

**ДИАГНОСТИКА ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ
И ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЯХ
ПО ДАННЫМ ЭМПИРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВЫСЫПАНИЙ**

**DIAGNOSTICS OF EMISSION INTENSITIES AND ELECTRON DENSITY
IN AURORAS BASED ON EMPIRICAL PRECIPITATION MODELS**

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

Аннотация. Исследовано влияние формы спектра потока высыпающихся электронов на интегральную интенсивность эмиссий $\lambda 391.4$ нм 1NG N_2^+ , $\lambda 670.4$ нм 1PG N_2 , $\lambda 337.1$ нм 2PG N_2 , $\lambda 320.0$ нм VKN $_2$, $\lambda 127.3$ нм LBH N_2 , эмиссий атомарного кислорода $\lambda 557.7$ и $\lambda 630.0$ нм и полное электронное содержание в вертикальном столбе полярного сияния. Показано, что интегральные характеристики интенсивности излучения и полного содержания электронной концентрации слабо зависят от вида энергетического спектра и определяются в основном значениями средних энергий E_{cp} и величиной потока энергии F_E высыпающихся электронов. Предложен алгоритм диагностики планетарного распределения интенсивностей свечения и электронной концентрации в полярных сияниях по данным эмпирических моделей электронных высыпаний без априорных предположений о виде энергетического спектра потока высыпающихся электронов.

Ключевые слова: полярные сияния, электронные высыпания, эффективность возбуждения, авроральные эмиссии, электронная концентрация, планетарное распределение.

Abstract. We have studied the influence of the precipitating electron spectrum shape on the integral intensity of emissions $\lambda 391.4$ nm 1NG N_2^+ , $\lambda 670.4$ nm 1PG N_2 , $\lambda 337.1$ nm 2PG N_2 , $\lambda 320.0$ nm VK N_2 , $\lambda 127.3$ nm LBH N_2 , atomic oxygen emissions $\lambda 557.7$ and $\lambda 630.0$ nm, total electron content in the vertical column of aurora. The integral characteristics of the emission intensity and the total electron content are shown to weakly depend on the energy spectrum shape and to be determined mainly by average energy values E_{ev} and energy flux value F_E of precipitating electrons. An algorithm is proposed for diagnosing the planetary distribution of emission intensities and total electron content in auroras based on data from empirical electron precipitation models, without making a priori assumptions about the shape of the energy spectrum of precipitating electrons.

Keywords: auroras, electron precipitation, excitation efficiency, auroral emissions, electron density, planetary distribution.

ВВЕДЕНИЕ

В вопросах диагностики и прогноза состояния возмущенной полярной ионосферы одно из центральных мест занимает задача прогнозирования планетарного распределения интенсивностей полярных сияний в различных спектральных интервалах и электронной концентрации в периоды магнитосферных возмущений. Попытки создания глобальных моделей аврорального свечения были предприняты в работах [Иванов и др., 1993; Воробьев и др., 2013]. Экспериментальной основой проведения данных исследований послужили эмпирические модели высыпаний, представляющие собой пространственное распределение средних энергий и потока энергии высыпающихся электронов для разных уровней магнитной активности. В работе [Иванов и др., 1993] для вычислений интегральных интенсивностей свечения авроральных эмиссий авторы использовали эмпирическую модель планетарного распределения элек-

тронных высыпаний, предложенную в работе [Spiro et.al, 1982]. Расчеты интенсивностей свечения проводились в предположении, что энергетический спектр потока высыпающихся электронов имеет экспоненциальный характер. В работе [Воробьев и др., 2013] для вычислений интегральных интенсивностей свечения авторы использовали модель авроральных высыпаний, представленную в работах [Воробьев, Ягодкина, 2005, 2007]. Расчеты интенсивностей свечения проводились в предположении, что энергетический спектр потока высыпающихся электронов имеет максвелловское распределение. В обеих работах для проведения расчетов авторы делали априорное предположение о виде энергетического спектра потока высыпающихся электронов.

В данной работе представлены описание и обоснование методики, позволяющей построить эффективные алгоритмы расчета планетарного распределения интенсивностей свечения в полярных сияниях и электронной концентрации, не делая предположе-

ний о виде энергетического спектра потока высыпавшихся электронов, а используя только величины представленных в эмпирических моделях авроральных высыпаний средних энергий и потоков энергий высыпавшихся электронов, [Spiro et al., 1982; Hardy et al., 1985; Vorobjev et al., 2013].

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Рассмотрим влияние параметров потока высыпавшихся электронов на интегральную интенсивность эмиссий и величину электронной концентрации в вертикальном столбе полярных сияний. Под параметрами потока будем понимать вид энергетического спектра, поток энергии и среднюю энергию высыпавшихся электронов. Введем понятие эффективности возбуждения оптической эмиссии, определяемую как отношение интегральной интенсивности излучения с длиной волны λ к полному потоку энергии высыпавшихся электронов $\Phi_\lambda = I_\lambda / F_E$, где I_λ — интегральная интенсивность эмиссии, измеряемая в рэлях; F_E — поток энергии высыпавшихся электронов ($\text{эрг}\cdot\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$).

Таким образом, эффективность возбуждения оптической эмиссии равна величине интегральной интенсивности излучения, обусловленной высыпанием электронов с потоком энергии, равным 1 $\text{эрг}\cdot\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Интегральная интенсивность соответствует суммарной интенсивности в вертикальном столбе полярного сияния и может быть рассчитана из высотного профиля объемной интенсивности излучения $I_\lambda = \int_h Q_\lambda(h)dh$, где $Q_\lambda(h)$ — величина объемной интенсивности излучения с длиной волны λ на высоте h ($\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$).

Аналогичным образом определим эффективность формирования полного электронного содержания в столбе полярного сияния $\Phi_e = N_e / F_E$, $N_e = \int_h n_e(h)dh$, где N_e — полное электронное содержание, см^{-2} ; $n_e(h)$ — концентрация электронов на высоте h (см^{-3}).

Таким образом, эффективность формирования полного электронного содержания равна полному электронному содержанию в столбе полярного сияния, обусловленному высыпанием электронов с потоком энергии 1 $\text{эрг}\cdot\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Расчеты интенсивностей эмиссий и электронной концентрации проводились в рамках физико-химической модели возбужденной полярной ионосферы. Модель, представленная в работе [Дашкевич и др., 2017], позволяет рассчитывать высотные профили концентрации 17 основных возбужденных и ионизированных компонент атмосферных газов и электронную концентрацию во время авроральных высыпаний. Входными параметрами этой модели являются энергетический спектр высыпавшихся электронов на верхней границе ионосферы и модель нейтральной атмосферы. Перераспределение энергии, выделившейся вследствие высыпаний электронов, описывают 56 физико-химических реакций. Кроме того, модель включает в себя корректный учет элек-

тронно-колебательной кинетики в процессах возбуждения триплетных состояний N_2 . Высотные профили скоростей образования возбужденных компонент атмосферных газов рассчитывались с использованием функции диссипации энергии и «энергетических цен», полученных на основе результатов моделирования процесса переноса электронов в атмосферных газах [Иванов, Козелов, 2001; Sergienko, Ivanov, 1993].

Для моделирования интенсивностей излучения были выбраны наиболее характерные и интенсивные полосы, наблюдаемые в полярных сияниях, а именно, эмиссия $\lambda 391.4$ нм Первой отрицательной системы полос 1NG N_2^+ , эмиссия $\lambda 670.4$ нм Первой положительной системы полос 1PG N_2 , эмиссия $\lambda 337.1$ нм Второй положительной системы полос 2PG N_2 , эмиссия $\lambda 320.0$ нм системы полос Вегарда—Каплана VK N_2 , эмиссия $\lambda 127.3$ нм системы полос Лаймана—Берджа—Хопфилда LBH N_2 , эмиссии атомарного кислорода $\lambda 557.7$ и $\lambda 630.0$ нм. Оптические переходы, соответствующие выбранным эмиссиям, приведены в таблице.

Электронная концентрация рассчитывалась при условии термодинамического равновесия как сумма концентрации ионов на высоте h :

$$n_e = [N_2^+] + [O_2^+] + [O^+(^4S)] + [O^+(^4D)] + [O^+(^4P)] + [NO^+] + [N^+].$$

Расчеты проводились в модели нейтральной атмосферы MSIS-E-90 [Hedin, 1991], данные взяты с веб-сайта [https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/msis_vitmo.php]. Источник электронов помещался на высоте 700 км.

Для исследования влияния формы спектра на эффективности возбуждения эмиссий и формирования электронной концентрации в качестве входных параметров выбраны энергетические спектры потока высыпавшихся электронов трех видов: моноэнергетический, поток с экспоненциальным распределением по энергиям и поток с максвелловским распределением по энергиям:

$$\begin{aligned} f(E) &= F_E \delta(x - E), \\ f(E) &= \frac{F_E}{E_0^2} \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right), \\ f(E) &= \frac{F_E}{2E_0^3} E \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right). \end{aligned} \quad (1)$$

Распределения этих трех видов и их комбинации описывают наблюдаемые в полярных сияниях спектры высыпавшихся электронов.

На рис. 1 показаны спектры с максвелловским и экспоненциальным распределениями по энергиям для различных средних энергий высыпавшихся электронов, $F_E = 1 \text{ эрг}\cdot\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Распределение по питч-углам задавалось изотропным в нижней полусфере. Расчеты проводились для средних энергий в диапазоне 0.1–20 кэВ, который является типичным для авроральных электронов, возбуждающих полярные сияния [Spiro et al., 1982; Hardy et al., 1985, 1987; Vorobjev et al., 2013].

Оптические переходы эмиссий полярных сияний

Переходы O			λ , нм
$^1S \rightarrow ^1D$			557.7
$^1D \rightarrow ^3P$			630.0
Переходы N ₂			
1PG $B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+$	ν'	ν''	λ , нм
	5	2	670.4
2PG $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$	0	0	337.1
VK $A^3\Sigma_g^+ \rightarrow X^1\Sigma_g^+$	1	9	320.0
LBN $a^1\Pi_g \rightarrow X^1\Sigma_g^+$	6	0	127.3
Переходы N ₂ ⁺			
1NG $B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$	0	0	391.4

ν' , ν'' — колебательные числа верхнего и нижнего состояния соответственно.

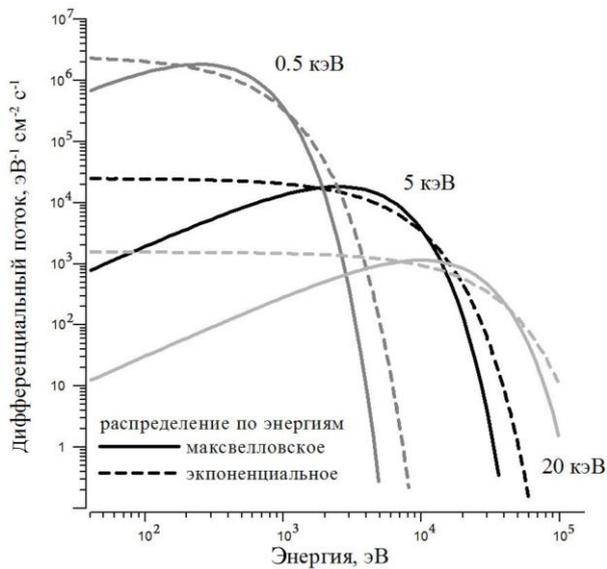


Рис. 1. Энергетические спектры с максвелловским и экспоненциальным распределениями по энергиям (1) для различных средних энергий высыпающихся электронов

РЕЗУЛЬТАТЫ

Эмпирические модели авроральных высыпаний включают в себя планетарное распределение потоков энергии и средних энергий высыпающихся электронов. Исследуем зависимость эффективности возбуждения оптических эмиссий Φ_λ и эффективности формирования полного электронного содержания Φ_e от средней энергии потока высыпающихся электронов E_{cp} .

Эмиссии первой отрицательной системы полос молекулярного азота возникают только благодаря прямому возбуждению электронным ударом, следовательно, они могут служить эффективным инструментом оценки процессов энергообмена между магнитосферой и ионосферой. На рис. 2 показаны рассчитанные зависимости эффективности возбуждения эмиссии 1NG N₂⁺ λ 391.4 нм от средней энергии высыпающихся электронов E_{cp} для энергетических спектров авроральных электронов трех видов (1). Видно,

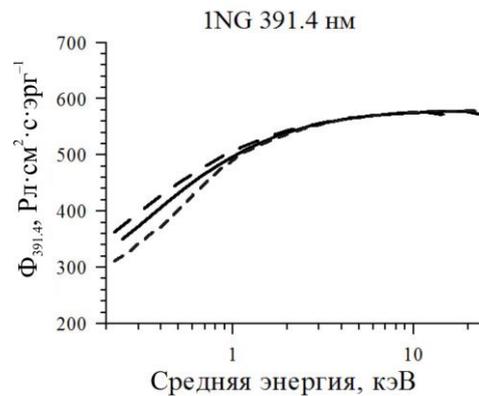


Рис. 2. Эффективность возбуждения эмиссии λ 391.4 нм, рассчитанная для трех видов спектра высыпающихся электронов: длинные штрихи — поток с экспоненциальным распределением; короткие штрихи — моноэнергетический поток; сплошная линия — поток с максвелловским распределением (1)

что отношение интегральной интенсивности излучения эмиссии λ 391.4 нм к энергии, вносимой в ионосферу авроральными электронами, слабо зависит от вида начального дифференциального потока частиц (1). Максимальное отклонение $\Phi_{391.4}$ от среднего значения в рассматриваемом диапазоне средней энергии электронов не превышает 8 %.

На рис. 3 показаны зависимости эффективности от средней энергии высыпающихся электронов $\Phi_\lambda(E_{cp})$, рассчитанные для эмиссий λ 670.4 нм 1PG N₂, λ 337.1 нм 2PG N₂, λ 320.0 нм VK N₂ и λ 127.3 нм LBN N₂. В отличие от эмиссии λ 391.4 нм, в возбуждение перечисленных выше эмиссий кроме прямого удара вносят вклад процессы перераспределения энергии в результате химических реакций [Дашкевич и др., 2017]. Видно, что для данных эмиссий также наблюдается слабая зависимость $\Phi_\lambda(E_{cp})$ от вида энергетического спектра потока высыпающихся электронов. Максимальные отклонения наблюдаются только для эмиссии VK N₂ λ 320.0 нм, возбуждение которой сильно зависит от физико-химических процессов переноса энергии. Максимальное отклонение $\Phi_{320.0}$ от среднего значения не превышает 12 %.

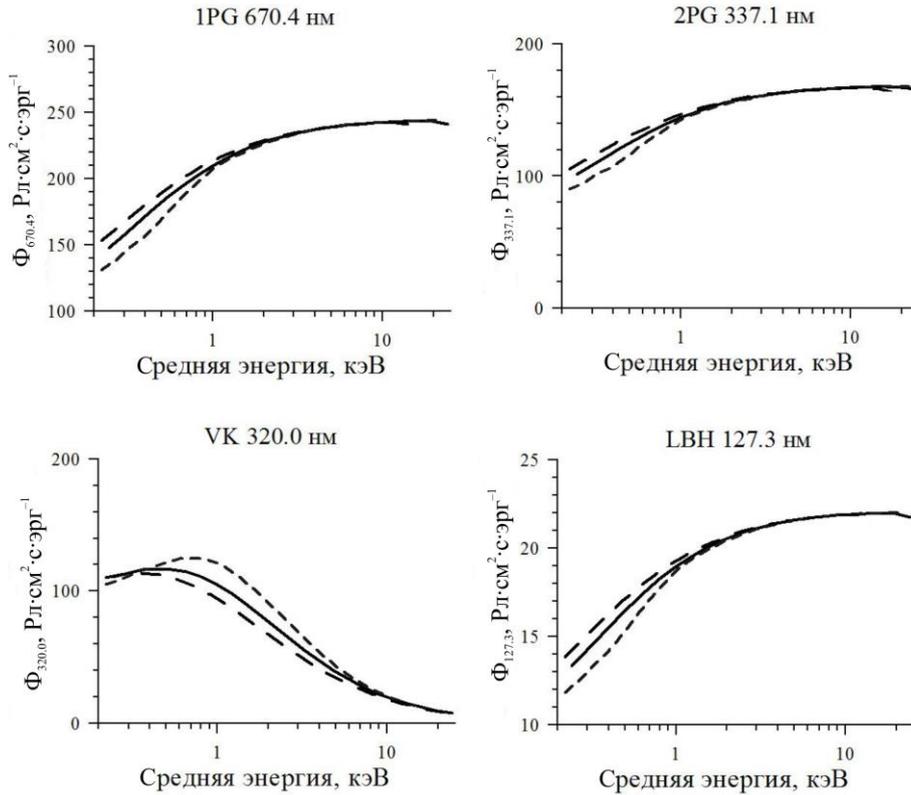


Рис. 3. Эффективности возбуждения эмиссий молекулярного азота, рассчитанные для трех видов спектра высыпавшихся электронов: длинные штрихи — экспоненциальное распределение; короткие штрихи — моноэнергетический поток; сплошная линия — максвелловское распределение (1)

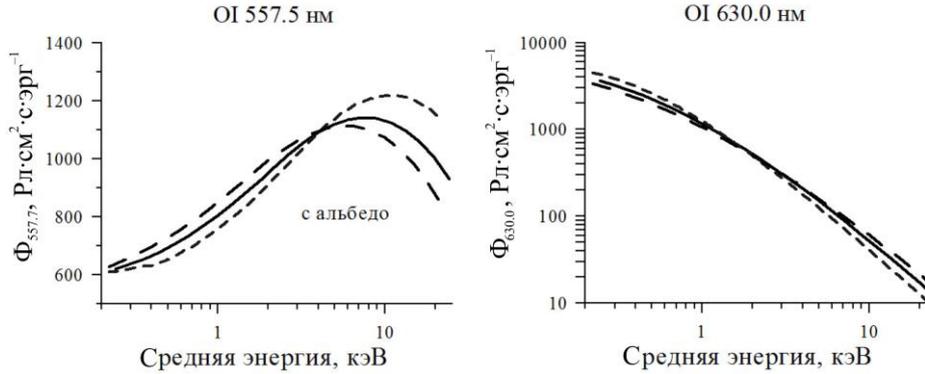


Рис. 4. То же для эмиссий возбужденного атомарного кислорода

На рис. 4 показаны зависимости $\Phi_{\lambda}(E_{cp})$ для эмиссий возбужденного атомарного кислорода $\lambda 557.7$ и $\lambda 630.0$ нм, в возбуждение которых также значительный вклад вносят процессы перераспределения энергии, происходящие посредством физико-химических реакций, вызванных электронными высыпаниями в атмосферу [Дашкевич, Иванов, 2018]. Видно, что эффективности возбуждения этих эмиссий атомарного кислорода $\Phi_{557.7}$ и $\Phi_{630.0}$ также слабо зависят от вида энергетического спектра потока высыпавшихся электронов, максимальное отклонение от среднего значения не более 10 %.

Слабая зависимость $\Phi_{\lambda}(E_{cp})$ от вида энергетического спектра потока высыпавшихся электронов позволяет в алгоритмах, реализующих прогноз планетарного распределения интенсивности излучения в полярных сияниях на основе эмпирических моде-

лей авроральных высыпания, использовать функциональную связь

$$I_{\lambda} = F_E \Phi_{\lambda}(E_{cp}), \tag{2}$$

где I_{λ} — интегральная интенсивность излучения эмиссии с длиной волны λ ; F_E и E_{cp} — поток энергии и средняя энергия электронов, представленных в эмпирических моделях авроральных высыпаний. Величина $\Phi_{\lambda}(E_{cp})$ определяется как усредненное значение соответствующих кривых на рис. 1–3.

Кроме прогноза планетарного распределения интенсивностей излучения в оптическом диапазоне значительный интерес представляет прогноз полного электронного содержания в столбе полярного сияния. На рис. 5 показана зависимость эффективности формирования электронной концентрации $\Phi_e(E_{cp})$ от сред-

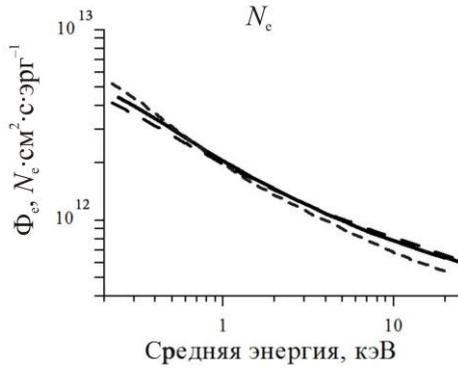


Рис. 5. Эффективность формирования полного электронного содержания в столбе полярного сияния, рассчитанная для трех видов спектра высыпающихся электронов: длинные штрихи — экспоненциальное распределение; короткие штрихи — моноэнергетический поток; сплошная линия — максвелловское распределение (1)

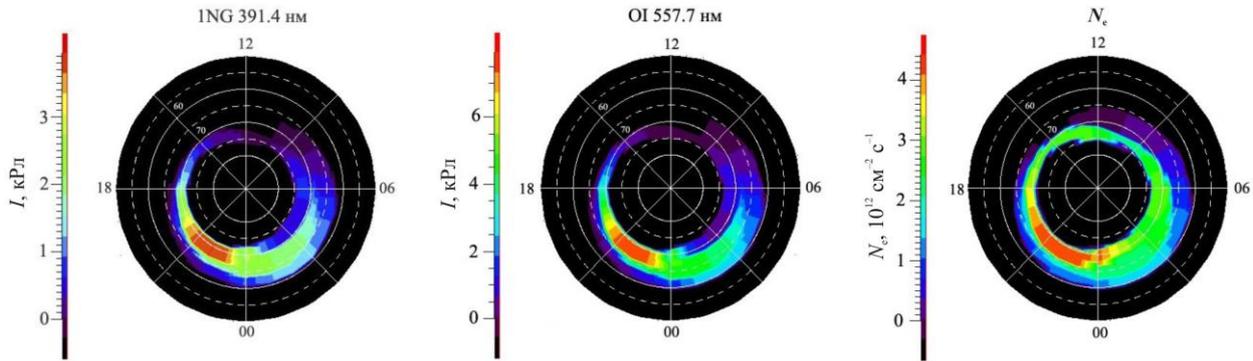


Рис. 6. Планетарные распределения интенсивностей эмиссий λ 391.4 и λ 557.7 нм и электронной концентрации в столбе полярного сияния ($AL=-300$, $Dst=-5$)

ней энергии высыпающихся электронов, рассчитанная для трех видов энергетического спектра потока высыпающихся электронов (1). Можно видеть, что максимальные отклонения Φ_e от среднего значения не превышают 5 % в рассмотренном диапазоне средних энергий высыпающихся электронов 0.1–20 кэВ. Следовательно, для расчетов планетарного распределения электронной концентрации в столбе полярного сияния можно использовать функциональную связь, аналогичную (2),

$$N_e = F_E \Phi_e (E_{cp}),$$

где N_e — полное электронное содержание в вертикальном столбе полярного сияния, F_E и E_{cp} — поток энергии и средняя энергия электронов.

На рис. 6 показаны примеры планетарного распределения интенсивностей эмиссий λ 391.4 и λ 557.7 нм и электронной концентрации в столбе полярного сияния, рассчитанные с использованием предложенной методики по данным эмпирической модели авроральных электронных высыпаний [Vorobjev et al., 2013] для умеренной авроральной активности $AL=-300$, $Dst=-5$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулировано понятие эффективности возбуждения оптической эмиссии Φ_λ , которая определяется как отношение интегральной интенсивности излучения с длиной волны λ к полному потоку энер-

гии высыпающихся электронов, и по аналогии — эффективности формирования полного содержания электронной концентрации в столбе полярного сияния Φ_e . Исследовано влияние параметров потока высыпающихся электронов, а именно, формы спектра и средней энергии, на эффективности возбуждения эмиссий λ 391.4 нм Первой отрицательной системы полос N_2^+ , λ 670.4 нм Первой положительной системы полос N_2 , λ 337.1 нм Второй положительной системы полос N_2 , λ 320.0 нм системы полос Вегарда—Каплана N_2 , эмиссии λ 127.3 нм системы полос Лаймана—Берджа—Хопфилда N_2 , эмиссий атомарного кислорода λ 557.7 и λ 630.0 нм, а также на эффективность формирования полного электронного содержания в вертикальном столбе полярного сияния. Расчеты Φ_λ и Φ_e проводились для трех видов энергетического спектра авроральных электронов: моноэнергетического, экспоненциального и потока с максвелловским распределением. Средняя энергия электронов варьировала в диапазоне 0.1–20 кэВ, который является типичным для авроральных высыпаний. Показано, что эффективности Φ_λ и Φ_e слабо зависят от вида энергетического спектра и определяются в основном значениями средних энергий E_{cp} потока высыпающихся электронов. Рассчитанные зависимости Φ_λ и Φ_e от средних энергий позволяют построить эффективные алгоритмы расчета планетарного распределения интенсивности содержания концентрации в полярных сияниях по данным эмпири-

ческих моделей электронных высыпаний, не делая априорных предположений о виде энергетического спектра потока высыпавшихся электронов.

Авторы благодарны старшему научному сотруднику ПГИ Ягодкиной О.И. за предоставление данных о потоках и средних энергиях эмпирической модели высыпаний [Vorobjev et al., 2013] и помощь в оформлении статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Влияние магнитной активности на глобальное распределение зон авроральных вторжений. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2005. Т. 45. С. 467–473.

Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Динамика авроральных высыпаний в периода сильных магнитных бурь. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2007. Т. 47. С. 198–205. DOI: [10.1134/S0016793207020065](https://doi.org/10.1134/S0016793207020065).

Воробьев В.Г., Кириллов А.С., Каткалов Ю.В., Ягодкина О.И. Планетарное распределение интенсивности аврорального свечения, полученное с помощью модели авроральных высыпаний. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2013. Т. 53. С. 757–761. DOI: [10.7868/S0016794013060163](https://doi.org/10.7868/S0016794013060163).

Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. Оценка эффективности каналов возбуждения атомов $O(^1S)$ и $O(^1D)$ в полярных сияниях. *Труды Кольского научного центра РАН*. 2018. Т. 5. С. 69–75. DOI: [10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.5](https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.5).

Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Сергиенко Т.И., Козелов Б.В. Физико-химическая модель авроральной ионосферы. *Космические исследования*. 2017. Т. 55. С. 94–106. DOI: [10.7868/S0023420617020029](https://doi.org/10.7868/S0023420617020029).

Иванов В.Е., Козелов Б.В. *Прохождение электронных и протонно-водородных пучков в атмосфере Земли*. Российская академия наук; Кольский научный центр; Полярный геофизический институт. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2001. — 260 с. Апатиты. 2001. 260 с.

Иванов В.Е., Кириллов А.С., Мальков М.В. и др. Границы овала сияний и планетарная модель интенсивности свечения. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1993. Т. 33. С. 80–88.

Hardy D.A., Gussenhoven M.S., Holeman E. A statistical model of the auroral electron precipitation. *J. Geophys. Res.* 1985. Vol. 90. P. 4229.

Hardy D.A., Gussenhoven M.S., Raistrick R., McNeil W.J. Statistical and functional representations of the pattern of auroral energy flux, number flux, and conductivity. *J. Geophys. Res.* 1987. Vol. 92. P. 12275–12294.

Hedin A.E. Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere. *J. Geophys. Res.* 1991. Vol. 96. P. 1159–1172.

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. P. 717–727.

Spiro R.V., Reiff P.H., Maher L.J.Jr. Precipitating electron energy flux and auroral zone conductance — an empirical model. *J. Geophys. Res.* 1982. Vol. 87. P. 8215–8227.

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).

URL: https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/msis_vitmo.php (дата обращения 23 января 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

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).