

## ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ NO НА ОТНОШЕНИЕ $I_{557.7}/I_{427.8}$ В ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЯХ

### EFFECT OF THE NO CONCENTRATION ON THE RATIO $I_{557.7}/I_{427.8}$ IN AURORAS

**В.Е. Иванов***Полярный геофизический институт РАН,  
Мурманск, Апатиты, Россия, ivanov@pgia.ru***Ж.В. Дашкевич***Полярный геофизический институт РАН,  
Мурманск, Апатиты, Россия, zhanna@pgia.ru***V.E. Ivanov***Polar Geophysical Institute RAS,  
Murmansk, Apatity, Russia, ivanov@pgia.ru***Zh.V. Dashkevich***Polar Geophysical Institute RAS,  
Murmansk, Apatity, Russia, zhanna@pgia.ru*

**Аннотация.** Методом численного моделирования исследовано влияние концентрации окиси азота на отношение интенсивностей эмиссий 557.7 и 427.8 нм  $I_{557.7}/I_{427.8}$  в полярных сияниях, вызванных потоками высыпаящихся электронов. Показано, что отношение испытывает сильную зависимость от концентрации NO. По результатам модельных расчетов отношение уменьшается с 7 до 2 при увеличении концентрации NO в максимуме ее высотного профиля  $[NO]_{\max}$  от  $10^7$  до  $3 \cdot 10^9$  см<sup>-3</sup>, что находится в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными. Показано также, что влияние окиси азота на величину отношения осуществляется через канал возбуждения эмиссии 557.7 нм, а именно, диссоциативной рекомбинации иона молекулярного кислорода  $O_2^+ + e_{th}$  путем дезактивации иона в столкновительной реакции с окисью азота  $O_2^+ + NO$ .

**Ключевые слова:** окись азота, эмиссии 557.7 и 427.8 нм, отношение интенсивностей, полярные сияния, моделирование, электронные высыпания.

**Abstract.** We have examined the effect of the nitrogen oxide concentration on the ratio between  $\lambda 557.7$  nm and  $\lambda 427.8$  nm emission intensities in auroras caused by precipitating electron fluxes, using the numerical simulation method. The ratio  $I_{557.7}/I_{427.8}$  has been shown to strongly depend on the NO concentration: the ratio decreases from 7 to 2 with increasing NO maximum concentration at the height profile from  $10^7$  to  $3 \cdot 10^9$ . This fact is in satisfactory agreement with experimental data. The effect of nitric oxide on the ratio has been demonstrated to occur through the excitation channel of the emission  $\lambda 557.7$  nm, namely, the dissociative recombination of the molecular oxygen ion  $O_2^+ + e_{th}$  due to the ion deactivation by collision reaction with nitric oxide  $O_2^+ + NO$ .

**Keywords:** nitric oxide, 557.7 nm and 427.8 nm emissions, intensity ratio, aurora, modeling, electron precipitation.

## ВВЕДЕНИЕ

Результаты проведенных ранее исследований свидетельствуют о том, что величина отношения  $I_{557.7}/I_{427.8}$  варьирует в достаточно широком диапазоне от 2 до 10 [Maseide, 1967; Brekke, Henriksen, 1972; Gattinger, Vallance Jones, 1972; Henriksen, 1973; Mende, Eather, 1975; Shepherd, Gerdjikova, 1988; Steel, McEwen, 1990; Дашкевич и др., 2006]. Возможные причины наблюдаемой вариабельности отношения рассматривались в работах [Shepherd, Gerdjikova, 1988; Shepherd, Shepherd, 1995; Gattinger et al., 1996], в которых анализировалось влияние на возбуждение <sup>1</sup>S-состояния атомарного кислорода нейтральной атмосферы двух процессов, а именно: вариаций параметров энергетического спектра потока высыпаящихся электронов и вариаций концентрации атомарного кислорода. При этом в моделях, описывающих каналы возбуждения <sup>1</sup>S-состояния атомарного кислорода, было включено только два основных источника: прямой электронный удар

$O + e^* \rightarrow O(^1S) + e$  и столкновительная реакция  $N_2(A^3\Sigma_u^+) + O \rightarrow O(^1S) + N_2(X^1\Sigma_g^+)$ . В результате в [Shepherd, Gerdjikova, 1988; Shepherd, Shepherd, 1995] было показано, что наблюдаемый диапазон изменения  $I_{557.7}/I_{427.8}$  не может быть вызван вариациями энергетического спектра потока высыпаящихся электронов, но может быть объяснен вариациями концентрации атомарного кислорода [O]. В этом случае концентрация [O] должна варьировать в диапазоне (0.6÷2)MSIS[O]. В [Gattinger et al., 1996] были получены аналогичные выводы и определен интервал изменения [O], составляющий (0.5÷1)MSIS[O]. Однако, подобные вариации концентрации кислорода в неосвещенной солнцем ионосфере маловероятны в процессе электронных высыпаний.

В [Shepherd, Gerdjikova, 1988; Shepherd, Shepherd, 1995; Gattinger et al., 1996] не рассматривалась реакция диссоциативной рекомбинации  $O_2^+ + e_{th} \rightarrow O(^1S) + O(^1D)$  как один из возможных

каналов возбуждения  $^1S$ -состояния атомарного кислорода. Это было связано с тем, что по полученным в [Gattinger et al., 1985, 1996] оценкам вклад реакции диссоциативной рекомбинации в возбуждение  $^1S$ -состояния атомарного кислорода составляет менее 10 %. Однако следует отметить, что величина вклада диссоциативной рекомбинации иона  $O_2^+$  в значительной степени зависит от концентрации окиси азота, так как NO является основным гасителем иона молекулярного кислорода в реакции  $O_2^+ + NO \rightarrow NO^+ + O_2$ . В работах [Gattinger et al., 1985, 1996] концентрация NO задавалась равной  $4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$  и  $10^9 \text{ см}^{-3}$  в максимуме ее высотного профиля, что и привело к оценке вклада реакции диссоциативной рекомбинации в возбуждение  $^1S$  атомарного кислорода менее 10 %. Непосредственные оценки концентрации окиси азота в полярных сияниях демонстрируют достаточно широкий диапазон изменения концентрации NO в максимуме ее высотного профиля [Swider, Narcisi, 1977; Sharp, 1978; Siskind et al., 1989; Дашкевич, Иванов, 2019]. На рис. 1 приведены высотные профили [NO], полученные на основе ракетных и наземных наблюдений в области полярных сияний.

Видно, что  $[NO]_{\text{max}}$  лежит в достаточно широком интервале от  $3 \cdot 10^7$  до  $3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ . В [Deans, Shepherd, 1978] на основе масс-спектроскопических измерений отмечалось, что  $[NO]_{\text{max}}$  в области полярных сияний не превышает  $10^8 \text{ см}^{-3}$ . С уменьшением  $[NO]_{\text{max}}$  менее  $10^8 \text{ см}^{-3}$  эффект гашения иона молекулярного кислорода окисью азота также будет уменьшаться. Поэтому можно ожидать, что вклад реакции диссоциативной рекомбинации в возбуждение  $^1S$ -состояния атомарного кислорода будет возрастать и превысит оценку 10 %, что непосредственно скажется на величине  $I_{557.7}/I_{427.8}$ .

Целью данной работы является исследование степени влияния  $[NO]_{\text{max}}$  на величину  $I_{557.7}/I_{427.8}$  эмиссий, наблюдаемых в полярных сияниях. Ключевым моментом в данной работе является исследование влияния  $[NO]_{\text{max}}$  на эффективность реакции диссоциативной рекомбинации  $O_2^+ + e_{\text{th}} \rightarrow O(^1S) + O(^1D)$ , которая представляет собой один из значимых каналов возбуждения  $^1S$ -состояния атомарного кислорода.

### 1. ВЛИЯНИЕ ОКИСИ АЗОТА НА ВОЗБУЖДЕНИЕ ЭМИССИИ $\lambda 557.7 \text{ нм}$

Эмиссия  $\lambda 557.7 \text{ нм}$  является следствием возбуждения  $^1S$ -состояния атомарного кислорода с последующим переходом на  $^1D$ -уровень. В полярных сияниях возбуждение атомов  $O(^1S)$  происходит как за счет прямого электронного удара, так и за счет процессов столкновительного взаимодействия между компонентами атмосферы. В настоящее время в задачах, связанных с расчетом  $I_{557.7}$ , рассматривается шесть каналов возбуждения  $^1S$ -состояния атомарного кислорода:

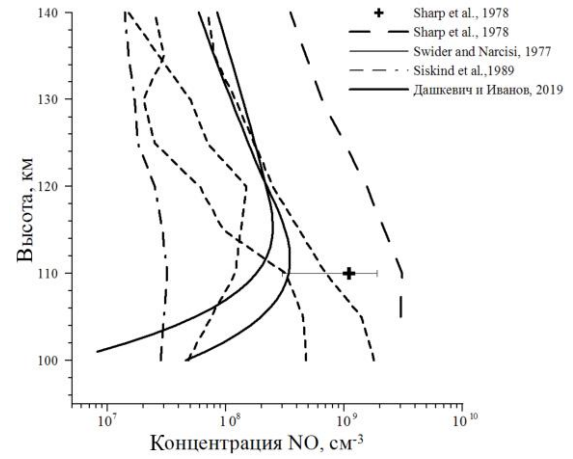
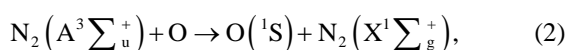
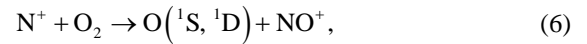
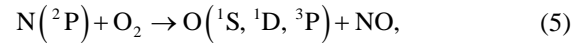
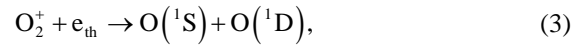


Рис. 1. Оценки высотных профилей концентрации NO, полученные по данным ракетных и наземных наблюдений



где  $e^*$  — высыпавшийся энергичный электрон;  $e_{\text{th}}$  — тепловой электрон ионосферной плазмы.

Рассмотрим, каким образом  $I_{557.7}$  может зависеть от [NO]. Одним из каналов возбуждения  $^1S$ -состояния атомарного кислорода является реакция диссоциативной рекомбинации иона молекулярного азота (3). Эффективность данного канала в первую очередь зависит от концентрации ионов молекулярного кислорода  $O_2^+$ , рожденных в области электронных высыпаний, которая зависит от эффективности реакций дезактивации  $O_2^+$  с нечетным азотом  $N(^4S)$ ,  $N(^2D)$  и NO. Константы скоростей реакций  $O_2^+ + N(^4S)$ ,  $O_2^+ + N(^2D)$  и  $O_2^+ + NO$  сравнимы между собой [Fensfeld, 1977; Goldan et al., 1966], тогда как концентрации  $N(^4S)$  и  $N(^2D)$  в полярных сияниях на порядки меньше концентраций NO. Поэтому можно считать, что основным процессом дезактивации иона  $O_2^+$  является реакция  $O_2^+ + NO$ . Возможным каналом, влияющим на  $I_{557.7}$ , является также реакция дезактивации  $^1S$ -состояния атомарного кислорода окисью азота  $O(^1S) + NO$ . Однако влияние данной реакции на  $I_{557.7}$  незначительно из-за низкой скорости ее протекания [Black et al., 1969].

Вертикальные профили объемной интенсивности излучения эмиссии с длиной волны  $\lambda 557.7 \text{ нм}$  определяются следующим образом:

$$\eta_{557.7}(h) = A_{1S \rightarrow 1D} [O(^1S), h],$$

где  $\eta_{557.7}$  — объемная интенсивность излучения эмиссии с длиной волны  $\lambda 557.7 \text{ нм}$ ;  $A_{1S \rightarrow 1D}$  — коэффициент Эйнштейна для излучательного перехода  $O(^1S \rightarrow ^1D)$ , испускающего эмиссию  $\lambda 557.7 \text{ нм}$ ;  $[O(^1S)]$  — концентрация атомарного кислорода в  $^1S$ -состоянии;  $h$  — высота.

Принимая во внимание механизмы возбуждения и дезактивации  $^1\text{S}$ -состояния атомарного кислорода [Дашкевич и др., 2017] уравнение баланса для расчета  $[\text{O}(^1\text{S}), h]$  будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{d}{dt}[\text{O}(^1\text{S}), h] = Q_{1\text{S}}(h) + \sum_{ij} k_{ij}[N_i, h][N_j, h] - (A_{1\text{S} \rightarrow 1\text{D}})[\text{O}(^1\text{S}), h] - \sum_i k_i[N_i, h][\text{O}(^1\text{S}), h],$$

где  $Q_{1\text{S}}(h)$  — скорость возбуждения  $^1\text{S}$ -состояния атомарного кислорода электронным ударом на высоте  $h$ ; второй член — возбуждение  $^1\text{S}$ -состояния в результате столкновительных взаимодействий частиц сорта  $i$  с частицами сорта  $j$  (1)–(6); третий член — дезактивация  $^1\text{S}$ -состояния за счет радиационного перехода  $^1\text{S} \rightarrow 1\text{D}$ ; четвертый член — дезактивация  $^1\text{S}$ -состояния в результате столкновительных взаимодействий;  $k_{ij}$  — константы скоростей реакций;  $A_{1\text{S} \rightarrow 1\text{D}}$  — коэффициент Эйнштейна для перехода  $^1\text{S} \rightarrow 1\text{D}$ .

Высотные профили скорости образования  $^1\text{S}$ -состояния за счет электронного удара (1) рассчитывались с использованием функции диссипации энергии и «энергетических цен», полученных на основе моделирования процесса переноса электронов в атмосферных газах в соответствии с формулами

$$Q_{1\text{S}}(h) = P_0(h) \rho(h) \frac{1}{\varepsilon_{1\text{S}}} \Phi(F(E), h),$$

$$\Phi(F(E), h) = \int_E \frac{EF(E)}{R(E)} \lambda \left( E, \frac{z(h)}{R(E)} dE \right),$$

где  $\Phi(F(E), h)$  — полная энергия, выделившаяся на высоте  $h$ ;  $P_0(h)$  — относительная доля энергии, пошедшая на возбуждение атомарного кислорода на высоте  $h$ ;  $\rho(h)$  — плотность нейтральной атмосферы;  $\varepsilon_{1\text{S}}$  — энергетическая цена возбуждения  $^1\text{S}$ -состояния атома кислорода;  $z(h)$  — масса, проходящая электроном до высоты  $h$ ;  $R(E)$  — интегральная длина пробега;  $F(E)$  — энергетический спектр потока высыпавшихся электронов;  $\lambda \left( E, \frac{z(h)}{R(E)} \right)$  — безразмерная функция диссипации энергии [Sergienko, Ivanov, 1993].

В столбе полярного сияния

$$I_{557.7} = \int_{h_2}^{h_1} \eta_{557.7}(h) dh,$$

где  $h_1$  и  $h_2$  — высоты верхней и нижней границы полярного сияния.

Численное моделирование процесса возбуждения  $^1\text{S}$ -состояния атомарного кислорода, обусловленного потоком высыпавшихся электронов, проводилось в рамках нестационарной модели возмущенной полярной ионосферы, детально описанной в [Дашкевич и др., 2017]. Модель включает в себя 56 физико-химических реакций, описывающих перераспределение энергии, выделившейся в столбе

полярного сияния в процессе высыпания авроральных электронов. В качестве нейтральной модели атмосферы использовалась MSIS-90. В [Дашкевич, Иванов, 2022] было показано, что  $I_{557.7}/I_{427.8}$  слабо зависит от формы энергетического спектра потока электронов, характерных для авроральных высыпаний, но показывает сильную зависимость от средней энергии потока. Поэтому в данной работе энергетический спектр потока высыпавшихся электронов задавался в виде максвелловского распределения

$$N(E) = N_0 E \exp(-E/E_0) / E_0^2,$$

где  $N_0$  и  $E_0$  — начальный поток частиц и характеристическая энергия соответственно. Средняя энергия потока  $E_{\text{cp}}$ , имеющего максвелловское распределение, соответствует величине  $2E_0$ . Распределение по углам задавалось изотропным в нижней полусфере.

Исследуем влияние  $[\text{NO}]$  на величины относительных вкладов реакций (1)–(6) в возбуждение эмиссии  $\lambda 557.7$  нм, принимая суммарную  $I_{557.7}$  за единицу. В проведенных расчетах средняя энергия потока высыпавшихся электронов  $E_{\text{cp}}$  варьировала в диапазоне 1–20 кэВ, который является типичным для авроральных электронов, возбуждающих полярные сияния [Vogobjev et al., 2013]. Величина  $[\text{NO}]_{\text{max}}$  варьировала в диапазоне  $10^7$ – $3 \cdot 10^9$  см $^{-3}$ , что соответствует наблюдаемому в полярных сияниях значениям. На рис. 2 показаны результаты расчетов зависимостей относительных вкладов реакций (1)–(6) от  $[\text{NO}]_{\text{max}}$  для электронных потоков со средней энергией 1, 3, 7 и 15 кэВ.

Видно, что относительные вклады реакций (1), (2), (5) и (6) слабо зависят от  $[\text{NO}]_{\text{max}}$  во всем рассмотренном диапазоне средних энергий потока высыпавшихся электронов. Сильную зависимость показывают только вклады реакций (3) и (4):  $\text{O}_2^+ + e_{\text{th}}$  и  $\text{O}_2^+ + \text{N}(^4\text{S})$ . Однако абсолютная величина относительного вклада реакции  $\text{O}_2^+ + \text{N}(^4\text{S})$  незначительна и составляет менее 1 % во всем диапазоне средних энергий электронного потока. Поэтому более детально рассмотрим зависимость величины относительного вклада реакции  $\text{O}_2^+ + e_{\text{th}}$  от  $[\text{NO}]_{\text{max}}$ . Рассчитанные зависимости вклада реакции  $\text{O}_2^+ + e_{\text{th}}$  в возбуждение  $^1\text{S}$ -состояния атомарного кислорода показаны на рис. 3 для диапазона средних энергий электронного потока от 1 до 20 кэВ.

Видно, что при  $[\text{NO}]_{\text{max}} > 2 \cdot 10^8$  см $^{-3}$  в интервале  $E_{\text{cp}}$  от 1 до 20 кэВ усредненный вклад реакции диссоциативной рекомбинации  $\text{O}_2^+$  в возбуждение эмиссии  $\lambda 557.7$  нм составляет менее 10 % и продолжает уменьшаться с ростом содержания окиси азота в области полярного сияния, что согласуется с оценками, полученными в [Gattinger et al., 1985, 1996]. Однако, при уменьшении  $[\text{NO}]_{\text{max}}$  от  $2 \cdot 10^8$  см $^{-3}$  относительный вклад реакции диссоциативной рекомбинации начинает возрастать. При  $[\text{NO}]_{\text{max}} = 10^7$  см $^{-3}$  относительный вклад реакции  $\text{O}_2^+ + e_{\text{th}}$  лежит в интервале от 20 до 41 % для диапазона  $E_{\text{cp}}$  от 1 до 20 кэВ.

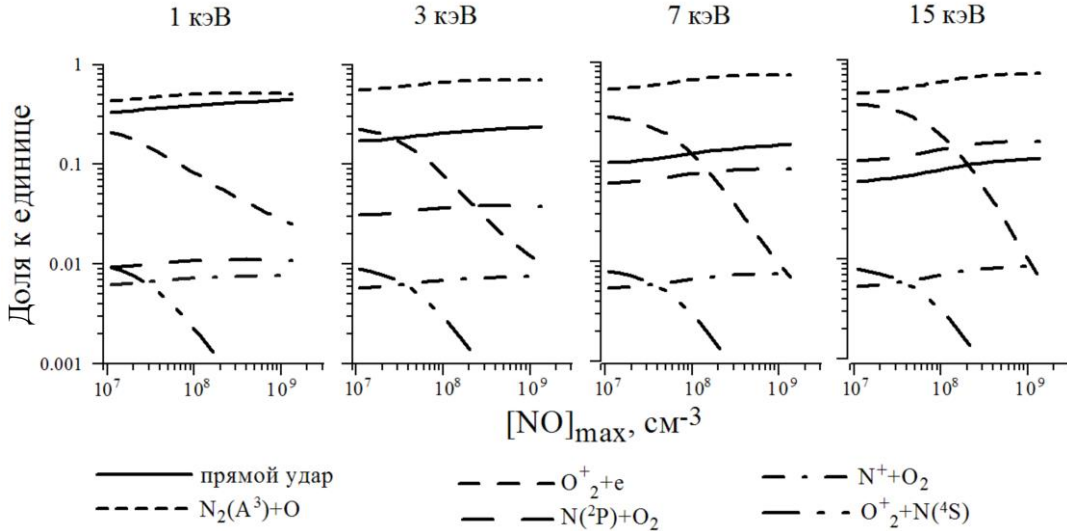


Рис. 2. Зависимость относительных вкладов шести каналов возбуждения <sup>1</sup>S-состояния атомарного кислорода от [NO]<sub>max</sub> для средних энергий электронного потока 1, 3, 7 и 15 кэВ

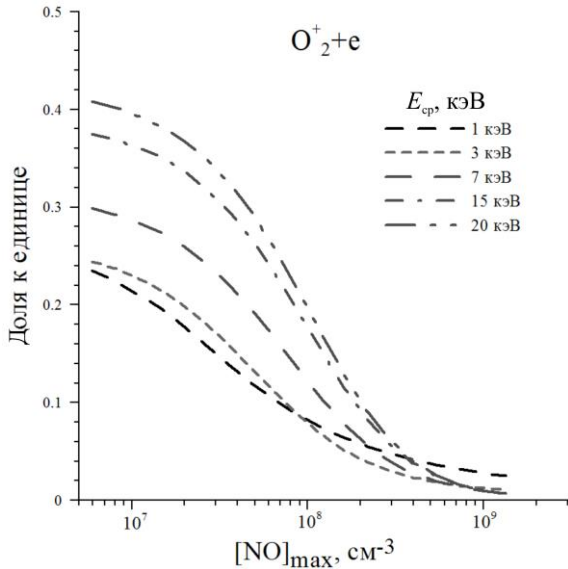


Рис. 3. Зависимость относительного вклада реакции диссоциативной рекомбинации O<sub>2</sub><sup>+</sup> в возбуждение <sup>1</sup>S-состояния атомарного кислорода от [NO]<sub>max</sub> для средних энергий электронного потока 1, 3, 7, 15 и 20 кэВ

Подобный характер поведения этой реакции как источника возбуждения <sup>1</sup>S-состояния атомарного кислорода с неизбежностью приведет к вариациям I<sub>557.7</sub> в зависимости от [NO] в полярном сиянии.

## 2. ОТНОШЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ I<sub>557.7</sub>/I<sub>427.8</sub>

Исследуем влияние [NO] на I<sub>557.7</sub>/I<sub>427.8</sub>. Эмиссия λ427.8 нм является одной из интенсивных полос системы 1NG N<sub>2</sub><sup>+</sup>, возникающая вследствие перехода

$$N_2^+(B^2 \sum_u^+, v'=0 \rightarrow X^2 \sum_g^+, v''=1),$$

где *v* — колебательное квантовое число. Объемная интенсивность излучения эмиссии λ427.8 нм на высоте *h* определяется как

$$\eta_{427.8}(h) = A_{B^2, v'=0 \rightarrow X^2, v''=1} [N_2^+(B^2 \sum_u^+, v'=0) h],$$

где  $[N_2^+(B^2 \sum_u^+, v'=0), h]$  — концентрация иона N<sub>2</sub><sup>+</sup> в состоянии B<sup>2</sup>∑<sub>u</sub><sup>+</sup>, v'=0; A<sub>B<sup>2</sup>, v'=0 → X<sup>2</sup>, v''=1</sub> — коэффициент Эйнштейна для излучательного перехода N<sub>2</sub><sup>+</sup>(B<sup>2</sup>∑<sub>u</sub><sup>+</sup>, v'=0 → X<sup>2</sup>∑<sub>g</sub><sup>+</sup>, v''=1), испускающего эмиссию λ427.8 нм.

Принимая во внимание малое время жизни B<sup>2</sup>∑<sub>u</sub><sup>+</sup> терма (~10<sup>-7</sup> с), столкновительной дезактивацией этого состояния можно пренебречь, считая, что он целиком возбуждается только электронным ударом и гасится благодаря радиационным переходам на терм X<sup>2</sup>∑<sub>g</sub><sup>+</sup>. В этом случае концентрация иона молекулярного азота N<sub>2</sub><sup>+</sup> в состоянии B<sup>2</sup>∑<sub>u</sub><sup>+</sup>, v'=0 в условиях фотохимического равновесия будет определяться простым стационарным уравнением баланса

$$0 = Q_{B^2, v'=0}(h) - \sum_{v''} A_{B^2, v'=0 \rightarrow X^2, v''} [N_2^+(B^2 \sum_u^+, v'=0), h],$$

где Q<sub>B<sup>2</sup>, v'=0</sub>(*h*) — скорость возбуждения состояния B<sup>2</sup>∑<sub>u</sub><sup>+</sup>, v'=0 иона N<sub>2</sub><sup>+</sup> электронным ударом на высоте *h*, A<sub>B<sup>2</sup>, v'=0 → X<sup>2</sup>, v''</sub> — вероятность радиационного перехода v'=0 колебательного уровня B<sup>2</sup>∑<sub>u</sub><sup>+</sup> состояния v'' в основное состояние иона молекулярного азота X<sup>2</sup>∑<sub>g</sub><sup>+</sup>.

Тогда

$$\eta_{427.8}(h) = \frac{A_{B^2, v'=0 \rightarrow X^2, v''=0}}{\sum_{v''} A_{B^2, v'=0 \rightarrow X^2, v''}} Q_{v'=0}(h).$$

Высотные профили скорости образования состояния  $B^2 \sum_u^+$ ,  $v'=0$  иона молекулярного азота  $Q_{B^2, v'=0}(h)$  рассчитывались так же, как высотные профили скорости образования  $^1S$ -состояния атомарного кислорода с использованием функции диссипации энергии и энергетических цен:

$$Q_{B^2, v'=0}(h) = P_{N_2}(h) \rho(h) \frac{q_{B^2, v'=0}}{\epsilon_{B^2}} \Phi(F(E), h),$$

где  $P_{N_2}(h)$  — относительная доля энергии на возбуждение молекулы азота на высоте  $h$ ;  $\rho(h)$  — плотность нейтральной атмосферы на высоте  $h$ ;  $q_{B^2, v'=0}$  — фактор Франка—Кондона, определяющий относительную заселенность  $v'=0$  колебательного уровня  $B^2 \sum_u^+$  состояния иона  $N_2^+$ ;  $\epsilon_{B^2}$  — энергетическая цена возбуждения состояния  $B^2 \sum_u^+$  иона  $N_2^+$ ;  $\Phi(F(E), h)$  — полная энергия, выделившаяся на высоте  $h$ ;  $F(E)$  — энергетический спектр потока высыпающихся электронов.

Интенсивность эмиссии  $\lambda 427.8$  нм в столбе полярного сияния

$$I_{427.8} = \int_{h_2}^{h_1} \eta_{427.8}(h) dh.$$

Расчеты  $I_{557.7}/I_{427.8}$  проводились для средних энергий  $E_{cp}$  потока высыпающихся электронов в интервале от 1 до 20 кэВ. Величина  $[NO]_{max}$  варьировала от  $10^7$  до  $4 \cdot 10^9$   $cm^{-3}$ . Рассчитанные зависимости  $I_{557.7}/I_{427.8}$  от  $[NO]_{max}$  показаны на рис. 4.

Видно, что  $I_{557.7}/I_{427.8}$  испытывает сильную зависимость от  $[NO]_{max}$  во всем рассмотренном диапазоне средних энергий потока высыпающихся электронов. С увеличением  $[NO]_{max}$  от  $10^7$  до  $3 \cdot 10^9$   $cm^{-3}$   $I_{557.7}/I_{427.8}$  уменьшается от  $\sim 7$  до  $\sim 2$ . Полученные значения  $I_{557.7}/I_{427.8}$  находятся в удовлетворительном согласии с величинами, наблюдаемыми в полярных сияниях. Влияние средней энергии потока высыпающихся электронов на  $I_{557.7}/I_{427.8}$  гораздо слабее, чем влияние  $[NO]_{max}$ . В рассмотренном диапазоне средних энергий высыпающихся электронов 1–20 кэВ величина  $I_{557.7}/I_{427.8}$  при  $[NO]_{max} = 10^7$   $cm^{-3}$  лежит в диапазоне 6–7, при  $[NO]_{max} = 3 \cdot 10^9$   $cm^{-3}$  — в диапазоне 2–3. Данный результат находится в согласии с результатами, полученными в [Shepherd, Gerdjikova, 1988; Shepherd, Shepherd, 1995].

В [Sharp et al., 1979] были приведены результаты одновременных измерений  $I_{391.4}$ ,  $I_{557.7}$  и  $[NO]$  в области полярного сияния,  $I_{391.4}$  была пересчитана в  $I_{427.8}$ . Полученное отношение  $I_{557.7}/I_{427.8}$  и измеренные  $[NO]$  показаны на рис. 4. Видно, что результаты модельных расчетов находятся в согласии с экспериментальными данными.

Таким образом, наблюдаемый в полярных сияниях диапазон изменения  $I_{557.7}/I_{427.8}$  может быть обусловлен не вариациями концентрации атомарного кислорода нейтральной атмосферы, как было показано

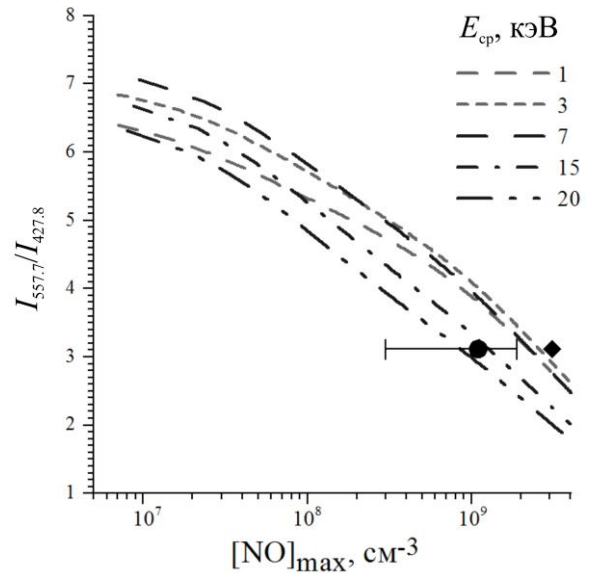


Рис. 4. Зависимость  $I_{557.7}/I_{427.8}$  от  $[NO]_{max}$  для средних энергий 1, 3, 7, 15 и 20 кэВ. Сплошной кружок и ромб — экспериментальные данные работы [Sharp et al., 1979]

в [Shepherd, Gerdjikova, 1988; Shepherd, Shepherd, 1995; Gattinger et al., 1996], а вариациями  $[NO]$  в области полярных сияний.

## ВЫВОДЫ

В данной работе исследовано влияние концентрации окиси азота NO на отношение интенсивностей  $I_{557.7}/I_{427.8}$  в полярных сияниях, вызванных потоками авроральных электронов. Показано, что  $I_{557.7}/I_{427.8}$  испытывает сильную зависимость от  $[NO]_{max}$  во всем диапазоне средних энергий, типичных для потоков высыпающихся электронов. Отношение уменьшается с увеличением  $[NO]_{max}$  от  $10^7$  до  $3 \cdot 10^9$   $cm^{-3}$ . При этом изменение  $I_{557.7}/I_{427.8}$  лежит в интервале от 7 до 2, что находится в удовлетворительном согласии с диапазоном изменения отношения, наблюдаемым в полярных сияниях.

Показано, что причиной варибельности  $I_{557.7}/I_{427.8}$  является дезактивация иона молекулярного кислорода окисью азота  $O_2^+ + NO$ , которая приводит к изменению вклада реакции диссоциативной рекомбинации  $O_2^+ + e_{th} \rightarrow O(^1S) + O(^1D)$  в возбуждение  $^1S$ -состояния атомарного кислорода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. Оценка содержания окиси азота в полярных сияниях по данным наземных фотометрических наблюдений. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 1. С. 3–10. DOI: [10.12737/szf-51201908](https://doi.org/10.12737/szf-51201908).
- Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. Диагностика интенсивностей излучения и электронной концентрации в полярных сияниях по данным эмпирических моделей высыпаний. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 2. С. 61–66. DOI: [10.12737/szf-82202208](https://doi.org/10.12737/szf-82202208).
- Дашкевич Ж.В., Зверев В.Л., Иванов В.Е. Отношения интенсивностей эмиссий  $I_{557.7}/I_{427.8}$  в полярных сияниях. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2006. Т. 46, № 3. С. 385–389.
- Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Сергиенко Т.И., Козелов Б.В. Физико-химическая модель авроральной ионо-

сферы. *Космические исследования*. 2017. Т. 55, № 2. С. 94–106. DOI: [10.7868/S0023420617020029](https://doi.org/10.7868/S0023420617020029).

Black G., Slander T.G., St. John G.A., Young R.A. Vacuum-ultraviolet photolysis of N<sub>2</sub>O. IV. Deactivation of N(<sup>2</sup>D). *J. Chemical Phys.* 1969. Vol. 51, no. 1. P. 116–121. DOI: [10.1063/1.1671694](https://doi.org/10.1063/1.1671694).

Brekke A., Henriksen K. The intensity ratio  $I(557.7)/I(427.8)$  and the effective life time of O(<sup>1</sup>S) atoms in pulsating aurora. *Planet. Space Sci.* 1972. Vol. 20, no. 1. P. 53–60. DOI: [10.1016/0032-0633\(72\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0032-0633(72)90140-7).

Deans A.J., Shepherd G.G. Rocket measurements of oxygen and nitrogen emissions un the aurora. *Planet. Space Sci.* 1978. Vol. 26, no. 4. P. 319–333. DOI: [10.1016/0032-0633\(78\)90115-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(78)90115-0).

Fensenfeld F.C. The reaction of O<sub>2</sub><sup>+</sup> with atomic nitrogen and NO<sup>+</sup>-H<sub>2</sub>O and NO<sub>2</sub><sup>+</sup> with atomic oxygen. *Planet. Space Sci.* 1977. Vol. 25, no. 2. P. 195–196.

Gattinger R.L., Vallance Jones A. The intensity ratios of auroral emissions features. *Ann. Geophys.* 1972. Vol. 28. P. 91–97.

Gattinger R.L., Harris F.R., Vallance Jones A. The height, spectrum and mechanism of type-B red aurora and its bearing on the excitation of O(<sup>1</sup>S) in aurora. *Planet. Space Sci.* 1985. Vol. 33, no. 2. P. 207–221. DOI: [10.1016/0032-0633\(85\)90131-X](https://doi.org/10.1016/0032-0633(85)90131-X).

Gattinger R.L., Llewellyn E.J., Vallance Jones A. On  $I(5577\text{A})$  and  $I(7620\text{A})$  auroral emissions and atomic oxygen densities. *Ann. Geophys.* 1996. Vol. 14, no.7. P. 687–698. DOI: [10.1007/s00585-996-0687-1](https://doi.org/10.1007/s00585-996-0687-1).

Goldan P.D., Schmeltekopf A.L., Fehsenfeld F.C., et al. Thermal energy ion-neutral reaction rates. II. Some reactions of ionospheric interest. *J. Chemical Phys.* 1966. Vol. 44, no. 11. P. 4095–4103. DOI: [10.1063/1.1726588](https://doi.org/10.1063/1.1726588).

Henriksen K. Photometric investigation of the 4278 A and 5577A emission in aurora. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1973. Vol. 35, no. 7. P. 1341–1350. DOI: [10.1016/0021-9169\(73\)90167-0](https://doi.org/10.1016/0021-9169(73)90167-0).

Maseide K. Rocket measurements of the volume emission profiles for auroral glow. *Planet. Space Sci.* 1967. Vol. 15, no. 5. P. 899–905. DOI: [10.1016/0032-0633\(67\)90124-9](https://doi.org/10.1016/0032-0633(67)90124-9).

Mende S.B., Eather R.A. Spectroscopic determination of the characteristics of precipitating auroral particles. *J. Geophys. Res.* 1975. Vol. 80. P. 3211–3216. DOI: [10.1029/JA080i022p03211](https://doi.org/10.1029/JA080i022p03211).

Sergienko N.I., Ivanov V.E. A new approach to calculate the excitation of atmospheric gases by auroral electron impact. *Ann. Geophys.* 1993. Vol. 11, no. 8. P. 717–727.

Sharp W.E. NO<sub>2</sub> continuum in aurora. *J. Geophys. Res.* 1978. Vol. 83. P. 4373–4376. DOI: [10.1029/JA083iA09p04373](https://doi.org/10.1029/JA083iA09p04373).

Sharp W.E., Rees M.H., Stewart A.I. Coordinated rocket and satellite measurements of an auroral event 2. The rocket observations and analysis. *J. Geophys. Res.* 1979. Vol. 84, no. A5. P. 1977–1985. DOI: [10.1029/JA084iA05p01977](https://doi.org/10.1029/JA084iA05p01977).

Shepherd G.G., Gerdjikova M.G. Thermospheric atomic oxygen concentrations inferred from the auroral  $I(5577)/I(4278)$  emission rate ratio. *Planet. Space Sci.* 1988. Vol. 36, no. 9. P. 893–895. DOI: [10.1016/0032-0633\(88\)90096-7](https://doi.org/10.1016/0032-0633(88)90096-7).

Shepherd M.G., Shepherd G.G. On the  $I(557.7\text{ nm})/I(427.8\text{ nm})$  emission rate in aurora. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1995. Vol. 57, no. 8. P. 933–943. DOI: [10.1016/0021-9169\(94\)00065-V](https://doi.org/10.1016/0021-9169(94)00065-V).

Siskind D.E., Barth C.A., Evans D.S., Roble R.G. The response of thermospheric nitric oxide to an auroral storm 2. Auroral latitudes. *J. Geophys. Res.* 1989. Vol. 94, no. A12. P. 16899–16911. DOI: [10.1029/JA094iA12p16899](https://doi.org/10.1029/JA094iA12p16899).

Steel D.P., McEwen D.J. Electron auroral excitation efficiencies and intensity rations. *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95, no. A7. P. 10321–10336. DOI: [10.1029/JA095iA07p10321](https://doi.org/10.1029/JA095iA07p10321).

Swider W., Narcisi R.S. Auroral E-region: Ion composition and nitric oxide. *Planet. Space Sci.* 1977. Vol. 25, no. 2. P. 103–116. DOI: [10.1016/0032-0633\(77\)90014-9](https://doi.org/10.1016/0032-0633(77)90014-9).

Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Yu.V. Auroral precipitation model and its applications to ionospheric and magnetospheric studies. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013. Vol. 102. P. 157–171. DOI: [10.1016/j.jastp.2013.05.007](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.007).

*Как цитировать эту статью:*

Иванов В.Е., Дашкевич Ж.В. Влияние концентрации NO на отношение  $I_{557.7}/I_{427.8}$  в полярных сияниях. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 1. С. 31–36. DOI: [10.12737/szf-101202404](https://doi.org/10.12737/szf-101202404).