

DOI: 10.51981/2588-0039.2024.47.024

ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА АВРОРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ДАННЫМ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Ж.В. Дашкевич*, В.Е. Иванов

Полярный геофизический институт, Апатиты, Мурманская область, Россия

*E-mail: zhanna@pgia.ru

Аннотация

Предложены методики диагностики параметров потока высыпавшихся во время полярных сияний электронов по данным фотометрических измерений интенсивностей излучения ЛВН полос молекулярного азота N_2 , полос первой отрицательной системы иона молекулярного азота N_2^+ и эмиссии 630.0 нм атомарного кислорода, а также методика восстановления спектра энергичных электронов по высотному профилю энерговыделения с использованием данных по интенсивности излучения полярного сияния в широком диапазоне длин волн. Показаны результаты оценок параметров авроральных электронов по фотометрическим данным, полученным в ходе экспериментов, проведенных в ПГИ.

Восстановление энергетического спектра потока высыпавшихся электронов по вертикальным профилям энерговыделения

Энергетический спектр высыпавшихся электронов определяет характер полярного сияния, и в первую очередь высотный профиль выделившейся при прохождении электронов энергии. Высотное распределение выделившейся в атмосфере энергии при инжекции электронного потока можно представить в виде функционала [Иванов и Козелов, 2001]:

$$W(h) = \rho(h) \int_E \frac{E}{R(E)} \lambda(h, E) f(E) dE, \quad (1)$$

где $W(h)$ -энергия, выделившаяся на высоте h , эВ·см³·с; $\rho(h)$ -плотность атмосферы на высоте h , г·см⁻³; E - энергия электрона в источнике, эВ; $R(E)$ - интегральная длина пробега, г·см⁻²; $\lambda(h, E)$ – безразмерная функция диссипации энергии, $f(E)$ -энергетический спектр высыпавшихся электронов, эВ⁻¹·см⁻²·с⁻¹.

Решая интегральное уравнение (1) относительно функции $f(E)$, получаем зависимость величины потока электронов от энергии электронов – дифференциальный энергетический спектр. Таким образом, знание высотного профиля энерговыделения в полярных сияниях, возникающих вследствие электронных высыпаний, позволяет восстановить параметры энергетического спектра высыпавшихся электронов.

Представим интеграл в формуле (1) в виде суммы через формулу трапеций:

$$W(h) = \rho(h) \sum_{k=2}^n \frac{[K(h, E_k)F_k + K(h, E_{k-1})F_{k-1}][E_k - E_{k-1}]}{2}, \quad (2)$$

где $K(h, E) = \frac{E}{R(E)} \lambda(h, E)$, n – количество точек на высотном профиле энерговыделения.

После принятия дополнительных ограничений в том, что F_k должны быть положительными, а искомая $f(E)$ – достаточно плавной функцией в зависимости от энергии, приходим к задаче о минимизации следующего функционала:

$$G = \sum_j^m \left\{ \sum_i^n (W(h_i) - W_i^{\text{эк}}(h_i))^2 + \gamma \sum_{k=2}^n (F_k - F_{k-1})^2 \right\}, \quad (3)$$

где $W(h_i)$ - интеграл (2), представленный в виде суммы, $W_i^{\text{эк}}(h_i)$ - экспериментально измеренная величина выделившейся энергии, γ - регуляризирующий параметр, m – количество экспериментальных точек на высотном профиле объемной интенсивности излучения.

Обычно в реальных экспериментах измеряется не профиль энерговыделения, а высотные профили интенсивностей авроральных эмиссий. Так, в триангуляционном эксперименте, проведенном в Полярном геофизическом институте в 2011-2021 гг. с помощью камер MAIN, регистрирующих излучение полярного

сияния в широком диапазоне длин волн, были получены высотные профили интенсивности в диапазоне 380-580 нм для 11 случаев лучистых форм полярных сияний [Козелов и др., 2021].

При известном составе линий и полос свечений в регистрируемом спектре можно определить связь между суммарной объемной интенсивностью свечения в диапазоне 380-580 нм $\eta_{380-580}(h)$ и величиной суммарного энерговыделения:

$$W(h) = k(h) \cdot \eta_{380-580} \quad (4)$$

где $W(h)$ - энергия, выделившаяся на высоте h в единицах $\text{эрг}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$, $\eta_{380-580}$ - объемная интенсивность излучения в единицах $\text{фотон}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$, $k(h)$ - коэффициент взаимосвязи в единицах $\text{эрг}\cdot\text{фотон}^{-1}$.

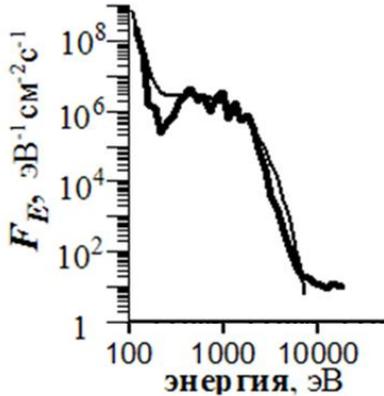


Рисунок 1. Пример восстановленного спектра высыпавшихся электронов для лучистых форм полярного сияния.

Для расчетов коэффициента взаимосвязи моделировались высотные профили интенсивностей эмиссий и полос, лежащих в диапазоне регистрации камер. Расчеты проводились в рамках модели авроральной ионосферы, описанной в работе [Дашкевич и др., 2017] с учетом чувствительности регистрирующей матрицы [Kozelov et al., 2013]. Далее, используя соотношение (4) и значения коэффициента $k(h)$, высотные профили объемной интенсивности излучения $\eta_{380-580}$, полученные из экспериментальных данных, были преобразованы в высотные профили энергии, выделившейся при прохождении авроральных электронов $W(h)$. Используя алгоритм восстановления энергетических спектров потоков высыпавшихся электронов по высотному профилю выделившейся энергии, были получены спектры высыпавшихся электронов для 11 случаев лучистых структур полярного сияния. Пример восстановленного энергетического спектра $f_{\text{экс}}(E)$ для лучистых полярных сияний приведен на рис. 1. Подробно об процедуре восстановления спектров и их характеристиках можно прочитать в работе [Дашкевич и др., 2021].

Оценка характеристик потока высыпавшихся электронов по отношению интенсивности эмиссии 630.0 нм и 427.8 нм

Фотометрические измерения излучений полярных сияний используются в основном для оценки характеристической энергии высыпавшихся частиц на основе алгоритма, предложенного в работе [Rees and Luckey, 1974], где был предложен использовать интенсивности эмиссий 427.8 нм 1NG N_2^+ и 630.0 нм.

Отношение интенсивностей $I_{630.0}/I_{427.8}$ имеет однозначную зависимость от средней энергии высыпавшегося потока электронов. Это отношение слабо зависит от параметров потока высыпавшихся электронов и состава атмосферы, в частности, от количества в атмосфере окиси азота и атомарного кислорода, что продемонстрировано на рис. 2.

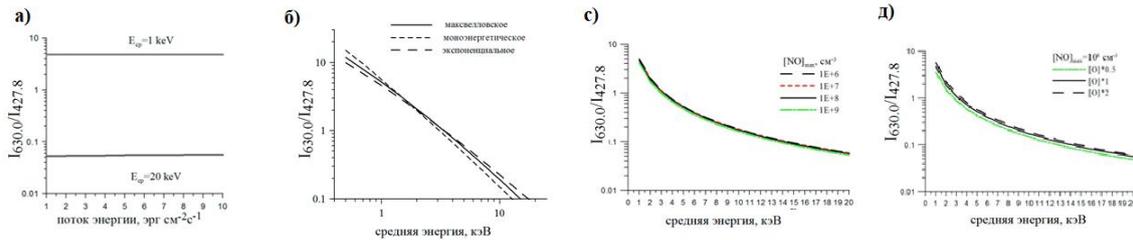


Рисунок 2. Влияние на отношение $I_{630.0}/I_{427.8}$ различных параметров: а) потока энергии высыпавшихся электронов; б) формы спектра высыпавшихся электронов; в) концентрации окиси азота; д) концентрации атомарного кислорода.

Определенный характер зависимости отношения $I_{630.0}/I_{427.8}$ от средней энергии подтверждается и экспериментальными данными [Christensen et al., 1987; Дашкевич и др., 2006]. Такое поведение отношения интенсивностей красной и синей авроральных линий дает возможность восстановления характеристик потоков авроральных электронов.

Как видно из рисунка 2б на отношение $I_{630.0}/I_{427.8}$ форма энергетического спектра электронов не влияет существенным образом. Максимальные отклонения от средней кривой зависимости составляют меньше 10%. Таким образом, при определении параметров электронного потока является корректным делать

предположение о максвелловском распределении высыпавшихся электронов $f(E) = \frac{F_E}{2E_M^3} \exp\left(-\frac{E}{E_M}\right)$. Тогда средняя энергия высыпавшихся частиц будет определяться как $E_{cp} = 2E_M$, где E_M – характеристическая энергия высыпавшихся электронов, определяемая по экспериментально измеренной величине отношения интенсивностей $I_{630.0}/I_{427.8}$ из теоретической кривой, полученной для конкретных авроральных условий. Зависимость характеристической энергии E_M от величины отношения $I_{630.0}/I_{427.8}$ показан на рис. 3.

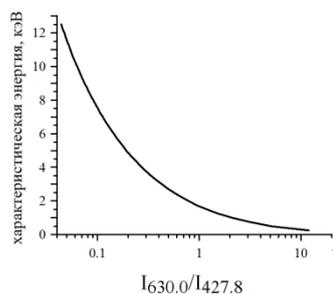


Рисунок 3. Зависимость характеристической энергии E_M от величины отношения $I_{630.0}/I_{427.8}$.

Абсолютная величина потока энергии $|F_E|$ определяется из условия нормировки интенсивности, полученной в эксперименте $I_{427.8}^{экс}$, к рассчитанной для единичного потока энергии максвелловского распределения высыпавшихся электронов теоретической интенсивности в столбе полярного сияния $I_{427.8}^{теор}$:

$$I_{427.8}^{экс} = |F_E| \cdot I_{427.8}^{теор} \quad (5)$$

Учитывая формулу (1), получаем:

$$|F_E| = \frac{I_{427.8}^{экс}}{B \int_h \int_E \bar{\kappa}(h,E) \frac{E \exp(-E/E_M)}{E_M^3} dE dh} \quad (6)$$

Величина потока энергии F_E связана с величиной потоков высыпавшихся электронов N_0 соотношением

$$F_E = N_0 E_{cp} \quad (7)$$

Таким образом, имея экспериментально измеренные интенсивности эмиссии 427.8 нм первой отрицательной системы иона молекулярного азота $1NG N_2^+$ и эмиссии 630.0 нм атомарного кислорода OI , можно определять:

- 1) среднюю энергию высыпавшихся частиц E_{cp} , используя рис. 3;
- 2) поток энергии высыпавшихся электронов, используя формулу (6);
- 3) поток частиц высыпавшихся электронов, используя формулу (7).

Процедура оценки параметров спектра высыпавшихся электронов была применена в ходе томографического эксперимента, проводимого в Полярном геофизическом институте в зимний период 1999 г. Интенсивности эмиссий 427.8 нм, 557.7 нм и 630.0 нм внутри дуги полярного сияния были восстановлены томографическими методами для полярного сияния 10-11 февраля 1999 г. Подробности эксперимента и томографических реконструкций описаны в работе [Dashkevich et al., 2007]. Были получены отношения интенсивностей в столбе полярного сияния эмиссий 630.0 нм и 427.8 нм. Используя описанную выше процедуру, найдены изменения параметров потока высыпавшихся электронов вдоль дуги полярного сияния. На рис. 4 представлены изменения вдоль меридиана средней энергии и величины потока энергии высыпавшихся электронов.

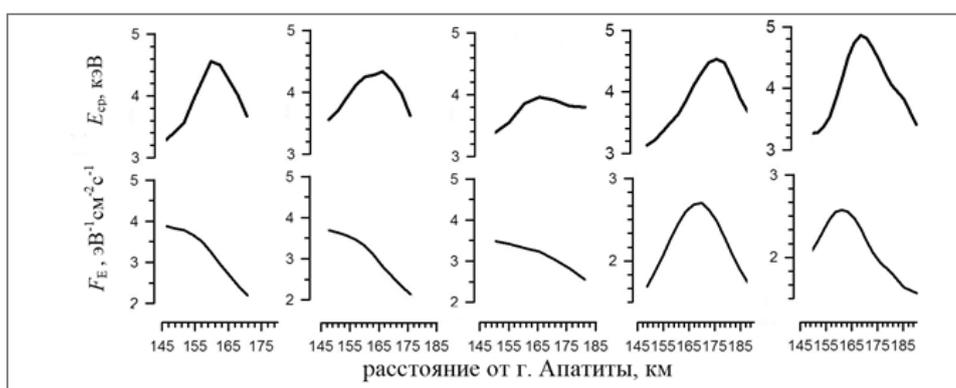


Рисунок 4. Меридиональное поведение параметров потока высыпавшихся электронов внутри отдельных дуг.

Оценка средней энергии потока высыпавшихся электронов по отношению интенсивностей излучения полос системы ЛВН, имеющих различную степень поглощения в континууме Шумана-Рунге

Излучение полос системы Лаймана-Берджа-Хопфилда (ЛВН) молекулярного азота наблюдается в ультрафиолетовой области спектра 125-180 нм. В этой области спектра излучение поглощается континуумом

Шумана-Рунге молекулярного кислорода. Величина сечения поглощения в O_2 континууме изменяется примерно в сто раз в интервале 125.0-150.0 нм. С увеличением энергии вторгающихся в атмосферу частиц, увеличивается глубина их проникновения в атмосферу, поэтому высота максимума объемной интенсивности излучения ЛВН тем меньше, чем больше средняя энергия частиц. Но с уменьшением высоты максимума увеличивается толщина O_2 поглотителя для ЛВН излучения. Чем больше поглощение, тем сильнее выражена зависимость интенсивности от энергии. Такое поведение интенсивности полос дает возможность для диагностики параметров высыпающихся электронов. Хорошим индикатором средней энергии служит отношение интенсивностей излучения двух полос ЛВН, имеющих разную степень поглощения в O_2 . В работе [Dashkevich et al., 1993] было показано, что такое отношение слабо зависит от состава атмосферы.

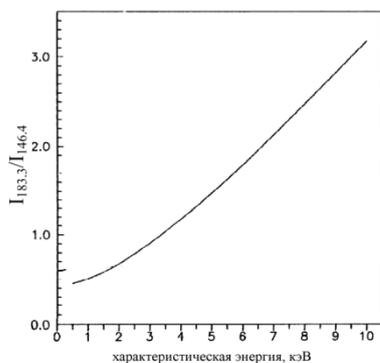


Рисунок 5. Отношение интенсивности двух ЛВН полос от энергии электронов.

Поскольку форма спектра высыпающихся электронов очевидно не будет изменять существенным образом отношение интенсивностей двух полос ЛВН [Дашкевич и Иванов, 2022], можно использовать максвелловское распределение электронов по энергиям. На рис. 5 показано отношение интенсивностей коротковолновой полосы ЛВН, для которой сечение поглощения O_2 велико, и длинноволновой полосы, где поглощения нет, в зависимости от характеристической энергии. Как можно видеть, отношение интенсивностей полос ЛВН, испытывающих различную степень поглощения молекулярным кислородом, очень чувствительно к изменению характеристической энергии. Принимая во внимание соотношение $E_{cp}=2E_m$, по его величине можно однозначно судить о средней энергии высыпающихся электронов.

Литература

- 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 аэроном. 2006. Т. 46. № 3. С. 385–389.
- 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
- Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Козелов Б.В. Исследование лучистых структур в полярных сияниях триангуляционными методами: 2. Энергетические спектры высыпающихся электронов // Космические исслед. 2021. Т. 59. № 5. С. 355–360. doi: 10.31857/S0023420621050034
- Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Сергиенко Т.И., Козелов Б.В. Физико-химическая модель авроральной ионосферы // Космические исслед. 2017. Т. 55. № 2. С. 94–106.
- Иванов В.Е., Козелов Б.В. Прохождение электронных и протонно-водородных пучков в атмосфере Земли // Апатиты: изд. Кольского научного центра РАН. 260 с. 2001.
- Козелов Б.В., Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. Исследование лучистых структур в полярных сияниях триангуляционными методами: 1. Высотный профиль объемной интенсивности свечения // Космические исслед. 2021. Т. 59. № 4. С. 267–274. doi: 10.31857/S0023420621040038
- Christensen A.B., Lyons L.R., Hecht J.H., Sivjee G., Meer R.R., Strickland D.J. Magnetic field-aligned electric field acceleration and characteristics of the optical aurora // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. № 6. P. 6163–6167. doi: 10.1029/JA092iA06p06163
- Dashkevich Z.V., Sergienko T.I., Ivanov V.I. The Lyman-Birge-Hopfield bands in aurora // Planet. Space Sci. 1993. V. 41. № 1. P. 81–87.
- Dashkevich Zh.V., Ivanov V.E., Khudukon B.Z. Features of stable diffuse arcs observed by means of auroral tomography // Annales Geophysicae. 2007. V. 25. № 5. P. 1131–1139.
- Kozelov B.V., Brändström B.U.E., Sigernes F., Roldugin A.V., Chernouss S.A. Practice of CCD cameras' calibration by LED low-light source // "Physics of Auroral Phenomena". Proc. XXXVI Annual Seminar. Apatity. 2013. P. 151–154.
- Rees M.H., Luckey D. Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emission. 1. Model computations // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. № 34. P. 5181–5186.