до 100° интенсивность эмиссии ИКАО₂ 1.58 мкм уменьшается от 1 мегарэлей до 4.5 килорэлей. Причем, скорость уменьшения интенсивности наблюдаемого излучения в летние вечерние сумерки гораздо выше, чем в зимние. В сезонном поведении летом наблюдается глубокий минимум сумеречной интенсивности и ее максимум в середине зимы. В дневное время интенсивность мало меняется в течение года.

5.1. Суточные вариации. Первым необходимым этапом анализа поведения собственного излучения верхней атмосферы обычно становится рассмотрение вариаций интенсивности в течение времени суток. Однако для эмиссии ИКАО₂ закономерности суточных вариаций в течение ночного периода суток существенно зависят от сезона года. Обычно эмиссии, регистрируемые наземными спектрофотометрическими средствами, измеряются только в периоды сумерек и ночи, т.е. в пределах зенитного угла Солнца $97^\circ \leq \chi \leq \text{полночь} \leq \chi \leq 97^\circ$. Однако, в отличие от других атмосферных излучений эмиссия ИКАО₂ (вследствие поглощения ее в нижних слоях атмосферы) активно начала исследоваться преимущественно при помощи ракетных и баллонных методов. Имеется небольшое число попыток регистрации этой эмиссии также и наземными методами. Этому способствовало то,

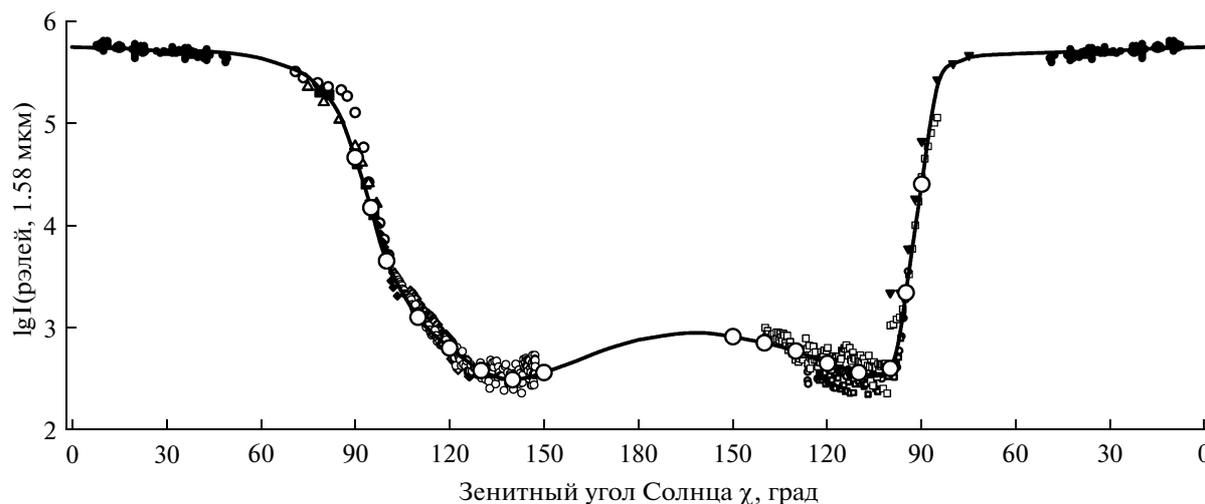


Рис. 1. Суточные вариации логарифма интенсивности эмиссии ИКАО₂ 1.58 мкм по данным различных измерений. Интервалы: $0^\circ \leq \chi \leq 50^\circ$ (после полудня) и $50^\circ \geq \chi \geq 0^\circ$ (до полудня), широты 20–45° N, май–июль 1973 г., $F_{10.7} = 90$ [Wright and Gadsden, 1975]; интервалы $70^\circ \leq \chi \leq 100^\circ$ (вечер) и $100^\circ \geq \chi \geq 75^\circ$ (утро), Саскатун, октябрь 1965 г., $F_{10.7} = 80$ — эмиссия 1.27 мкм [Hunten, 1967; Pick et al., 1971; Noxon, 1982]. Интервалы $90^\circ \leq \chi \leq 150^\circ$ (до полуночи) и $150^\circ \geq \chi \geq 90^\circ$ (после полуночи) — эмиссия 1.58 мкм, Звенигород, декабрь 2009–ноябрь 2010 г., $F_{10.7} = 78$. Интервалы $150^\circ \leq \chi \leq 180^\circ$ (до полуночи) и $180^\circ \geq \chi \geq 150^\circ$ (после полуночи) — на основе вариаций эмиссии 557.7 нм [Семенов и Шефов, 1997; Шефов и др., 2006], среднегодовые значения — большие кружки. Сплошная линия — аппроксимация.

что в ИКАО₂ имеются две колебательно-вращательные полосы (0–0) 1.27 мкм и (0–1) 1.58 мкм, соотношение интенсивностей которых равно 80. Для наземных измерений, как уже выше упоминалось, пригодна только полоса (0–1) 1.58 мкм, интенсивность которой при зенитных углах Солнца $92^\circ \leq \chi \leq 98^\circ$ составляла 5–8 килорэлей, и была доступной для регистрации техническими средствами первой половины прошлого столетия. Интенсивность полосы (0–0) 1.27 мкм составляет несколько десятков мегарэлей.

Наиболее продолжительные исследования (1957–2000 гг.) эмиссии ИКАО₂ проводились в Канаде в Саскачеванском Университете на основе измерений интенсивностей эмиссий 1.27 мкм и 1.58 мкм на станции Саскатун ($\varphi = 52.1^\circ$ N, $\lambda = 253.3^\circ$ E). К сожалению, подробной информации об условиях измерений на этой станции было опубликовано немного. В большинстве статей сведения о данных измерениях повторялись, обсуждались возможные теоретические интерпретации, но необходимой систематизации данных, измеряемых к тому же, к сожалению, не слишком регулярно, сделано не было.

Пример вариаций интенсивности в ночное время для условий Звенигорода уже был представлен в работе [Семенов и др., 2011]. Суточные вариации логарифма интенсивности эмиссии ИКАО₂ 1.58 мкм по данным всех имеющихся различных измерений представлены на рис. 1. Наличие корреляционного соотношения эмиссий 1.58 мкм и 557.7 нм в ночное время было использовано для восстановления вариаций интенсивности излучения инфракрасной эмиссии. Сред-

негодовые значения для различных зенитных углов Солнца χ показаны большими кружками. Важно подчеркнуть, что такая зависимость представлена впервые. Сплошная линия — аппроксимация. Ее аналитическое выражение имеет вид для послеполуночного периода

$$\lg I(\chi) = 2.56 + \frac{3.18}{1 + \exp\left[\frac{\chi - 95.7}{8.50}\right]} - 0.14 \cos \frac{2\pi}{360}(\chi - 29.3) + 0.154 \cos \frac{2\pi}{180}(\chi - 16.8) - 0.08 \cos \frac{2\pi}{120}(\chi - 17.8) + 0.03 \cos \frac{2\pi}{90}(\chi - 13.9)$$

и для дополуночного интервала суток

$$\lg I(\chi) = 2.56 + \frac{3.18}{1 + \exp\left[\frac{\chi - 91.3}{3.16}\right]} - 0.14 \cos \frac{2\pi}{360}(\chi + 29.3) + 0.154 \cos \frac{2\pi}{180}(\chi + 16.8) - 0.08 \cos \frac{2\pi}{120}(\chi + 17.8) + 0.03 \cos \frac{2\pi}{90}(\chi + 13.9),$$

где $I(\chi)$ — интенсивность эмиссии ИКАО₂ в рэлях.

На рисунке 2 представлено пространственное распределение логарифма интенсивности эмиссии 1.58 мкм в плоскости эклиптики от зенитного угла Солнца. Весь диапазон зенитных углов Солнца $0^\circ \leq \chi \leq 180^\circ$ реализуется для географических широт $-23.5^\circ \leq \varphi \leq 23.5^\circ$.

Результаты наблюдений в Звенигороде позволили получить закономерности вариаций интен-

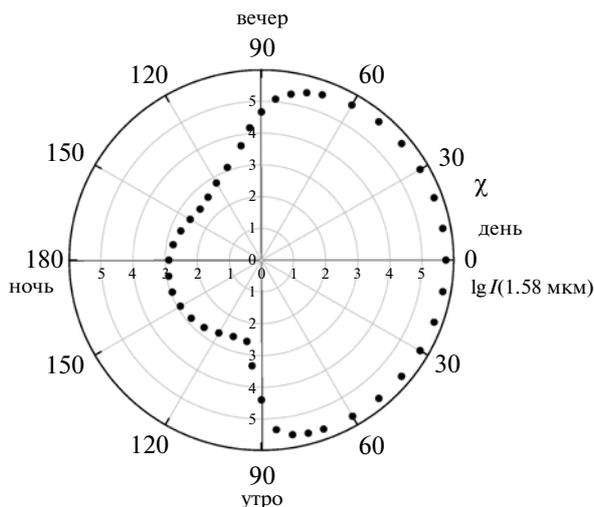


Рис. 2. Пространственное распределение логарифма интенсивности (рэлей) эмиссии 1.58 мкм в плоскости эклиптики в зависимости от зенитного угла Солнца χ .

сивности эмиссии 1.58 мкм в течение сумеречных и ночных периодов для различных месяцев года (рис. 3). На рисунке показаны, как правило, данные нескольких ночей, непосредственные результаты измерений которых для каждой ночи были предварительно усреднены по интервалам 5 минут, поскольку, как уже указывалось выше, экспозиции составляли 1 мин. Сплошные линии указывают аппроксимацию. Поскольку результаты были получены в 2010 г., то среднее значение уровня солнечной активности было $F10.7 = 80 \pm 3$.

Анализ проведенной аппроксимации суточных вариаций логарифма интенсивности для различных месяцев года позволил выявить систематические закономерности вариаций входящих параметров. Это дало возможность построить единые зависимости поведения интенсивности излучения 1.58 мкм для периодов суток — до полуночи и после полуночи.

Для вечернего интервала ночи

$$\begin{aligned} \lg I^{ev}(\chi) = & 2.7 + 0.12 \cos \frac{360}{365} t_d + \\ & + \frac{3.25}{1 + \exp \left[\frac{\chi - 95}{9.5 + 0.5 \cos \frac{360}{365} t_d} \right]} + \\ & + 0.01 \left[6 + 2.7 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 350) + \right. \\ & + 3.3 \cos \frac{4\pi}{365} (t_d - 185) \left. \right] \cos \frac{2\pi}{\Delta\chi(t_d)} (\chi - 6) + \\ & + 0.01 \left[4 + 2.0 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 350) + \right. \\ & + 2.7 \cos \frac{4\pi}{365} (t_d - 180) \left. \right] \cos \frac{2\pi}{\Delta\chi(t_d)} (\chi - 4). \end{aligned}$$

Для утреннего интервала ночи

$$\begin{aligned} \lg I^{dw}(\chi) = & 2.7 + 0.12 \cos \frac{360}{365} t_d + \\ & + \frac{3.25}{1 + \exp \left[\frac{\chi - 91}{3.25 + 0.25 \cos \frac{360}{365} t_d} \right]} + \\ & + 0.01 \left[6 + 2.7 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 350) + \right. \\ & + 3.3 \cos \frac{4\pi}{365} (t_d - 185) \left. \right] \cos \frac{2\pi}{\Delta\chi(t_d)} (\chi + 6) + \\ & + 0.01 \left[4 + 2.0 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 350) + \right. \\ & + 2.7 \cos \frac{4\pi}{365} (t_d - 180) \left. \right] \cos \frac{2\pi}{\Delta\chi(t_d)} (\chi + 4). \end{aligned}$$

Здесь

$$\Delta\chi(t_d) = 2[\chi^{mn}(t_d) - 90^\circ] = 2[90^\circ - (\varphi + \delta)].$$

Как видно, для условий сумеречных наблюдений при зенитных углах Солнца $\chi > 90^\circ$ значение интервала $\Delta\chi$ может быть больше нуля в течение года на широтах $\varphi < 66^\circ$. На широте Звенигорода (55.7° N) зависимость этого интервала от дня года может быть оценена по формуле

$$\Delta\chi(t_d) \approx 68^\circ + 47^\circ \cos \frac{360}{365} (t_d - 342).$$

5.2. Сезонные вариации. Сезонные вариации являются весьма значимыми для эмиссии (0–1) 1.58 мкм, причем они существенны для конкретных зенитных углов Солнца. Первые результаты систематизации результатов измерений эмиссии (0–0) 1.27 мкм при помощи самолетных экспедиций были представлены в работе [Noxon, 1982]. При этом были использованы данные измерений в течение периода с 1957 г. до середины 1970-х годов, полученные на различных широтах и при различных зенитных углах Солнца. Поскольку из-за чувствительности применяемых приборов измерения производились только при зенитных углах Солнца $\chi \leq 95^\circ$, то все имеющиеся результаты измерений интенсивности были редуцированы к условиям $\chi = 90^\circ$. На рис. 4 в логарифмической шкале показаны интенсивности эмиссии (0–1) 1.58 мкм, взятые из работы [Noxon, 1982]. Для них была сделана простейшая аппроксимация для всех данных (штриховая линия) по формуле

$$\lg I(1.58 \text{ мкм}) = 5.081 + 0.0710 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 360),$$

и только для диапазона широт 60° N– 40° N (сплошная линия), который соответствует условиям наблюдений в Звенигороде, по формуле

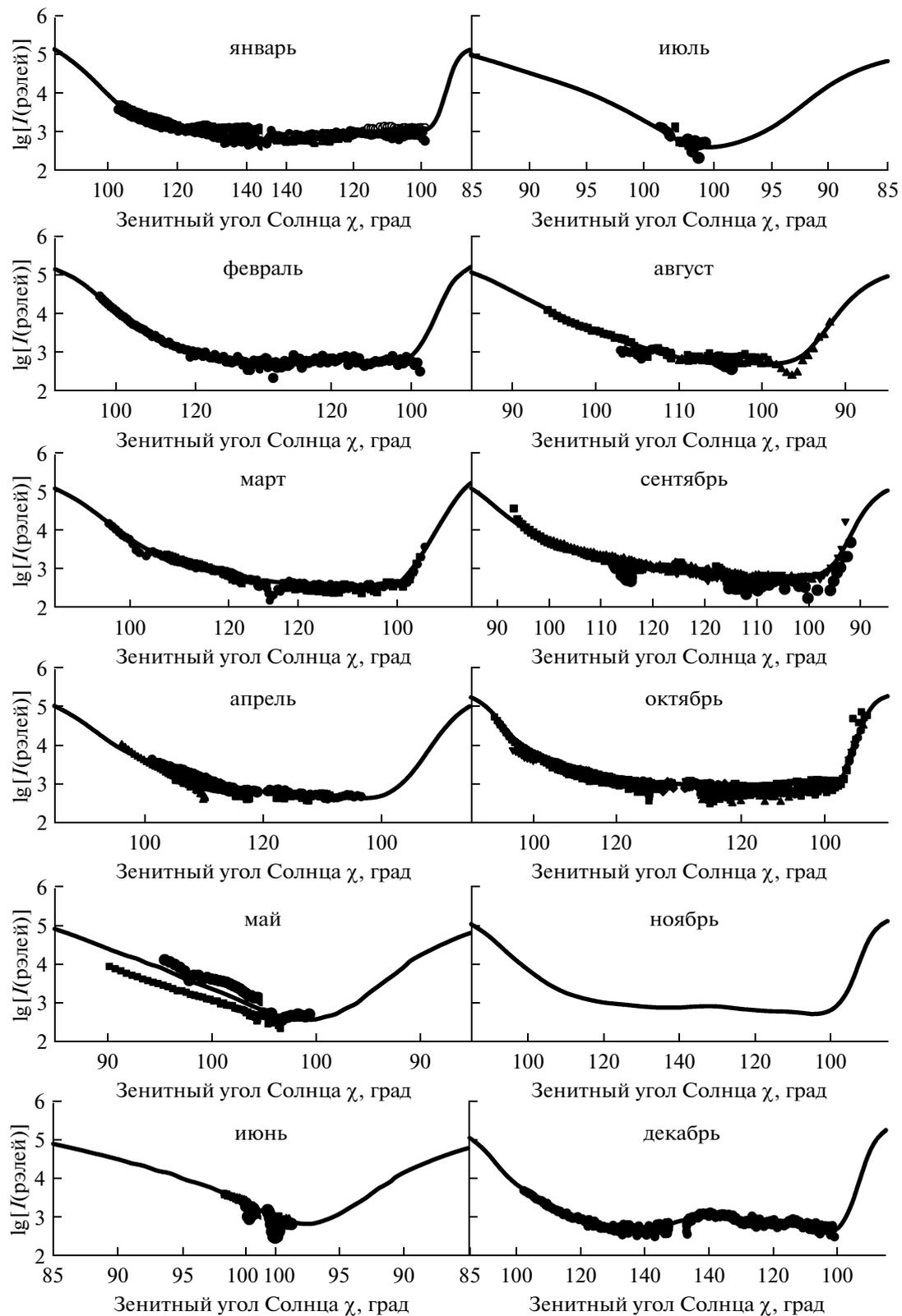


Рис. 3. Среднемесячные суточные вариации логарифма интенсивности эмиссии ИКАО₂ 1.58 мкм ($F_{10.7} = 80 \pm 3$) по наблюдениям в Звенигороде. Сплошные линии – аппроксимации.

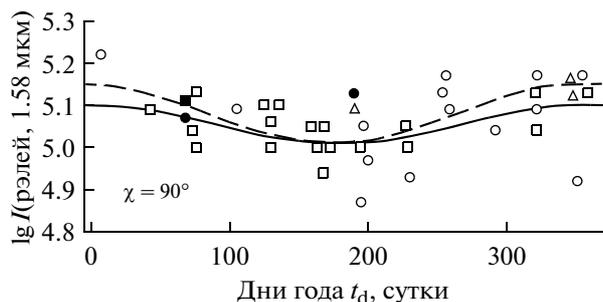


Рис. 4. Сезонные вариации логарифмов интенсивности эмиссии ИКАО₂ 1.58 мкм приведенных к зенитному углу Солнца: $\chi = 90^\circ$ на основе данных измерений интенсивности эмиссии 1.27 мкм на различных широтах за период 1960–1970 гг.: \circ : $75^\circ \text{ N} - 60^\circ \text{ N}$; \square : $60^\circ \text{ N} - 40^\circ \text{ N}$; ∇ : $40^\circ \text{ N} - 20^\circ \text{ N}$; \bullet : $20^\circ \text{ N} - 20^\circ \text{ S}$; \blacksquare : $20^\circ \text{ S} - 40^\circ \text{ S}$ со сдвигом на полгода [Noxon, 1982], представленных в логарифмической шкале. Прерывистая линия аппроксимация на основе учета всех данных измерений, сплошная линия – аппроксимация для диапазона широт $60^\circ \text{ N} - 40^\circ \text{ N}$.

$$\lg I(1.58 \text{ мкм}) = 5.056 + 0.0456 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 360).$$

Результаты измерений в Звенигороде сезонных вариаций логарифма интенсивности для различных зенитных углов Солнца в течение вечерних и утренних сумерек показаны на рис. 5. Как видно, амплитуды вариаций в вечернее время существенно больше, чем в утреннее время, хотя данные для этого периода суток имеют меньшую обеспеченность данными измерений. На основе этих сведений были получены среднегодовые значения интенсивности для различных зенитных углов Солнца. Они показаны на рис. 1 крупными кружками. Сплошные линии – аппроксимация

$$\lg I^{\text{ev}}(\chi = 90^\circ) = 4.66 + 0.137 \cos \frac{360}{365} (t_d - 11),$$

$$\lg I^{\text{ev}}(\chi = 95^\circ) = 4.17 + 0.213 \cos \frac{360}{365} (t_d - 11),$$

$$\lg I^{\text{ev}}(\chi = 100^\circ) = 3.65 + 0.323 \cos \frac{360}{365} (t_d - 11),$$

$$\lg I^{\text{ev}}(\chi = 105^\circ) = 3.30 + 0.272 \cos \frac{360}{365} (t_d - 11),$$

$$\lg I^{\text{ev}}(\chi = 110^\circ) = 3.09 + 0.257 \cos \frac{360}{365} (t_d - 11),$$

$$\lg I^{\text{ev}}(\chi = 115^\circ) = 2.98 + 0.181 \cos \frac{360}{365} (t_d - 11),$$

$$\lg I^{\text{dw}}(\chi = 90^\circ) = 4.42 + 0.257 \cos \frac{360}{365} (t_d - 11),$$

$$\lg I^{\text{dw}}(\chi = 95^\circ) = 3.24 + 0.227 \cos \frac{360}{365} (t_d - 11),$$

$$\lg I^{\text{dw}}(\chi = 100^\circ) = 2.75 + 0.155 \cos \frac{360}{365} (t_d - 11),$$

$$\lg I^{\text{dw}}(\chi = 105^\circ) = 2.67 + 0.182 \cos \frac{360}{365} (t_d - 11),$$

$$\lg I^{\text{dw}}(\chi = 110^\circ) = 2.70 + 0.103 \cos \frac{360}{365} (t_d - 11),$$

$$\lg I^{\text{dw}}(\chi = 115^\circ) = 2.66 + 0.135 \cos \frac{360}{365} (t_d - 11).$$

5.3. Зависимость от географической широты. Как уже указывалось, возникновение эмиссии ИКАО₂ в дневное время обусловлено фотолизом молекул озона на высотах 50–80 км, а в ночное время процессами образования электронно возбужденных молекул кислорода в реакциях тройных столкновений атомов кислорода (механизм Барта), вследствие которых возбуждаются высокие метастабильные состояния O₂, а также ИКАО₂ и эмиссия атомарного кислорода 557.7 нм.

Широтные вариации эмиссии 1.58 мкм существенно зависят от времени суток, поскольку интенсивности эмиссии, возникающей на различных высотах средней атмосферы, обусловлены различными фотохимическими процессами. Однако таких измерений специально не проводилось. Имеющиеся данные для дневных условий свидетельствуют о незначительной зависимости интенсивности 1.58 мкм от широты (рис. 6). Для анализа широтного поведения интенсивности 1.58 мкм в дневных условиях использовались результаты измерений эмиссии 1.27 мкм, опубликованные в работах [Wraight and Gadsden, 1975; Noxon, 1982], которые были редуцированы к эмиссии 1.58 мкм. Для интервала широт $20^\circ - 40^\circ \text{ N}$ измерения проводились 28 июня 1973 г. ($F10.7 = 94$, $Kp = 4$, $\lambda = \sim 0^\circ$). Для диапазона широт $40^\circ - 70^\circ \text{ N}$, $\lambda = 285^\circ \text{ E}$ использованы данные для 28 мая 1971 г. ($F10.7 = 107$, $Kp = 0$), 14 июня 1971 г. ($F10.7 = 94$, $Kp = 2$), 14 июля 1971 г. ($F10.7 = 119$, $Kp = 2-3$). Поэтому в первом случае была введена поправка для учета геомагнитной активности (как указано ниже). Эта же поправка была учтена и для данных, представленных на рис. 1 и 2. Во втором случае сделана редукция данных к уровню $F10.7 = 100$ (см. ниже). Таким образом, для дневных условий аппроксимация широтной зависимости интенсивности 1.58 мкм имеет вид

$$\lg I(\varphi, 1.58 \text{ мкм}) = 5.40 + 0.31 \cos^{0.5} \varphi.$$

Характер широтных вариаций эмиссии 557.7 нм в ночное время представлен в работах [Фишкова и др., 2000; Шефов и др., 2006]. По-видимому, они должны соответствовать ночным вариациям эмиссии ИКАО₂. Принято соотношение абсолютных интенсивностей эмиссий $I(1.58 \text{ мкм})/I(557.7 \text{ нм}) \approx 4$. Зависимость от широты

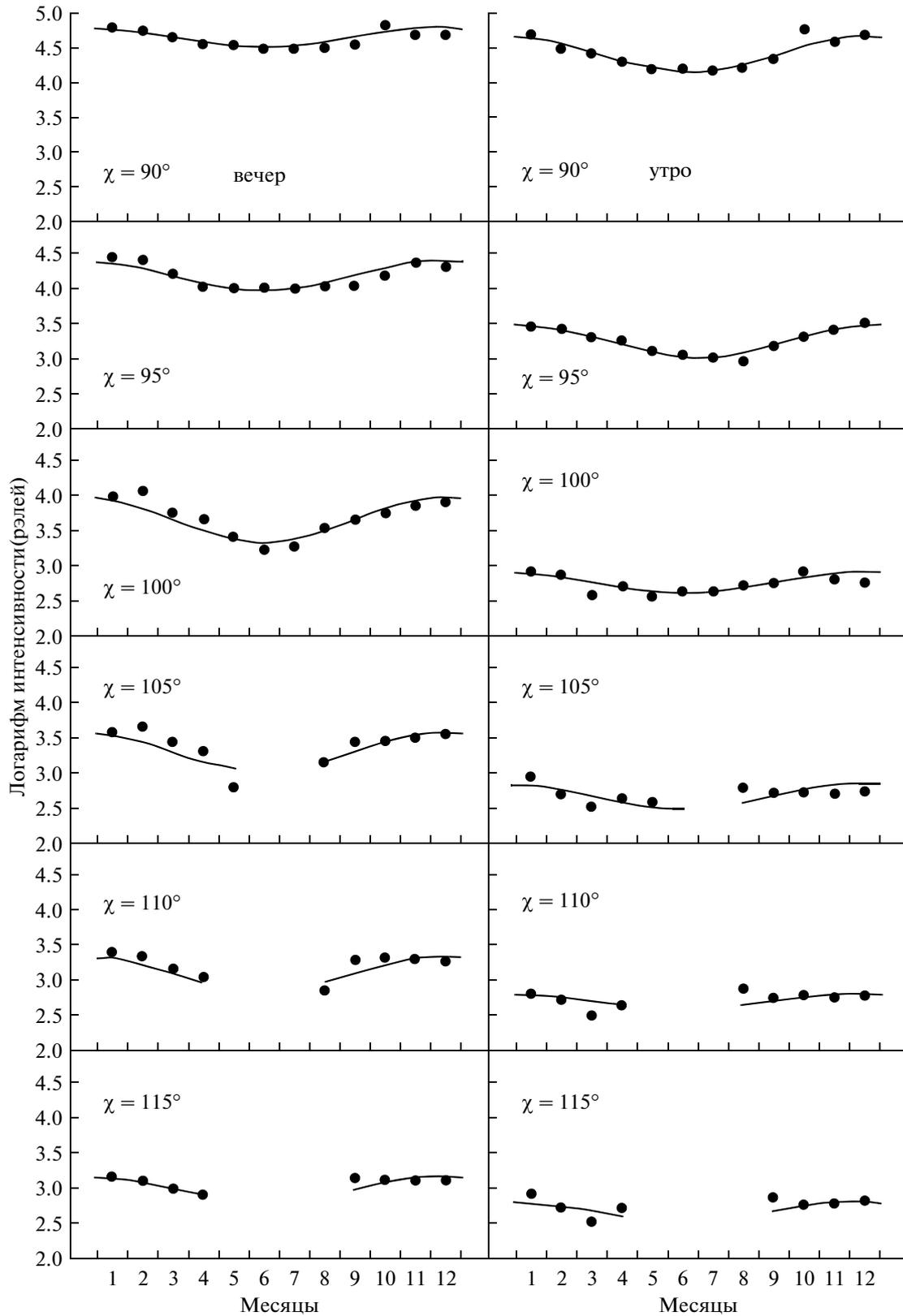


Рис. 5. Сезонные вариации логарифма интенсивности эмиссии ИКАО₂ (0–1) 1.58 мкм для различных зенитных углов Солнца в вечернее и утреннее время суток. Сплошные линии – аппроксимация.

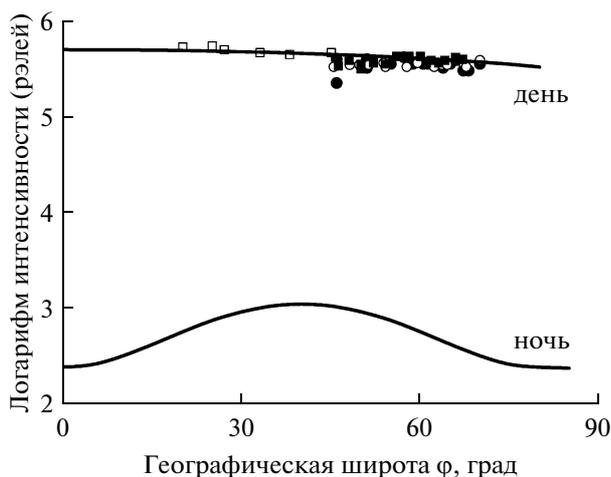


Рис. 6. Широтные вариации логарифма интенсивности эмиссии 1.58 мкм на основе дневных измерений: ● – 28.05.1971 г., ○ – 14.06.1971 г., ■ – 14.07.1971 г. [Noxon, 1982] и □ – 28.06.1973 г. [Wraight and Gadsden, 1975]. Сплошная линия – аппроксимация. Ночные вариации представлены на основе корреляции интенсивностей эмиссий 1.58 мкм и 557.7 нм, для которой использованы данные модели [Фишкова и др., 2000; Шефов и др., 2006].

ты использована согласно работам [Фишкова и др., 2000; Шефов и др., 2006]

$$\lg I(\varphi, 1.58 \text{ мкм}) = \lg \{240 + 880[\cos 1.8(\varphi - 40)]^{4.5}\}.$$

5.4. Многолетние вариации. Анализ результатов измерений интенсивности эмиссии ИКАО₂ 1.58 мкм как в течение суток, так и в течение различных сезонов, позволил сделать оценку многолетних изменений интенсивности за период ~50 лет (1957–2010 гг.) Первые измерения, как уже упоминалось, проводились в Канаде в Саскатуне в западном полушарии на широте $\varphi = 52.1^\circ \text{ N}$, которая близка к географической широте Звенигорода. Это исключает возможное влияние широтного эффекта.

Уже первые сопоставления существующих результатов измерений сезонных вариаций интенсивности для зенитного угла Солнца 100° на основе данных [Vallance Jones and Gattinger, 1963] для 1961 г., и результатов для Звенигорода для 2010 г., показали, что имеется заметное уменьшение интенсивности, которое соответствует линейному тренду – 1.5% в год [Семенов и др., 2011]. Данные на рис. 4 для зенитного угла Солнца 90° и диапазона широт $40^\circ \text{ N} - 60^\circ \text{ N}$ [Noxon, 1982] были специально выделены для возможно сравнения с результатами измерений на станции Звенигород, полученными также для $\chi = 90^\circ$ (рис. 5).

Поскольку эмиссии ИКАО₂ 1.58 мкм и 557.7 нм в ночное время обусловлены общим механизмом фотохимических реакций, то представляло интерес

сравнение их многолетнего поведения. Согласно работам [Фишкова и др., 2001; Шефов и др., 2006] среднегодовой тренд интенсивности эмиссии 557.7 нм за указанный период составляет $\sim -1.5\%/год$.

5.5. Зависимость от уровня солнечной активности. Сведения о зависимости интенсивности эмиссии ИКАО₂ от уровня солнечной активности, опубликованные в работе [Gattinger and Vallance Jones, 1966], были даны для зенитного угла Солнца $\chi = 97^\circ$ без указания абсолютных значений интенсивности эмиссии 1.58 мкм. Поэтому были просмотрены и проанализированы все результаты конкретных измерений для отдельных дат, выполненных в течение периода 1957–1975 гг., в течение которого уровень солнечной активности менялся от минимума до максимума. Для этих лет имелись значения интенсивности эмиссии 1.27 мкм для зенитного угла Солнца $\chi = 100^\circ$ (вечерние сумерки), приведенные в работах [Vallance Jones and Gattinger, 1963; Gattinger, 1968; Pick et al., 1971; Llewellyn et al., 1973; Noxon, 1982]. Интенсивности эмиссии 1.58 мкм были вычислены на основе соотношения между ними, равного 80. Сопоставление логарифма интенсивности с индексом солнечной активности $F10.7$ представлено на рис. 7. Эта аппроксимация имеет вид (коэффициент корреляции $r = 0.780 \pm 0.113$)

$$\lg I(1.58 \text{ мкм}) = 3.71 + \frac{F10.7 - 130}{290}.$$

Такая поправка $\frac{F10.7 - 130}{290}$ для полученных эмпирических зависимостей суточных и сезонных вариаций логарифма интенсивности, по-видимому, может использоваться для учета влияния уровня солнечной активности.

5.6. Зависимость от уровня геомагнитного возмущения. Эмиссии ИКАО₂, как и другие эмиссии верхней атмосферы, подвержены влиянию уровня геомагнитной активности. В данном случае оно должно рассматриваться в двух направлениях поиска.

Первое – это усиление непосредственно под влиянием процессов возбуждения электронами в периоды авроральной активности. Примеры таких корреляций были опубликованы в работе [Gattinger and Vallance Jones, 1966]. Однако, в приведенной работе, интенсивность эмиссии 1.58 мкм была дана в относительных единицах, а главное, зависимость представлена как функция от среднесуточного значения индекса Kp , что совершенно не соответствует действительному уровню геомагнитной активности, характеризующего геомагнитное состояние в данном регионе.

Второе – эффект последствия после геомагнитных возмущений. Характер такого типа вариаций был первоначально обнаружен в Звенигороде по наблюдениям гидроксильного излучения

[Shefov, 1969; Шефов, 1973, 1978; Шефов и др., 2006]. Их особенность состоит в том, что они возникают через несколько суток после геомагнитного возмущения в зависимости от разности геомагнитных широт авроральной зоны и места наблюдения возмущения эмиссии и продолжаются 10–15 суток, распространяясь вплоть до экватора. Природа таких возмущений обусловлена меридиональным распространением волнового цуга, начальный максимум которого обусловлен переносом продуктов диссоциации молекул кислорода и азота из зоны полярных сияний.

После обнаружения такого типа вариаций интенсивности гидроксильного излучения один случай одновременной регистрации такого типа вариаций для эмиссий гидроксила и ИКАО₂ 1.27 мкм был опубликован в работе [Gattinger and Vallance Jones, 1973] по наблюдениям в Канаде 19–24 марта 1971 г. на обсерватории Форт Черчилль ($\varphi = 58.8^\circ \text{ N}$, $\lambda = 265^\circ \text{ E}$, $\Phi = 68.7^\circ \text{ N}$, $\Lambda = 322.6^\circ \text{ E}$). Особенность условий наблюдений состояла в том, что хотя географическая широта была близка к географической широте Звенигорода ($\varphi = 55.7^\circ \text{ N}$, $\lambda = 36.8^\circ \text{ E}$, $\Phi = 51.2^\circ \text{ N}$, $\Lambda = 120.0^\circ \text{ E}$), геомагнитная широта соответствовала зоне полярных сияний. В этот период возникла магнитная буря с внезапным началом с 18:00 UT 19 марта до 03:00 UT 20 марта. Максимальный индекс $Kp = 5$ наблюдался в конце суток 19 марта приблизительно в 21:00–24:00 UT и имел значения $Kp = 4$ в течение последующих 9 часов. Совершенно естественно, что суммарный за сутки индекс Kp никак не может соответствовать реальному уровню возмущения, поскольку среднее значение за предшествующий период суток равен $\bar{Kp} = 2.7 \pm 1$.

Как следует из этих данных [Gattinger and Vallance Jones, 1973] максимальное увеличение интенсивности эмиссии ОН составило 170%, что соответствует широтной зависимости амплитуды возмущения для $Kp = 5$ для широты наблюдения [Шефов, 1973]. В момент максимума геомагнитного возмущения интенсивность эмиссии 1.27 мкм составляла 145 килорэлей, что соответствует 1800 рэлей для полосы 1.58 мкм. После окончания магнитной бури, через несколько суток интенсивность эмиссии 1.58 мкм была 920 рэлей. Тем не менее, поскольку измерения велись в сумеречных условиях, то высота излучающего слоя должна была быть гораздо ниже слоя гидроксильного излучения (87 км). Поэтому характер вариаций не совсем такой, как он имеется для полос эмиссии ОН.

Для получения более достоверной зависимости интенсивности излучения от уровня геомагнитного возмущения были использованы данные конкретных измерений, для которых были указаны даты [Vallance Jones and Gattinger, 1963; Gattinger, 1968; Pick et al., 1971; Llewellyn et al., 1973;

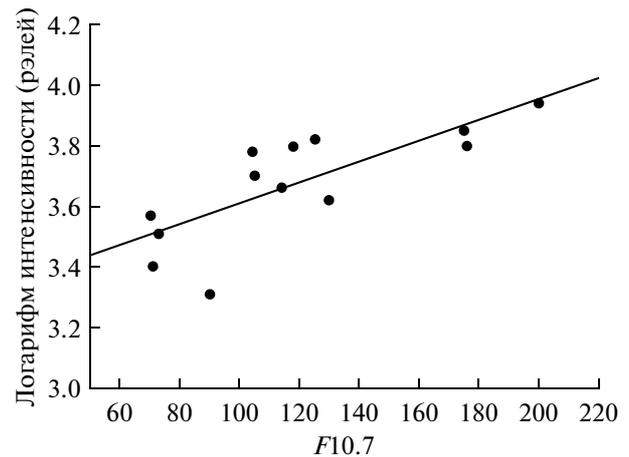


Рис. 7. Зависимость логарифма интенсивности эмиссии 1.58 мкм для зенитного угла Солнца $\chi = 100^\circ$ (вечерние сумерки) от уровня солнечной активности $F10.7$ на основе данных работ [Vallance Jones and Gattinger, 1963; Gattinger, 1968; Pick et al., 1971; Llewellyn et al., 1973; Noxon, 1982]. Сплошная линия — линия регрессии.

Noxon, 1982]. На этой основе были получены значения интенсивности эмиссии 1.58 мкм для зенитного угла Солнца $\chi = 100^\circ$ по результатам данных для эмиссии 1.27 мкм. Поэтому для них можно было определить уровни солнечной и геомагнитной активности.

В период наблюдений в Звенигороде в 2010 г. в условиях минимума солнечной и геомагнитной активности имеющиеся данные соответствовали спокойным уровням активности. Поэтому была сделана попытка использовать данные работы [Gattinger and Vallance Jones, 1966].

В этой работе, как уже указывалось, отсутствуют не только абсолютные значения интенсивности, но и реальные максимальные значения индексов Kp . Указаны только периоды наблюдений ноябрь — март с 1960–1961 гг. до 1963–1964 гг. Анализ случаев с геомагнитными возмущениями для этих интервалов лет, имевшими в течение суток $Kp \geq 5$, показал, что среднесуточные значения $\bar{Kp} = 3.5\text{--}4$ соответствовали в среднем максимальным $Kp \sim 5$, значения $\bar{Kp} = 4$ соответствовали в среднем максимальным значениям $Kp \sim 6\text{--}7$. Для реальных индексов $Kp \sim 8\text{--}9$ среднесуточные значения составляли $\bar{Kp} = 6\text{--}8$.

На этой основе в данные работы были введены соответствующие поправки для индексов Kp . Абсолютные значения были приняты для зенитного угла Солнца $\chi = 100^\circ$, хотя в условиях экспериментальных возможностей предшествующих лет измерения велись для $\chi \leq 97^\circ$. Поскольку сезонные вариации интенсивностей для таких значений зенитных углов Солнца невелики, то влияние

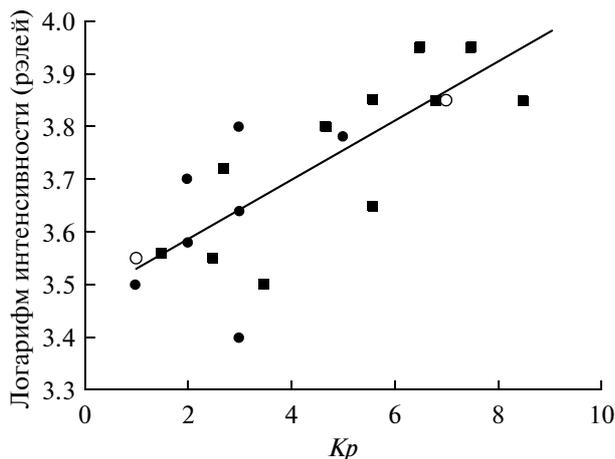


Рис. 8. Зависимость логарифма интенсивности эмиссии 1.58 мкм для зенитного угла Солнца $\chi = 100^\circ$ (вечерние сумерки) от уровня геомагнитной активности: ● – данные [Gattinger, 1968; Pick et al., 1971; Llewellyn et al., 1973; Noxon, 1982]; ■ – скорректированные данные [Gattinger and Vallance Jones, 1966]; ○ – данные [Gattinger and Vallance Jones, 1973], смещенные на 0.3. Сплошная линия – линия регрессии.

их, по-видимому, не слишком существенно. Полученные данные представлены на рис. 8. Данные работы [Gattinger and Vallance Jones, 1973] дают значения интенсивности эмиссии 1.27 мкм значительно меньшие, чем они должны быть для используемых зенитных углов Солнца (хотя и не указанных). Тем не менее, в логарифмической шкале на рис. 8 они хорошо соответствуют общей совокупности данных при условии смещения по оси ординат на 0.3, т.е. увеличены в два раза. Аппроксимация зависимости полученных данных (коэффициент корреляции ($r = 0.787 \pm 0.087$)) имеет вид

$$\lg I(1.58 \text{ мкм}) = (3.47 \pm 0.05) + (0.056 \pm 0.010)Kp.$$

Таким образом, в первом приближении удается установить количественную зависимость интенсивности эмиссий ИКАО₂ от уровня геомагнитного возмущения.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа опубликованных данных измерений интенсивности излучения ИКАО₂ для дневных и ранних сумеречных условий, а также использования результатов измерений ее интенсивности в Звенигороде для сумеречных и ночных периодов, впервые были разработаны эмпирические модели вариаций логарифма интенсивности эмиссии 1.58 мкм молекулярного кислорода в течение суток для различных месяцев года, сезонные вариации для различных зенитных углов Солнца, а также в зависимости от широты, уровня солнечной активности и геомагнитного возмущения.

Авторы благодарны А.И.Семенову за активное обсуждение результатов измерений и статистического анализа полученного материала и помощь в работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 10-05-00062а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бронитэн В.А., Дагаев М.М., Кононович Э.В., Куликовский П.Г. Астрономический календарь. Постоянная часть / Ред. В.К. Абалакин. Изд. 7. М.: Наука. 704 с. 1981.
- Герасимова Н.Г., Яковлева А.В. Комплект светосильных спектрографов с дифракционными решетками // Приборы и техника эксперимента. № 1. С. 83–86. 1956.
- Гопштейн И.М., Кушпиль В.И. Дневное свечение верхних слоев атмосферы Земли в области 1.25 мк // Космич. исслед. Т. 2. № 4. С. 619–622. 1964.
- Семенов А.И., Шефов Н.Н. Эмпирическая модель вариаций эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм в ночное время. 1. Интенсивность // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 37. № 2. С. 81–90. 1997.
- Семенов А.И., Перминов В.И., Липатов К.В., Хомич В.Ю. Оценка сезонных изменений интенсивности Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 51. № 3. С. 419–424. 2011.
- Фишкова Л.М., Марцваладзе Н.М., Шефов Н.Н. Закономерности вариаций эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 40. № 6. С. 107–111. 2000.
- Фишкова Л.М., Марцваладзе Н.М., Шефов Н.Н. Сезонные вариации зависимости эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм от солнечной активности и многолетнего тренда // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 41. № 4. С. 557–562. 2001.
- Шефов Н.Н. Поведение гидроксильной эмиссии в течение солнечного цикла, сезонов и геомагнитных возмущений // Полярные сияния и свечение ночного неба / Ред. В.И. Красовский. М.: Наука. № 20. С. 23–39. 1973.
- Шефов Н.Н. Некорпускулярная природа ионосферного поглощения, возникающего на средних широтах после геомагнитных бурь // Полярные сияния и свечение ночного неба / Ред. В.И. Красовский. М.: Сов. Радио. № 27. С. 36–44. 1978.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС. 741 с. 2006.
- Barth C.A., Hildebrandt A.F. The 5577 Å airglow emission mechanism // J. Geophys. Res. V. 66. № 3. P. 985–986. 1961.
- Barth C.A. Three-body reaction // Ann. Geophysique. V. 20. № 2. P. 182–196. 1964.
- Findlay F.D. Relative band intensities in the atmospheric and infrared atmospheric systems of molecular oxygen // Can. J. Phys. V. 47. № 6. P. 687–691. 1969.

- *Gattinger R.L., Vallance Jones A.* The ${}^1\Delta_g-{}^3\Sigma_g^-$ O₂ 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 O₂(${}^1\Delta_g-{}^3\Sigma_g^-$) airglow emission // *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.
- *Haslett J.C., Fehsenfeld F.C.* Ratio of the O₂(${}^1\Delta_g-{}^3\Sigma_g^-$) (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.
- *Llewellyn E.J., Evans W.F.J., Wood H.C.* O₂(${}^1\Delta$) in the atmosphere // *Physics and chemistry of atmosphere* / Ed. B.M. McCormac. Boston: D. Reidel Publ. Co. P. 193–202. 1973.
- *Newman S.M., Lane I.C., Orr-Ewing A.J., Newnham D.A., Ballard J.* Integrated absorption intensity and Einstein coefficients for the O₂ $a^1\Delta_g-X^3\Sigma_g^-(0,0)$ 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: D.Reidel Publ. Co. P. 1–51. 1971.
- *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.
- *Noxon J.F.* A global study of O₂(${}^1\Delta_g$) airglow: day and twilight // *Planet. Space Sci.* V. 30. № 6. P. 545–557. 1982.
- *Pick D.R., Llewellyn E.J., Vallance Jones A.* A twilight airglow measurements of the OH and O₂ bands by means of balloon-borne instruments // *Canad. J. Phys.* V. 49. № 7. P. 897–905. 1971.
- *Shefov N.N.* Hydroxyl emission of the upper atmosphere. I. Behaviour during solar cycle, seasons and geomagnetic disturbances // *Planet. Space Sci.* V. 17. № 5. P. 797–813. 1969.
- *Vallance Jones A., Harrison A.W.* ${}^1\Delta_g-{}^3\Sigma_g^-$ O₂ 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 μ ${}^1\Delta_g-{}^3\Sigma_g^-$ 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 O₂ during a total eclipse of the sun // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 37. № 5. P. 717–730. 1975.