ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫПУСК 6, 20–34, 2013

ТЕХНОЛОГИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

УДК 550.388

ВАРИАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭМИССИЙ КОНТИНУУМА ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

А.И. Семенов[1], Н.Н.Шефов[1], И.В.Медведева[2] Железнов[3] Ю.А.

Поступила в редакцию 12.08.2013 г. Опубликована 12.12.2013 г.

Представлены результаты анализа данных наземных и спутниковых измерений интенсивностей эмиссий континуума (непрерывного излучения) верхней атмосферы. Измерения охватывают видимую и ближнюю инфракрасную области спектра Данные получены на геофизических станциях, расположенных в различных частях Земного шара и с борта орбитального космического корабля «Мир». Выявлены закономерности спектрального распределения интенсивности эмиссии континуума и ее вариации для различных гелиогеофизических условий.

1. ВВЕДЕНИЕ

Существование непрерывного спектра (континуума) в излучении ночной верхней атмосферы обратило на себя внимание исследователей при оценке суммарного света звезд, а также изучении временных и пространственных вариаций излучения неба в тех спектральных участках, где отсутствуют дискретные эмиссии [Страйжис, 1977; McDade et al., 1986]. Истинная спектральная структура такого квази-непрерывного излучения достоверно не известна вследствие его малой спектральной плотности интенсивности (~10 рэлей·нм$^{-1}$) и возможного блендирования различными молекулярными эмиссиями. Поэтому под понятием континуума подразумевается вся совокупность излучения как действительно непрерывного по спектру, так и возможная совокупность слабых спектрально неразрешенных диффузных молекулярных полос.

Наиболее многочисленные исследования пространственно-временных характеристик интенсивности излучения континуума проводились в видимых областях спектра, в том числе около 530 нм [Чуваев, 1952,1961; Шефов, 1959, 1960, 1961; Карягина и Туленкова, 1959; Ярин, 1961; Таранова, 1962; Гиндилис, 1965; Davis and Smith, 1965; Dandekar, 1966; Sparrow et al., 1968; Фишкова, 1969, 1970, 1983; Robley and Vilkki, 1970; Sternberg and Ingham, 1972; Gadsden and Marovich, 1973; Страйжис, 1977; Соболев, 1978; Sobolev, 1978; Misawa and Takeuchi, 1982; McDade et al., 1984, 1986]. Результаты этих исследований показали, что интенсивность атмосферного континуального излучения в этой области спектра в среднем составляет ~ 10 рэлей·нм$^{-1}$.

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Первоначальные исследования континуума в различных спектральных участках проводились при помощи фотометров с фильтрами, имеющими спектральные интервалы $\Delta\lambda_{1/2}$ ~ 10 нм. Поэтому выводы, полученные в результате таких измерений, в основном относились только о возможных временных вариациях его интенсивности. Измерения же спектрального распределения излучения континуума стали возможны благодаря появлению светосильных спектрографов. Их применение позволило впервые обнаружить существование широкого максимума интенсивности вблизи 600 нм и уменьшение интенсивности в ультрафиолетовой и инфракрасной областях [Шефов, 1959, 1961; Ярин, 1961; Гиндилис, 1965; Фишкова, 1969, 1970, 1983; Noxon, 1978; Соболев, 1978; Sobolev, 1978]. Интенсивность этого максимума в среднем составляет 10–15 рэлей·нм$^{-1}$.

Оценки спектрального распределения континуума делались в основном на базе наземных спектрофотометрических измерений [Соболев, 1978, Sobolev, 1978]. В результате было получено, что спектральный состав континуума меняется в течение сезонов года в среднем на 20 %, хотя, и это необходимо отметить, что наблюдались и более

[1]ФГБУН Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова Российской академии наук, Москва
[2]ФГБУН Институт солнечно-земной физики СО Российской академии наук, Иркутск
[3]ФГБУН Institute of Problems of Electrophysics, Russian Academy of Sciences, Dvortsovaya Naberezhnaya 18, St. Petersburg, 191186 Russia
e-mail: anasemenov@yandex.ru, nikoshefov@yandex.ru

значительные изменения его спектрального состава. Такие изменения спектральных характеристик континуума свидетельствуют о нескольких процессах его возникновения.

3. ПРОЦЕССЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Важно подчеркнуть, что, несмотря на то, что спектральная объемная интенсивность эмиссии континуума мала (хотя и отмечались случаи значительного усиления до 100–150 рэлей·нм$^{-1}$ [Ярин, 1961]), однако его интегральная интенсивность в широкой области спектра оказывается весьма значительной. Так, для области 350–1200 нм интенсивность его излучения в среднем составляет ~ 10 килорэлей, а в отдельных случаях может достигать 20–30 килорэлей. Таким образом, это излучение фактически обусловливает самостоятельный, достаточно интенсивный компонент в свечении ночного неба. К сожалению, для более длинноволновой области спектра (больше 1200 нм) данных наблюдений о континууме практически нет. Имеющиеся теоретические публикации, в которых делались оценки о возможном увеличении интенсивности излучения континуума (до 150 килорэлей) в длинноволновой области спектра [Wraight, 1975, 1977, 1986], основывались на использовании данных разнородных измерений спектров излучения ночного свечения верхней атмосферы [Шефов и др., 2006].

Первые теоретические представления о природе атмосферного континуума были даны в работе Красовского [1951], в которой был предложен двухступенчатый химический процесс его возникновения – образование окиси азота и его взаимодействие с атомарным кислородом, в результате которого образуются возбужденные молекулы двуокиси азота, излучающие континуальное излучение.

$$N_2 + O \rightarrow NO + N$$
$$\alpha_{N_2O} = 1.2 \cdot 10^{-10} \cdot \exp\left[-\frac{38000}{T}\right], \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1},$$

$$NO + O \rightarrow NO_2^* + h\nu$$
$$\alpha_{NOO} = 2.9 \cdot 10^{-17} \cdot \exp\left[-\frac{530}{T}\right], \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$$

Этот процесс достаточно хорошо исследован в лабораторных условиях [Кармилова и Кондратьев, 1951]. В дальнейшем этот механизм получил свое подтверждение в работах [Gadsden and Marovich, 1973; Noxon, 1978; Красовский, 1978; Красовский и др., 1980; Шефов и др., 2006].

Позже, в работе [Kenner and Ogryzlo, 1984] было предложено развитие этого процесса – реакция, приводящая к возбуждению молекулы двуокиси азота, может происходить и с возбужденной молекулой озона

$$NO + O_3^* \rightarrow NO_2^* + O_2 + h\nu$$
$$\alpha_{NOO_3^*} = 1.8 \cdot 10^{-15} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$$

Образование возбужденных молекул озона обусловливается реакцией, в котором участвует возбужденная молекула кислорода, излучающая полосы первой системы Герцберга

$$O_2(A^3\textstyle\sum_u^+) + O_2 \rightarrow O_3^* + O$$
$$\alpha_{O_2^*O_2} = 1.810 \cdot 10^{-15} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$$

Кроме этого процесса возникновение возбужденных молекул озона (в метастабильном состоянии, связанном с излучением полос Шаппюи вблизи 600 нм) возможно в другой реакции [Gadsden, 1967]

$$O_2(a^1\Delta_g) + O \rightarrow O_3^* \rightarrow O_3 + h\nu$$

Другой возможный процесс, приводящий к образованию возбужденной молекулы двуокиси азота, связан с окисью азота и невозбужденной молекулой озоном [Clough and Thrush, 1967]

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2^* + O_2 + h\nu$$
$$\alpha_{NOO_3} = 1.26 \cdot 10^{-12} \cdot \exp\left(-\frac{2100}{T}\right) \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$$

Реальное разделение спектральных распределений излучений в континууме, обусловленных этими реакциями невозможно, так как они протекают одновременно. Поэтому все эти реакции можно рассматривать, согласно [Kenner and Ogryzlo, 1984], как единый механизм, приводящий к возникновению континуального излучения верхней атмосферы. В работе [Kenner and Ogryzlo, 1984] это излучение регистрировалось в области спектра 400–1600 нм, по данным работы

[Golde et al., 1973] оно прослеживалось до 3000 нм.

4. ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ

Спектральные распределения интенсивности (фотоны.) континуума в соответствии с реакциями различных компонентов

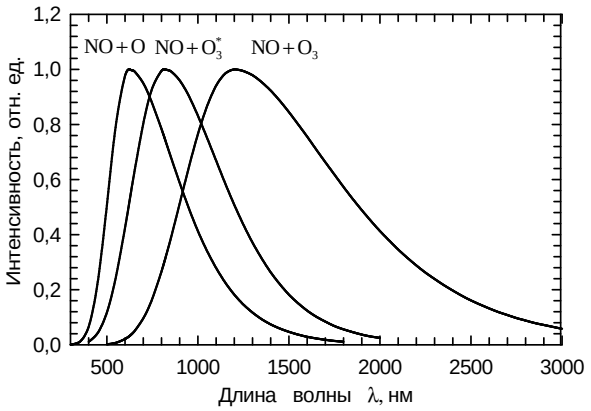

Рис. 1. Спектральные относительные (фотоны) распределения интенсивности континуума в соответствии с реакциями различных компонентов, указанных возле каждой кривой, вычисленные на основе аппроксимации данных лабораторных измерений [Kenner and Ogryzlo, 1984].

На основе данных о спектральном распределении интенсивности излучения континуума, выявленных на основе лабораторных исследований [Kenner and Ogryzlo, 1984], нами была получена более детальная его аппроксимация, чем сделанная ранее в работе [Шефов и др., 2006]. На рис. 1 представлены спектральные распределения интенсивности (фотоны) континуума, возникающего в различных участках спектра, и соответствующих различным механизмам его возбуждения в реакциях с различными атмосферными компонентами. Распределение интенсивности излучения континуума по спектру (фотоны, относительные единицы [Kaufman, 1958]) может быть аппроксимировано едиными формулами вида

$$I(\lambda) = I_{max}(\lambda_{max}) \cdot \exp\left[-\left(\frac{1}{\sigma_0 \mp \delta\sigma} \cdot \ln \frac{\lambda}{\lambda_{max}} \right)^2 \right],$$

где I_{max} – значение интенсивности излучения, соответствующего длине волны λ_{max} для распределений, относящихся к конкретному процессу (указанных на рис. 1), знак минус (–) соответствует интервалу спектра $\lambda \le \lambda_{max}$, а знак плюс (+) интервалу $\lambda \ge \lambda_{max}$. Средняя погрешность такой аппроксимации составляет 1-2 %. Соответствующая интегральная интенсивность определяется формулой

$$I(\lambda) = I(\lambda_{max}) \left[\int_0^{\lambda_{max}} \exp\left(-\frac{\ln^2 \frac{\lambda}{\lambda_{max}}}{(\sigma_0 - \delta\sigma)^2} \right) d\lambda + \right.$$

$$\left. + \int_{\lambda_{max}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\ln^2 \frac{\lambda}{\lambda_{max}}}{(\sigma_0 + \delta\sigma)^2} \right) d\lambda \right] \cong$$

$$\cong I(\lambda_{max}) \sqrt{\pi} \lambda_{max} (\sigma_0 + \delta\sigma) \exp\left(\frac{(\sigma_0 + \delta\sigma)}{2} \right)^2,$$

где λ_{max} - волны в нм.

Для реакции окиси азота с атомарным кислородом распределение интенсивности излучения континуума по спектру можно представить выражением

$$I_{NOO}(\lambda) = 1.00 \cdot \exp\left[-\left(\frac{1}{0.385 \mp 0.115} \cdot \ln \frac{\lambda}{625} \right)^2 \right],$$

где I_{NOO} в относительных единицах.

Спектральное распределение излучения (500-1400 нм), возникающего в реакции окиси азота с возбужденной молекулой озона, и спектральное распределение излучения в спектральном интервале (600-3000 нм), обусловленное реакцией окиси азота с невозбужденной молекулой озона, определялись в работе [Kenner and Ogryzlo, 1984]. Они могут быть представлены выражениями, соответственно

$$I_{NOO_3^*}(\lambda) = 1.00 \cdot \exp\left[-\left(\frac{1}{0.400 \mp 0.063} \cdot \ln \frac{\lambda}{820} \right)^2 \right] \cdot$$

$$I_{NOO_3}(\lambda) = 1.00 \cdot \exp\left[-\left(\frac{1}{0.448 \mp 0.096} \cdot \ln \frac{\lambda}{1200} \right)^2 \right] \cdot$$

Здесь, как и в предыдущих формулах, длина волны λ – в нм.

Соответствующие интегральные значения интенсивностей указанных спектральных распределений определяются выражениями

$$I_{NOO} = 500 \cdot I_{NOO}(\lambda_{max}),$$
$$I_{NOO_3^*} = 646 \cdot I_{NOO_3^*}(\lambda_{max}),$$
$$I_{NOO_3} = 1081 \cdot I_{NOO_3}(\lambda_{max}).$$

Для видимой части спектра оценка интегрального излучения континуума составляет примерно 7 килорэлей при средней спектральной плотности излучения 10 рэлей·нм$^{-1}$.

Результаты расчета спектральных распределений интенсивности континуального излучения, обусловленного различными процессами образования, представлены в таблице и приведены на рис. 1. Как видно, полученные спектральные распределения значительно перекрываются.

Таблица

Относительные спектральные распределения интенсивности (в фотонах) континуумов, вычисленные по аппроксимационным формулам на основе данных лабораторных измерений

λ, нм	NO + O	$NO + O_3^*$	$NO + O_3$	λ, нм	NO + O	$NO + O_3^*$	$NO + O_3$
400	0.065	0.011	–	1450	0.059	0.220	0.886
450	0.228	0.043	–	1500	0.047	0.182	0.845
500	0.506	0.117	0.002	1550	0.037	0.151	0.801
530	0.689	0.188	0.005	1600	0.029	0.124	0.756
550	0.800	0.247	0.007	1650	0.023	0.102	0.709
600	0.977	0.425	0.020	1700	0.018	0.084	0.663
605	0.986	0.445	0.023	1750	–	0.068	0.618
625	1.000	0.524	0.032	1800	–	0.056	0.573
650	0.994	0.623	0.048	1850	–	0.046	0.530
700	0.950	0.803	0.096	1900	–	0.037	0.489
712	0.934	0.840	0.111	1950	–	0.030	0.450
750	0.875	0.933	0.168	2000	–	0.025	0.413
800	0.784	0.995	0.266	2050	–	–	0.379
820	0.745	1.000	0.311	2100	–	–	0.346
830	0.725	0.999	0.334	2150	–	–	0.316
850	0.685	0.994	0.383	2200	–	–	0.288
900	0.588	0.960	0.513	2250	–	–	0.262
926.8	0.537	0.932	0.584	2300	–	–	0.239
950	0.496	0.904	0.644	2350	–	–	0.217
1000	0.413	0.832	0.765	2400	–	–	0.197
1050	0.341	0.752	0.866	2450	–	–	0.178
1061.2	0.326	0.733	0.885	2500	–	–	0.161
1100	0.279	0.669	0.941	2550	–	–	0.146
1150	0.226	0.586	0.985	2600	–	–	0.132
1200	0.182	0.508	1.000	2650	–	–	0.119
1250	0.146	0.436	0.994	2700	–	–	0.108
1300	0.117	0.374	0.979	2750	–	–	0.097
1350	0.093	0.314	0.954	2800	–	–	0.088
1400	0.074	0.263	0.923	2850	–	–	0.079
Интегральные значения					500	646	1081

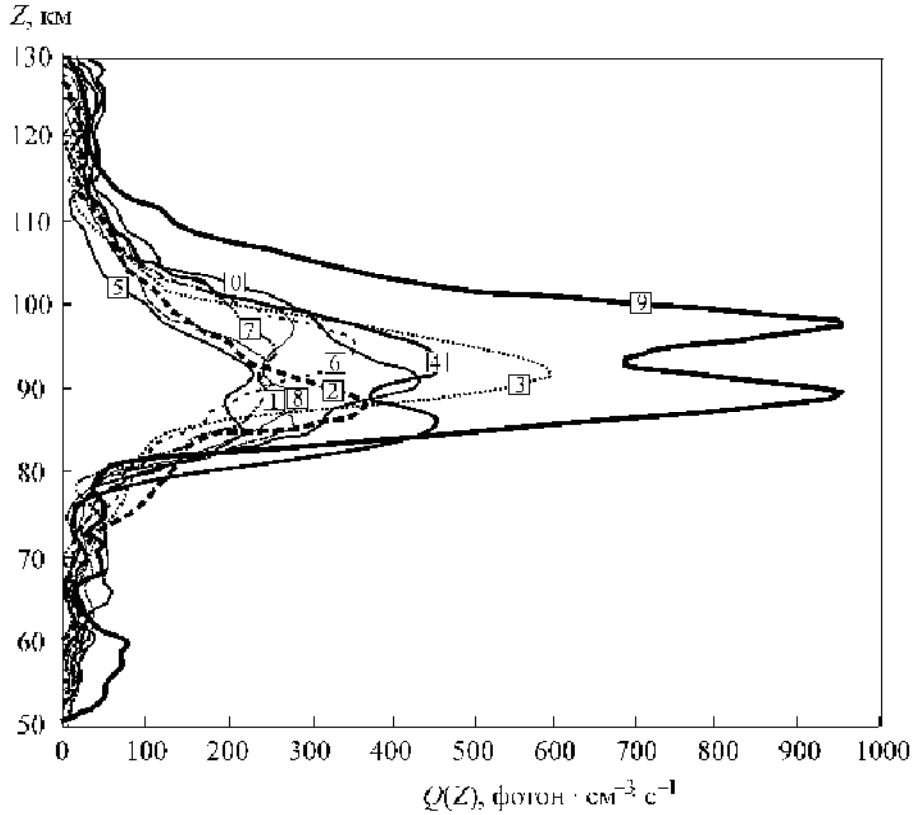

Рис. 2. Высотное распределение объемной интенсивности эмиссии верхней атмосферы в диапазоне 420-530 нм [Гурвич и др., 2002]. Цифры на кривых соответствуют номерам сеансов измерений на космическом корабле «Мир».

Важным источником закономерностей поведения интенсивности континуума являются результаты измерений с орбитальной станции «Мир», выполненные 7-9 января 1999 г. (F10,7 = 130) и показанные на рис. 2. Интенсивность континуума измерялась в области центра полосы пропускания фотометра – 475 нм, полуширина светофильтра составляла 110 нм [Гурвич и др., 2002]. Проводимые измерения континуума земной атмосферы соответствовали местному солнечному времени 5 часов и зенитному углу Солнца 115º. Эклиптическая долгота Солнца была 286º. Звезды, по которым производилось фиксирование линии визирования фотометра, имели приблизительные эклиптические координаты: $\lambda = 78^\circ$, $\beta = -39^\circ$; $\lambda = 78^\circ$, $\beta = -25^\circ$; $\lambda = 78^\circ$, $\beta = -25^\circ$. Имеющиеся сведения об интенсивности Зодиакального света (рис. 3) [Дивари, 2003] позволяют сделать вывод, что возможное его влияние заведомо меньше 1 рэлей нм$^{-1}$, поскольку положения измеряемых звезд соответствовали эклиптическим долготам относительно Солнца более 140º. Существенные вариации интенсивности этих измерений, выполненных непосредственно на высотах мезопаузы и не искаженных поглощением излучения в нижней атмосфере, позволили выявить отчетливую долготную неоднородность интенсивности излучения верхней атмосферы в используемом диапазоне спектра, обусловленную орографическим эффектом подстилающей поверхности Земли. На (рис. 4) показано долготное распределение высотного профиля рельефа земной поверхности, над которым производились измерения интенсивности на космическом корабле «Мир». Точки обозначают участки поверхности, соответствующие положению лимба в момент измерений [Шефов и др., 2006]. Важная особенность полученных данных состоит в зависимости измеренной интенсивности от высотного распределения рельефа подстилающей земной поверхности (т.е. проявление орографического возмущения излучающего слоя (рис. 5)). Такое явление уже было ранее обнаружено по измерениям эмиссий гидроксила (87 км), атомар-

ного кислорода 557.7 нм (97 км) [Семенов и др., 1981].

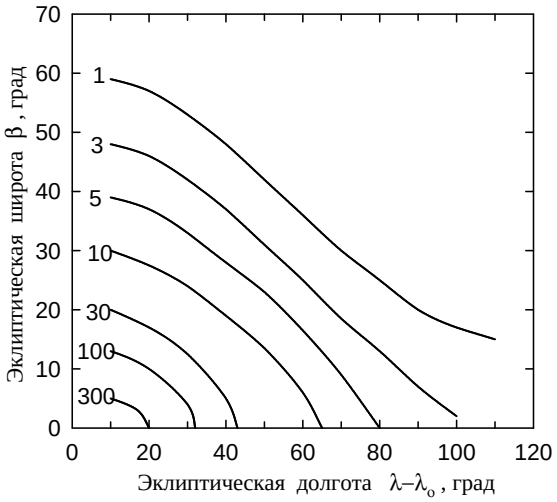

Рис. 3. Изофоты интенсивности Зодиакального света в видимой области спектра (рэлей нм$^{-1}$) по данным Дивари (2003).

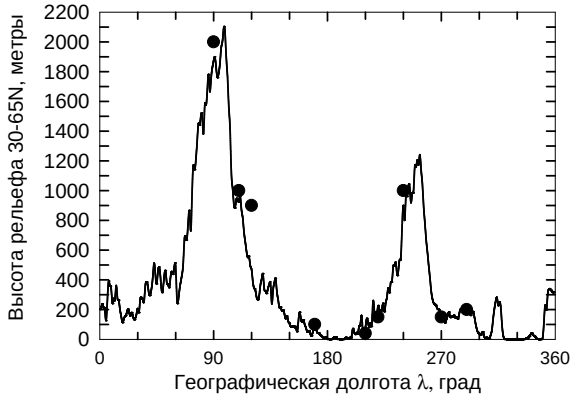

Рис. 4. Средняя высота рельефа земной поверхности в интервале широт 30-65ºN (сплошная линия), точки – долготы, для которых были сделаны измерения интенсивности эмиссии континуума на космической станции «Мир».

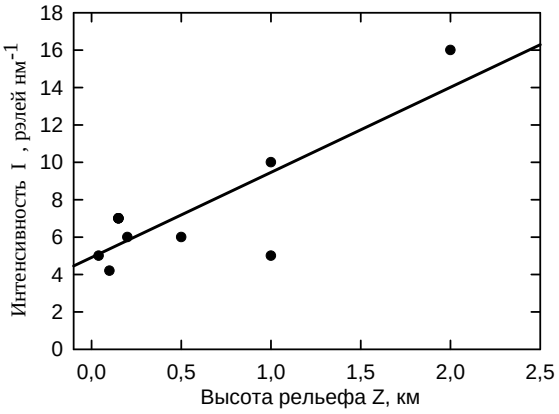

Рис.5. Корреляция интенсивности эмиссии континуума с высотой рельефа Земли на основе данных измерений на космическом корабле «Мир».

Таким образом, данные спутниковых измерений континуума на длине волны 475 нм [Гурвич и др., 2002] позволили отчетливо выявить зависимость его интенсивности (рэлей нм$^{-1}$) от высоты подстилающей земной поверхности (км):

$$I_{cont}(z) = 4.9 + 4.6\,Z = 4.9(1 + 0.94Z),$$
$$r = 0.83 \pm 0.10.$$

Это выражение дает возможность производить оценку интенсивности континуума, учитывающей влияние высотного рельефа подстилающей поверхности. Отсюда следует, что интенсивность эмиссии континуума на другой долготе, измеренная над уровнем рельефа с высотой Z (км), приведенная к уровню рельефа моря определяется выражением

$$I_0(\lambda) = \frac{I_{obs}(\lambda)}{1 + 0.94Z}$$

Все дальнейшие эмпирические соотношения были получены на основе редукции используемых данных к условиям высоты рельефа для уровня моря.

Данные рис. 1 и таблицы свидетельствуют, что преобладающий вклад интенсивности в этом коротковолновом участке спектра (420-530 нм) обусловлен компонентом реакции окиси азота и атомарного кислорода. Важным свойством данных является отсутствие световых помех при-

земной атмосферы, поскольку измерения проводились на высотах выше тропосферы. В этом случае можно оценить внеатмосферную (т.е. не искаженную поглощением в тропосфере) максимальную интенсивности этого компонента континуума для длины волны 625 нм над уровнем рельефа моря на основе представленных спектральных распределений.

$$NO + O \rightarrow NO_2^* + h\nu$$

I(625) = 15 рэлей нм$^{-1}$,
I(530) = 10.3 рэлей нм$^{-1}$,
I(605) = 14.8 рэлей нм$^{-1}$,
I(712) = 14 рэлей нм$^{-1}$,
I(820) = 11.2 рэлей нм$^{-1}$,
I(1061.2) = 4.9 рэлей нм$^{-1}$.

5. РЕГУЛЯРНЫЕ ВАРИАЦИИ

Первые попытки систематизации накопленных данных с целью выявления статистических закономерностей временных и пространственных вариаций интенсивности континуума были начаты в работах Фишковой [1970, 1983] и Соболева [1978], Sobolev [1978]. Однако, каких-либо аналитических выражений, математически описывающих обнаруженных ими вариаций, получено не было.

Данные измерений эмиссий континуума в различных участках спектра в Абастумани и Звенигороде позволили выявить средние значения интенсивностей каждой эмиссии (рис.6), По данным Абастумани они равны I(530) = 13 ± 1,5 рэлей нм$^{-1}$, I(605) = 13 ± 2 рэлей нм$^{-1}$, I(712) = 13 ± 3 рэлей нм$^{-1}$, по данным Звенигорода оказались равными: I(820) = 13,0 ± 3,2 рэлей нм$^{-1}$, I(1061,2) = 14,5 ± 2,7 рэлей нм$^{-1}$. Их внеатмосферные значения с учетом коэффициентов прозрачности атмосферы для этих участков спектра (~0,8 для 530 нм, 605 нм, 712 нм, 820 нм и 0,9 для 1061 нм) составили: I(530) = 16 ± 2 рэлей нм$^{-1}$, I(605) = 16 ± 2 рэлей нм$^{-1}$, I(712) = 16 ± 3 рэлей нм$^{-1}$, I(820) = 16,0 ± 4,0 рэлей нм$^{-1}$, I(1061,2) = 16,0 ± 3,4 рэлей нм$^{-1}$. Это позволило, исключив вклад в излучение этих эмиссий, вызванного реакцией окиси азота с атомарным кислородом, получить значения интенсивностей эмиссий континуума, имеющих спектральные максимумы I(820) и I(1200), обусловленных другими процессами возбуждения ($NO + O_3^* \rightarrow NO_2^* + O_2 + h\nu$ и $NO + O_3 \rightarrow NO_2^* + O_2 + h\nu$). В этом случае, суммарные интенсивности для рассматриваемых спектральных участков равны: I(712) = 2.5 рэлей нм$^{-1}$, I(820) = 5.0 рэлей нм$^{-1}$ и I(1061.2) = 11.0 .рэлей нм$^{-1}$.

Полученный результат может означать, что эти дополнительные процессы, приводящие к формированию излучения континуума (кроме процесса NO+O), имеют также свой собственный вклад в закономерности различного типа вариаций интенсивности. Поскольку они связаны с реакциями, в которых участвует молекулы озона, то их закономерности поведения естественно должны иметь сходство и с характером вариаций эмиссий Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода 1,27 мкм и 1,58 мкм [Липатов и Перминов, 2012].

5.1. Суточные вариации

Результаты измерений на средних широтах показывают, что интенсивность континуума меняется от ночи к ночи и в течение ночи, полученные на основе наблюдений в Абастумани эмиссии 530 нм [Фишкова, 1970, 1983]. С учетом данных ракетных измерений на средних широтах для зенитных углов Солнца более 150º (рис.7) выявляется минимум в этой области зенитных углов. Важно отметить, что абсолютные интенсивности для различных сезонов согласуются с данными сезонных вариаций. Кроме того, общий характер вариаций согласуется с закономерностью суточных вариаций эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм [Семенов и Шефов, 1997; Шефов и др., 2006], обусловливающий корреляцию между ними. Эти закономерности измеренных эмиссий имеют следующий характер. Для данных (рис.7)

$$I(625) = 3 + \frac{7.5}{1 + \exp\left(-\frac{\chi - 155}{5}\right)}, \text{ рэлей нм}^{-1},$$

для Звенигорода (рис. 8) средние вариации эмиссий 820 нм и 1061,2 нм в пределах имеющихся зенитных углов Солнца практически не меняются, что согласуется с данными рис. 7.

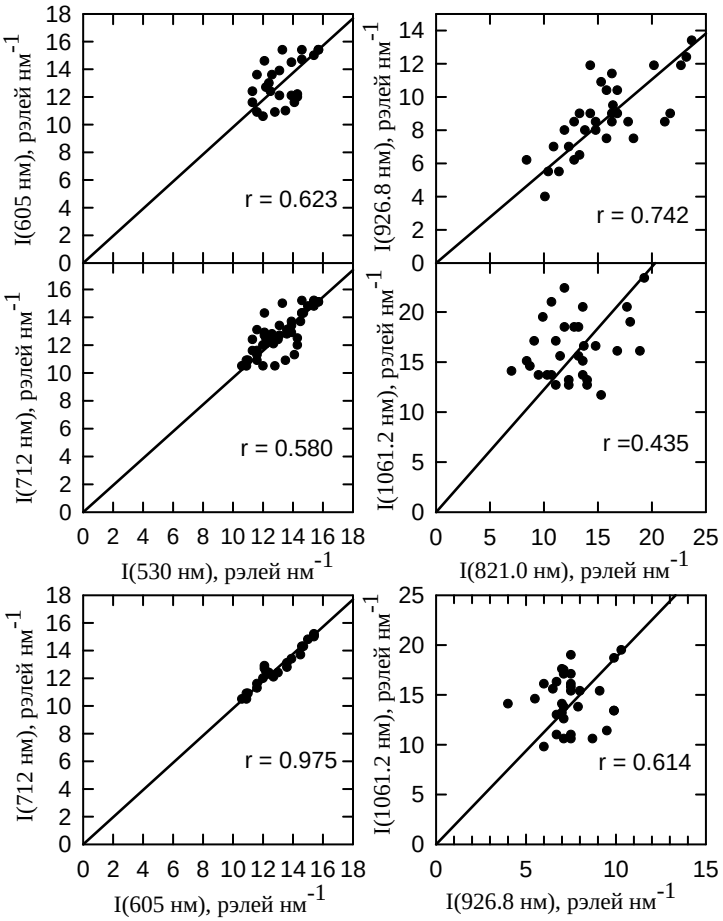

Рис.6. Корреляции интенсивностей эмиссий континуума различных участков спектра по измерениям в Абастумани (530 нм, 605 нм и 712 нм) и Звенигороде (821,0 нм, 926,8 нм и 1061,2 нм) [Соболев, 1978]. Сплошные линии – линии регрессии.

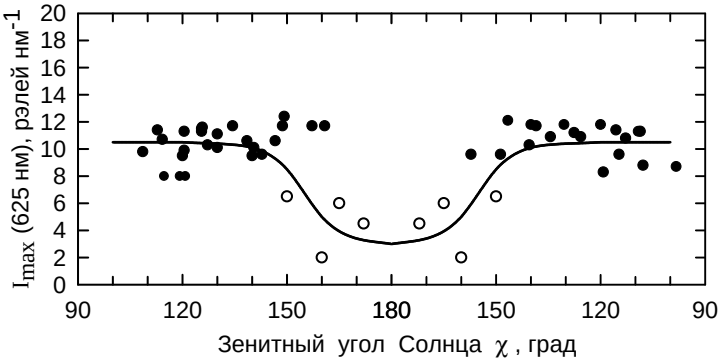

Рис.7. Суточные вариации интенсивности максимального спектрального распределения континуума на длине волны 625 нм: точки – по данным Абастумани, кружки – результаты ракетных измерений.

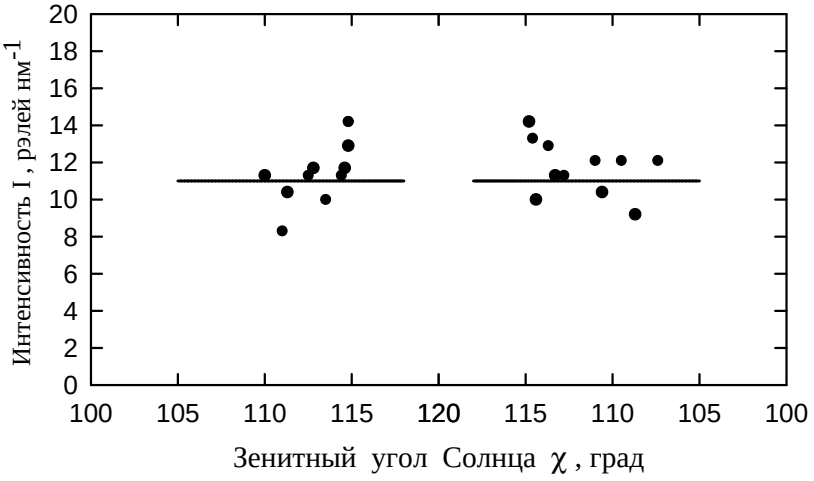

Рис. 8. Средние суточные вариации интенсивности эмиссии континуума 821 нм и 1061,2 нм по наблюдениям в Звенигороде.

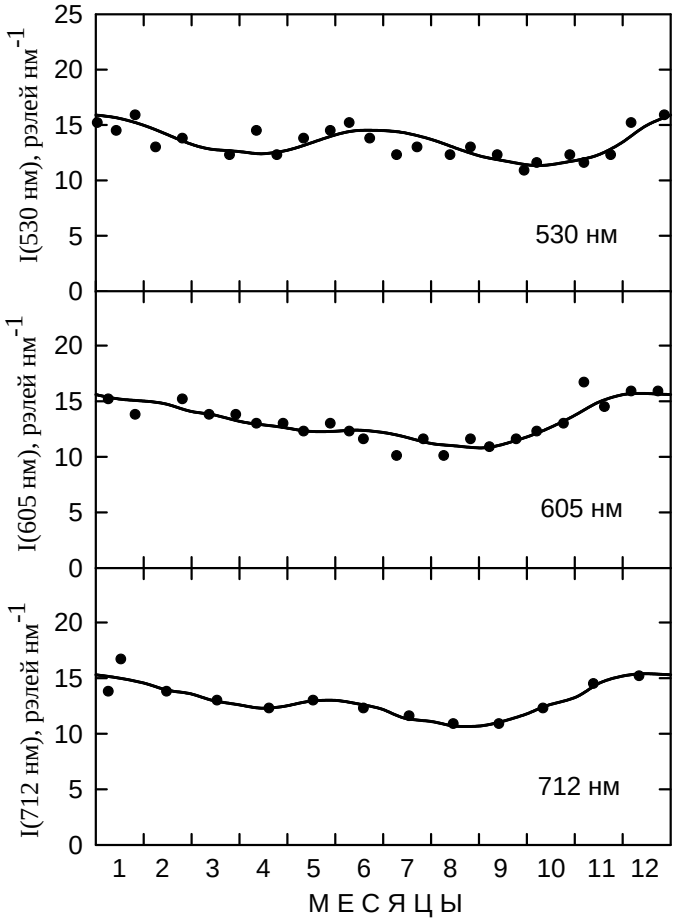

Рис. 9. Сезонные вариации интенсивностей эмиссии континуума на спектральных участках 530 нм, 605 нм и 712 нм по данным Абастумани. Сплошные линии – аппроксимации.

Такой характер их поведения с минимумом в течение ночи при увеличении зенитного угла Солнца соответствует тенденции вариаций параметров эмиссии Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода, обусловленной вариациями содержания озона в этот период суток [Липатов и Перминов, 2012].

5.2. Сезонные вариации

В работах [Соболев, 1978; Фишкова, 1969, 1970, 1983] показано наличие сезонных вариаций интенсивностей ряда эмиссий континуума (рис. 9). Используя эти данные, были получены сезонные вариации отношения интенсивностей для рассматриваемых эмиссий континуума в различных участках спектра, которые также подтверждали существование нескольких фотохимических процессов, приводящих к образованию континуального излучения в различных диапазонах спектра:

$$I(530) = 13.4 + 0.7\cos\frac{2\pi}{365}(t_d - 64) + $$
$$+ 1.6\cos\frac{4\pi}{365}(t_d - 166) + 0.2\cos\frac{6\pi}{365}(t_d - 10),$$

$$I(605) = 13.2 + 2.0\cos\frac{2\pi}{365}(t_d - 17) + $$
$$+ 0.8\cos\frac{4\pi}{365}(t_d - 166) + 0.3\cos\frac{6\pi}{365}(t_d - 75),$$

$$I(712) = 13.0 + 1.7\cos\frac{2\pi}{365}(t_d - 17) + $$
$$+ 1.0\cos\frac{4\pi}{365}(t_d - 163) + 0.1\cos\frac{6\pi}{365}(t_d - 44)$$

О наличии сезонных вариаций излучения континуума свидетельствуют и измерения на спутнике OSO-B2 на широтах 47ºN-16°S, которые обнаружили минимум интенсивности в летнее время и максимум в периоды равноденствий [Sparrow et al., 1968].

5.3. Широтные вариации

Минимум интенсивности свечения континуума наблюдается вблизи экватора (~1-2 рэлей·нм$^{-1}$), в то время как в полярных широтах его интенсивность достигает ~10-20 рэлей·нм$^{-1}$ [Таранова, 1962; Davis and Smith, 1965]. При этом, внеатмосферная составляющая свечения, обусловленная звездами и Зодиакальным светом, и достаточно подробно исследованная в работе [Дивари, 2003], в среднем за пределами эклиптических долгот 60^o и широт 30^o относительно Солнца не превышала ~ 1 рэлей·нм$^{-1}$ (рис. 3). В нашей работе результаты измерений интенсивности Зодиакального света в единицах числа звезд десятой звездной величины [Smith et al., 1965; Шаров и Липаева, 1973: Роч и Гордон, 1977; Дивари, 2003] заменены на значения в рэлей·нм$^{-1}$. Как следует из рис. 3 интенсивность свечения континуума Зодиакального света существенно зависит от эклиптических координат. Анализ долготных вариаций интенсивности также свидетельствует о существенном долготных неоднородностей на характер широтных вариаций. Характер вариаций интенсивности свечения континуума от географической широты с учетом влияния высоты подстилающего рельефа может быть описан следующим выражением (рис. 10):

$$I(530) = 7.4 - 5.1\cos 2\varphi \text{ , рэлей нм}^{-1}.$$

Аналогичный характер широтных изменений был получен в работе [Davis and Smith, 1965] при измерениях вдоль американского континента с северного до южного полушарий.

5.4. Долготные вариации

Долготные вариации континуума были обнаружены благодаря проведенным измерениям на космическом корабле «Мир» излучения слабых звезд в области спектра (420-530 нм) при их заходе за горизонт [Гурвич и др., 2002]. Эти измерения позволили проследить изменения параметров излучающего слоя (интенсивность, высота максимума излучающего слоя, полуширины его высотного распределения) вдоль долготы в интервале широт 46-52ºN (рис. 5) [Шефов и др., 2006; Semenov et al., 2012]. Несмотря на небольшое число выполненных измерений, они позволили отчетливо выявить долготную изменчивость параметров излучающего слоя континуума, отображающую рельеф земной поверхности.

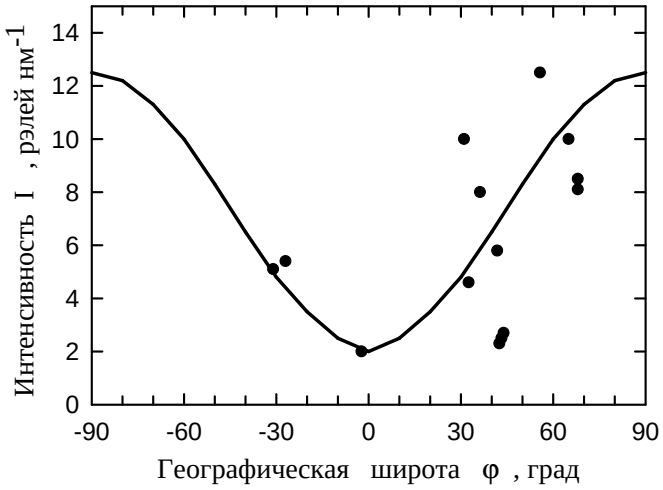

Рис. 10. Широтные вариации интенсивности эмиссии континуума 530 нм.

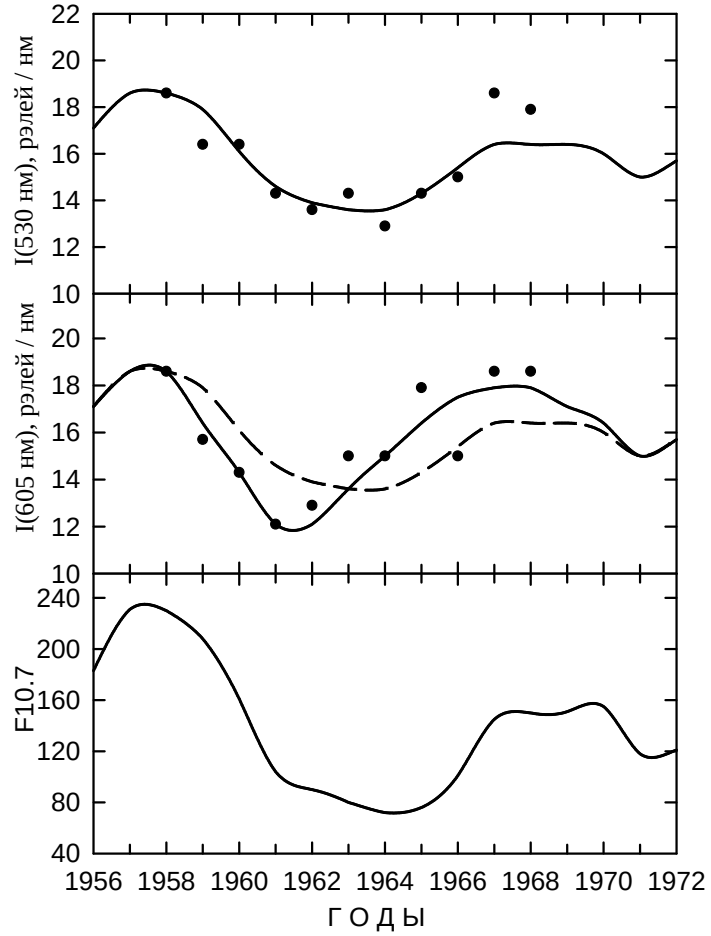

Рис. 11. Вариации интенсивностей эмиссий континуума 530 нм и 605 нм в течение цикла солнечной активности (точки) [Фишкова, 1970, 1983]. Сплошные линии – аппроксимация в соответствии с уравнением регрессии зависимости от солнечной активности. Прерывистая линия – аппроксимация, аналогичная эмиссии 530 нм.

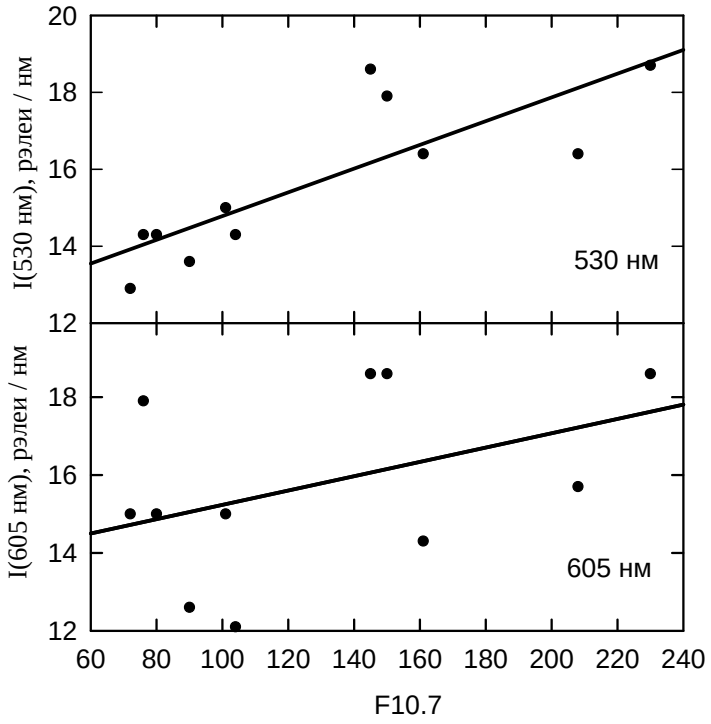

Рис. 12. Корреляции интенсивностей эмиссий континуума 530 нм и 605 нм с солнечной активностью по измерениям в Абастумани. Сплошные линии – линии регрессии.

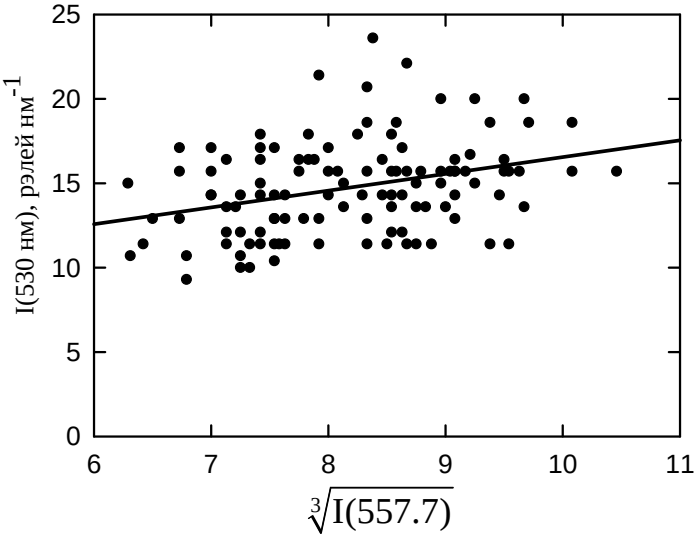

Рис.13. Корреляция интенсивности эмиссии континуума 530 нм и $\sqrt[3]{I(557.7)}$ [Фишкова, 1970, 1983].

Если в качестве аппроксимации долготного распределения принять форму долготного изменения подстилающего рельефа, то соотношения, описывающие зависимость параметров излучающего слоя от высоты рельефа земной поверхности будут иметь вид:

$$I_{cont}(Z_r) = 4.9 + 4.6\,Z_r = 4.9(1 + 0.94\,Z_r),$$
$$r = 0.83 \pm 0.10.$$

$$Z_{max} = 94 + 0.68 \cdot Z_r \quad r = 0.281 \pm 0.307,$$

$$W = 6 + 0.7 \cdot Z_r \quad r = 0.569 \pm 0.225,$$

где интенсивность излучения I(рэлей·нм$^{-1}$), высота максимума излучающего слоя Z_{max}(км), полуширина высотного распределения W (км), высота горного рельефа Z_r(км).

5.5. Зависимость от солнечной активности

Поскольку процесс возбуждения эмиссий континуума обусловлен фотохимическими процессами на высотах мезопаузы и нижней термосферы, во многом контролируемыми солнечным излучением, то интенсивность излучения этих эмиссий тесно связана с солнечной активностью. По данным измерений в Абастумани для эмиссий 530 нм и 605 нм выявлена корреляция их интенсивности излучения с солнечной активностью, характеризуемой потоком $F_{10.7}$ (рис. 11, 12)

$$I_{max}(530) = 15.7 + \frac{F10.7 - 130}{32} \quad r = 0.82 \pm 0.10$$
$$I_{max}(605) = 15.8 + \frac{F10.7 - 130}{54} \quad r = 0.42 \pm 0.20$$

5.6. Корреляционные связи с другими эмиссиями верхней атмосферы

Попытки обнаружения корреляционных связей между континуальным излучением и различными другими эмиссиями в области мезопаузы с целью выявления возможного сходства механизмов их возбуждения проводились неоднократно [Шефов, 1961; Ярин, 1961; Фишкова, 1969, 1970, 1983].

В частности, была обнаружена тесная связь между интенсивностью континуума в области спектра 530 нм и корнем кубическим из интенсивности эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм (Рис. 13) [Фишкова, 1970, 1983]. Такой характер связи обусловлен пропорциональностью интенсивности эмиссии 557,7 нм концентрации атомарного кислорода в третьей степени. Для Абастумани $(\varphi = 42.6^o\,N)$ уравнение регрессии и коэффициент корреляции равны

$$I_{max}(625) = 6.4 + 0.96\sqrt[3]{I(557.7)}\ ,\ \text{рэлей нм}^{-1},$$
$$r = 0.326 \pm 0.169,$$

Для Звенигорода $(\varphi = 55.8^o\,N)$

$$I_{max}(625) = 2.3 + 2.1\sqrt[3]{I(557.7)}\ ,\ \text{рэлей нм}^{-1},$$
$$r = 0.603 \pm 0.116.$$

К сожалению, данных измерений интенсивности эмиссий континуума, вследствие большой сложности ее измерения, к настоящему времени имеется мало. Поэтому во многом сейчас затруднительно провести полноценный анализ многолетних систематических вариациях параметров континуального излучения от различных геофизических факторов даже в северном полушарии, не говоря уже об южном.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Систематизация и анализ материалов многолетних измерений и исследований излучения континуума верхней атмосферы позволили выявить ряд новых особенностей его вариаций, отображающих важные химические и энергетические процессы на высотах мезосферы и нижней термосферы

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 13-05-00108.

CONTINUUM EMISSION INTENSITY VARIATIONS OF THE UPPER ATMOSPHERE.

A.I. Semenov[1], N.N.Shefov[1], I.V.Medvedeva[2], Y.A. Zheleznov[3]

[1]Oboukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences,
Pyzhevskii per. 3, Moscow, 119017 Russia
[2]Institute of Solar–Terrestrial Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
St. Lermontova 126a, Irkutsk, 64033 Russia
[3]Institute of Problems of Electrophysics, Russian Academy of Sciences, Dvortsovaya Naberezhnaya 18, St. Petersburg, 191186 Russia

The results of the data analysis of ground-based and satellite measurements of the intensity of the continuum emission (continuous radiation) of the upper atmosphere are presented. The measurements cover the visible and near infrared region of the spectrum. The data were obtained at the geophysical stations located in different parts of the globe, and the aboard an orbiting spacecraft "The Mir." The regularities of the spectral distribution of the continuum emission and its variations for different heliogeophysical conditions are revealed.

ЛИТЕРАТУРА

– *Гиндилис Л.М.* Абсолютные измерения непрерывного спектра свечения ночного неба // Полярные сияния и свечение ночного неба / ред. В.И. Красовский. М.: Наука. № 11. С. 26-34. 1965.
– *Гурвич А.С., Воробьев В.В., Савченко С.А., Пахомов А.И., Падалка Г.И., Шефов Н.Н., Семенов А.И.* Ночное свечение верхней атмосферы в диапазоне 420–530 нм по измерениям на орбитальной станции «Мир» в 1999 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42. № 4. С. 541–546. 2002.
– *Дивари Н.Б.* Зодиакальный свет. Одесса: Астропринт, 184 с., 2003.
– *Кармилова Л.В., Кондратьев В.Н.* Измерение концентрации атомов кислорода в пламенах при помощи NO // Журн. физ. химии. Т. 25, № 3. С. 312–322. 1951.
– *Карягина З.В., Туленкова Л.Н.* Спектрофотометрическое исследование непрерывного и эмиссионного спектра ночного неба в визуальной области спектра // Изв. Астрофиз. Института АН Каз. ССР. Т. 9. С. 86-95. 1959.
– *Красовский В.И.* О механизме свечения ночного неба // Докл. АН СССР. Т. 77. № 3. С. 395–398. 1951.
– *Красовский В.И.* NO, диссоциация H_2O и зимняя аномалия ионосферного поглощения // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 18. № 1. С. 151–153. 1978.
– *Красовский В.И., Рапопорт З.Ц., Семенов А.И. Соболев В.Г., Шефов Н.Н.* Окись азота, водяной пар, серебристые облака, эмиссии и поглощение радиоволн вблизи мезопаузы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 20, № 4. С. 657–663. 1980.
– *Липатов К.В., Перминов В.И.* Эмпирическая модель вариаций Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода. 1. Интенсивность // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 4. С. 541-553. 2012.
– *Роч Ф., Гордон Дж.* Свечение ночного неба. М.: Мир, 152 с. 1977.
– *Семенов А.И., Шефов Н.Н.* Эмпирическая модель вариаций эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм в ночное время. 1. Интенсивность // Геомагнетизм и аэрономия. 1997. Т. 37, № 2. С. 81–90.
– *Семенов А.И., Шефов Н.Н., Медведева И.В., Белецкий А.Б.* Долготные особенности вариаций температуры излучающего слоя эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм // Геомагнетизм и Аэрономия. Т. 52. № 2. С. 265-270. 2012.
– *Соболев В.Г.* Континуум ближней инфракрасной области спектра // Полярные сияния и свечение ночного неба / ред. В.И. Красовский. М.: Советское радио. № 27. С. 30-35. 1978.
– *Страйжис В.* Многоцветная фотометрия звезд. Вильнюс: Мокслас, 312 с. 1977.
– *Таранова О.Г.* Непрерывный спектр в излучении ночного неба и полярных сияний // Спектральные, электрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний и свечения ночного неба / ред. В.И. Красовский. М.: Изд-во АН СССР. № 8. С. 21-23. 1962.
– *Фишкова Л.М.* О распределении интенсивности в сплошном спектре свечения ночного неба в области λλ 5500-6700 А // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 9. № 3. С. 568-570. 1969.
– *Фишкова Л.М.* Сплошной спектр свечения ночного неба в видимой области // Бюлл. Абастуман. астрофиз. обсерв. / Под ред. Е.К. Харадзе. № 39. С. 117–150. 1970.

– *Фишкова Л.М.* Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли / Под ред. Н.Н. Шефова. Тбилиси: Мецниереба, 272 с. 1983.
– *Чуваев К.К.* О свечении земной атмосферы в непрерывном спектре // Докл. АН СССР. Т. 87. № 4. С. 551–554. 1952.
– *Чуваев К.К.* О разделении свечения ночного неба на составляющие // Астрон. журн. Т.38. № 4. С. 692–705. 1961.
– *Шаров А.С., Липаева Н.А.* Звездная составляющая свечения ночного неба // Астрон. журн. Т. 50. № 1. С. 107–114. 1973.
– *Шефов Н.Н.* Интенсивности некоторых эмиссий сумеречного и ночного неба // Спектральные, электрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний свечения ночного неба / Под ред. В.И. Красовского. М.: Изд-во АН СССР, № 1. С. 25–29. 1959.
– *Шефов Н.Н.* Интенсивность некоторых эмиссий ночного неба // Спектральные, электрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний и свечения ночного неба / ред. В.И. Красовский. М.: Изд-во АН СССР. № 2-3. С. 57-59. 1960.
– *Шефов Н.Н.* Непрерывный спектр в свечении ночного неба // Спектральные, электрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний и свечения ночного неба / ред. В.И. Красовский. М.: Изд-во АН СССР. № 5. С. 39-41. 1961
– *Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю.* Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС. 741 с. 2006.
– *Ярин В.И.* Непрерывный спектр и полосы Герцберга O_2 в излучении ночного неба // Спектральные, электрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний и свечения ночного неба / ред. В.И. Красовский. М.: Изд-во АН СССР. № 5. С. 35-38. 1961.
– *Clough P.N., Thrush B.A.* Mechanism of chemiluminescent reaction between nitric oxide and ozone // Trans. Faraday Soc. V. 63. № 4. P. 915–925. 1967.
– *Dandekar B.S.* Measurements of the airglow continuum with a birefringent filter photometer // Appl. Opt., V. 5. № 5. P. 835-838. 1966.
– *Davis T.N., Smith L.L.* Latitudinal and seasonal variations in the night airglow // J. Geophys. Res. V. 70. № 5. P. 1127-1138. 1965.
– *Gadsden M.* The nightglow continuum emission // J. Atmos. Terr. Phys. V. 29. № 5. P. 603-606. 1967.
– *Gadsden M., Marovich E.* The nightglow continuum // J. Atmos. Terr. Phys. V. 35. № 9. P. 1601-1614. 1973.
– *Golde M.F., Roche A.E., Kaufman F.* Absolute rate constant for the O + NO chemiluminescence in the near infrared // J. Chem. Phys. V. 59. № 8. P. 3953–3959. 1973.
– *Kaufman F.* Air afterglow and kinetics of some reactions of atomic oxygen // J. Chem. Phys., V. 28. № 1. P. 352-353. 1958.
– *Kenner R.D., Ogryzlo E.A.* Orange chemiluminescence from NO_2 // J. Chem. Phys. V. 80, № 1. P. 1–6. 1984.
– *McDade I.C., Greer G.H., Murtagh D.P.* Thermospheric nitric oxide concentrations derived from a measurement of the altitude profile of the green nightglow continuum // Ann. Geophys. V. 2. № 4. P. 487-493. 1984.
– *McDade I.*C., *Llewellyn E.J., Greer R.G.H., Murtagh D.P.* ETON 3: altitude profiles of the nightglow continuum at green and near infrared wavelrngths // Planet. Space Sci. V. 34. № . P. 801-810. 1986.
– *Misawa K., Takeuchi I.* Nightglow intensity variations in the O_2(0–1) atmospheric band, the Na D lines, the OH (6–2) band, the yellow-green continuum at 5750 Å and the oxygen green line // Ann. Géophys. V. 38. № 6. P. 781–788. 1982.
– *Noxon J.P.* The near infrared nightglow continuum // Plane. Space Sci. V. 26. № 3. P. 191-192. 1978.
– *Robley R., Vilkki E.* Le continuum dans la lumière du ciel nocturne // Ann. Géophys. V. 2. № 1. P. 195–199. 1970.6
– *Smith L.L., Roach F.S., Owen R.S.* The absolute photometry of the zodiacal light // Planet. Space Sci. V. 13. № 3. P. 207-217. 1965.
– *Sobolev V.G.* Continuum in night airglow between 8000-11000 A // Planet. Space Sci. V. 26. № 7. P. 703-704. 1978.
– *Sparrow J.G., Ney E.P., Burnett G.B., Stoddart J.W.* Airglow observations from OSO-B2 satellite // J. Geophys. Res. V. 73. № 3. P. 857–866. 1968.
– *Sternberg J.R., Ingham M.P.* Observations of the airglow continuum // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. V. 159. № 1. P. 1-20. 1972.
– *Wraight P.C.* Is there a continuum near infrared dayglow? // J. Atmos. Terr. Phys. V. 37. № 5. P. 731–737. 1975.
– *Wraight P.C.* The near infrared nightglow continuum // Planet. Space Sci. V. 25. № 8. P 787–794. 1977.
– *Wraight P.C.* Theory of the nightglow continuum // Planet. Space Sci. V. 34. № 12. P. 1373. 1986.