

Эмпирическая модель вариаций эмиссий континуума верхней атмосферы

А.И. Семенов¹, Н.Н. Шефов¹, И.В. Медведева², В.Ю. Хомич³, Ю.А. Железнов³

¹ *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия*
E-mail: anasetmenov@yandex.ru

² *Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 664033, Россия*
E-mail: ivmed@iszf.irk.ru

³ *Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, 191186, Россия*
E-mail: khomich@ras.ru

На основе анализа данных наземных, ракетных и спутниковых измерений интенсивности континуума верхней атмосферы в видимой и ближней инфракрасной областях спектра разработана модель, описывающая закономерности спектрального распределения интенсивности эмиссий континуума и их вариации для различных гелиогеофизических условий. Выполнен расчет абсолютной интегральной интенсивности инфракрасных компонент эмиссии континуума с использованием полученных в лабораторных условиях скоростей фотохимических реакций между молекулами окиси азота и невозбужденной и возбужденной молекулами озона. Показано, что высотное распределение интенсивности непрерывного спектра излучения атмосферы в инфракрасной области спектра охватывает диапазон высот средней атмосферы от 10 до 15 км. Сопоставление рассчитанных значений интенсивности континуума с результатами ее спектрофотометрических наземных измерений в ближней инфракрасной области спектра позволило уточнить коэффициент скорости реакции молекул окиси азота с озоном, ответственной за возникновение эмиссии континуума в ИК области спектра. В модели представлены особенности вариаций высотного распределения объемной интенсивности ИК континуума для различных гелиогеофизических условий. Выполненные исследования показали, что основной интервал высот излучающего слоя континуума, обусловленного процессом NO+O, находится на высотах 80–110 км. Излучающий слой континуума, возникновение которого связано с процессами взаимодействия молекул окиси азота с молекулами озона в возбужденном и невозбужденном состояниях, охватывает всю среднюю атмосферу выше тропосферы.

Ключевые слова: эмиссии континуума, инфракрасное и видимое излучение, интенсивность, высотное распределение, вариации излучения, средняя атмосфера

Одобрена к печати: 01.12.2015
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-171-185

Введение

Присутствие непрерывного спектра (континуума) в излучении ночной верхней атмосферы было обнаружено при оценке суммарного света звезд, а также при изучении временных и пространственных вариаций излучения неба в тех спектральных участках, где отсутствуют дискретные эмиссии (Страйжис, 1977; McDade et al., 1986). Окончательная спектральная структура этого излучения неизвестна вследствие его малой спектральной плотности интенсивности и возможного наложения на него различных молекулярных эмиссий. Из-за сложностей регистрации эмиссий континуума в ИК областях спектра, исследования его излучения проводились в основном в видимой области спектра (около 530 нм) (Чуваев, 1952; Шефов, 1961; Гиндилис, 1965; Dandekar, 1966; Sparrow et al., 1968; Фишкова, 1983; Robley, Vilkki, 1970; Sternberg, Ingham, 1972; Gadsden, Marovich, 1973; Sobolev, 1978; McDade et al., 1986). Результаты этих исследований показали, что интенсивность атмосферного континуального излучения в этой области спектра в среднем составляет ~ 10 рэлей нм^{-1} .

Важно подчеркнуть, что, несмотря на то, что спектральная объемная интенсивность эмиссии континуума мала, его интегральная интенсивность в широкой области спектра оказывается весьма значительной. Так, для области 350–1200 нм суммарная интенсивность его излучения в среднем составляет ~ 10 килорэлей, а в отдельных случаях может достигать

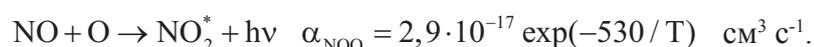
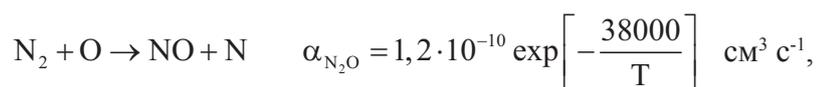
20–30 килорэлей. Поэтому это излучение представляет собой самостоятельный, достаточно интенсивный компонент в свечении ночного неба. К сожалению, для более длинноволновой области спектра (больше 1200 нм) данных наблюдений о континууме практически нет. Имеющиеся публикации, в которых делались теоретические оценки о возможном увеличении интенсивности излучения континуума (до 150 килорэлей) в длинноволновой области спектра, основывались на использовании данных разнородных измерений спектров излучения ночного свечения верхней атмосферы (Wraight, 1986; Шефов и др., 2006).

Сведения о высотном распределении интенсивности эмиссии континуума были получены с помощью ракетных и спутниковых измерений. Из них следует, что максимум объёмной интенсивности эмиссии континуума в видимой области спектра находится вблизи 100 км, а весь диапазон высот излучающего слоя составляет от 70 до 130 км.

В работе представлены результаты систематизации данных наземных, ракетных и спутниковых измерений эмиссий континуума средней и верхней атмосферы, позволившие выявить особенности пространственно-временных вариаций его характеристик – интенсивности и высоты максимума его свечения.

Процессы возникновения континуального излучения

Первые теоретические представления о природе атмосферного континуума были даны в работе (Красовский, 1951), в которой был предложен двухступенчатый механизм его возникновения – образование окиси азота и его взаимодействие с атомарным кислородом, в результате которого образуются возбужденные молекулы двуокиси азота, излучающие континуальное излучение:

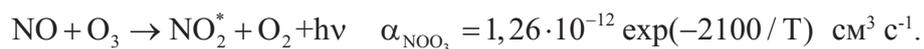


В дальнейшем этот механизм получил свое подтверждение в работах (Gadsden, Marovich, 1973; Noxon, 1978).

Позднее в (Kenner, Ogryzlo, 1984) было предложено развитие этого процесса – реакция, приводящая к возбуждению молекулы двуокиси азота, может происходить и с возбужденной молекулой озона:



Другим возможным процессом, приводящим к образованию возбужденной молекулы двуокиси азота, может быть реакция окиси азота с невозбужденной молекулой озона (Clough, Thrush, 1967):



Поскольку в реальных условиях атмосферы все эти реакции происходят одновременно, то разделение спектральных распределений интенсивности излучений в континууме при его измерениях практически невозможно. Поэтому все эти реакции можно рассматривать, согласно (Kenner, Ogryzlo, 1984), как единый механизм, приводящий к возникновению континуального излучения верхней атмосферы. В работе (Kenner, Ogryzlo, 1984) это излучение в лабораторном эксперименте регистрировалось в области спектра 400–1600 нм, а по данным работы (Golde et al., 1973) оно прослеживалось до 3000 нм.

Пространственно-временные вариации характеристик континуума

1. Интенсивность

Первые попытки систематизации данных наблюдений с целью выявления статистических закономерностей временных и пространственных вариаций интенсивности континуума были сделаны для станций Абастумани (41,8° с.ш., 42,8° в.д.) (Фишкова, 1983) и Звенигород (55,7° с.ш., 36,8° в.д.) (Sobolev, 1978). Однако каких-либо эмпирических аппроксимаций обнаруженных вариаций в этих работах получено не было.

Данные измерений континуума в различных участках спектра в Абастумани и Звенигороде позволили получить средние значения интенсивностей ряда наблюдаемых эмиссий. По данным Абастуманской обсерватории они составили для эмиссий 530, 605 и 712 нм: $I(530) = 13 \pm 1,5$ рэлей нм⁻¹, $I(605) = 13 \pm 2$ рэлей нм⁻¹, $I(712) = 13 \pm 3$ рэлей нм⁻¹. Для станции Звенигород, где проводились измерения континуума в ближней ИК области спектра, средние значения интенсивностей континуума для эмиссий 820, 1061,2 нм составили: $I(820) = 13,0 \pm 3,2$ рэлей нм⁻¹, $I(1061,2) = 14,5 \pm 2,7$ 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 1061,2 нм) составили: $I(530) = 16 \pm 2$ рэлей нм⁻¹; $I(605) = 16 \pm 2$ рэлей нм⁻¹; $I(712) = 16 \pm 3$ рэлей нм⁻¹; $I(820) = 16,0 \pm 4,0$ рэлей нм⁻¹; $I(1061,2) = 16,0 \pm 3,4$ рэлей нм⁻¹. Это позволило, исключив вклад в излучение этих эмиссий, вызванное реакцией окиси азота с атомарным кислородом, получить значения интенсивностей эмиссий континуума, имеющих спектральные максимумы $I(820)$ и $I(1061,2)$, обусловленных другими процессами возбуждения ($\text{NO} + \text{O}_3^* \rightarrow \text{NO}_2^* + \text{O}_2 + h\nu$ и $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2^* + \text{O}_2 + h\nu$).

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.

1.1. Суточные вариации

Результаты измерений на средних широтах эмиссии 625 нм, полученные в Абастумани, показывают, что интенсивность континуума меняется от ночи к ночи и в течение ночи (Фишкова, 1983). С учетом данных ракетных измерений, выполненных на средних широтах для зенитных углов Солнца более 150° (рис. 1) выявляется ее минимум. Полученный по данным Абастумани и ракетных измерений характер суточных вариаций континуума на длине волны 625 нм можно описать следующим выражением:

$$I(625) = 3 + \frac{7,5}{1 + \exp\left(-\frac{\chi - 155}{5}\right)}, \text{ рэлей нм}^{-1},$$

где χ – зенитный угол Солнца.

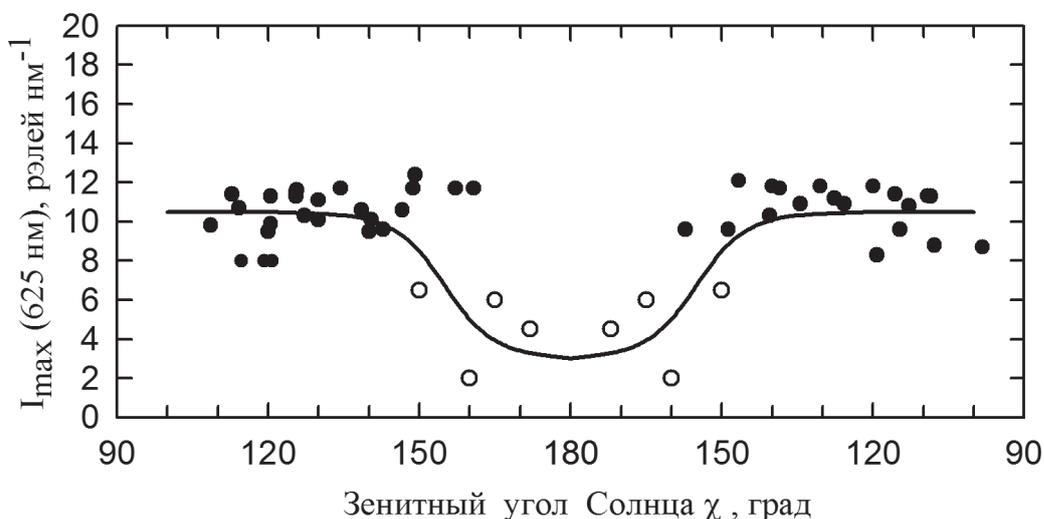


Рис. 1. Суточные вариации интенсивности континуума на длине волны 625 нм: точки – по данным Абастумани, кружки – результаты ракетных измерений

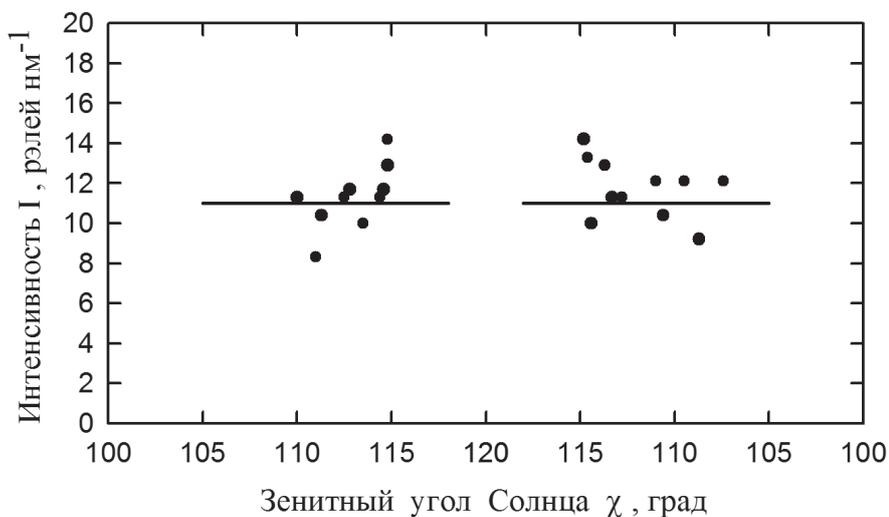


Рис. 2. Суточные вариации интенсивности эмиссии континуума 821 нм и 1061,2 нм по наблюдениям в Звенигороде

Анализ данных наблюдений на станции Звенигород показал, что средние вариации эмиссий 820 нм и 1061,2 нм в пределах зенитных углов Солнца (меньше 150°) практически не меняются (рис. 2), что согласуется с данными измерений в Абастумани (рис. 1).

1.2. Сезонные вариации

По результатам наземных наблюдений (Sobolev, 1978; Фишкова, 1983) были выявлены особенности сезонного поведения эмиссий континуума в видимой (530 и 605 нм) и ближней ИК (712 нм) областях спектра (рис. 3), которые математически можно представить выражениями:

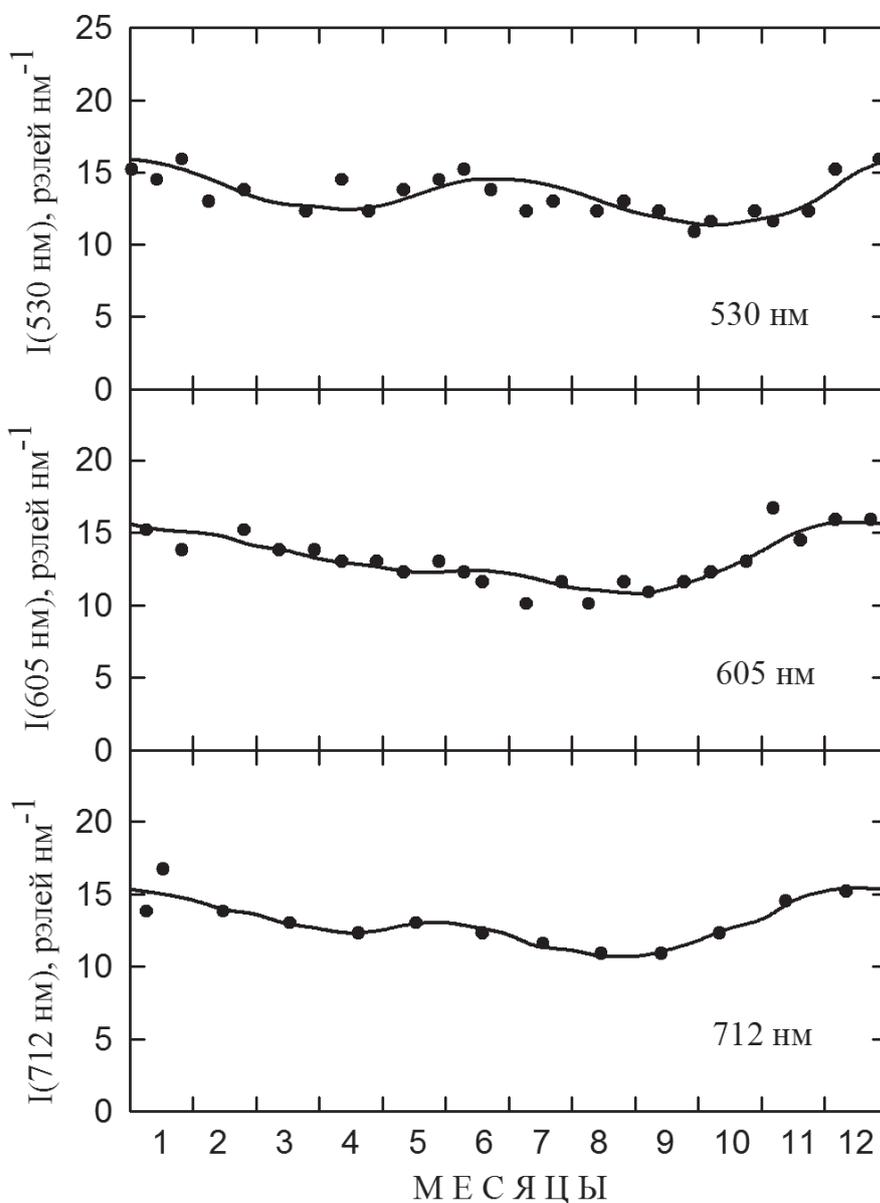


Рис. 3. Сезонные вариации интенсивностей эмиссии континуума на спектральных участках 530 нм, 605 нм и 712 нм по данным Абастумани. Сплошные линии – аппроксимации.

$$I(530) = 13,4 + 0,7 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 64) + 1,6 \cos \frac{4\pi}{365} (t_d - 166) + 0,2 \cos \frac{6\pi}{365} (t_d - 10),$$

$$I(605) = 13,2 + 2,0 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 17) + 0,8 \cos \frac{4\pi}{365} (t_d - 166) + 0,3 \cos \frac{6\pi}{365} (t_d - 75),$$

$$I(712) = 13,0 + 1,7 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 17) + 1,0 \cos \frac{4\pi}{365} (t_d - 163) + 0,1 \cos \frac{6\pi}{365} (t_d - 44).$$

Наличие сезонных вариаций излучения континуума отмечалось и по данным измерений на спутнике OSO-B2 на широтах $47^\circ\text{N} - 16^\circ\text{S}$, которые обнаружили минимум интенсивности в летнее время и максимум в периоды равноденствий (Sparrow et al., 1968).

1.3. Широтные вариации

Минимум интенсивности свечения континуума наблюдается вблизи экватора ($\sim 1-2$ рэлей нм^{-1}), в то время как в полярных широтах его интенсивность достигает $\sim 10-20$ рэлей нм^{-1} (Таранова, 1962; Davis, Smith, 1965). Анализ долготных вариаций интенсивности свидетельствует о существенном их влиянии на характер широтного поведения. Характер вариаций интенсивности свечения континуума от географической широты с учетом влияния высоты подстилающего рельефа может быть описан выражением (рис. 4):

$$I(530) = 7,4 - 5,1 \cos 2\varphi \text{ в рэлей } \text{нм}^{-1}.$$

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

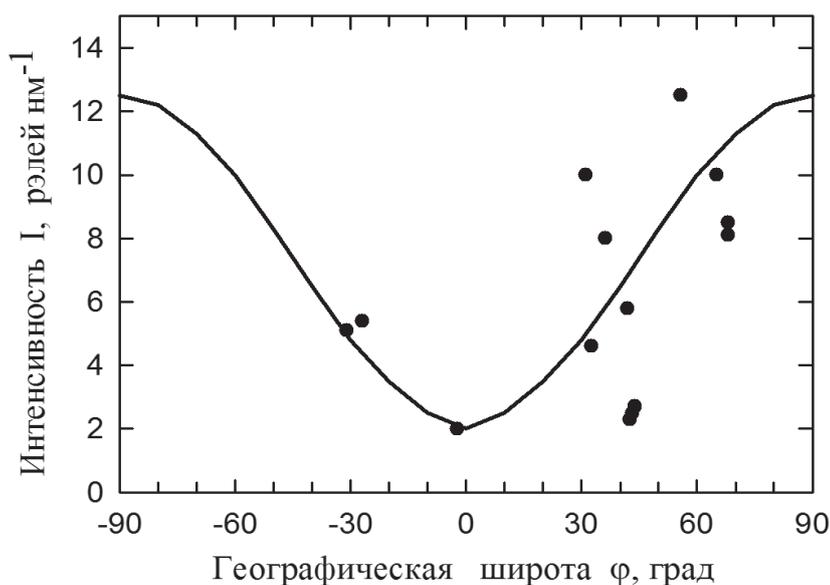


Рис. 4. Широтные вариации интенсивности эмиссии континуума 530 нм

1.4. Долготные вариации

Долготные вариации континуума были обнаружены по данным измерений 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 (I_{cont} , рэлей нм⁻¹), высоты максимума излучающего слоя (Z_{max} , км), и его полуширины (W , км) вдоль долготы в интервале широт 46–52 °N (рис. 5) и выявить их изменчивость, отображающую влияние высотного профиля рельефа земной поверхности (Шефов и др., 2006; Semenov et al., 2012).

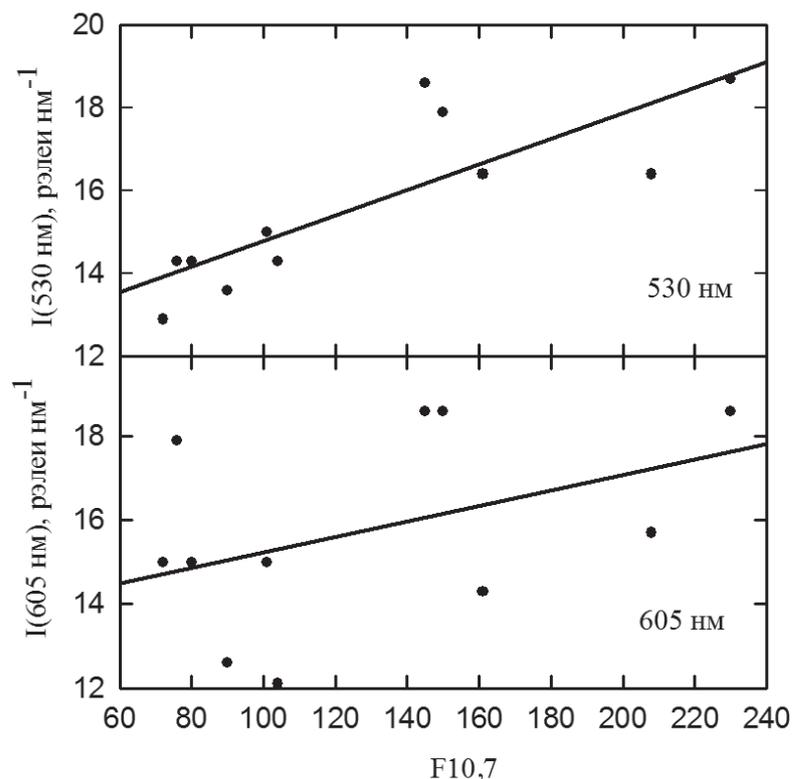


Рис. 5. Корреляции интенсивностей эмиссий континуума 530 нм и 605 нм с солнечной активностью по данным измерений в Абастумани. Сплошные линии – линии регрессии

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

$$I_{\text{cont}}(Z_r) = 4,9 + 4,6 Z_r = 4,9(1 + 0,94 Z_r), \quad r = 0,83 \pm 0,10;$$

$$Z_{\text{max}} = 94 + 0,68 \times Z_r, \quad r = 0,281 \pm 0,307,$$

$$W = 6 + 0,7 \times Z_r, \quad r = 0,569 \pm 0,225.$$

1.5. Зависимость от солнечной активности

Корреляция интенсивности излучения эмиссий континуума 530 и 605 нм с солнечной активностью, характеризуемой потоком F10,7 (рис. 5), выявлена на основе данных измерений в Абастумани:

$$I_{\max}(530) = 15,7 + \frac{F10,7 - 130}{32}, \quad r = 0,82 \pm 0,10;$$

$$I_{\max}(605) = 15,8 + \frac{F10,7 - 130}{54}, \quad r = 0,42 \pm 0,20.$$

2. Высотное распределение интенсивности излучения континуума

Сведения о высотном распределении интенсивности эмиссии континуума основаны на ракетных и спутниковых измерениях, проводившихся в различных районах земной поверхности. К сожалению, за прошедшие десятки лет, количество опубликованных данных о результатах этих измерений невелико. Более того, не все они содержат необходимые сведения о геофизических условиях, сопровождавших измерения интенсивности излучения. Ракетные измерения высотного профиля континуума проводились преимущественно в спектральной области около 530 нм. Как было показано выше, в этом диапазоне спектра возникновение излучения в основном связано с реакцией молекулы окиси азота с атомарным кислородом. Высотные распределения эмиссии континуума, наблюдаемые в инфракрасной области спектра, обусловлены реакциями молекул окиси азота с возбужденными и невозбужденными молекулами озона.

В работе (Gadsden, Marovich, 1973) на основе данных о высотном распределении молекул окиси азота и озона выявлены закономерности вариаций интенсивности континуума в инфракрасной области спектра, которые позволили предположить, что ИК эмиссии континуума возникают на высотах ниже 80 км. Анализ опубликованных данных ракетных измерений ряда эмиссий верхней атмосферы позволил сделать вывод о закономерностях высотного распределения инфракрасных компонентов эмиссии континуума. Было показано, что доля интенсивности этих компонентов при измерении, например, в ракетном эксперименте ETON (Greer et al., 1986; McDade et al., 1986) ничтожно мала, а излучение в спектральном участке с центром около 714 нм после исключения интенсивности излучения эмиссии, связанного с реакцией NO+O, обусловлено вращательными линиями P₀ и p₀ полосы OH (7–2).

При изучении высотного распределения объемной интенсивности эмиссии необходимо было получить аналитическое представление его профиля. Многочисленные исследования различных эмиссий верхней атмосферы неоднократно свидетельствовали, что такой профиль может быть представлен асимметричным нормальным распределением.

Соответствие такому распределению можно установить с помощью построения корреляционной зависимости между шириной (W_i) измеренного высотного профиля интенсив-

ности (на уровнях значений нормированных интенсивностей I/I_0) и параметра $\sqrt{\ln \frac{I_0}{I_i}}$, где I_i – различные значения интенсивности (Семенов, 1975; Шефов и др., 2006). Эта процедура основана на том, что нормальное распределение описывается следующей зависимостью:

$$I_i = I_0 \exp \left[- \left(\frac{W_i}{W_0} \right)^2 \right].$$

Результаты анализа имеющихся данных измерений эмиссий континуума показали, что рассматриваемые измеренные их высотные профили удовлетворительно аппроксимируются асимметричными нормальными распределениями.

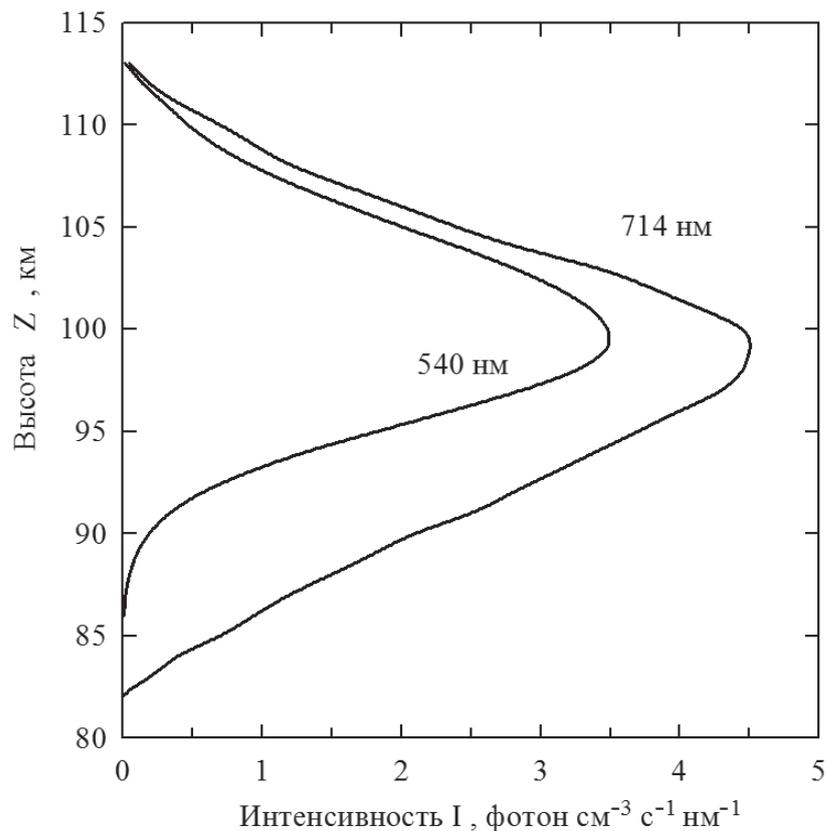


Рис. 6. Сглаженные высотные распределения объемной интенсивности континуума для двух спектральных участков 540 нм и 714 нм по данным ракетных измерений (Greer et al., 1986) для зенитного угла Солнца $\chi = 123^\circ$ и солнечной активности $F_{10,7} = 204$

Единственный случай, когда были одновременно измерены высотные профили интенсивности излучения в двух спектральных диапазонах – 540 нм и 714 нм, это ракетный эксперимент ETON, который был осуществлен 23 марта 1982 г. в Южном Уисте (зенитный угол Солнца $\chi = 122^\circ$) (Greer et al., 1986; McDade et al., 1986). Полученные высотные распределения приведены на рис. 6. На основе этих данных нами были сделаны оценки относительного вклада различных компонентов континуума в формирование его высотного профиля.

Высотное распределение интегральной по спектру объемной интенсивности континуума, обусловленного процессом NO+O, показано на рис. 7. Оно описывается с помощью формул:

$$Q_{\text{NOO}}(Z) = Q_{\text{NOO}}(Z_{\text{max}}) \exp \left\{ -\frac{\ln 2 [Z - Z_{\text{max}}(\chi)]^2}{P^2(\chi) W^2(\chi)} \right\} \text{ рэлей – верхняя часть слоя,}$$

$$Q_{\text{NOO}}(Z) = Q_{\text{NOO}}(Z_{\text{max}}) \exp \left\{ -\frac{\ln 2 [Z - Z_{\text{max}}(\chi)]^2}{[1 - P(\chi)]^2 W^2(\chi)} \right\} \text{ рэлей – нижняя часть слоя,}$$

где $Q_{\text{NOO}}(Z_{\text{max}}) = 2,06 \cdot 10^3$ фотон см^{-1} , высота максимума слоя континуума, возникающего за счет реакции $\text{NO} + \text{O}$, $Z_{\text{max}} = 99,3$ км, полуширина слоя $W = 11,2$ км и параметр, характеризующий степень асимметрии высотного профиля по отношению к его полуширине, $P = 0,59$. Интегральная интенсивность континуума для зенитного угла Солнца $\chi = 122^\circ$ составляет 2060 рэлей.

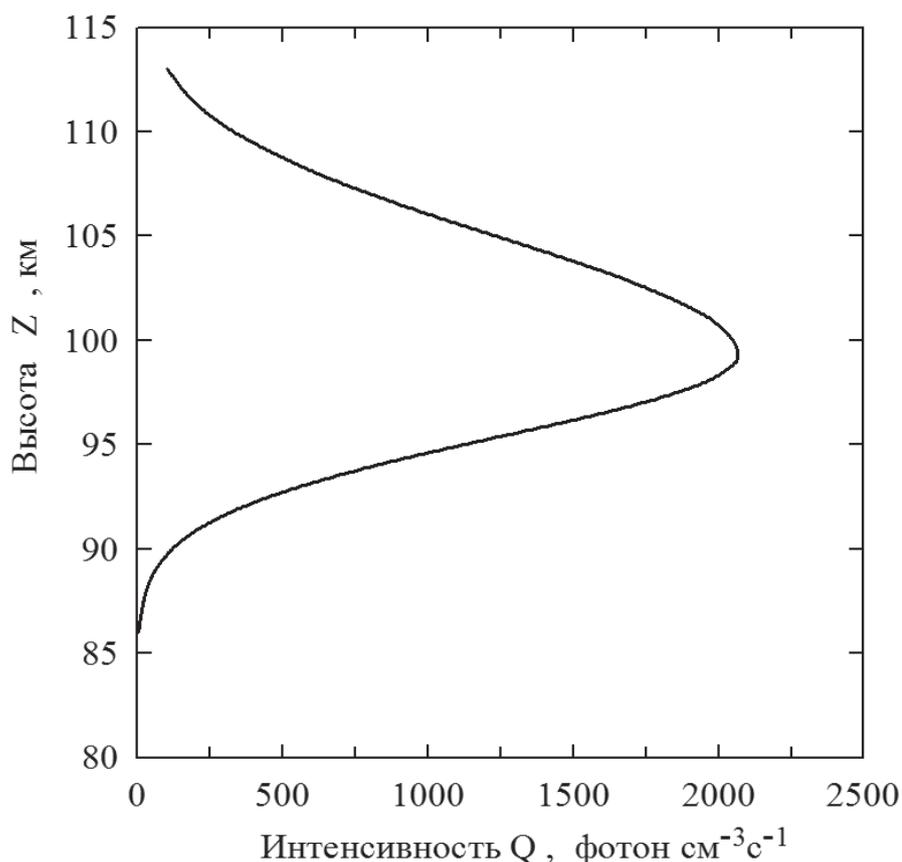


Рис. 7. Высотное распределение интегральной объемной интенсивности континуума, обусловленной процессом $\text{NO} + \text{O}$ для зенитного угла Солнца $\chi = 123^\circ$ и солнечной активности $F_{10,7} = 204$

Инфракрасные компоненты континуума излучаются практически всей атмосферой на высотах 10–115 км, интенсивность излучения которых определяется высотным распределением молекул озона и окиси азота.

Ракетные измерения позволили также оценить зависимость высоты излучающего слоя эмиссии 625 нм континуума от зенитного угла Солнца (рис. 8):

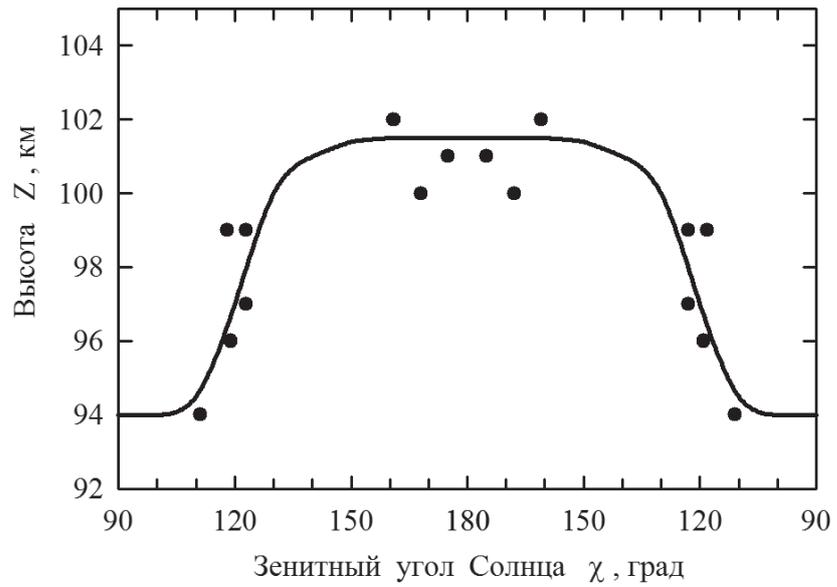


Рис. 8. Зависимость высоты максимума интенсивности эмиссии континуума 625 нм от зенитного угла Солнца на основе данных ракетных измерений

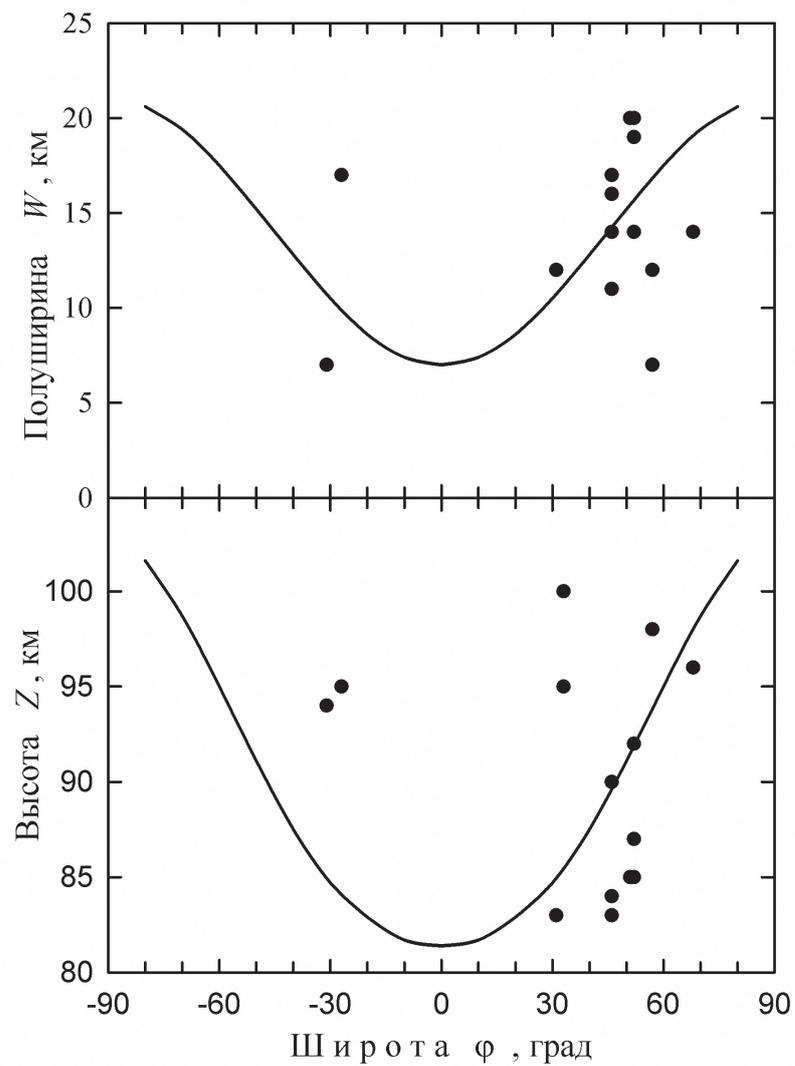


Рис. 9. Широтные вариации параметров излучающего слоя эмиссии континуума 625 нм

$$Z_{\max}(\chi) = 94 + \frac{6}{1 + \exp\left[-\frac{\chi - 120}{7}\right]},$$

где $Z_{\max}(\chi)$ в км.

Широтные вариации высоты максимума эмиссионного слоя имеют заметный минимум вблизи экватора (рис. 9).

Долготные вариации интенсивности и высоты излучающего слоя континуума были выявлены при помощи анализа данных измерений на космическом корабле «Мир» (Гурвич и др., 2002). В результате было обнаружено, что существует отчетливое отображение высоты земного рельефа в вариациях интенсивности. Выявить значимую зависимость между высотой излучающего слоя и его полуширины и подстилающим земным рельефом из-за малого количества данных не представлялось возможным.

Как следует из результатов различных исследований, высотные распределения различных химически активных компонентов средней атмосферы, таких как озон, окись азота, атомарный кислород, атомарный водород, на высотах 10–120 км зависят от зенитного угла Солнца. К сожалению, в настоящее время эти зависимости еще слабо изучены. Поэтому пока трудно говорить о достоверности вариаций параметров эмиссии континуума, возникающего за счет взаимодействия молекул окиси азота с молекулами кислородной группы в возбужденном и в невозбужденном состояниях в зависимости от зенитного угла Солнца.

Подводя итог, хотелось бы отметить, что представленные результаты и выводы могут быть существенно и статистически значимо улучшены по мере получения новых данных измерений (наземных, ракетных, спутниковых) характеристик эмиссий континуума в различных спектральных диапазонах, выполненных для различных гелиогеофизических условий.

Заключение

Выявлены особенности пространственно-временных вариаций интенсивности эмиссии континуума верхней атмосферы, отображающие важные химические и энергетические процессы на высотах мезосферы и нижней термосферы.

На основе проведенных исследований особенностей поведения высотного распределения объемной интенсивности эмиссии континуума были получены эмпирические соотношения, описывающие вариации параметров излучающего слоя континуума и их зависимость от гелиогеофизических условий. Было показано, что основной интервал высот излучающего слоя, обусловленного процессом $\text{NO}+\text{O}$, находится на высотах 80–110 км. В случае излучения, возникновение которого связано с процессами взаимодействия молекул окиси азота с молекулами озона в возбужденном и невозбуж-

денном состоянии, его излучающий слой охватывает всю среднюю атмосферу выше тропосферы.

Статистическая обработка наблюдаемых закономерностей этих вариаций позволили создать аналитические выражения, математически описывающие зависимость этих вариаций от различных геофизических факторов, необходимые для прогноза их поведения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, Грант № 13–05–00108.

Литература

1. Гиндилис Л.М. Абсолютные измерения непрерывного спектра свечения ночного неба // Полярные сияния и свечение ночного неба. 1965. № 11. С. 26–34.
2. 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. 2002. Т. 42. № 4. С. 541–546.
3. Красовский В.И. О механизме свечения ночного неба // Докл. АН СССР. 1951. Т. 77. № 3. С. 395–398.
4. Семенов А.И. Интерферометрические измерения температуры верхней атмосферы. I. Применение охлаждаемых электронно-оптических преобразователей // Полярные сияния и свечение ночного неба. 1975. № 23. С. 64–65.
5. Страйжис В. Многоцветная фотометрия звезд. Вильнюс: Мокслас, 1977. 312 с.
6. Таранова О.Г. Непрерывный спектр в излучении ночного неба и полярных сияний // Спектральные, электрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний и свечения ночного неба. 1962. № 8. С. 21–23.
7. Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Ред. Н.Н. Шефов. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 272 с.
8. Чуваев К.К. О свечении земной атмосферы в непрерывном спектре // Докл. АН СССР. 1952. Т. 87. № 4. С. 551–554.
9. Шефов Н.Н. Непрерывный спектр в свечении ночного неба // Спектральные, электрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний и свечения ночного неба. 1961. № 5. С. 39–41.
10. Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
11. Clough P.N., Thrush B.A. Mechanism of chemiluminescent reaction between nitric oxide and ozone // Trans. Faraday Soc. 1967. Vol. 63. No. 4. P. 915–925.
12. Dandekar B.S. Measurements of the airglow continuum with a birefringent filter photometer // Appl. Opt. 1966. Vol. 5. No. 5. P. 835–838.
13. Davis T.N., Smith L.L. Latitudinal and seasonal variations in the night airglow // J. Geophys. Res. 1965. Vol. 70. No. 5. P. 1127–1138.
14. Gadsden M., Marovich E. The nightglow continuum // J. Atmos. Terr. Phys. 1973. Vol. 35. No. 9. P. 1601–1614.
15. Golde M.F., Roche A.E., Kaufman F. Absolute rate constant for the O + NO chemiluminescence in the near infrared // J. Chem. Phys. 1973. Vol. 59. No. 8. P. 3953–3959.
16. Greer R.G.H., Murtagh D.P., McDade I.C., Dickinson P.H.G., Thomas L., Jenkins D.B., Stegman J., Llewellyn E.J., Witt G., Mackinnon D.J., Williams E.R. ETON 1: A data base pertinent to the study of energy transfer in the oxygen nightglow // Planet. Space Sci. 1986. Vol. 34. No. 9. P. 771–788.
17. Kenner R.D., Ogryzlo E.A. Orange chemiluminescence from NO₂ // J. Chem. Phys. 1984. Vol. 80. No. 1. P. 1–6.
18. McDade I.C., Llewellyn E.J., Greer R.G.H., Murtagh D.P. ETON 3: altitude profiles of the night glow continuum at green and near infrared wavelengths // Planet. Space Sci. 1986. Vol. 34. No. 9. P. 801–810.
19. Noxon J.P. The near infrared nightglow continuum // Planet. Space Sci. 1978. Vol. 26. No. 3. P. 191–192.
20. Robley R., Vilkki E. Le continuum dans la lumière du ciel nocturne // Ann. Géophys. 1970. Vol. 2. No. 1. P. 195–199.
21. Semenov A.I., Shefov N.N., Medvedeva I.V. Orographic Disturbances in the Upper Atmosphere // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2012. V. 90–91. P. 124–133.
22. Sobolev V.G. Continuum in night airglow between 8000 – 11000 Å // Planet. Space Sci. 1978. Vol. 26. No. 7. P. 703–704.
23. Sparrow J.G., Ney E.P., Burnett G.B., Stoddart J.W. Airglow observations from OSO-B2 satellite // J. Geophys. Res. 1968. Vol. 73. No. 3. P. 857–866.
24. Sternberg J.R., Ingham M.P. Observations of the airglow continuum // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1972. Vol. 159. No. 1. P. 1–20.
25. Wraight P.C. Theory of the nightglow continuum // Planet. Space Sci. 1986. Vol. 34. No. 12. P. 1373.

Empirical model of emission variations of the upper atmosphere continuum

A.I. Semenov¹, N.N. Shefov¹, I.V. Medvedeva², V.Yu. Khomich³, Yu.A. Zheleznov³

¹ *A.I. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, 119017, Russia*
E-mail: anasemenov@yandex.ru

² *Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch, RAS, Irkutsk 664033, Russia*
E-mail: ivmed@iszf.irk.ru

³ *Institute of Electrophysics and Electric Power, RAS, St. Petersburg 191186, Russia*
E-mail: khomich@ras.ru

Based on the analysis of data of ground-based, satellite and rocket measurements of the intensity of the continuum of the upper atmosphere in the visible and near infrared regions of the spectrum, we developed a model of regularities of the spectral distribution of the continuum emission intensity, and their variations for various helio-geophysical conditions. Absolute integral intensity of the infrared component of the continuum emission was calculated using the obtained in laboratory conditions rates of photochemical reactions between molecules of nitric oxide and excited and unexcited molecules of ozone. It was revealed that the height distribution of the intensity of the continuous spectrum of the atmosphere radiation in the infrared spectrum range covers a height range of the middle atmosphere from 10 to 15 km. Comparison of calculated values of the continuum intensity with the results of its ground-based spectrophotometric measurements in the near infrared region of the spectrum allowed us to specify the ratio of the rate of reaction of the molecules of nitric oxide with ozone. This reaction is responsible for occurrence of the continuum emission in the infrared region of the spectrum. In the model, variations of the altitude distribution of the volume intensity of the infrared continuum for various heliogeophysical conditions are presented. We found, that the basic interval of heights of a radiating layer of the continuum caused by process NO+O is located at heights of 80–110 km. The layer of the continuum emission, which occurs due to the processes of interaction of the molecules of nitric oxide with ozone molecules in the excited and unexcited states, covers the whole of middle atmosphere above the troposphere.

Keywords: continuum emissions, infrared and visible radiation, intensity, height distribution, airglow variations, middle atmosphere

Accepted: 01.12.2015

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-171-185

References

1. Gindilis L.M., Absolyutnye izmereniya nepreryvnogo spektra svecheniya nochnogo neba (Absolute measurements of the continuous spectrum of the night sky airglow), *Polyarnye siyaniya i svechenie nochnogo neba*, 1965, No. 11, pp. 26–34.
2. Gurvich A.S., Vorob'ev V.V., Savchenko S.A., Pakhomov A.I., Padalka G.I., Shefov N.N., Semenov A.I., Nochnoe svechenie verkhnei atmosfery v diapazone 420–530 nm po izmereniyam na orbital'noi stantsii «Mir» v 1999 g. (Night glow of the upper atmosphere in the range of 420–530 nm by measuring from the orbital station “Mir” in 1999), *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2002, Vol. 42, No. 4, pp. 541–546.
3. Krassovsky V.I., O mekhanizme svecheniya nochnogo neba (On the mechanism of airglow), *Dokl. AN SSSR*, 1951, Vol. 77, No. 3, pp. 395–398.
4. Semenov A.I., Interferometricheskie izmereniya temperatury verkhnei atmosfery. I. Primenenie okhlazhdaemykh elektronno-opticheskikh preobrazovatelei (Interferometric measurements of the temperature of the upper atmosphere. I. Application of cooled electron-optical converters), *Polyarnye siyaniya i svechenie nochnogo neba*, 1975, No. 23, pp. 64–65.
5. Straizhis V., Mnogotsvetnaya fotometriya zvezd (Multicolor photometry of stars), Vil'nyus: Mokslas, 1977, 312 p.
6. Taranova O.G., Nepreryvnyi spektr v izluchenii nochnogo neba i polyarnykh siyanii (The continuous spectrum of the radiation in the night sky and auroras), *Spektral'nye, elektrofotometricheskie i radiolokatsionnye issledovaniya polyarnykh siyanii i svecheniya nochnogo neba*, 1962, No. 8, pp. 21–23.
7. Fishkova L.M., *Nochnoe izluchenie sredneshirotnoi verkhnei atmosfery Zemli* (Nighttime airglow of the midlatitude upper atmosphere of the Earth), Ed. N.N. Shefov, Tbilisi: Metsniereba, 1983, 272 p.
8. Chuvayev K.K., O svechenii zemnoi atmosfery v nepreryvnom spektre (About the glow of Earth's atmosphere in the continuous spectrum), *Dokl. AN SSSR*, 1952, Vol. 87, No. 4, pp. 551–554.
9. Shefov N.N., Nepreryvnyi spektr v svechenii nochnogo neba (Continuous spectrum in the night airglow), *Spektral'nye, elektrofotometricheskie i radiolokatsionnye issledovaniya polyarnykh siyanii i svecheniya nochnogo neba*, 1961, No. 5, pp. 39–41.
10. Khomich V.Yu., Semenov A.I., Shefov N.N., *Airglow as an Indicator of Upper Atmospheric Structure and Dynamics*, Springer-Verlag GmbH, 2008, 736 p.

11. Clough P.N., Thrush B.A., Mechanism of chemiluminescent reaction between nitric oxide and ozone, *Trans. Faraday Soc.*, 1967, Vol. 63, No. 4, pp. 915–925.
12. Dandekar B.S., Measurements of the airglow continuum with a birefringent filter photometer, *Appl. Opt.*, 1966, Vol. 5, No. 5, pp. 835–838.
13. Davis T.N., Smith L.L., Latitudinal and seasonal variations in the night airglow, *J. Geophys. Res.*, 1965, Vol. 70, No. 5, pp. 1127–1138.
14. Gadsden M., Marovich E., The nightglow continuum, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1973, Vol. 35, No. 9, pp. 1601–1614.
15. Golde M.F., Roche A.E., Kaufman F., Absolute rate constant for the O + NO chemiluminescence in the near infrared, *J. Chem. Phys.*, 1973, Vol. 59, No. 8, pp. 3953–3959.
16. Greer R.G.H., Murtagh D.P., McDade I.C., Dickinson P.H.G., Thomas L., Jenkins D.B., Stegman J., Llewellyn E.J., Witt G., Mackinnon D.J., Williams E.R. ETON 1: A data base pertinent to the study of energy transfer in the oxygen nightglow, *Planet. Space Sci.*, 1986, Vol. 34, No. 9, pp. 771–788.
17. Kenner R.D., Ogryzlo E.A., Orange chemiluminescence from NO₂, *J. Chem. Phys.*, 1984, Vol. 80, No. 1, pp. 1–6.
18. McDade I.C., Llewellyn E.J., Greer R.G.H., Murtagh D.P., ETON 3.: altitude profiles of the night glow continuum at green and near infrared wavelengths, *Planet. Space Sci.*, 1986, Vol. 34, No. 9, pp. 801–810.
19. Noxon J.P., The near infrared nightglow continuum, *Planet. Space Sci.*, 1978, Vol. 26, No. 3, pp. 191–192.
20. Robley R., Vilkki E., Le continuum dans la lumière du ciel nocturne, *Ann. Géophys.*, 1970, Vol. 2, No. 1, pp. 195–199.
21. Semenov A.I., Shefov N.N., Medvedeva I.V., Orographic Disturbances in the Upper Atmosphere, *J. Atm. Solar-Terr. Phys.*, 2012, Vol. 90–91, pp. 124–133.
22. Sobolev V.G., Continuum in night airglow between 8000 – 11000 Å, *Planet. Space Sci.*, 1978, Vol. 26, No. 7, pp. 703–704.
23. Sparrow J.G., Ney E.P., Burnett G.B., Stoddart J.W., Airglow observations from OSO-B2 satellite, *J. Geophys. Res.*, 1968, Vol. 73, No. 3, pp. 857–866.
24. Sternberg J.R., Ingham M.P., Observations of the airglow continuum, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1972, Vol. 159, No. 1, pp. 1–20.
25. Wraight P.C., Theory of the nightglow continuum, *Planet. Space Sci.*, 1986, Vol. 34, No. 12, pp. 1373.