

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.126-128

ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ NO В ОБЛАСТИ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Ж.В. Дашкевич, В.Е. Иванов

ФГБНУ “Полярный геофизический институт”, г. Апатиты, Россия; e-mail: zhanna@pgia.ru

Аннотация. Получены оценки содержания окиси азота NO в области полярных сияний, сделанные на основе анализа наземных фотометрических измерений интенсивностей эмиссий 427.8, 557.7 и 630.0 нм. Показано, что концентрация окиси азота в максимуме ее высотного профиля лежит в интервале от $1 \cdot 10^8$ до $3.3 \cdot 10^8$ см⁻³. Полученные оценки свидетельствуют об отсутствии прямой корреляции между интенсивностью свечения эмиссии 427.8 нм и величиной концентрации окиси азота.

Введение

Во время высыпания заряженных частиц в атмосферу Земли происходит образование окиси азота в полярной ионосфере. Из-за большого времени жизни окись азота может накапливаться в атмосфере, и содержание NO может определяться продолжительностью и интенсивностью полярных сияний.

Прямые масс-спектрометрические измерения концентрации NO непосредственно в полярных сияниях отсутствуют. Оценки содержания NO в авроральной зоне сделаны на основе анализа ракетных измерений либо ионного состава атмосферы, либо интенсивности NO₂ континуума в эмиссии 520.0 нм [Swider and Narcisi, 1977; Sharp, 1978], а также анализа спутниковых измерений интенсивности полосы NO (1-0) [Rush and Barth, 1975; Gerard and Barth, 1977; Gerard and Noel, 1986; Siskind et al., 1989]. Сделанные оценки концентрации NO лежат в диапазоне от 10^7 до 10^9 см⁻³.

В связи с этим представляется актуальным поиск возможностей диагностики содержания NO по данным оптических наблюдений конкретных форм полярных сияний, проведенных как с поверхности Земли, так и с борта космических аппаратов.

Диагностика NO в области полярных сияний

Рассмотрим возможность диагностики “мгновенного” содержания NO в области полярных сияний по данным измерений интенсивности свечения в эмиссиях 557.7 и 630.0 нм атомарного кислорода и одной из эмиссий Первой отрицательной системы полос N₂⁺ - 427.8 нм, поскольку именно в этих эмиссиях часто ведутся фотометрические наблюдения авроры.

В работе [Дашкевич и Иванов, 2017] было показано, что вклад диссоциативной рекомбинации, являющейся одной из основных каналов возбуждения ¹S атомарного кислорода, существенным образом зависит от концентрации окиси азота и этот вклад растет с увеличением средней энергии высыпающегося потока. Таким образом, количество NO в атмосфере влияет на интенсивность зеленой линии.

Величина интенсивности авроральных эмиссий зависит как от средней энергии, так и от величины потока высыпающихся электронов N_0 . Поэтому рассмотрим отношение $I_{557.7}/I_{427.8}$, которое слабо зависит от N_0 [Дашкевич и Иванов, 2017]. Отношение $I_{557.7}/I_{427.8}$ будет в основном определяться средней энергией высыпающихся электронов и концентрацией окиси азота. На рис. 1 представлены зависимости отношения $I_{557.7}/I_{427.8}$ от концентрации NO в максимуме его высотного профиля $[NO]_{\max}$, рассчитанные по модели возбужденной полярной ионосферы для различных E_0 – характеристических энергий максвелловского распределения электронов по энергиям: $N(E) = N_0 E \exp(-E/E_0)/E_0^2$. [Дашкевич и Иванов, 2017].

Как следует из работ [Eather and Mende, 1972; Rees and Luckey, 1974; Дашкевич и др., 2006; Дашкевич и Иванов, 2017] отношение интенсивностей $I_{630.0}/I_{427.8}$ практически не зависит от величины потока высыпающихся электронов N_0 и определяется в основном характеристической энергией E_0 . Более того, в работе [Дашкевич и Иванов, 2017] было показано, что отношение $I_{630.0}/I_{427.8}$ не зависит и от концентрации окиси азота. На рис. 2 приведена зависимость $I_{630.0}/I_{427.8}$ от E_0 , полученная нами в работе [Дашкевич и Иванов, 2017].

Таким образом, мы можем определить концентрацию окиси азота по следующему алгоритму:

- 1) по измеренному отношению $I_{630.0}/I_{427.8}$ получаем оценку характеристической энергии E_0 высыпающегося потока электронов.
- 2) по зависимости отношения $I_{557.7}/I_{427.8}$ от $[NO]_{\max}$ для найденной E_0 определяем концентрацию окиси азота в максимуме его высотного профиля.

3) по концентрации окиси азота в максимуме его высотного профиля мы можем восстановить сам высотный профиль окиси азота, используя нестационарную физико-химическую модель полярной ионосферы [Дашкевич и др., 2017].

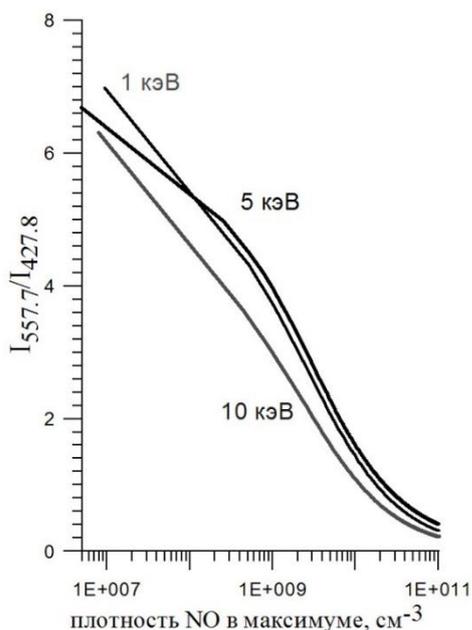


Рисунок 1. Зависимость отношения $I_{557.7}/I_{427.8}$ от концентрации NO в максимуме его профиля для E_0 из диапазоне от 1 до 10 кэВ.

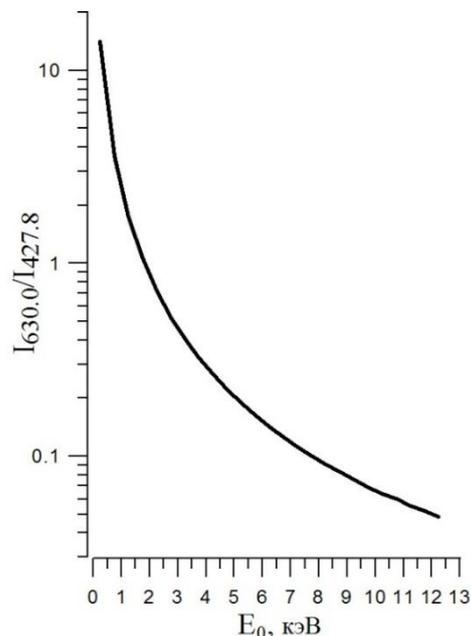


Рисунок 2. Зависимость $I_{630.0}/I_{427.8}$ от характеристической энергии высыпающего потока электронов.

Таблица. Результаты моделирования

$I_{427.8}$, Рл эксперимент	$I_{557.7}/I_{427.8}$ эксперимент	$I_{630.0}/I_{427.8}$ эксперимент	E_0 , эВ расчет	N_0 , $10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ расчет	$[\text{NO}]_{\text{max}}$, 10^8 см^{-3} расчет
150	5.21 ± 0.55	1.63 ± 0.14	1039	0.5	1.6
250	5.31 ± 0.43	1.46 ± 0.28	1116	0.8	1.6
350	5.35 ± 0.44	1.17 ± 0.22	1291	0.9	1.8
450	5.49 ± 0.43	1.07 ± 0.18	1370	1.1	1.7
550	5.38 ± 0.5	0.90 ± 0.24	1541	1.2	2.3
650	5.48 ± 0.32	0.84 ± 0.16	1607	1.3	2.2
750	5.52 ± 0.44	0.88 ± 0.21	1559	1.5	2.2
850	5.82 ± 0.38	0.72 ± 0.17	1780	1.5	1.5
950	5.87 ± 0.62	0.61 ± 0.13	1987	1.5	1.4
1100	6.12 ± 0.66	0.68 ± 0.29	1858	1.9	1.0
1350	5.84 ± 0.77	0.56 ± 0.17	2102	2.0	1.7
1700	5.46 ± 0.12	0.44 ± 0.12	2465	2.1	3.3

Оценка концентрации NO в области полярных сияний

Для оценки концентрации окиси азота NO в работе были использованы результаты фотометрических наблюдений интенсивностей эмиссий 427.8, 557.7 и 630.0 нм. Экспериментальный массив данных включал в себя 1335 измерений в 8 ночных сериях наблюдений в обсерватории Ловозеро ($\Phi' = 64.17^\circ\text{N}$) и 1200 измерений в 8 ночных сериях в обсерватории Туманный ($\Phi' = 65.24^\circ\text{N}$). Диапазон интенсивности эмиссии 427.8 нм: 0.1-2 кРл. Данные были сгруппированы в 100 релейные интервалы интенсивностей эмиссии 427.8 нм и усреднены по двум станциям.

Параметры заданного в модели потока высыпающихся электронов, а именно: характеристическая энергия E_0 и величина потока частиц N_0 , определялись их наблюдаемых в эксперименте интенсивности излучения в эмиссиях 427.8 и 630.0 А. Значения характеристической энергии E_0 оценивались по полученным в эксперименте отношениям $I_{630.0}/I_{427.8}$ с помощью кривой на рис. 2. Величины потоков высыпающихся электронов N_0 определяем из условия нормировки рассчитанного значения интенсивности $I_{427.8}$ к интенсивности, полученной в эксперименте. Далее по величине отношения $I_{557.7}/I_{427.8}$ делались оценки концентрации NO в максимуме высотного профиля. Полученные величины сведены в таблицу.

Таким образом, оценки концентрации NO в области полярных сияний, полученные на основе фотометрических измерений интенсивности свечения в эмиссиях 427.8, 557.7 и 630.0 нм, лежат в интервале $1 \cdot 10^8$ до $3.3 \cdot 10^8$ см⁻³ для диапазона интенсивностей эмиссии 427.8 нм от 0.1 до 2 кРл. Полученные результаты не противоречат и находятся в удовлетворительном согласии с результатами оценок концентрации NO, полученными на основе анализа ионного состава в полярных сияниях, измеренного в ракетных экспериментах [Swider and Narcisi, 1977] и [Sharp, 1978].

Следует также отметить, что полученные в данной работе результаты свидетельствуют об отсутствии прямой корреляции между величиной концентрации окиси азота и интенсивностью свечения эмиссии 427.8 нм, а значит и интенсивностью полярных сияний. На данный факт ранее обращалось внимание и в работе [Gerard and Barth, 1977]. Причину отсутствия такой корреляции можно объяснить большим временем жизни окиси азота, которая может накапливаться в ионосфере.

На рис. 3 представлены рассчитанные высотные профили концентрации окиси азота для каждого найденного значения $[NO]_{\max}$. Профили были рассчитаны с использованием нестационарной физико-химической модели полярной ионосферы [Дашкевич и др., 2017].

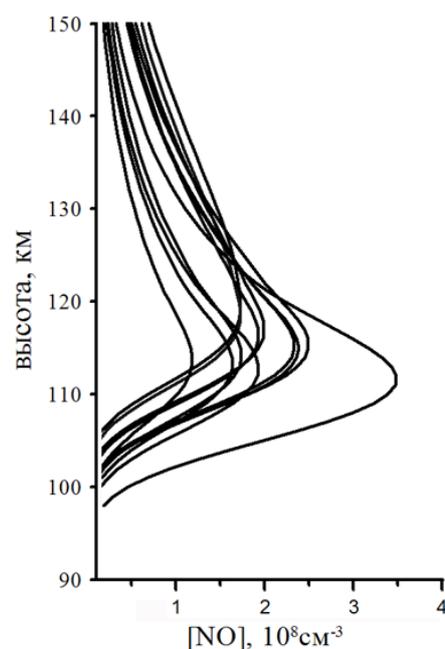


Рисунок 3. Рассчитанные высотные профили [NO]

Выводы

Представлены численные оценки содержания окиси азота NO в области полярных сияний. Модельные расчеты выполнены на основе наземных фотометрических измерений интенсивностей свечения в эмиссиях 427.8, 557.7 и 630.0 нм в полуночном секторе аврорального овала. Показано, что для данных фотометрических наблюдений концентрация NO в максимуме ее высотного профиля $[NO]_{\max}$ лежит в интервале $1 - 3.3 \cdot 10^8$ см⁻³ для полярных сияний с интенсивностью в эмиссии 427.8 нм в интервале от 0.1 до 2 кРл. Не обнаружена прямая корреляция величины концентрации окиси азота в максимуме высотного профиля $[NO]_{\max}$ с интенсивностями.

Литература

1. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. Оценка концентрации NO в полярных сияниях по интенсивностям эмиссий 391.4, 557.7 и 630.0 нм // Космич. Исслед. Т.55. №5. С. 337–341. 2017
2. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Сергиенко Т.И., Козелов Б.В. Физико-химическая модель авроральной ионосферы // Космич. исслед. Т.55. №2. С.94–106. 2017
3. 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 аэронав. Т. 46. №3. С. 385–389. 2006
4. Eather R.H., Mende S.B. Systematics in auroral energy spectra // J. Geophys. Res. V.77. №4. P. 660–673.1972
5. Gerard J.-C., Barth C.A. High-latitude nitric oxide in the lower thermosphere // J. Geophys. Res. V.82. №4. 674–680.1977
6. Gerard J.C., Noel C.E. AE-D measurements of the NO geomagnetic latitudinal distribution and contamination by N⁺(²S) emission // J. Geophys. Res. V.91. №A9. P.10136–10140.1986
7. Rees M.H., Luckey D. Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions 1. Model computations // J. Geophys. Res. V.79. №34. P.5181–5186. 1974
8. Rusch D.W., Barth C.A. Satellite measurements of nitric oxide in the polar region // J. Geophys. Res. V.80. №25. P.3719–3721.1975
9. Sharp W.E. NO₂ continuum in aurora // J. Geophys. Res. V.83. №9. P.4373–4376. 1978
10. 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. V.94. №A12. P.16899–16911.1989
11. Swider W., Narcisi R.S. Auroral E-region: Ion composition and nitric oxide // Planet. Space Sci. V.25. №2. P.103–116.1977