

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ОКИСИ АЗОТА В ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЯХ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

ESTIMATED NITRIC OXIDE DENSITY IN AURORAS FROM GROUND-BASED PHOTOMETRIC DATA

Ж.В. Дашкевич

Полярный геофизический институт РАН,
Апатиты, Россия, zhanna@pgia.ru

В.Е. Иванов

Полярный геофизический институт РАН,
Апатиты, Россия, ivanov@pgia.ru

Zh.V. Dashkevich

Polar Geophysical Institute RAS,
Apatity, Russia, zhanna@pgia.ru

V.E. Ivanov

Polar Geophysical Institute RAS,
Apatity, Russia, ivanov@pgia.ru

Аннотация. Численные оценки содержания окиси азота в полярных сияниях сделаны на основе результатов фотометрических наблюдений интенсивностей эмиссий 427.8, 557.7 и 630.0 нм. Наблюдения проводились в полуночные часы в обсерваториях Полярного геофизического института. Оценки сделаны методом численного моделирования в рамках нестационарной физико-химической модели авроральной ионосферы [Дашкевич и др., 2017]. Показано, что концентрация окиси азота [NO] в максимуме ее высотного профиля лежит в интервале $(1\div 3.3)\cdot 10^8$ см⁻³. В результате оценки не обнаружена прямая корреляция величин в максимуме высотного профиля [NO]_{max} с интенсивностями свечения в эмиссии 427.8 нм.

Ключевые слова: окись азота, концентрации ионосферных компонент, полярные сияния, интенсивность эмиссии, моделирование, электронные высыпания.

Abstract. In this paper, we numerically estimate the nitric oxide density in auroras, using photometric data on 427.8, 557.7, and 630.0 nm emission intensities. The data were obtained at midnight at observatories of the Polar Geophysical Institute. These estimates were made using a numerical modeling procedure with a time-dependent model of the auroral ionosphere [Dashkevich et al., 2017]. It is shown that the NO density in the maximum of the altitude profile is between $(1\div 3.3)\cdot 10^8$ cm⁻³. The obtained estimates indicate the absence of a correlation between the [NO]_{max} values and 427.8 nm emission intensities.

Keywords: nitric oxide, ionosphere component densities, auroras, emission intensity, modeling, electron precipitation.

ВВЕДЕНИЕ

Окись азота NO, являясь малой составляющей атмосферы, играет важную роль в цикле физико-химических процессов, протекающих во время высыпания авроральных электронов в ионосферу. Прямые масс-спектрометрические измерения концентрации NO непосредственно в полярных сияниях отсутствуют. Оценки содержания NO в авроральной зоне были сделаны на основе анализа ракетных измерений либо ионного состава атмосферы, либо интенсивности NO₂ континуума в эмиссии 520.0 нм [Sharp, 1978; Swider, Narcisi, 1977], а также анализа спутниковых измерений интенсивности полосы NO [Gerard, Barth, 1977; Gerard, Noel, 1986; Rusch, Barth, 1975; Siskind et al., 1989; Solomon et al., 1999; Stevens et al., 1997]. На рис. 1 показаны высотные профили [NO], полученные на основе измерений, сделанных непосредственно в полярных сияниях. Видно, что [NO] в максимуме профиля может меняться в диапазоне $10^7\text{--}10^9$ см⁻³.

В работе [Дашкевич, Иванов, 2017] был детально описан метод, позволяющий получить оценки [NO] в полярных сияниях по результатам измерений ин-

тенсивностей излучения в эмиссиях $1NG\ N_2^+(B^2\Sigma_u^+)$ 391.4 нм, $OI(^1S)$ 557.7 и $OI(^1D)$ 630.0 нм. В основе данного метода лежит тот факт, что NO является гасителем иона O_2^+ : $O_2^+ + NO \rightarrow NO^+ + O_2$, диссоциативная рекомбинация которого $O_2^+ + e \rightarrow O(^1S) + O(^1D)$ является одним из основных источников образования атомарного кислорода в ¹S состоянии, которое, в свою очередь, служит источником эмиссии 557.7 нм. В данной работе представлены результаты оценок [NO], полученные на основе измерений в полярных сияниях интенсивностей излучения в эмиссиях $1NG\ N_2^+(B^2\Sigma_u^+)$ 427.8 нм, $OI(^1S)$ 557.7 нм и $OI(^1D)$ 630.0 нм. Оценки сделаны путем моделирования процессов перераспределения по внутренним степеням свободы энергии возбужденных атмосферных газов, вышедшей в ионосфере вследствие высыпания авроральных электронов. На основе измеренных интенсивностей излучения эмиссий 427.8, 557.7 и 630.0 нм восстанавливались энергетические спектры высыпавшихся электронов и [NO], которые определяют измеренные в полярных сияниях интенсивности эмиссий.

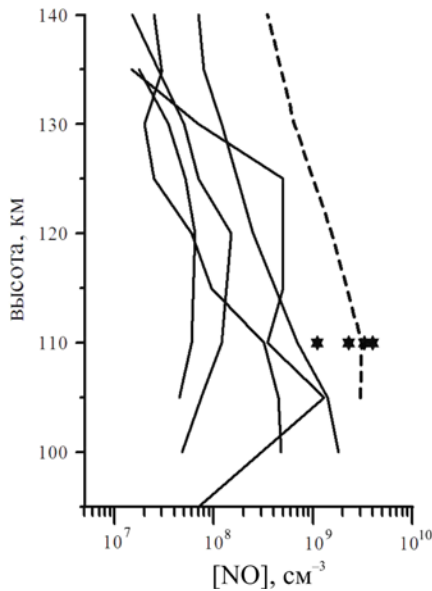


Рис. 1. Высотные зависимости концентрации окиси азота: звездочки — данные из работы [Sharp, 1978], полученные из отношения $[NO^+]/[O_2^+]$, штриховая линия — данные из работы [Sharp, 1978], полученные по интенсивности эмиссии континуума NO_2 , сплошные линии — данные из работы [Swider, Narcisi, 1977]

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки $[NO]$ в работе были использованы результаты фотометрических наблюдений интенсивности эмиссий 427.8, 557.7 и 630.0 нм в полярных сияниях. Наблюдения проводились в обсерваториях Полярного геофизического института в 1998–2001 гг. Данные по интенсивности эмиссий в зените получены в полночные часы при условии наличия свечения полярного сияния и отсутствия облачности. Экспериментальный массив данных включал в себя 1335 измерений в восьми ночных сериях наблюдений в обс. Ловозеро ($\Phi' = 64.17^\circ N$) и 1200 измерений в восьми ночных сериях в обс. Туманный ($\Phi' = 65.24^\circ N$). Детали обработки экспериментальных данных описаны в работе [Дашкевич и др., 2006], здесь отметим только, что диапазон интенсивности эмиссии 427.8 нм лежит в интервале 0.1–2 кРл. Усредненные по двум станциям результаты измерений, сгруппированные по значениям интенсивностей эмиссии 427.8 нм, приведены в первых трех колонках табл. 1. Диапазон изменения интенсивности эмиссии 427.8 нм разбит на интервалы по 100 Рл.

Расчет $[NO]$ и интенсивностей свечения в эмиссиях 427.8, 557.7 и 630.0 нм в области электронных высыпаний проводился методом численного моделирования в рамках нестационарной физико-химической модели авроральной ионосферы, описывающей процессы взаимодействия основных возбужденных и ионизированных компонент атмосферы во время электронных высыпаний [Дашкевич и др., 2017]. Модель составлена на основе имеющихся в научной литературе данных и содержит 56 физико-химических реакции, включая 23 реакции с участием нечетного азота NO , $N(^4S)$, $N(^2D)$, $N(^2P)$, N^+ и NO^+ . Реакции, входящие в данную модель и описывающие пере-

распределение выделившейся в ионосфере энергии авроральных электронов, представлены в табл. 2. Отличительной особенностью модели является метод расчета высотных профилей скоростей возбуждения атмосферных газов, в основу которого положен функционал, позволяющий аналитически связать высотные профили возбужденных компонент атмосферы с энергетическим спектром высыпавшихся электронов [Sergienko, Ivanov, 1993]. Численная модель позволяет рассчитать высотные профили концентрации ионосферных компонент N_2^+ , O_2^+ , $O(^4S)$, $O(^2D)$, $O(^2P)$, $O(^1D)$, $O(^1S)$, $N(^4S)$, $N(^2D)$, $N(^2P)$, NO , NO^+ , N^+ , $N_2(A^3\Sigma_u^+)$, $N_2(B^3\Pi_g)$, $N_2(W^3\Delta_u)$, $N_2(B^3\Sigma_u^-)$, $N_2(C^3\Pi_u)$ и электронов в авроральной ионосфере; временную динамику концентраций ионосферных компонент; высотные профили интенсивности основных авроральных эмиссий, в том числе 427.8, 557.7 и 630.0 нм. Поскольку в модели не учитываются эффекты переноса, она применима к E- и нижней F-областям ионосферы. Входными параметрами модели являются модель нейтральной атмосферы и параметры потока высыпавшихся электронов.

В этой работе были использованы модель нейтральной атмосферы MSIS-90 и энергетический спектр высыпавшихся электронов в виде максвелловского распределения

$$N(E) = N_0 E \exp(-E/E_0) / E_0^2, \quad (1)$$

где N_0 и E_0 — поток высыпавшихся электронов на верхней границе термосферы ($cm^{-2}s^{-1}$) и характеристическая энергия (эВ) соответственно.

Процедура восстановления высотных профилей $[NO]$, детально описанная в [Дашкевич, Иванов, 2017], включала в себя два этапа. На первом этапе определялись параметры заданного в модели потока высыпавшихся электронов (1), а именно характеристическая энергия E_0 и величина потока частиц N_0 , которые обеспечивают наблюдаемые в эксперименте интенсивности излучения в эмиссиях 427.8 и 630.0 нм. Значения характеристической энергии E_0 оценивались по полученным в эксперименте отношениям интенсивностей $I_{630.0}/I_{427.8}$. Как следует из работ [Дашкевич и др., 2006; Дашкевич, Иванов, 2017; Eather, Mende, 1972; Rees, Luckey, 1974], $I_{630.0}/I_{427.8}$ практически не зависит от N_0 и определяется E_0 . Более того, в работе [Дашкевич, Иванов, 2017] было показано, что $I_{630.0}/I_{427.8}$ не зависит и от $[NO]$. На рис. 2 приведена используемая в данной работе зависимость $I_{630.0}/I_{427.8}$ от E_0 , рассчитанная согласно физико-химической модели ионосферы [Дашкевич и др., 2017]. Величины потоков N_0 определялись из условия

$$I_{427.8}^{экс} = N_0 \int \eta_{427.8}^{теор}(E, h) E \exp(-E/E_0) / E_0^2 dEdh,$$

где $I_{427.8}^{экс}$ — экспериментально измеренная интенсивность эмиссии 427.8 нм ($cm^{-2}s^{-1}$), $\eta_{427.8}^{теор}(E, h)dEdh$ — объемная светимость эмиссии 427.8 нм, созданная на высоте h в слое толщиной dh высыпавшимися электронами с энергиями в интервале от E до $E+dE$, E_0 — характеристическая энергия (эВ).

Таблица 1

Результаты моделирования

$I_{427.8}$, Рл эксп.	$I_{557.7}$, Рл эксп.	$I_{630.0}$, Рл эксп.	E_0 , эВ расчет	N_0 , $10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ расчет	$[\text{NO}]_{\text{max}}$, 10^8 см^{-3} расчет	$I_{557.7}$, Рл расчет
150	782	273	1039	0.5	1.6	780
250	1330	365	1116	0.8	1.6	1330
350	1845	403	1291	0.9	1.8	1845
450	2437	475	1370	1.1	1.7	2432
550	2945	490	1541	1.2	2.3	2941
650	3551	544	1607	1.3	2.2	3543
750	4075	650	1559	1.5	2.2	4072
850	4930	609	1780	1.5	1.5	4927
950	5567	578	1987	1.5	1.4	5554
1100	6683	737	1858	1.9	1.0	6679
1350	7755	744	2102	2.0	1.7	7754
1700	9243	745	2465	2.1	3.3	9223

Таблица 2

Реакции взаимодействия атмосферных ионов и возбужденных компонент в условиях полярных сияний

N_2^+	$\text{O}^+(^2\text{P})$	$\text{N}(^4\text{S})$
$\text{N}_2^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2^+$	$\text{O}^+(^2\text{P}) + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}^+(^4\text{S}) + \text{N}_2$	$\text{N}(^4\text{S}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}$
$\text{N}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}^+(^4\text{S})$	$\text{O}^+(^2\text{P}) + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2^+ + \text{O}$	$\text{N}(^4\text{S}) + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}$
$\text{N}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}(^2\text{D})$	$\text{O}^+(^2\text{P}) + \text{O} \rightarrow \text{O}^+(^4\text{S}) + \text{O}$	$\text{N}(^2\text{D})$
$\text{N}_2^+ + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{NO}^+$	$\text{O}^+(^2\text{P}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{O}$	$\text{N}(^2\text{D}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}(^3\text{P}, ^1\text{D})$
$\text{N}_2^+ + e \rightarrow \text{N}(^4\text{S}) + \text{N}(^2\text{D})$	$\text{O}^+(^2\text{P}) \rightarrow \text{O}^+(^2\text{D}) + h\nu$	$\text{N}(^2\text{D}) + \text{O} \rightarrow \text{N}(^4\text{S}) + \text{O}(^3\text{P}, ^1\text{D})$
O_2^+	$\text{O}^+(^2\text{P}) \rightarrow \text{O}^+(^4\text{S}) + h\nu$	$\text{N}(^2\text{D}) + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}$
$\text{O}_2^+ + e \rightarrow \text{O}(^1\text{S}) + \text{O}(^1\text{D})$	$\text{O}^+(^2\text{P}) + e \rightarrow \text{O}^+(^2\text{D}) + e$	$\text{N}(^2\text{D}) + \text{NO} \rightarrow \text{N}(^4\text{S}) + \text{NO}$
$\text{O}_2^+ + \text{N}(^4\text{S}) \rightarrow \text{NO}^+ + \text{O}(^1\text{S})$	$\text{O}^+(^2\text{P}) + e \rightarrow \text{O}^+(^4\text{S}) + e$	$\text{N}(^2\text{D}) + e \rightarrow \text{N}(^4\text{S}) + e$
$\text{O}_2^+ + \text{NO} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{O}_2$	$\text{O}(^1\text{D})$	$\text{N}(^2\text{D}) \rightarrow \text{N}(^4\text{S}) + h\nu$
$\text{O}_2^+ + \text{N}(^2\text{D}) \rightarrow \text{NO}^+ + \text{O}$	$\text{O}(^1\text{D}) + \text{N}_2 \rightarrow \text{O} + \text{N}_2$	$\text{N}(^2\text{P})$
$\text{O}^+(^4\text{S})$	$\text{O}(^1\text{D}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2$	$\text{N}(^2\text{P}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}(^1\text{S}, ^1\text{D}, ^3\text{P})$
$\text{O}^+(^4\text{S}) + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}(^4\text{S})$	$\text{O}(^1\text{D}) + \text{O} \rightarrow \text{O} + \text{O}$	$\text{N}(^2\text{P}) + \text{O} \rightarrow \text{N}(^2\text{D}) + \text{O}$
$\text{O}^+(^4\text{S}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{O}$	$\text{O}(^1\text{D}) \rightarrow \text{O} + h\nu$	$\text{N}(^2\text{P}) \rightarrow \text{N}(^2\text{D}) + h\nu$
$\text{O}^+(^4\text{S}) + \text{NO} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{O}$	$\text{O}(^1\text{D}) + e \rightarrow \text{O} + e$	$\text{N}(^2\text{P}) \rightarrow \text{N}(^4\text{S}) + h\nu$
$\text{O}^+(^2\text{D})$	$\text{O}(^1\text{S})$	$\text{N}(^2\text{P}) + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}$
$\text{O}^+(^2\text{D}) + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2^+ + \text{O}$	$\text{O}(^1\text{S}) + \text{O} \rightarrow \text{O} + \text{O}$	N^+
$\text{O}^+(^2\text{D}) + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}(^4\text{S})$	$\text{O}(^1\text{S}) \rightarrow \text{O}(^1\text{D}) + h\nu$	$\text{N}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{N}(^4\text{S}, ^2\text{D})$
$\text{O}^+(^2\text{D}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{O}$	$\text{O}(^1\text{S}) \rightarrow \text{O} + h\nu$	$\text{N}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}^+ + \text{O}(^1\text{D}, ^1\text{S})$
$\text{O}^+(^2\text{D}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}^+(^4\text{S}) + \text{O}_2$	$\text{O}(^1\text{S}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2$	$\text{N}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}^+(^4\text{S}) + \text{NO}$
$\text{O}^+(^2\text{D}) + \text{O} \rightarrow \text{O}^+(^4\text{S}) + \text{O}$	$\text{O}(^1\text{S}) + \text{NO} \rightarrow \text{O} + \text{NO}$	$\text{N}^+ + \text{O} \rightarrow \text{O}^+(^4\text{S}) + \text{N}(^4\text{S})$
$\text{O}^+(^2\text{D}) + e \rightarrow \text{O}^+(^4\text{S}) + e$	NO^+	$\text{N}_2(\text{A}^3\Sigma_u^+)$
$\text{O}^+(^2\text{D}) \rightarrow \text{O}^+(^4\text{S}) + h\nu$	$\text{NO}^+ + e \rightarrow \text{O} + \text{N}(^4\text{S}, ^2\text{D})$	$\text{N}_2(\text{A}^3\Sigma_u^+) + \text{O} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}(^1\text{S})$

Примечание. Константы скоростей реакций представлены в работе [Дашкевич и др., 2017].

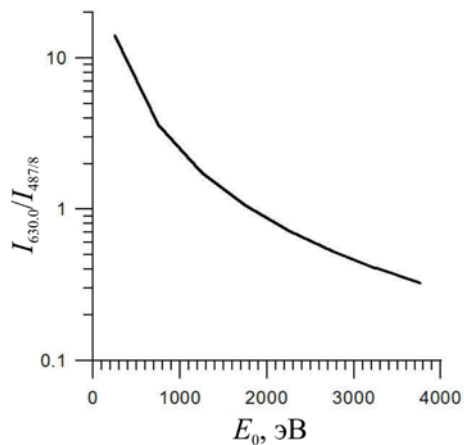


Рис. 2. Зависимость отношения $I_{630.0}/I_{487.8}$ от характеристической энергии выпадающих электронов E_0

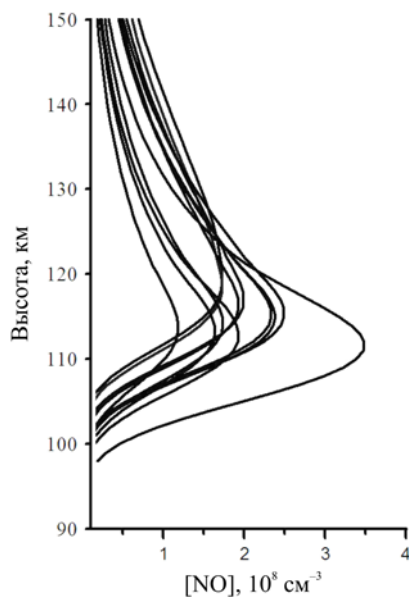


Рис. 3. Смоделированные высотные профили $[\text{NO}]$. Каждая кривая соответствует одной паре отношений $I_{630.0}/I_{427.8}$ и $I_{557.7}/I_{427.8}$

Определенные таким образом E_0 и N_0 обеспечивают наблюдаемые в эксперименте интенсивности $I_{427.8}$ и $I_{630.0}$ для выпадающих электронов с заданным энергетическим спектром в виде (1).

Второй этап включал в себя расчет высотных профилей интенсивности излучения эмиссии 557.7 нм и соответствующих данным профилям высотных распределений $[\text{NO}]$. Абсолютные значения $[\text{NO}]$ для каждого конкретного события определялись из условия получения наилучшего согласия рассчитанных значений $I_{557.7}$ с измеренными в эксперименте. Смоделированные таким образом высотные профили $[\text{NO}]$ представлены на рис. 3. Рассчитанные значения $[\text{NO}]_{\text{max}}$ в максимуме высотного профиля приведены в табл. 1. Здесь же для сравнения даны смоделированные значения $I_{557.7}$. Видно, что оценки $[\text{NO}]$ в области полярных сияний, полученные на основе фотометрических измерений $I_{427.8}$, $I_{557.7}$ и $I_{630.0}$, лежат в интервале $(1 \div 3.3) \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ для диапазона $I_{427.8}$ от 0.1 до 2 кРл. Полученные результаты находятся в удовлетворительном согласии с результатами оценок $[\text{NO}]$, полученными на основе анализа ионного

состава в полярных сияниях, измеренного в ракетных экспериментах [Sharp, 1978; Swider, Narcisi, 1977].

Следует отметить также, что полученные в данной работе результаты свидетельствуют об отсутствии прямой корреляции между $I_{427.8}$ и $[\text{NO}]_{\text{max}}$. На данный факт ранее обращалось внимание и в работе [Gerard, Barth, 1977]. Причину отсутствия такой корреляции можно объяснить большим временем жизни NO, которая может накапливаться в ионосфере. Поэтому $[\text{NO}]$ в каждом конкретном полярном сиянии может определяться не только продолжительностью и интенсивностью выпадающих электронных потоков, но и продолжительностью и интенсивностью авроральной активности, предшествующей исследуемому событию.

ВЫВОДЫ

В работе представлены численные оценки содержания NO в полярных сияниях, сделанные на основе наземных фотометрических измерений интенсивностей свечения в эмиссиях 427.8, 557.7 и 630.0 нм в полуденном секторе аврорального овала. Показано, что $[\text{NO}]$ в максимуме ее высотного профиля $[\text{NO}]_{\text{max}}$ лежит в интервале $(1 \div 3.3) \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$. Не обнаружена прямая корреляция величины $[\text{NO}]_{\text{max}}$ с интенсивностями свечения в эмиссии 427.8 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. Оценка концентрации NO в полярных сияниях по интенсивностям эмиссий 391.4, 557.7 и 630.0 нм // Космические иссл. 2017. Т. 55. С. 337–341. DOI: [10.7868/S0023420617050028](https://doi.org/10.7868/S0023420617050028).
- Дашкевич Ж.В., Зверев В.Л., Иванов В.Е. Отношение интенсивностей эмиссий $I_{630.0}/I_{427.8}$ и $I_{557.7}/I_{427.8}$ в полярных сияниях // Геомагнетизм и аэронавигация. 2006. Т. 46. С. 385–389.
- Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Сергиенко Т.И., Козелов Б.В. Физико-химическая модель авроральной ионосферы // Космические иссл. 2017. Т. 55. С. 94–106. DOI: [10.7868/S0023420617020029](https://doi.org/10.7868/S0023420617020029).
- Eather R.H., Mende S.B. Systematics in auroral energy spectra // J. Geophys. Res. 1972. V. 77. P. 660–673. DOI: [10.1029/JA077i004p00660](https://doi.org/10.1029/JA077i004p00660).
- Gérard J.-C., Barth C.A. High-latitude nitric oxide in the lower thermosphere // J. Geophys. Res. 1977. V. 82, P. 674–680. DOI: [10.1029/JA082i004p00674](https://doi.org/10.1029/JA082i004p00674).
- Gérard J.C., Noel C.E. AE-D measurements of the NO geomagnetic latitudinal distribution and contamination by $\text{N}^+(\text{}^5\text{S})$ emission // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. P. 10136–10140. DOI: [10.1029/JA091iA09p10136](https://doi.org/10.1029/JA091iA09p10136).
- Rees M.H., Luckey D. Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions. 1. Model computations // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. P. 5181–5186. DOI: [10.1029/JA079i034p05181](https://doi.org/10.1029/JA079i034p05181).
- Rusch D.W., Barth C.A. Satellite measurements of nitric oxide in the polar region // J. Geophys. Res. 1975. V. 80. P. 3719–3721. DOI: [10.1029/JA080i025p03719](https://doi.org/10.1029/JA080i025p03719).
- Sergienko T.I., Ivanov V.E. A new approach to calculate the excitation of atmospheric gases by auroral electron impact // Ann. Geophys. 1993. V. 11. P. 717–727.
- Sharp W.E. NO_2 continuum in aurora // J. Geophys. Res. 1978. V. 83. P. 4373–4376. DOI: [10.1029/JA083iA09p04373](https://doi.org/10.1029/JA083iA09p04373).
- Siskind D.E., Barth C.A., Evans D.S., Roble R.G. The response of the thermospheric nitric oxide to an auroral storm.

2. Auroral latitudes // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94, N A12. P. 16899–16911. DOI: [10.1029/JA094iA12p16899](https://doi.org/10.1029/JA094iA12p16899).

Solomon C.S., Barth C.A., Bailey S.M. Auroral production of nitric oxide measured by the SNOE satellite // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. P. 1259–1262. DOI: [10.1029/1999GL900235](https://doi.org/10.1029/1999GL900235).

Stevens M.H., Conway R.R., Cardon J.G., Russell J.M. MAHRSI observations of nitric oxide in the mesosphere and lower thermosphere // *Geophys. Res. Lett.* 1997. V. 24. P. 3213–3216. DOI: [10.1029/97GL03257](https://doi.org/10.1029/97GL03257).

Swider W., Narcisi R.S. Auroral E-region: Ion composition and nitric oxide // *Planet. Space Sci.* 1977. V. 25. P. 103–116. DOI: [10.1016/0032-0633\(77\)90014-9](https://doi.org/10.1016/0032-0633(77)90014-9).

REFERENCES

Dashkevich Zh.V., Ivanov V.E. Estimation of the NO concentration in the polar region from 391.4, 557.7, and 630.0 nm emission intensities. *Cosmic Res.* 2017, vol. 55, no. 5, pp. 318–322. DOI: [10.1134/S0010952517050045](https://doi.org/10.1134/S0010952517050045).

Dashkevich Zh.V., Zverev V.L., Ivanov V.E. Ratios of $I_{630.0}/I_{427.8}$ and $I_{557.7}/I_{427.8}$ emission intensities in auroras. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2006, vol. 46, no. 3, pp. 366–370. DOI: [10.1134/S001679320603011X](https://doi.org/10.1134/S001679320603011X).

Dashkevich Zh.V., Ivanov V.E., Sergienko T.I., Kozelov B.V. Physicochemical model of the auroral ionosphere. *Cosmic Res.* 2017, vol. 55, no. 2, pp. 88–100. DOI: [10.1134/S0010952517020022](https://doi.org/10.1134/S0010952517020022).

Eather R.H., Mende S.B. Systematics in auroral energy spectra. *J. Geophys. Res.* 1972, vol. 77, no. 4, pp. 660–673. DOI: [10.1029/JA077i004p00660](https://doi.org/10.1029/JA077i004p00660)

Gérard J.-C., Barth C.A. High-latitude nitric oxide in the lower thermosphere. *J. Geophys. Res.* 1977, vol. 82, no. 4, pp. 674–680. DOI: [10.1029/JA082i004p00674](https://doi.org/10.1029/JA082i004p00674).

Gérard J.-C., Noel C.E. AE-D measurements of the NO geomagnetic latitudinal distribution and contamination by $N^+(\delta S)$ emission. *J. Geophys. Res.* 1986, vol. 91, no. A9, pp. 10136–10140. DOI: [10.1029/JA091iA09p10136](https://doi.org/10.1029/JA091iA09p10136).

Rees M.H., Luckey D. Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions. 1. Model computations. *J. Geophys. Res.* 1974, vol. 79, no. 34, pp. 5181–5186. DOI: [10.1029/JA079i034p05181](https://doi.org/10.1029/JA079i034p05181).

Rusch D.W., Barth C.A. Satellite measurements of nitric oxide in the polar region. *J. Geophys. Res.* 1975, vol. 80, no. 25, pp. 3719–3721. DOI: [10.1029/JA080i025p03719](https://doi.org/10.1029/JA080i025p03719).

Sergienko T.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, pp. 717–727.

Sharp W.E. NO_2 continuum in aurora. *J. Geophys. Res.* 1978, vol. 83, no. 9, pp. 4373–4376. DOI: [10.1029/JA083iA09p04373](https://doi.org/10.1029/JA083iA09p04373).

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

Solomon C.S., Barth C.A., Bailey S.M. Auroral production of nitric oxide measured by the SNOE satellite. *Geophys. Res. Lett.* 1999, vol. 26, pp. 1259–1262. DOI: [10.1029/1999GL900235](https://doi.org/10.1029/1999GL900235).

Stevens M.H., Conway R.R., Cardon J.G., Russell J.M. MAHRSI observations of nitric oxide in the mesosphere and lower thermosphere. *Geophys. Res. Lett.* 1997, vol. 24, pp. 3213–3216. DOI: [10.1029/97GL03257](https://doi.org/10.1029/97GL03257).

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

Как цитировать эту статью

Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. Оценка содержания окиси азота в полярных сияниях по данным наземных фотометрических наблюдений ионосферы. *Солнечно-земная физика.* 2019. Т. 5, № 1. С. 77–81. DOI: [10.12737/szf-51201908](https://doi.org/10.12737/szf-51201908).