

УДК 551.510.535

ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЭМИССИЙ И ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЯХ

© 2023 г. В. Е. Иванов¹, Ж. В. Дашкевич¹, *, О. И. Ягодкина¹

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
“Полярный геофизический институт”, Апатиты, Россия

*E-mail: zhanna@pgia.ru

Поступила в редакцию 17.09.2022 г.

После доработки 05.10.2022 г.

Принята к публикации 26.10.2022 г.

Показано, что эффективности возбуждения авроральных эмиссий $\lambda = 391.4, 557.7$ и 630.0 нм и эффективность формирования электронной концентрации слабо зависят от формы энергетического спектра высыпающихся электронов и определяются в основном значениями средних энергий потока электронов.

DOI: 10.31857/S0367676522700508, EDN: AJCHKI

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование пространственного распределения интенсивностей свечения различных эмиссий и электронной концентрации в периоды магнитосферных возмущений имеет важное значение в вопросах диагностики и прогноза состояния возмущенной полярной ионосферы. Созданию глобальных моделей планетарного распределения аврорального свечения были посвящены работы [1, 2]. В качестве экспериментальной основы при создании таких моделей в этих работах были использованы эмпирические модели электронных высыпаний [3–5], при этом в обеих работах для проведения расчетов делалось априорное предположение о форме энергетического спектра потока высыпающихся электронов. В данной работе рассмотрено влияние формы энергетического спектра и средней энергии высыпающихся электронов на интегральную интенсивность авроральных эмиссий и содержание электронов в столбе полярного сияния.

ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭМИССИЙ

Введем понятие эффективности возбуждения оптической эмиссии как отношение интегральной интенсивности излучения с длиной волны λ к полному потоку энергии высыпающихся электронов:

$$Eff_{\lambda} = I_{\lambda} / F_E, \quad (1)$$

где I_{λ} – интегральная интенсивность эмиссии, измеряемая в Рэляях, F_E – поток энергии высыпающихся электронов в эрг \cdot см⁻² \cdot с⁻¹.

Интегральная интенсивность соответствует суммарной интенсивности в вертикальном столбе полярного сияния и может быть рассчитана из высотного профиля объемной интенсивности излучения:

$$I_{\lambda} = \int_0^{\infty} Q_{\lambda}(h) dh, \quad (2)$$

где: $Q_{\lambda}(h)$ – величина объемной интенсивности излучения с длиной волны λ на высоте h в фотон \cdot см⁻³ \cdot с⁻¹.

Рассмотрим влияние параметров потока высыпающихся электронов на эффективность возбуждения эмиссий в вертикальном столбе полярных сияний. Под параметрами потока будем понимать форму энергетического спектра и среднюю энергию высыпающихся электронов. Для исследования были выбраны наиболее характерные эмиссии, наблюдаемые в полярных сияниях: эмиссия первой отрицательной системы полос $N_2^+ 1NG \lambda = 391.4$ нм и эмиссии возбужденного атомарного кислорода $OI \lambda = 557.7$ нм и $OI \lambda = 630.0$ нм.

Расчеты интенсивностей эмиссий проводились в рамках физико-химической модели возбужденной полярной ионосферы, представленной в работе [6], позволяющей рассчитывать высотные профили концентрации 17 основных возбужденных и ионизированных компонент атмосферных газов и электронную концентрацию

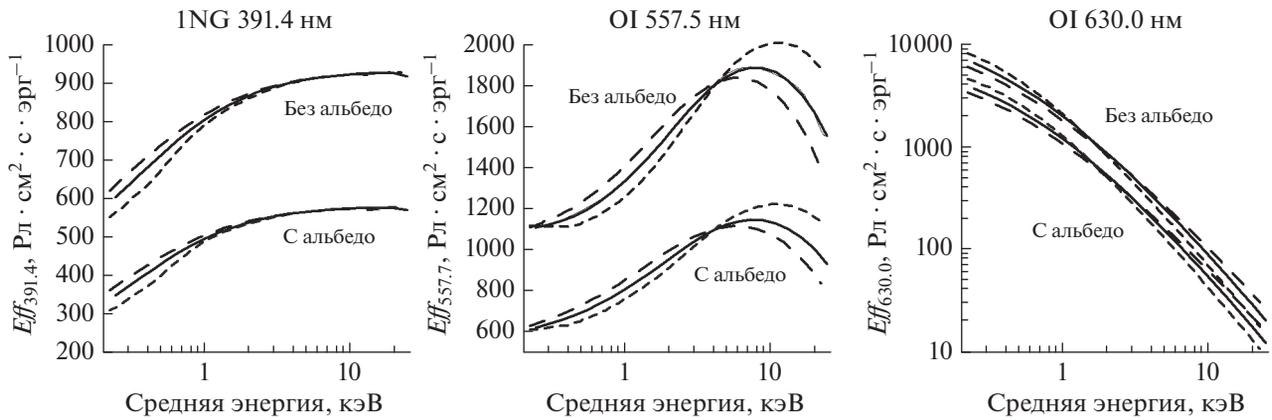


Рис. 1. Эффективности возбуждения оптических эмиссий, рассчитанные для трех видов спектра высыпавшихся электронов: длинный пунктир – поток с экспоненциальным распределением, короткий пунктир – моноэнергетический поток, сплошная линия – поток с максвелловским распределением (3).

во время авроральных высыпаний. Входными параметрами в 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. 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, представленных в работе [7]. Расчеты проводились в модели нейтральной атмосферы MSIS-E-90, данные взяты с веб-сайта https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/msis_vitmo.php. Для исследования были выбраны три вида энергетического спектра потока высыпавшихся электронов: моноэнергетический, поток с экспоненциальным распределением по энергиям и поток с максвелловским распределением по энергиям соответственно:

$$f(E) = F_E \delta(E - E_0), \quad f(E) = \frac{F_E}{E_0^2} \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right), \quad (3)$$

$$f(E) = \frac{F_E}{2E_0^3} E \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right).$$

Расчеты проводились для средних энергий в диапазоне от 0.1 до 20 кэВ, который является типичным для авроральных электронов, возбуждающих полярные сияния [3, 8, 9]. При моделировании излучения авроральных эмиссий необходимо учитывать величины альbedo-потоков, которые определяют долю энергии электронов, отраженную атмосферой. Доля отраженной энергии находится в зависимости от высоты источника электронов и энергии высыпавшихся частиц [7]. Поэтому расчеты эффективностей возбужде-

ния оптических эмиссий проводились для двух случаев, без учета альbedo-потоков и с их учетом, при этом источник электронов помещался на высоте 700 км.

Исследуем зависимости эффективностей возбуждения оптических эмиссий Eff_λ от средней энергии потока высыпавшихся электронов E_{cp} . Эмиссии первой отрицательной системы полос молекулярного азота возбуждаются только благодаря прямому возбуждению электронным ударом, следовательно, они могут служить эффективным инструментом для оценки процессов энергообмена между магнитосферой и ионосферой. На рис. 1 приведены рассчитанные зависимости эффективности возбуждения эмиссии 1NG $N_2^+ \lambda = 391.4$ нм от средней энергии высыпавшихся электронов E_{cp} для трех видов энергетических спектров высыпавшихся авроральных электронов (3). Из рисунка видно, что эффективность возбуждения оптической эмиссии $\lambda = 391.4$ нм – $Eff_{391.4}$ – слабо зависит от формы начального дифференциального потока частиц (1). Максимальное отклонение $Eff_{391.4}$ от среднего значения в рассматриваемом диапазоне средней энергии электронов не превышает 8%.

На рис. 1 также приведены зависимости эффективностей от средней энергии высыпавшихся электронов $Eff_\lambda(E_{cp})$, рассчитанные для эмиссий возбужденного атомарного кислорода OI $\lambda = 557.7$ нм и OI $\lambda = 630.0$ нм для трех видов энергетических спектров авроральных электронов (3). В отличие от эмиссии 1NG $\lambda = 391.4$ нм, в возбуждение перечисленных выше эмиссий кроме, прямого удара, вносят вклад процессы перераспределения энергии в результате химических реакций, что в значительной степени влияет на интенсивность эмиссий возбужденного атомарного кислорода. [6, 10]. Несмотря на этот факт, эффективно-

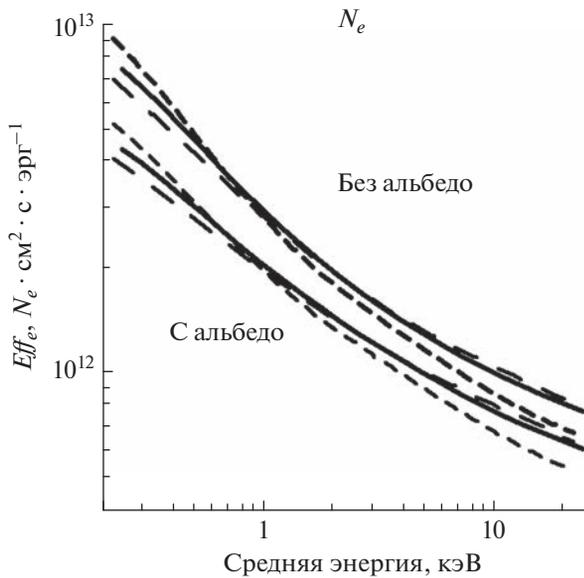


Рис. 2. Эффективность формирования электронной концентрации в столбе полярного сияния, рассчитанная для трех видов спектра высыпавшихся электронов: длинный пунктир – экспоненциальное распределение, короткий пунктир – моноэнергетический поток, сплошная линия – максвелловское распределение (3).

сти возбуждения этих эмиссий $Eff_{557.7}$ и $Eff_{630.0}$ также слабо зависят от формы энергетического спектра потока высыпавшихся электронов. Максимальное отклонение от среднего значения не более 10%.

Таким образом, эффективности возбуждения рассматриваемых авроральных эмиссий Eff_{λ} зависят в основном от средней энергии высыпавшихся электронов $E_{ср}$.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

Эффективность формирования электронной концентрации в столбе полярного сияния определим как отношение полного содержания электронной концентрации в столбе полярного сияния к величине потока энергии высыпавшихся электронов:

$$Eff_e = N_e / F_E, \quad (4)$$

где

$$N_e = \int_0^{\infty} n_e(h) dh. \quad (5)$$

В формулах: N_e – полное содержание электронной концентрации в столбе полярного сияния в см^{-2} , $n_e(h)$ – концентрация электронов на высоте h в см^{-3} .

Электронная концентрация рассчитывалась в рамках физико-химической модели авроральной ионосферы [6] при условии термодинамического равновесия как сумма концентрации ионов на высоте h :

$$n_e = [N_2^+] + [O_2^+] + [O^+(^4S)] + [O^+(^2D)] + [O^+(^2P)] + [NO^+] + [N^+].$$

Рассмотрим влияние параметров спектра высыпавшихся электронов на эффективность формирования полного содержания электронной концентрации. Для этого исследуем зависимости Eff_e от средней энергии высыпавшихся электронов для трех видов энергетического спектра (3). Рассчитанные зависимости $Eff_e(E_{ср})$ для средних энергий в диапазоне 0.1–20 кэВ приведены на рис. 2. Можно видеть, что максимальные отклонения Eff_e от среднего значения не превышают 5%. Таким образом, эффективность формирования электронной концентрации также, как и эффективности возбуждения оптических эмиссий, слабо зависит от формы спектра высыпавшихся электронов и определяется их средней энергией.

ПРОГНОЗ ПЛАНЕТАРНОЙ КАРТИНЫ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

Слабая зависимость $Eff_{\lambda}(E_{ср})$ от вида энергетического спектра потока высыпавшихся электронов позволяет в алгоритмах, реализующих прогноз планетарного распределения интенсивности излучения в полярных сияниях на основе эмпирических моделей авроральных высыпания, использовать следующую связь:

$$I_{\lambda} = F_E Eff_{\lambda}(E_{ср}), \quad (6)$$

где I_{λ} – интегральная интенсивность излучения эмиссии с длиной волны λ , F_E и $E_{ср}$ – поток энергии и средняя энергия электронов, представленных в эмпирических моделях авроральных высыпаний.

Величина $Eff_{\lambda}(E_{ср})$ определяется как усредненное значение соответствующих кривых на рис. 1.

Аналогично, для расчетов планетарного распределения электронной концентрации в столбе полярного сияния можно использовать формулу:

$$N_e = F_E Eff_e(E_{ср}), \quad (7)$$

где N_e – полное содержание электронной концентрации в вертикальном столбе полярного сияния.

На рис. 3 приведены примеры планетарного распределения интенсивности свечения эмиссий $\lambda = 391.4, 557.7$ и 630.0 нм и электронной концентрации в столбе полярного сияния, рассчитанные с использованием формул (6) и (7), для трех уровней магнитных возмущений. Слабое возмущение: индексы AL и D_{st} равны -100 и -5 нТл соот-

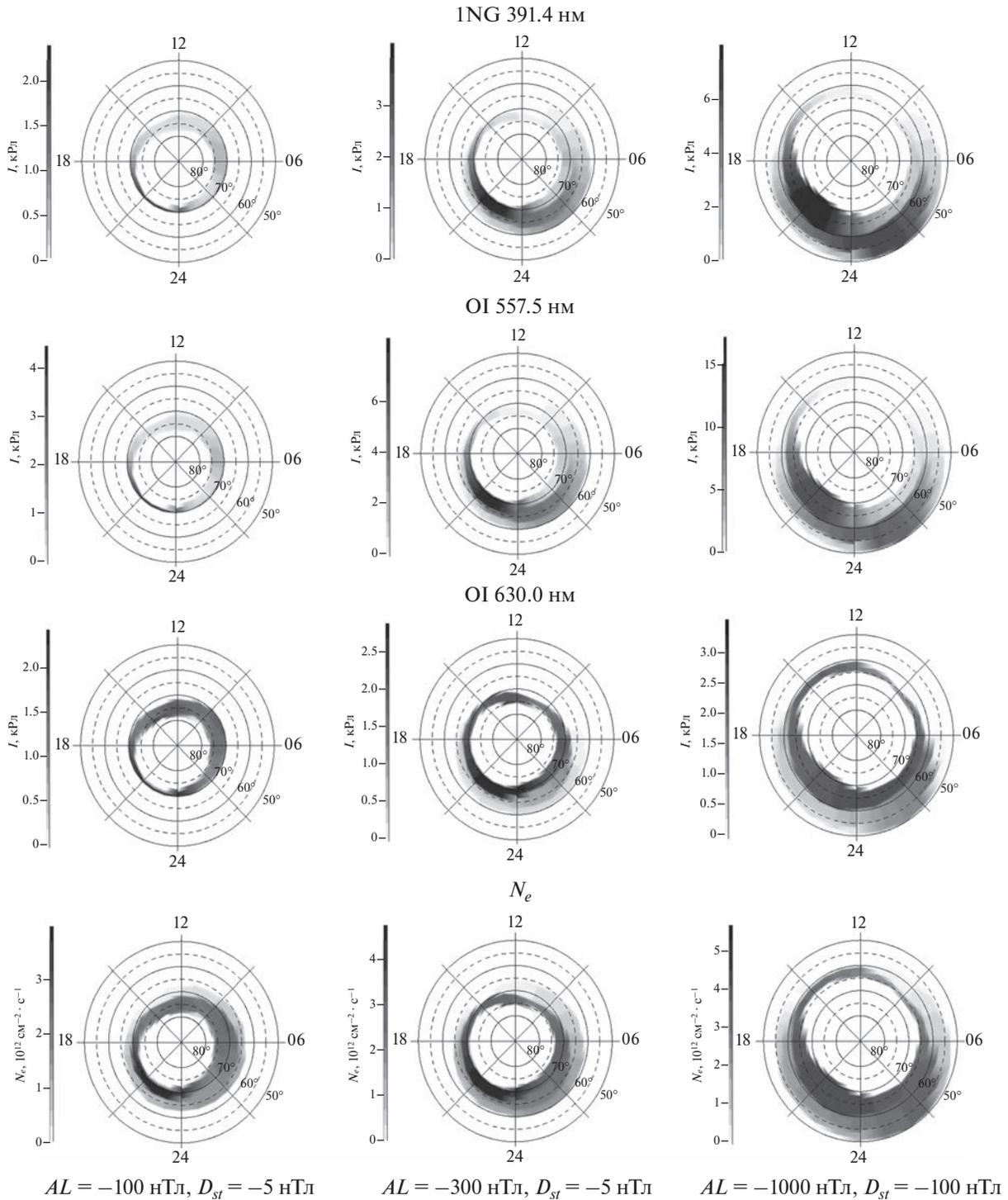


Рис. 3. Планетарное распределения интенсивности свечения эмиссий $\lambda = 391.4, 557.7$ и 630.0 нм и электронной концентрации в столбе полярного сияния для трех уровней магнитной активности: левая колонка – индексы $AL = -100$ нТл и $D_{st} = -5$ нТл, средняя колонка – $AL = -300$ нТл и $D_{st} = -5$ нТл, правая колонка – $AL = -1000$ нТл и $D_{st} = -100$ нТл.

ответственно, среднее возмущение: $AL = -300$ нТл и $D_{st} = -5$ нТл, сильное возмущение $AL = -1000$ нТл и $D_{st} = -100$ нТл. Расчеты были сделаны по данным эмпирической модели авроральных электронных высыпаний [9], где представлены про-

странственные распределения средних энергий и потока энергии высыпавшихся электронов для разных уровней магнитной активности. На рисунке хорошо видны вариации как планетарного распределения, так и величин интенсивностей

свечения авроральных эмиссий и содержания электронной концентрации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние параметров потока высыпавшихся электронов на интенсивность эмиссий $\lambda = 391.4, 557.7$ и 630.0 нм и величину электронной концентрации в вертикальном столбе полярных сияний. В качестве параметров потока авроральных электронов рассматривались: форма энергетического спектра и средняя энергия высыпавшихся электронов.

Введено понятие эффективности возбуждения оптической эмиссии Eff_λ , определяемое как отношение интегральной интенсивности излучения с длиной волны λ к полному потоку энергии высыпавшихся электронов и, по аналогии, эффективности формирования полного содержания электронной концентрации в столбе полярного сияния Eff_e . Расчеты Eff_λ и Eff_e проводились для трех видов энергетического спектра авроральных электронов: моноэнергетического, экспоненциального и потока с максвелловским распределением. Средняя энергия варьировалась в диапазоне $0.1\text{--}20$ кэВ, который является типичным для авроральных электронов. Показано, что эффективности Eff_λ и Eff_e слабо зависят от формы энергетического спектра и определяются в основном значениями средних энергий потока электронов.

Рассчитанные зависимости Eff_λ и Eff_e от средних энергий позволяют построить эффективные алгоритмы для расчета планетарного распределения интенсивностей свечения и полной элект-

ронной концентрации в полярных сияниях по данным эмпирических моделей электронных высыпаний, не делая априорных предположений о виде энергетического спектра потока высыпавшихся электронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.Е., Кириллов А.С., Мальков М.В. и др. // Геомагн. и аэроном. 1993. Т. 33. № 5. С. 80.
2. Воробьев В.Г., Кириллов А.С., Каткалов Ю.В., Ягодкина О.И. // Геомагн. и аэроном. 2013. Т. 53. № 6. С. 757; Vorobyov V.G., Kirillov A.S., Katkalov Yu.V., Yagodkina O.I. // Geomagn. Aeron. 2013. V. 53. No. 6. P. 711.
3. Spiro R.V., Reiff P.H., Maher L.J. Jr. // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. No. A10. P. 8215.
4. Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. // Геомагн. и аэроном. 2005. Т. 45. № 4. С. 467; Vorobyov V.G., Yagodkina O.I. // Geomagn. Aeron. 2005. V. 45. No. 4. P. 438.
5. Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. // Геомагн. и аэроном. 2007. Т. 47. № 2. С. 198; Vorobyov V.G., Yagodkina O.I. // Geomagn. Aeron. 2007. V. 47. No. 2. P. 185.
6. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Сергиенко Т.И., Козелов Б.В. // Косм. иссл. 2017. Т. 55. № 2. С. 94; Dashkevich Zh.V., Ivanov V.E., Sergienko T.I., Kozelov B.V. // Cosmic Res. 2017. V. 55. No. 2. P. 88.
7. Иванов В.Е., Козелов Б.В. Прохождение электронных и протонно-водородных пучков в атмосфере Земли. Апатиты: Изд. Кольского науч. центра, 2001. 260 с.
8. Hardy D.A., Gussenhoven M.S., Raistrick R., McNeil W.J. // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. No. A11. Art. No. 12275.
9. Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Yu.V. // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. 2013. V. 102. P. 157.
10. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. // Тр. Кольск. науч. центра РАН. 2018. Т. 5. С. 69.

Efficiencies of emission excitation and electron density formation in auroras

V. E. Ivanov^a, Zh. V. Dashkevich^{a, *}, O. I. Yagodkina^a

^a Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia

*e-mail: zhanna@pgia.ru

It is shown that the efficiencies of excitation of optical emissions $\lambda = 391.4, 557.7$, and 630.0 nm and the efficiency of formation of the total electron density weakly depend on the shape of the energy spectrum of precipitating electrons and are mainly determined by the values of the average energy of the electron flux.