

МОДЕЛЬ ВОЗМУЩЕННОЙ ПОЛЯРНОЙ АТМОСФЕРЫ

Ж.В. Дашкевич, В.Е. Иванов, Б.В. Козелов
Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

Аннотация. Представлена физико-химическая модель возбужденной полярной ионосферы, позволяющая рассчитывать концентрации следующих нейтральных и ионизированных компонент: O_2^+ , N_2^+ , $O^+(^4S)$, $O^+(^2D)$, $O^+(^2P)$, $O(^1D)$, $O(^1S)$, $N(^4S)$, $N(^2D)$, $N(^2P)$, NO , NO^+ , N^+ , $N_2(A)$ и концентрацию электронов. Модель составлена на основе имеющихся литературных данных и включает в себя 57 физико-химических реакции, оказывающих в полярной ионосфере влияние на концентрации перечисленных компонент. Входными параметрами модели являются энергетический спектр электронов на верхней границе ионосферы и концентрации нейтральных составляющих. Модель ионосферы апробированы на результатах координированного ракетно-спутникового эксперимента [Rees et al., 1977].

Введение

Проводимые на протяжении многих десятилетий наземные, спутниковые и ракетные спектрометрические измерения полярных сияний содержат большое количество информации о процессах, происходящих в верхней атмосфере во время высыпаний авроральных частиц. Ранее эти данные использовались только для восстановления параметров авроральных частиц и концентраций некоторых составляющих верхней атмосферы. С развитием авроральной томографии появилась возможность увидеть пространственно-временное распределение свечения полярных сияний и, имея определенную методику восстановления энергетических спектров по данным томографических экспериментов, можно получать информацию о пространственной динамике характеристик потоков высыпающихся частиц. Решение этой задачи невозможно без численных моделей излучения эмиссий полярных сияний и авроральной ионосферы.

Описание модели

При проникновении в ионосферу заряженные частицы инициируют сложный комплекс физико-химических процессов, в результате которых образуются возбужденные составляющие атмосферы - источники эмиссий полярных сияний. Так эмиссии 630.0 нм и 557.7 нм являются результатом спонтанных излучений возбужденных атомов кислорода $O(^1D)$ и $O(^1S)$. Наиболее интенсивная эмиссия Первой отрицательной системы полос возникает вследствие разрешенного дипольного перехода $B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$ в молекуле N_2^+ . В силу того, что некоторые возбужденные атомы и

ионы являются долгоживущими (так, время жизни $O(^1D)$ порядка 110 сек., $O(^1S)$ - порядка 0.74 сек.), они являются активными участниками физико-химических реакций, происходящих в ионосфере. В эти физико-химические реакции вовлечены как атмосферные газы в основном и возбужденном своем состоянии, так и их ионы. Для того, чтобы корректно учесть роль большинства составляющих ионосферы физико-химическом процессе была создана нестационарная по времени физико-химическая модель возбужденной полярной ионосферы, позволяющая рассчитывать концентрации следующих нейтральных и ионизированных компонент: O_2^+ , N_2^+ , $O^+(^4S)$, $O^+(^2D)$, $O^+(^2P)$, $O(^1D)$, $O(^1S)$, $N(^4S)$, $N(^2D)$, $N(^2P)$, NO , NO^+ , N^+ , $N_2(A)$ и концентрацию электронов. Модель составлена на основе имеющихся литературных данных и включает в себя 57 физико-химических реакции, оказывающих в полярной ионосфере влияние на концентрации перечисленных компонент. Входными параметрами данной модели авроральной ионосферы являются энергетический спектр авроральных электронов на верхней границе ионосферы и концентрации нейтральных составляющих атмосферы, рассчитанные по модели MSIS90 для конкретного дня. За верхнюю границу ионосферы в случае модельных расчетов принимается высота 700 км, а в случае анализа экспериментальных данных высота спутника, на котором измерялся спектр авроральных частиц. Пространственный перенос не учитывается, поэтому модель действительна для E и нижней F областей ионосферы. Модель позволяет рассчитывать как высотные профили излучения основных авроральных эмиссий, таких как интенсивности эмиссий 557.7 нм и 630.0 нм атомарного кислорода, 391.4 нм Первой отрицательной системы полос, 337.1 нм Второй положительной системы и 320.0 нм системы Вегарда-Каплана молекулярного азота, так и интегральную интенсивность свечения этих эмиссий в надире.

Данная модель возмущенной полярной ионосферы нестационарна по времени. В основе модели лежит решение системы нестационарных одномерных уравнений неразрывности для всех 14 входящих в модель составляющих ионосферы:

$$\frac{dN_i(h,t)}{dt} = Q_i(h,t) - L_i(h,t),$$

где N_i - концентрация i -ой составляющей атмосферы, Q_i -скорость образования, L_i скорость потерь i -ой составляющей.

В условиях полярных сияний значительный вклад в скорость образования большинства учитываемых компонент вносит процесс прямой удара. Расчет скорости этого процесса является важной особенностью, отличающей эту модель от моделей других авторов. Функционал для расчета высотного распределения скоростей образования возбужденных компонент ионосферы описан в работах [Иванов и Сергиенко, 1992, *Sergienko and Ivanov*, 1993]:

$$Q_i(h) = P_Y(h) \rho(h) \frac{1}{\varepsilon_{iY}(h)} \int_{E_0}^{E_0 F(E_0) [1 - T_E(E_0)]} \frac{\lambda(E_0, \chi) dE_0}{R(E_0)}$$

где: $P_Y(h)$ – доля энергии, пошедшая на возбуждение атмосферного газа сорта Y , $\rho(h)$ – плотность атмосферы, $\varepsilon_{iY}(h)$ – энергетическая цена возбуждения i -составляющей, E_0 – начальная

энергия электрона, $F(E_0)$ – начальный энергетический спектр высыпавшихся электронов, $T_E(E_0)$ – величина альbedo-потока, $R(E_0)$ – интегральная длина пробега, $\lambda(E_0, \chi)$ – функция диссипации энергии. Энергетическая цена возбуждения i -составляющей $\varepsilon_{iY}(h)$ слабо зависит как от характеристик авроральных электронов, так и от глубины проникновения потоков электронов в атмосферу Земли.

Кроме прямого электронного удара малые составляющие авроральной атмосферы образуются и теряются в результате химических реакций соударения или при радиационных переходах в случае частиц, находящихся в возбужденном состоянии. В Табл. 1 представлены учитываемые в модели реакции и константы их скоростей.

Таблица 1

№	Реакция	Коэффициент скорости реакции, $\text{см}^3\text{с}^{-1}$
1	$N_2^+ + O_2 \rightarrow N_2 + O_2^+$	$k_1 = 5 \cdot 10^{-11} \cdot (300/T_i)^{0.8}$
2	$N_2^+ + O \rightarrow N_2 + O^+(^4S)$	$k_2 = 9.8 \cdot 10^{-12} \cdot (300/T_i)^{0.23}$
3	$N_2^+ + O \rightarrow NO^+ + N(^2D)$	$k_3 = 1.4 \cdot 10^{-10} \cdot (300/T_i)^{0.44} - k_2, f_{2D} = 0.9$
4	$N_2^+ + NO \rightarrow N_2 + NO^+$	$k_4 = 3.3 \cdot 10^{-10}$
5	$N_2^+ + e \rightarrow N(^4S) + N(^2D)$	$k_5 = 3.5 \cdot 10^{-7} \cdot (300/T_e)^{0.5}, f_{4S} = 0.1, f_{2D} = 1.9$
6	$O_2^+ + e \rightarrow O(^1S) + O(^1D)$	$k_6 = 1.9 \cdot 10^{-7} \cdot (300/T_e)^{0.5}, f_{1D} = 1.2, f_{1S} = 0.1$
7	$O_2^+ + N(^4S) \rightarrow NO^+ + O(^1S)$	$k_7 = 1.2 \cdot 10^{-10} f_{1S} = 0.2$
8	$O_2^+ + NO \rightarrow NO^+ + O_2$	$k_8 = 4.4 \cdot 10^{-10}$
9	$O^+(^4S) + N_2 \rightarrow NO^+ + N(^4S)$	$k_9 = 1.533 \cdot 10^{-12} - 5.92 \cdot 10^{-13} \cdot (T_i/300) + 8.6 \cdot 10^{-14} \cdot (T_i/300)^2$
10	$O^+(^4S) + O_2 \rightarrow O_2^+ + O$	$k_{10} = 2.82 \cdot 10^{-11} - 7.74 \cdot 10^{-12} \cdot (T_i/300) + 1.073 \cdot (T_i/300)^2 - 5.17 \cdot 10^{-14} \cdot (T_i/300)^3 + 9.65 \cdot 10^{-16} \cdot (T_i/300)^4$
11	$O^+(^2D) + N_2 \rightarrow N_2^+ + O$	$k_{11} = 7.2 \cdot 10^{-10}$
12	$O^+(^2D) + N_2 \rightarrow NO^+ + N(^4S)$	$k_{12} = 8 \cdot 10^{-11}$
13	$O^+(^2D) + O_2 \rightarrow O_2^+ + O$	$k_{13} = 6.3 \cdot 10^{-10}$
14	$O^+(^2D) + O_2 \rightarrow O^+(^4S) + O_2$	$k_{14} = 7 \cdot 10^{-11}$
15	$O^+(^2D) + O \rightarrow O^+(^4S) + O$	$k_{15} = 1 \cdot 10^{-11}$
16	$O^+(^2D) + e \rightarrow O^+(^4S) + e$	$k_{16} = 6.6 \cdot 10^{-8} \cdot (300/T_e)^{0.5}$
17	$O^+(^2D) \rightarrow O^+(^4S) + h\nu$	$A_{17} = 0.97 \cdot 10^{-4}$
18	$O^+(^2P) + N_2 \rightarrow O^+(^4S) + N_2$	$k_{18} = 4 \cdot 10^{-10}$
19	$O^+(^2P) + N_2 \rightarrow N_2^+ + O$	$k_{19} = 5 \cdot 10^{-11}$

20	$O^+(^2P)+O \rightarrow O^+(^4S)+O$	$k_{20} = 5 \cdot 10^{-11}$
21	$O^+(^2P)+O_2 \rightarrow O_2^+ + O$	$k_{21} = 4.8 \cdot 10^{-10}$
22	$O^+(^2P) \rightarrow O^+(^2D)+h\nu$	$A_{22} = 0.171$
23	$O^+(^2P) \rightarrow O^+(^4S)+h\nu$	$A_{23} = 0.048$
24	$O^+(^2P)+e \rightarrow O^+(^2D)+e$	$k_{24} = 1.4 \cdot 10^{-7} \cdot (300/T_e)^{0.5}$
25	$O^+(^2P)+e \rightarrow O^+(^4S)+e$	$k_{25} = 4.4 \cdot 10^{-8} \cdot (300/T_e)^{0.5}$
26	$O(^1D)+N_2 \rightarrow O+N_2$	$k_{26} = 2 \cdot 10^{-11} \cdot \exp(107.8/T_n)$
27	$O(^1D)+O_2 \rightarrow O+O_2$	$k_{27} = 2.9 \cdot 10^{-11} \cdot \exp(67.5/T_n)$
28	$O(^1D)+O \rightarrow O+O$	$k_{28} = 8 \cdot 10^{-12}$
29	$O(^1D) \rightarrow O+h\nu$	$A_{29} = 9.3 \cdot 10^{-3}$
30	$O(^1D)+e \rightarrow O+e$	$k_{30} = 1.6 \cdot 10^{-12} \cdot T_e^{0.91}$
31	$O(^1S)+O \rightarrow O+O$	$k_{31} = 2 \cdot 10^{-14}$
32	$O(^1S) \rightarrow O(^1D)+h\nu$	$k_{32} = 1.06$
33	$O(^1S) \rightarrow O+h\nu$	$k_{33} = 0.045$
34	$O(^1S)+O_2 \rightarrow O+O_2$	$k_{34} = 4 \cdot 10^{-12} \cdot \exp(-860/T_n)$
35	$O(^1S)+NO \rightarrow O+NO$	$k_{35} = 5.5 \cdot 10^{-13}$
36	$N(^4S)+O_2 \rightarrow NO+O$	$k_{36} = 4.4 \cdot 10^{-12} \exp(-3600/T_n)$
37	$N(^4S)+NO \rightarrow N_2+O$	$k_{37} = 3.4 \cdot 10^{-11}$
38	$N(^2D)+O_2 \rightarrow NO+O(^3P,^1D)$	$k_{38} = 6 \cdot 10^{-12}, f_{^1D} = 0.1$
39	$N(^2D)+O \rightarrow N(^4S)+O(^3P,^1D)$	$k_{39} = 6.9 \cdot 10^{-13}, f_{^1D} = 0.1$
40	$N(^2D)+NO \rightarrow N_2+O$	$k_{40} = 6.7 \cdot 10^{-11}$
41	$N(^2D)+NO \rightarrow N(^4S)+NO$	$k_{41} = 6.3 \cdot 10^{-11}$
42	$N(^2D)+e \rightarrow N(^4S)+e$	$k_{42} = 5.5 \cdot 10^{-10} \cdot (T_e/300)^{0.5}$
43	$N(^2D) \rightarrow N(^4S)+h\nu$	$A_{43} = 1.07 \cdot 10^{-5}$
44	$N(^2P)+O_2 \rightarrow NO+O(^1S,^1D,^3P)$	$k_{44} = 3.5 \cdot 10^{-12} (2.2 \cdot 10^{-12}), f_{^1S^1D^3P} = 0.33$
45	$N(^2P)+O \rightarrow N(^2D)+O$	$k_{45} = 1 \cdot 10^{-11} (1.7 \cdot 10^{-11})$
46	$N(^2P) \rightarrow N(^2D)+h\nu$	$A_{46} = 5.4 \cdot 10^{-3}$
47	$N(^2P) \rightarrow N(^4S)+h\nu$	$A_{47} = 7.9 \cdot 10^{-2}$
48	$NO^+ + e \rightarrow O+N(^4S,^2D)$	$k_{48} = 2.3 \cdot 10^{-7} \cdot (300/T_e)^{0.5}, f_{^4S} = 0.24, f_{^2D} = 0.76$
49	$N^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + N(^4S,^2D)$	$k_{49} = 3 \cdot 10^{-10}, f_{^4S} = 0.8, f_{^2D} = 0.2$
50	$N^+ + O_2 \rightarrow NO^+ + O(^1D,^1S)$	$k_{50} = 2.6 \cdot 10^{-10}, f_{^1D} = 0.7, f_{^1S} = 0.01$
51	$N^+ + O_2 \rightarrow O^+(^4S)+NO$	$k_{51} = 4 \cdot 10^{-11}$

52	$N^+ + O \rightarrow O^+(^4S) + N(^4S)$	$k_{52} = 1 \cdot 10^{-12}$
53	$O^+(^4S) + NO \rightarrow NO^+ + O$	$k_{53} = 8.36 \cdot 10^{-13} - 2.02 \cdot 10^{-13} \cdot (T_i/300) + 6.95 \cdot (T_i/300)^2$
54	$N_2(A^3\Sigma_u^+) + O \rightarrow N_2 + O(^1S)$	$k_{54} = (2.8 + 0.8861g\nu) \cdot 10^{-11}$ $f_{1S} = 0,55, 0,12, 0,16, 0,26, 0,13, 0,16, 0,23, 0,16, 0,12$
55	$N_2(A^3\Sigma_u^+) + O_2 \rightarrow$	$k_{55} = (2.57 + 2.391g\nu) \cdot 10^{-12}$
56	$N_2(A^3\Sigma_u^+) + N_2 \rightarrow N_2 + N_2(B^3\Pi_g)$	$k_{56} = 3.7 \cdot 10^{-16}, 3.1 \cdot 10^{-16}, 5 \cdot 10^{-15}, 3.8 \cdot 10^{-14}, 1.3 \cdot 10^{-13}, 2.6 \cdot 10^{-13}, 5 \cdot 10^{-13}, 2.3 \cdot 10^{-12}, 3.2 \cdot 10^{-12}$
57	$N_2(A^3\Sigma_u^+) \rightarrow N_2 + h\nu$	$A_{57} = 0.422, 0.377, 0.347, 0.323, 0.309, 0.301, 0.302, 0.254, 0.251$

f_{1S} -выход $O(^1S)$ в указанной реакции

Результаты моделирования

Модель возмущенной полярной ионосферы была апробирована на результатах координированного ракетно-спутникового эксперимента, описанного в работах [Rees et al., 1977] и [Sharp et al., 1979]. В этом эксперименте одновременно на спутнике АЕ-С и ракете, запущенной в область стабильной дуги полярного сияния, были измерены: спектр авроральных электронов; концентрации атмосферных газов N_2 , O_2 и O ; концентрации ионов N_2^+ , O_2^+ и O^+ , интенсивности эмиссий 557.7 нм и 630.0 нм атомарного кислорода, 391.4 нм. Первой отрицательной системы полос, 337.1 нм. Второй положительной системы и 320.0 нм системы Вегарда-Каплана молекулярного азота.

На рис. 1 и рис. 2 представлены профили концентрации ионов N_2^+ , O_2^+ , O^+ , NO^+ и концентрация электронов и профили

интенсивностей эмиссий 557.7 нм, 630.0 нм 391.4 нм, 337.1 нм и 320.0 нм, рассчитанные по данной модели и измеренные в эксперименте. В качестве модели нейтральной атмосферы выбрана MSIS-90. Концентрации атомарного и молекулярного кислорода, а также концентрация молекулярного азота нейтральной атмосферы были скорректированы в соответствии с измеренным в эксперименте. В качестве первичного спектра электронов как входного параметра модели был использован спектр, измеренный непосредственно в эксперименте на спутнике АЕ [Rees et al., 1977].

Хорошее согласие рассчитанных и экспериментальных величин позволяет сделать вывод о том, что данная модель хорошо описывает процессы в верхней атмосфере Земли в условиях полярных сияний.

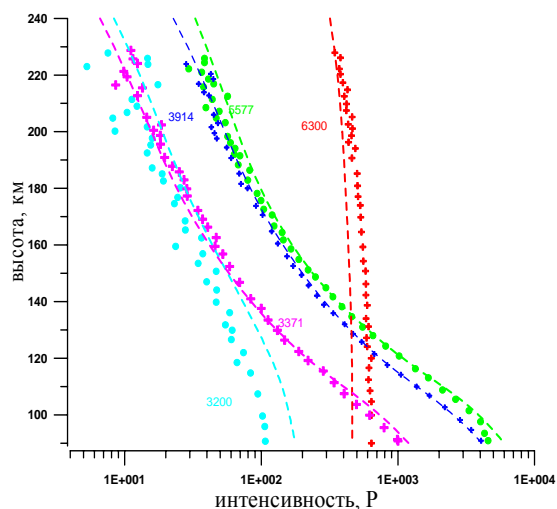


Рисунок 1. Сравнение измеренных и рассчитанных интегральных интенсивностей оптических эмиссий

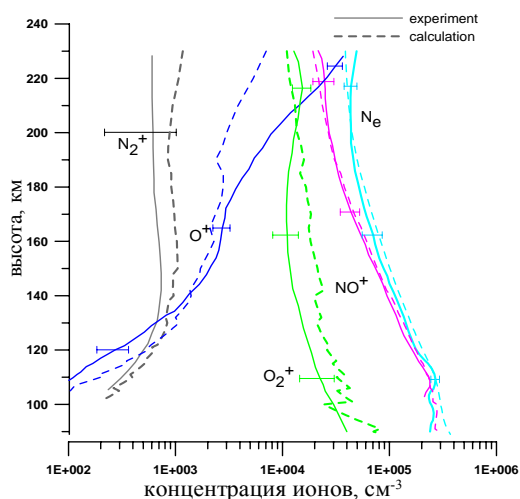


Рисунок 2. Сравнение измеренных и рассчитанных концентраций ионов

Литература

- Rees M.H., Stewart A.I., Sharp W.E., Hays P.B., Hoffman R.A., Brace L.H., Doering J.P., Peterson W.K. Coordinated rocket and satellite measurements of an auroral event, 1, Satellite observation and analysis // *J. Geophys. Res.* V.82. №16. P.2250-2261. 1977.
 Sharp W.E., Rees M.H., Stewart A.I. Coordinated rocket and satellite measurements of an auroral events 2. The rocket observations and analysis // *J. Geophys. Res.* V.84. №A5. P.1977-1985. 1979
 Иванов В.Е., Сергиенко Т.И. Взаимодействие авроральных электронов с атмосферными газами // С.-П. 1992. 144 с.