

УДК 550.388

ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВАРИАЦИЙ ЭМИССИИ ИНФРАКРАСНОЙ АТМОСФЕРНОЙ СИСТЕМЫ МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА. 2. ВЫСОТА ИЗЛУЧАЮЩЕГО СЛОЯ

© 2013 г. 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 11.08.2011 г.

На основе анализа и систематизации опубликованных результатов ракетных и спутниковых измерений высотного распределения объемной интенсивности излучения Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода 1.27 мкм получены эмпирические закономерности вариаций параметров излучающего слоя в зависимости от зенитного угла Солнца.

DOI: 10.7868/S0016794013010124

1. ВВЕДЕНИЕ

Результаты исследований вариаций интенсивности эмиссии 1.27 мкм Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода (ИКАО₂) для различных гелио-геофизических условий, основанные на систематизации данных наблюдений за период 1957–1990 гг., были представлены в работах [Семенов и др., 2011; Липатов и Перминов, 2012]. Другой важнейшей характеристикой этой эмиссии является высота максимума ее излучения, которая существенно зависит от зенитного угла Солнца.

Измерения высотного распределения интенсивности эмиссии 1.27 мкм начались вскоре после ее обнаружения при помощи наземных и аэростатных измерений. Рассмотренные в публикациях [Семенов и др., 2011; Липатов и Перминов, 2012] вариации интенсивности эмиссии (0–0) 1.27 мкм в течение сумеречных периодов обнаружили значительные изменения интенсивности в зависимости от зенитного угла Солнца. В основе принятых в настоящее время механизмов образования возбужденных молекул кислорода в состоянии $O_2(a^1\Delta_g)$ лежат фотохимические процессы, связанные с молекулами озона в области высот мезопаузы 50–100 км [Wayne, 1966, 1967; Gattinger, 1968; Клоповский и др., 1995]. Для получения высотного распределения возникающего излучения ИКАО₂ (0–0) 1.27 мкм первоначально использовались ракетные, а затем спутниковые (SME) измерения. Общее количество измерений высотного распределения интенсивности эмиссии 1.27 мкм, выполненных на средних широтах в Канаде, США, Бразилии и Японии за период 1966–2002 гг., составило 32 (таблица).

Целью работы является впервые выполненный анализ опубликованных данных ракетных измерений высотного распределения эмиссии Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода и разработка эмпирической модели зависимости параметров высотного распределения свечения от зенитного угла Солнца.

2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Ракетные измерения осуществлялись с помощью фотометров со светофильтрами. Приемниками излучения 1.27 мкм служили фотоспротивления PbS. К сожалению, во всех опубликованных работах (приведенных в таблице), сведения о сопутствующих запускам ракет гелиогеофизических условиях, представлены очень неоднородно. Наиболее важным параметром для анализа данных измерений является зенитный угол Солнца для момента, когда прибор, установленный на ракете, осуществляет измерения высотного распределения интенсивности излучения. В большинстве же рассматриваемых статей указывалось только время и место запуска ракеты, причем не истинное местное солнечное время, а поясное, гражданское или всемирное время. К тому же в работах отсутствовали сведения о точных направлениях линии визирования прибора на ракете во время измерений. Это особенно важно, если зенитный угол линии визирования прибора зависел от зенитного угла и азимута направления движения ракеты и, при этом, еще происходило ее вращение. В таком случае реальный зенитный угол Солнца для момента измерения в конкретной области верхней атмосферы, зависящей от ориентации ракеты, мог значительно отличаться от значения его для места и момента запуска ракеты. В данной работе

Результаты ракетных и спутниковых измерений высотных распределений объемной интенсивности $Q(Z)$ эмиссии (0–0) 1.27 мкм Инфракрасной Атмосферной системы молекулы кислорода

№	Дата	LT, час	χ°	Z_M , км	W , км	P	$\lg Q_M$	$F_{10.7}$	K_p	Станция	φ°	λ°	δ°	Ссылка
1	11.10.1966 г.	16.9	76	86	10	0.55	6.00	110	0	White Sands	32.3 N	253.5 E	-7.1	Evans et al., 1968
2	11.07.1967 г.	19.1	72	88	5	0.50	6.10	107	4	Ft. Churchill	58.7 N	265.9 E	22.2	Wood et al., 1970
3	12.07.1967 г.	5.7	81	55	18	0.64	6.70	106	3	Ft. Churchill	58.7 N	265.9 E	22.1	Wood et al., 1970
4	07.03.1968 г.	16.3	82	52	20	0.61	6.92	132	1	Ft. Churchill	58.7 N	265.9 E	-5.2	Haslett et al., 1969
5	29.04.1968 г.	15.8	61	55	24	0.60	7.08	128	3	Ft. Churchill	58.7 N	265.9 E	14.5	Haslett et al., 1969
6	29.04.1968 г.	19.7	90	60	21	0.66	6.52	128	3	Ft. Churchill	58.7 N	265.9 E	14.5	Haslett et al., 1969
7	30.04.1968 г.	3.7	93	>60				133	2	Ft. Churchill	58.7 N	265.9 E	14.7	Haslett et al., 1969
8	09.03.1969 г.	20.3	124	80	12	0.55	5.57	144	3	Natal, Brazil	5.9 S	324.8 E	-4.2	Han et al., 1973
9	21.03.1969 г.	22.6	119	90	13	0.55	4.72	231	3	Ft. Churchill	58.7 N	265.9 E	0.2	Bishop et al., 1972
10	19.04.1969 г.	17.9	80	86	5	0.53	5.81	146	1	Ft. Churchill	58.7 N	265.9 E	11.1	Megill et al., 1970
11	12.09.1969 г.	18.9	87	85	12	0.57	5.72	121	2	Ft. Churchill	58.7 N	265.9 E	4.1	Llewellyn and Evans, 1971; Evans and Llewellyn, 1972
12	03.11.1969 г.	23.8	136	90	20	0.53	4.66	127	4	Ft. Churchill	58.7 N	265.9 E	-15.0	Bishop et al., 1972
13	03.12.1969 г.	18.2	110	85	10	0.50		132	0	Ft. Churchill	58.7 N	265.9 E	-22.1	Schiff et al., 1970
14	08.02.1972 г.	3.8	120	95	5	0.50	4.60	104	3	Ft. Churchill	58.7 N	265.9 E	-15.0	Evans et al., 1972
15	11.07.1977 г.	0	126	89	14	0.63	4.90	74	3	White Sands	32.3 N	253.5 E	22.2	Thomas and Yang, 1981
16	16.08.1977 г.	19.9	106	84	13	0.58	5.11	85	2	Uchinoura	30.3 N	131.3 E	13.6	Makino et al., 1983

Таблица. (Окончание)

№	Дата	LT, час	χ°	Z_M , км	W , км	P	$\lg Q_M$	$F_{10.7}$	K_p	Станция	φ°	λ°	δ°	Ссылка
17	28.09.1977 г.	5.6	80	50	18	0.64	6.70	100	2	Poker Flat	64.9 N	212.2 E	-2.0	Stair et al., 1985; Winick et al., 1985
18	26.02.1979 г.	10.3	66	85	13	0.66	5.74	191	2	Red Lake	50.5 N	266.5 E	-8.5	Pendleton et al., 1983
19	26.02.1979 г.	10.7	63	90	10	0.50	5.30	191	2	Red Lake	50.5 N	266.5 E	-8.5	Bantle et al., 1984
20	19.12.1981 г.	19.6	123	84	14	0.61	5.24	134	2	El Arenosillo	37.1 N	353.7 E	-23.4	López-Moreno et al., 1984, 1988
21	14.03.1982 г.	14.8	44	87	13	0.55	5.85	204	2	SME	12.5 N	~225 E	-2.5	Thomas et al., 1983
22	14.03.1982 г.	15.7	74	87	15	0.55	5.85	204	2	SME	66.2 S	~225 E	-2.5	Thomas et al., 1983
23	23.03.1982 г.	21.7	115	89	12	0.63	4.72	204	2	South Uist	57.6 N	252.6 E	1.2	Greer et al., 1986; McDade et al., 1987
24	01.03.1983 г.	15.0	65	48	17	0.75	7.08	148	4	SME	44 N	~225 E	-7.4	Thomas et al., 1984
25	01.03.1983 г.	15.0	48	47	18	0.70	7.08	148	4	SME	10 N	~225 E	-7.4	Thomas et al., 1984
26	01.03.1983 г.	15.0	45	45	18	0.81	7.13	148	4	SME	20 S	~225 E	-7.4	Thomas et al., 1984
27	01.03.1983 г.	15.0	70	52	20	0.66	6.90	148	4	SME	72 S	~225 E	-7.4	Thomas et al., 1984
28	11.05.1984 г.	16.2	60	84	6	0.55	6.08	145	2	Ft. Churchill	58.7 N	265.9 E	18.0	Evans et al., 1988
29	10–31.07.1984 г.	3.0	103	92	10	0.55	4.98	145	2	SME	45 N		20.5	Howell et al., 1990
30	10–31.07.1984 г.	15.0	44	85	14	0.55	5.84	145	2	SME	45 N		20.5	Howell et al., 1990
31	28.01.1990 г.	4.4	124	92	7	0.54	5.30	237	1	Kagoshima	31.5 N	131.1 E	-18.2	Yamamoto et al., 1992
32	04.07.2002 г.	16.5	61	90	10	0.62	5.85	173	2	SABER	69 N	160 E	22.5	Mlynczak et al., 2007

на основе имеющихся в работах сведений вычислялись зенитные углы Солнца для указанных условий запуска ракеты. Однако из-за ограниченности сведений об условиях измерений, приводимых в работах, вычисленные зенитные углы Солнца могли не в полной мере соответствовать условиям моментов времени, когда непосредственно проводились измерения излучающих слоев эмиссии 1.27 мкм. Это могло обусловить увеличение дисперсии рассматриваемых результатов измерений, поскольку быстро изменяющиеся высоты излучающих слоев в период измерений могли не полностью соответствовать зенитным углам Солнца для момента запуска ракеты, в особенности для утренних условий. На это указывают и представленные отклонения отдельных значений измеренных параметров излучающего слоя от их средних значений (см. раздел 3).

Измерения на спутнике SME, запущенном 6 октября 1981 г., проводились путем сканирования вертикального распределения интенсивности излучения в плоскости орбиты спутника, ось которого была перпендикулярна плоскости орбиты, за счет его вращения. Угол наклона плоскости орбиты к плоскости экватора составлял 97° . Период вращения спутника составлял 12 с. Результаты усреднялись для пяти сканов. Этот метод позволял получать распределения интенсивности излучения вдоль лимба [Thomas et al., 1983, 1984]. Совершенно естественно, что при сохранении пространственной ориентации плоскости орбиты спутника при движении Земли по ее орбите вокруг Солнца направления визирования прибора для различных месяцев года неизбежно должны были соответствовать различным моментам суток. Поэтому данные измерений излучения верхней атмосферы должны были быть представлены для различных моментов суток для различных месяцев. Однако опубликованы данные только для марта 1982 и 1983 гг., а также июля 1984 г.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Первые же результаты измерений высотных профилей эмиссии 1.27 мкм позволили подтвердить, что высота максимума излучающего слоя при увеличении зенитного угла Солнца увеличивается от 45 до 90 км. Преобладающее большинство исследований производилось во второй половине суток, соответствовавших вечерним сумеркам и ночи. Существенно меньшее количество данных имеется для утренних сумерек. Важным результатом проводимых измерений было обнаружение изменений высотного распределения интенсивности излучения от зенитного угла Солнца. Было выявлено, что для дневных измерений, когда максимум объемной интенсивности излучения соответствовал высотам 40–50 км, существует значительное разли-

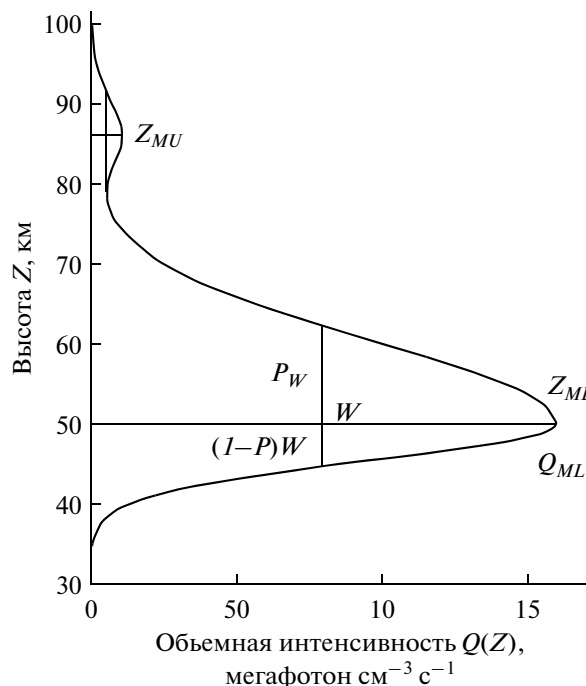


Рис. 1. Высотное распределение объемной интенсивности $Q(Z)$ излучающего слоя эмиссии ИКАО₂ 1.27 мкм. Z_{MU} — высота максимума объемной интенсивности нижнего слоя, $Q_M(Z_{ML})$ — максимальная объемная интенсивность нижнего слоя, W — полуширина нижнего излучающего слоя, P_W — полуширина верхней части нижнего излучающего слоя, $(1 - P)W$ — полуширина нижней части нижнего слоя.

чие вблизи утренних и вечерних сумерек. Поэтому первоначальной задачей настоящего исследования было выявление закономерностей вариаций высотного профиля интенсивности в зависимости от зенитного угла Солнца.

Наблюдаемые высотные распределения излучения для верхней и нижней частей излучающего слоя имели большое сходство с нормальным распределением. Поэтому для уточнения характера рассматриваемого высотного распределения был использован метод, применявшийся в работах [Семенов, 1975; Шефов и др., 2006] для оценки профилей спектральной линии при интерферометрических измерениях.

Рассмотрим основные параметры высотного распределения объемной интенсивности эмиссии молекулярного кислорода 1.27 мкм $Q(Z)$, размерность которой фотон $\text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$. Высотный профиль имеет два максимума, образуя, таким образом, два излучающих слоя. Нижний слой, обусловленный в дневное время процессами фотолиза озона, изменяет свою высоту в зависимости от условий освещения Солнцем средней атмосферы, т.е. зависит от зенитного угла Солнца χ . Условия же образования верхнего слоя связаны с процессами, аналогичными процессам возбужде-

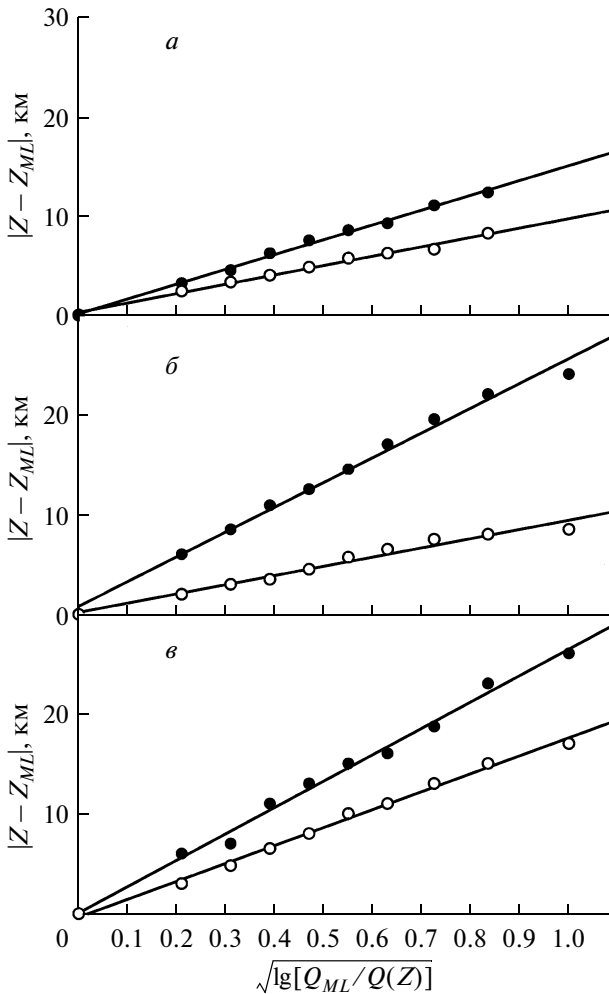


Рис. 2. Примеры корреляционных зависимостей ширины верхней $|Z - Z_{ML}|$ (точки) и нижней $|Z - Z_{ML}|$ (кружки) частей нижнего высотного профиля объемной интенсивности излучения полосы (0–0) 1.27 мкм для данных ракетных и спутниковых измерений: *a* – 11.07.1977 г.; *b* – 01.03.1983 г.; *c* – 10–31.07.1984 г. Вертикальные линии указывают значения ширины верхней и нижней частей нижнего высотного профиля для значения $0.5Q_{ML}$.

ния эмиссии 557.7 нм атомарного кислорода. Поэтому его высота мало изменяется в течение суток. На рисунке 1 показан типичный пример высотного распределения $Q(Z)$. Параметрами нижней части слоя являются высота максимума Z_{ML} , км; его объемная интенсивность $Q_{ML}(Z_{ML})$; полуширина W , км, соответствующая его ширине для значения объемной интенсивности, равной половине максимального значения. Рассматриваемый профиль имеет отчетливую асимметрию P высотного распределения, которая имеет значения в пределах ($0.5 \leq P < 1$). Поэтому для верхней более широкой части нижнего слоя удобно принять значение полуширины профиля, как соответствующей Гауссовскому (нормальному) рас-

пределению, $W_{upL} = Z - Z_{ML} = PW$. Тогда для нижней более узкой части профиля нижнего слоя его полуширина будет соответствовать $W_{lowL} = Z_{ML} - Z = (1 - P)W$. В случае представления высотного распределения объемной интенсивности нижнего слоя при помощи нормального распределения эти формулы будут иметь вид для его верхней и нижней частей, соответственно:

$$Q(Z) = Q_{ML} \exp \left[-\frac{\ln 2(Z - Z_{ML})^2}{P^2 W^2} \right];$$

и нижней части

$$Q(Z) = Q_{ML} \exp \left[-\frac{\ln 2(Z - Z_{ML})^2}{(1 - P)^2 W^2} \right].$$

На рисунке 2, приведены примеры зависимостей ширины высотного профиля для нормального распределения, полученные по методике [Семенов, 1975, Шефов и др., 2006]. На основе этих соотношений регрессионная зависимость имеет вид

$$|Z_i - Z_{ML}| = C \sqrt{\lg \frac{Q_{ML}}{Q_i(Z_i)}}$$

для верхней и для нижней части нижнего слоя. Значения $i = 1-9$, C – константа.

Преобладающее количество данных весьма удовлетворительно соответствовало линейной зависимости с высокой степенью корреляции (коэффициент корреляции $r > 0.95$), что означает справедливость предположения о нормальном распределении $Q(Z)$ от высоты Z как выше, так и ниже его максимума.

Таким образом, интегральная интенсивность $I(Z_M)$, рэлей, как нижнего, так и верхнего слоев высотного распределения интенсивности может быть представлена формулой

$$I[Z_M(\chi)] = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\ln 2}} W(\chi) Q_M[Z_M(\chi)].$$

Данные ракетных и спутниковых измерений, собранные в таблице, были использованы для построения зависимостей параметров нижнего и верхнего излучающих слоев: высоты максимума Z_M объемной интенсивности излучающего слоя эмиссии ИКАО₂, его полуширины W и асимметрии P от зенитного угла Солнца χ (рис. 3).

Как следует из таблицы, представленные данные измерений относятся ко второй половине XX века. В то же время многочисленные данные атмосферных исследований свидетельствуют о климатических изменениях за прошедший период, следствием которых было оседание верхней атмосферы [Шефов и др., 2006]. На основе этих

данных величина оседания может быть оценена по формуле

$$\delta Z(Z, t) = -0.09 \left(\frac{Z}{100} \right)^{1.1} (1990 - t),$$

где Z измеряется в км и $\delta Z(Z, t)$ в км год⁻¹.

Проведенная оценка показала, что в этом случае ожидаемые изменения высот в диапазоне 40–100 км не превосходили 1.7 км, что полностью перекрывается возможными погрешностями определения высот максимумов интенсивности. Поэтому введение таких поправок было не нужным. Аналогично обстоит ситуация с учетом возможного влияния солнечной активности. Наибольшего влияния в этом случае следует ожидать для верхней части излучающего слоя. Однако и в этом случае погрешности полученных высотных профилей интенсивности перекрывают возможные поправки за счет солнечной активности.

На основе представленных данных измерений были получены эмпирические аппроксимации зависимостей параметров высотных распределений от зенитного угла Солнца.

Высота (в км) максимума слоя Z_M соответственно нижнего и верхнего слоев для послеполуденного (вечернего) интервала суток:

$$Z_{MLev}(\chi) = 45.5 + \frac{45.2}{1 + \exp\left(\frac{-\chi - 100.2}{13.1}\right)};$$

$$Z_{MUV}(\chi) = 86.0 + \frac{4.0}{1 + \exp\left(\frac{-\chi - 124.0}{7.6}\right)}.$$

Для дополуденного (утреннего) интервала суток:

$$Z_{MLmo}(\chi) = 45.0 + \frac{45.8}{1 + \exp\left(\frac{-\chi - 93.5}{3.4}\right)};$$

$$Z_{MUmo}(\chi) = 86.0 + \frac{4.8}{1 + \exp\left(\frac{-\chi - 87.2}{5.2}\right)}.$$

Полуширина слоя W для послеполуденного интервала суток:

$$W_{Lev}(\chi) = 6.1 + \frac{19.4}{1 + \exp\left(\frac{\chi - 88.4}{33.1}\right)};$$

$$W_{Uev}(\chi) = 7.6 + \frac{6.9}{1 + \exp\left(\frac{\chi - 57.9}{17.4}\right)}.$$

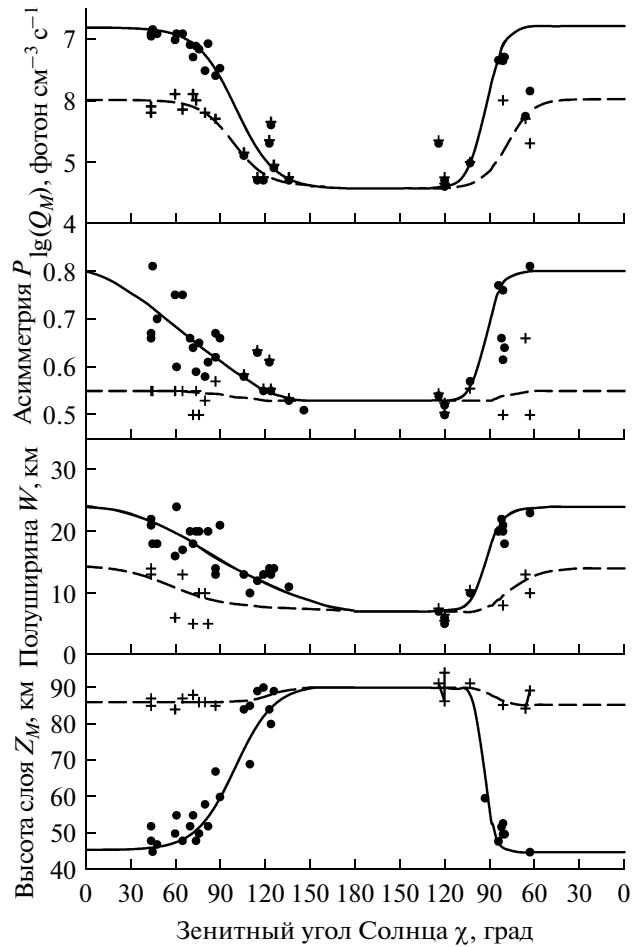


Рис. 3. Зависимости от зенитного угла Солнца: высот максимумов излучающего слоя эмиссии 1.27 мкм, его полуширин и асимметрии, а также логарифмов измеренной объемной интенсивности эмиссии 1.27 мкм на высотах максимумов нижней и верхней частей излучающего слоя по результатам ракетных и спутниковых измерений. Точки – нижний слой, крестики – верхний слой, сплошные и штриховые линии – аппроксимация.

Для дополуденного интервала суток:

$$W_{Lmo}(\chi) = 7.0 + \frac{17.0}{1 + \exp\left(\frac{\chi - 92.0}{5.4}\right)};$$

$$W_{Umo}(\chi) = 6.9 + \frac{7.0}{1 + \exp\left(\frac{\chi - 75.4}{8.2}\right)}.$$

Асимметрия слоя P для послеполуденного интервала суток:

$$P_{Lev}(\chi) = 0.52 + \frac{0.31}{1 + \exp\left(\frac{\chi - 65.5}{28.0}\right)};$$

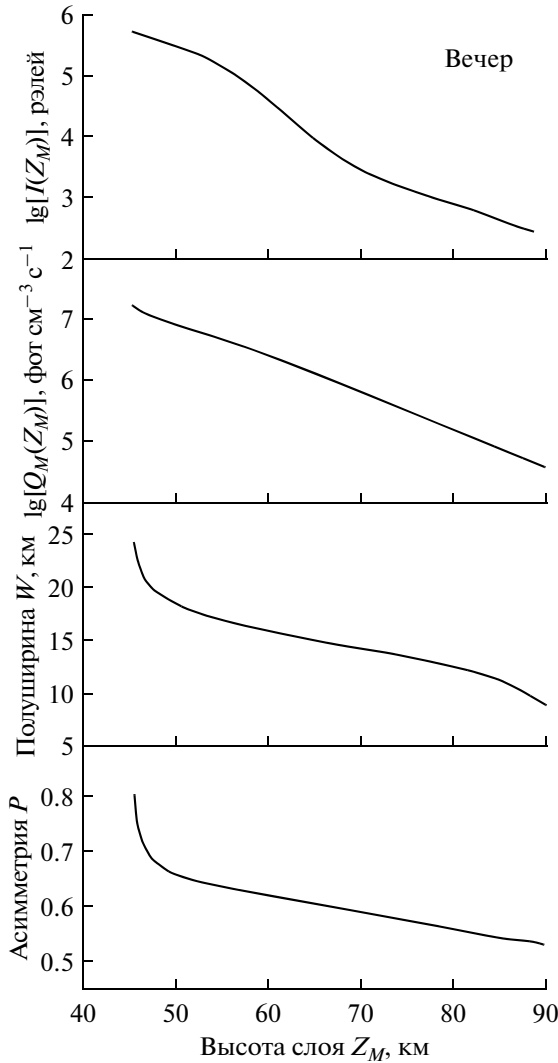


Рис. 4. Средние зависимости от высоты максимума нижнего слоя высотного профиля измеренной интенсивности эмиссии 1.27 мкм (вечерний интервал суток): логарифма измеренной интенсивности эмиссии 1.58 мкм, логарифма измеренной объемной интенсивности максимума излучающего слоя эмиссии 1.27 мкм, полуширины излучающего слоя и его асимметрии по результатам ракетных и спутниковых измерений.

$$P_{Uev}(\chi) = 0.53 + \frac{0.020}{1 + \exp\left(\frac{\chi - 94.8}{10.7}\right)}$$

Для дополуденного интервала суток:

$$P_{Lmo}(\chi) = 0.53 + \frac{0.27}{1 + \exp\left(\frac{\chi - 92.1}{5.1}\right)}$$

$$P_{Umo}(\chi) = 0.53 + \frac{0.020}{1 + \exp\left(\frac{\chi - 79.3}{5.1}\right)}$$

Логарифм объемной интенсивности максимума слоя $\lg Q_M(\chi)$, измеренной в фотон $\text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$, для верхнего и нижнего слоев для послеполуденного интервала суток:

$$\lg Q_{MLev}(\chi) = 4.56 + \frac{2.62}{1 + \exp\left(\frac{\chi - 100.6}{13.0}\right)}$$

$$\lg Q_{MUev}(\chi) = 4.61 + \frac{1.40}{1 + \exp\left(\frac{\chi - 99.2}{11.2}\right)}$$

Для дополуденного интервала суток:

$$\lg Q_{MLmo}(\chi) = 4.57 + \frac{2.64}{1 + \exp\left(\frac{\chi - 92.5}{6.1}\right)}$$

$$\lg Q_{MUmo}(\chi) = 4.62 + \frac{1.40}{1 + \exp\left(\frac{\chi - 77.3}{8.2}\right)}$$

Особенный интерес представляет зависимость параметров нижнего слоя излучения, как наиболее интенсивного компонента наблюдаемой эмиссии 1.27 мкм, а также 1.58 мкм, от высоты максимума объемной интенсивности излучающего слоя. На основе эмпирических соотношений, представленных выше, на рисунках 3, 4 и 5 показаны зависимости наиболее значимых параметров. Их эмпирические соотношения для вечернего периода суток имеют следующий вид.

Логарифм измеренной интенсивности эмиссии (0–1) 1.58 мкм, рэлей

$$\lg[I_{ev}(Z_{ML})] = 2.49 + \frac{3.38}{1 + \exp\left(\frac{Z_{ML} - 66.2}{6.8}\right)}$$

Логарифм измеренной объемной интенсивности эмиссии (0–0) 1.27 мкм, рэлей

$$\lg[Q_{MLev}(Z_{ML})] = -1.3 + \frac{12.3}{1 + \exp\left(\frac{Z_{ML} - 86.2}{50.4}\right)}$$

Полуширина излучающего слоя, км

$$W_{Lev}(Z_{ML}) = 14.5 + 4.14 \lg\left(\frac{46.4}{Z_{ML} - 45.4} - 1\right)$$

Асимметрия излучающего слоя, отн. ед.

$$P_{Lev}(Z_{ML}) = 0.59 + 0.088 \lg\left(\frac{55.5}{Z_{ML} - 44.7} - 1\right)$$

Соотношения для утреннего периода суток имеют следующий вид.

Логарифм измеренной интенсивности эмиссии (0–1) 1.58 мкм

$$\lg[I_{Lmo}(Z_{ML})] = 2.0 + 1.24 \lg\left(\frac{162.9}{Z_{ML} - 45.0} - 1\right)$$

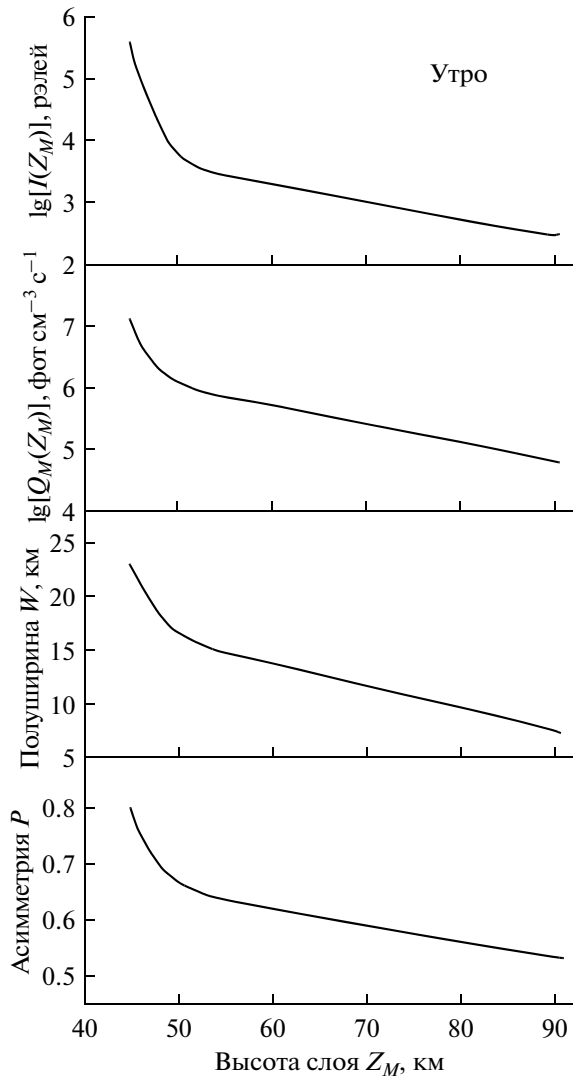


Рис. 5. То же, что на рис. 4, но для утреннего интервала суток.

Логарифм измеренной объемной интенсивности эмиссии (0–0) 1.27 мкм

$$\lg[Q_{Lmo}(Z_{ML})] = 5.3 + 0.85 \lg\left(\frac{58.1}{Z_{ML} - 44.7} - 1\right).$$

Полуширина излучающего слоя

$$W_{Lmo}(Z_{ML}) = 11.1 + 5.91 \lg\left(\frac{56.3}{Z_{ML} - 44.7} - 1\right).$$

Асимметрия излучающего слоя

$$P_{Lmo}(Z_{ML}) = 0.56 + 0.105 \lg\left(\frac{72.2}{Z_{ML} - 44.7} - 1\right).$$

Полученные закономерности представляют собой эмпирическую модель вариаций рассмотренных выше параметров излучающего слоя ИКАО₂. Она позволяет делать необходимые оценки состоя-

ния излучающего слоя для заданных геофизических условий. В заключение необходимо заметить, что, к сожалению, имеющийся в настоящее время объем данных измерений рассмотренных параметров слоя эмиссии ИКАО₂ 1.27 мкм не позволил выявить возможные воздействия на них сезонных вариаций, солнечной активности и многолетних изменений.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые проведены систематизация и статистический анализ данных ракетных и спутниковых измерений высотного распределения объемной интенсивности излучения Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода 1.27 мкм. Измерения проводились более 25-ти лет в различных географических пунктах и в различные сезоны года. Это позволило выявить средние закономерности их вариаций в течение суток. Полученная эмпирическая модель позволяет делать оценки параметров излучающего слоя для заданных значений зенитного угла Солнца.

Автор благодарен А.И. Семенову за советы и внимание, а также активное обсуждение получаемых результатов и помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Клоповский К.С., Ковалев А.С., Лопавев Д.В., Попов Н.В., Рахимов А.Т., Рахимова Т.В. Новый механизм образования синглетного кислорода в процессах с участием электронно-колебательно-возбужденных молекул озона // ЖЭТФ. Т. 107. № 4. С. 1080–1099. 1995.
- Липатов К.В., Перминов В.И. Эмпирическая модель вариаций эмиссии Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода. 1. Интенсивность // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 52. № 4. С. 541–553. 2012.
- Семенов А.И. Интерферометрические измерения температуры верхней атмосферы. I. Применение охлаждаемых электронно-оптических преобразователей // Полярные сияния и свечение ночного неба / Ред. В.И. Красовский. М.: Наука, № 23. С. 64–65. 1975.
- 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.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС. 741 с. 2006.
- Bantle M., Llewellyn E.J., Solheim B.H. Measurement of O₂(a¹Δ_g) emission in a total solar eclipse // J. Atmos. Terr. Phys. V. 46. № 3. P. 265–271. 1984.
- Bishop R.H., Baker K.D., Han R.Y. Altitude profile of O₂(a¹Δ_g) at night // J. Atmos. Terr. Phys. V. 34. № 9. P. 1477–1482. 1972.

- *Evans W.F.J., Hunten D.M., Llewellyn E.J., Vallance Jones A.* Altitude profile of the infrared system of oxygen in the dayglow // *J. Geophys. Res.* V. 73. № 9. P. 2885–2896. 1968.
- *Evans W.F.J., Llewellyn E.J.* Measurements of mesospheric ozone from observations of the 1.27 μ band // *Radio Sci.* V. 7. № 1. P. 45–50. 1972.
- *Evans W.F.J., Llewellyn E.J., Vallance Jones A.* Altitude distribution of the $O_2(^1\Delta_g)$ nightglow emission // *J. Geophys. Res.* V. 77. № 25. P. 4899–4901. 1972.
- *Evans W.F.J., McDade I.C., Yuen J., Llewellyn E.J.* A rocket measurement of the O_2 Infrared Atmospheric (0–0) band emission in the dayglow and a determination of the mesospheric ozone and atomic oxygen densities // *Canad. J. Phys.* V. 66. № 11. P. 941–946. 1988.
- *Gattinger R.L.* Observation and interpretation of the $O_2(^1\Delta_g - ^3\Sigma_g^-)$ airglow emission // *Canad. J. Phys.* V. 46. № 14. P. 1613–1626. 1968.
- *Greer R.G.H., Murtagh D.P., McDade I.C. et al.* ETON 1: A data base pertinent to the study of energy transfer in the oxygen nightglow // *Planet. Space Sci.* V. 34. № 9. P. 771–788. 1986.
- *Han R.Y., Megill L.R., Wyatt C.L.* Rocket observation of the equatorial $O_2(^1\Delta_g)$ emission after sunset // *J. Geophys. Res.* V. 78. № 27. P. 6140–6149. 1973.
- *Haslett J.C., Megill L.R., Schiff H.I.* Rocket measurements of oxygen $O_2(^1\Delta_g)$ // *Canad. J. Phys.* V. 47. № 21. P. 2351–2354. 1969.
- *Howell C.D., Michelangeli D.V., Allen M., Yung Y.L., Thomas R.J.* SME observations of $O_2(^1\Delta_g)$ nightglow: an assessment of the chemical production mechanisms // *Planet. Space Sci.* V. 38. № 4. P. 529–537. 1990.
- *Llewellyn E.J., Evans W.F.J.* The dayglow // *The radiating atmosphere* / Ed. B.M. McCormac. Dordrecht-Holland: D. Reidel Publ. Co., P. 17–33. 1971.
- *Lopez-Moreno J.J., Vidal S., Rodrigo R., Llewellyn E.J.* Rocket-borne photometric measurements of $O_2(^1\Delta_g)$, green line and OH Meinel bands in the nightglow // *Ann. Geophysicae* V. 2. № 1. P. 61–66. 1984.
- *Lopez-Moreno J.J., Rodrigo R., Moreno F., Lopez-Puertas M., Molina A.* Rocket measurements of O_2 Infrared Atmospheric System in the nightglow // *Planet. Space Sci.* V. 36. № 5. P. 459–467. 1988.
- *Makino T., Yamamoto H., Sekiguchi H.* Altitude profiles of OH and O_2 near infrared airglow in the evening twilight // *J. Geomagn. Geoelectr.* V. 35. № 3. P. 57–64. 1983.
- *McDade I.C., Llewellyn E.J., Greer R.G.H., Murtagh D.P.* ETON 6: A rocket measurement of the O_2 Infrared Atmospheric (0–0) band in the nightglow // *Planet. Space Sci.* V. 35. № 12. P. 1541–1552. 1987.
- *Megill L.R., Despain A.M., Baker D.J., Baker K.D.* Oxygen Atmospheric and Infrared Atmospheric bands in the aurora // *J. Geophys. Res.* V. 75. № 25. P. 4775–4785. 1970.
- *Mlynczak M.G., Marshall B.T., Martin-Torres F.J. et al.* Sounding of the atmosphere using broadband emission radiometry observations of daytime mesospheric $O_2(^1\Delta)$ 1.27 μ m 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.
- *Pendleton W.R., Baker K.D., Howlett L.C.* Rocket-based investigations of $O(^3P)$, $O_2(^1\Delta_g)$ and $OH(v = 1.2)$ during the solar eclipse of 26 February 1979 // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 45. № 7. P. 479–491. 1983.
- *Schiff H.I., Haslett J.C., Megill L.R.* Accidental rocket observation of $O_2(^1\Delta_g)$ in an aurora // *J. Geophys. Res.* V. 75. № 22. P. 4363–4365. 1970.
- *Stair A.T., Sharma R.D., Nadile R.M., Baker D.J., Grieder W.F.* Observations of limb radiance with cryogenic Spectral Infrared Rocket Experiment (SPIRE) // *J. Geophys. Res.* V. 90. № A10. P. 9763–9775. 1985.
- *Thomas R.J., Young R.A.* Measurement of atomic oxygen and related airglows in the lower thermosphere // *J. Geophys. Res.* V. 86. № C 8. P. 7389–7393. 1981.
- *Thomas R.J., Barth C.A., Rottman G.J. et al.* Ozone density distribution in the mesosphere (50–90 km) measured by the SME limb scanning near infrared spectrometer // *Geophys. Res. Lett.* V. 10. № 4. P. 245–248. 1983.
- *Thomas R.J., Barth C.A., Rusch D.W., Sanders R.W.* Solar Mesosphere Explorer Near-Infrared Spectrometer: measurements of 1.27 μ radiation and the inference of mesospheric ozone // *J. Geophys. Res.* V. 89. № D6. P. 9569–9580. 1984.
- *Wayne R.P.* Photo-chemiluminescent emission in ozone // *Photochem. Photobiol.* V. 5. № 11–12. P. 889–903. 1966.
- *Wayne R.P.* The photochemical formation of electronically excited oxygen molecules in the atmosphere // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* V. 93. № 395. P. 69–78. 1967.
- *Winick J.R., Picard R.H., Sharma R.D., Nadile R.M.* Oxygen singlet delta 1.58-micrometer (0–1) limb radiance in the upper stratosphere and lower mesosphere // *J. Geophys. Res.* V. 90. № A10. P. 9804–9814. 1985.
- *Wood H.C., Evans W.F.J., Llewellyn E.J., Vallance Jones A.* Summer daytime height profiles of $O_2(^1\Delta_g)$ concentration // *Canad. J. Phys.* V. 48. № 7. P. 862–867. 1970.
- *Yamamoto H., Naito I., Makino T., Sekiguchi H.* Altitude distribution of the O_2 1.27 μ m nightglow emission // *J. Geomagn. Geoelectr.* V. 44. № 3. P. 207–221. 1992.