

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛУЧИСТЫХ СТРУКТУР В ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЯХ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ: 2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ВЫСЫПАЮЩИХСЯ ЭЛЕКТРОНОВ

© 2021 г. Ж. В. Дашкевич¹, *, В. Е. Иванов¹, Б. В. Козелов¹

¹Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

*zhanna@pgia.ru

Поступила в редакцию 02.11.2020 г.

После доработки 14.12.2020 г.

Принята к публикации 22.01.2021 г.

Обоснована возможность оценки энергетических спектров потоков высыпающих электронов, формирующих лучистые структуры в полярных сияниях, по данным триангуляционных наблюдений аппаратурой, регистрирующей излучение в широком интервале длин волн (380–580 нм). Представлена методика расчета высотных профилей энерговыделения из высотных профилей объемной интенсивности излучения, регистрируемого приемной аппаратурой. Восстановлены энергетические спектры потоков высыпающих электронов, ответственных за формирование лучистых структур в полярных сияниях. Показано, что энергетические спектры потока высыпающих электронов можно аппроксимировать суммой двух электронных потоков, имеющих степенной энергетический спектр и максвелловское распределение по энергиям. Высказано предположение о том, что лучистые структуры в полярных сияниях формируются благодаря сбросу в ионосферу электронов, имеющих степенное распределение по энергиям.

DOI: 10.31857/S0023420621050034

1. ВВЕДЕНИЕ

Механизмы, приводящие к высыпанию авроральных электронов в атмосферу Земли и, как следствие, формированию структурированных форм полярных сияний до сих пор недостаточно изучены. Одним из подходов к изучению данной проблемы является исследование особенностей энергетических спектров высыпающих электронов, формирующих морфологически различные формы полярных сияний, таких как дуги, полосы и лучистые структуры. И, если характер энергетических спектров авроральных электронов, вызывающих полярные сияния, наблюдаемые в виде дуг и полос, исследованы достаточно хорошо, то спектральные характеристики электронных потоков, формирующих лучистые структуры, практически не исследованы.

Вид энергетического спектра потока высыпающих электронов является одним из основных факторов, определяющих характер высотного распределения выделившейся в области полярного сияния энергии. Одним из методов получения высотных профилей энерговыделения в авроральных структурах являются триангуляционные наблюдения авроральных форм из разнесенных пунктов. В данной работе описана методика восстановления высотных профилей энерговыделе-

ния на основе триангуляционных наблюдений лучистых структур полярных сияний камерами с приемниками регистрирующими излучение в довольно широком диапазоне длин волн (380–580 нм). На основе полученных высотных профилей энерговыделения сделаны оценки параметров энергетических спектров высыпающих электронов, формирующих лучистые структуры.

2. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

Высотное распределение выделившейся в атмосфере энергии при инъекции электронного потока можно представить в виде следующего функционала [1]:

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

где $W(h)$ – энергия, выделившаяся на высоте h в единицах эрг · см⁻³ с⁻¹; $\rho(h)$ – плотность атмосферы на высоте h в единицах г · см⁻³; E – энергия электрона в эВ; $R(E)$ – интегральная длина пробега в единицах г · см⁻²; $\lambda(h, E)$ – безразмерная функция диссипации энергии, описывающая долю энергии электрона, выделившейся на высоте h ;

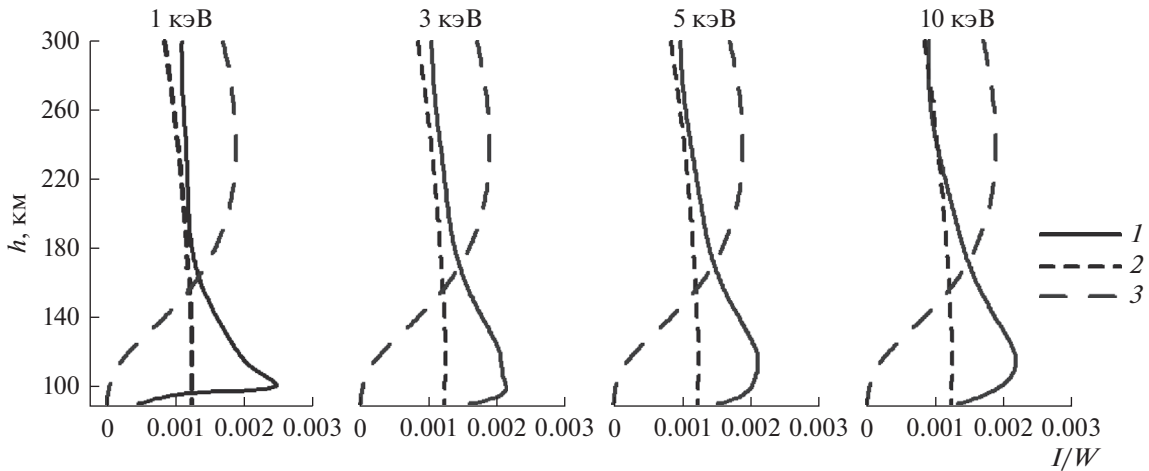


Рис. 1. Рассчитанные отношения объемных интенсивностей эмиссий, лежащих в диапазоне 380–580 нм, к общей выделившейся энергии W : кривая 1 – $I_{557.7}/W$, кривая 2 – I_{1NG}/W , кривая 3 – I_{VK}/W .

$f(E)$ – энергетический спектр высыпавшихся электронов в единицах $\text{см}^{-2} \text{эВ}^{-1} \text{с}^{-1}$.

Из формулы (1) видно, что знание высотного профиля энерговыделения в полярных сияниях, возникающих вследствие электронных высыпаний, позволяет восстановить параметры энергетического спектра высыпавшихся электронов.

В данной работе для анализа энергетических спектров высыпавшихся электронов, формирующих лучистые структуры, будут использованы результаты работы [2]. В работе [2] были представлены высотные профили объемной скорости излучения в лучистых структурах, полученные на основе триангуляционных измерений. Отличительной особенностью, использованной в [2] аппаратуры является регистрация суммарного излучения сияния в широком диапазоне длин волн (380–580 нм). В данном диапазоне согласно [3] в суммарную интенсивность излучения более 90% вносят эмиссия $\text{O}(\text{I})$ 557.7 нм, полосы Первой отрицательной системы N_2^+ (1NG N_2^+), полосы системы Вегарда–Каплана (VK) и полосы Второй положительной системы N_2 (2PG N_2). Поэтому необходимым условием при использовании формулы (1) для восстановления энергетического спектра потока высыпавшихся электронов по результатам работы [2] является исследование связи между интенсивностью свечения $I(h)$, регистрируемой конкретной камерой, и величиной суммарного энерговыделения:

$$W(h) = k(h)I(h), \quad (2)$$

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

Расчеты $k(h)$ проводились в рамках нестационарной модели авроральной ионосферы, представленной в работе [4]. С этой целью моделировались высотные профили интенсивностей эмиссий и полос, лежащих в диапазоне спектральной чувствительности камер. Расчеты проводились в модели нейтральной атмосферы MSIS-90 [5]. Энергетический спектр высыпавшихся электронов задавался в виде максвелловского распределения с изотропным распределением по питч-углам в нижней полусфере:

$$f(E) = N_0 E \exp(-E/E_0) / E_0^2, \quad (3)$$

где N_0 – начальный поток частиц в $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$, E_0 – характеристическая энергия в эВ.

Характеристическая энергия E_0 варьировалась в интервале 1–10 кэВ, начальный поток энергии $F_0 = N_0 E_0$ – в интервале 1–10 $\text{эрг} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Данный диапазон начальных параметров электронного потока, инициирующего полярные сияния, охватывает широкий интервал интегральных интенсивностей излучения в эмиссии 557.7 нм от 0.2 до 15 кРл. Поскольку содержание окиси азота в области полярных сияний оказывает значительное влияние на интенсивность излучения зеленой линии (557.7 нм) [6], величина плотности NO в максимуме ее высотного профиля варьировалась в диапазоне 10^6 – 10^8см^{-3} , что соответствует наблюдаемым в полярных сияниях плотностям окиси азота [7, 8]. На рис. 1 приведены рассчитанные высотные зависимости отношений интенсивности эмиссии 557.7 нм атомарного кислорода $I_{557.7}$, суммарной интенсивности излучения полос Первой отрицательной системы полос N_2^+ – I_{1NG} и суммарной интенсивности 57 полос системы Вегарда–Каплана – I_{VK} к общей выделившейся при высыпании электронов энергии W для различных E_0 . Из рис. 1

видно, что высотные зависимости $I_{557.7}/W$, I_{ING}/W и I_{VK}/W носят различный характер. Отношение I_{VK}/W возрастает с увеличением высоты и начинает превалировать на высотах $h > 150$ км. Отношение I_{ING}/W практически постоянно во всем интервале высот, в то время как отношение $I_{557.7}/W$ имеет ярко выраженный максимум в интервале высот 100–120 км и уменьшается с увеличением высоты. Однако, высотные распределения отношений полной выделившейся энергии $W(h)$ к суммарной интенсивности излучения $I(h)$ в спектральном диапазоне 380–580 нм, обозначенные в этой работе как $k(h)$, носят другой характер. На рис. 2 приведены рассчитанные зависимости $k(h)$ для различных параметров высыпавшегося потока электронов и концентраций окиси азота. Из рисунка можно видеть, что $k(h)$ демонстрируют идентичное поведение для всего диапазона вариаций характеристической энергии, потока энергии высыпавшихся электронов и величины концентрации окиси азота. Это позволяет рассчитать усредненную зависимость k от высоты h , которая показана на рис. 3. Здесь же приведены среднеквадратичные отклонения этого параметра на нескольких высотах. Видно, что среднеквадратичная ошибка для коэффициента $k(h)$ лежит в пределах 10%. Таким образом, применение данного коэффициента открывает возможность использовать результаты наблюдений полярных сияний камерами с широким спектральным интервалом [2] для восстановления высотных профилей энерговыделения и, следовательно, для оценки параметров потока высыпавшихся электронов. Применяя рассчитанный коэффициент $k(h)$ преобразуем согласно формуле (2) экспериментально полученную объемную интенсивность излучения $I(h)$ в выделившуюся энергию $W(h)$. На рис. 4 приведены полученные в работе [2] высотные профили объемной интенсивности излучения для четырех случаев лучистых форм полярных сияний и восстановленные по ним высотные профили энерговыделения $W(h)$.

Решая уравнение (1) относительно $f(E)$, восстановим энергетические спектры потоков высыпавшихся электронов. Функция диссипации энергии $\lambda(h, E)$ и интегральные длины пробега $R(E)$ в формуле (1) задавались в соответствии с работой [1]. Полученные энергетические спектры $f(E)$ для четырех случаев лучистых полярных сияний, рассмотренных в работе [2], приведены на рис. 5. Из рисунка можно видеть две характерные особенности в поведении энергетического спектра $f(E)$. В области энергий $E \sim 500\text{--}1000$ эВ наблюдается локальный максимум, в то время как в области энергий $E \leq 200$ эВ величина дифференциального потока электронов демонстрирует резкое возрастание с уменьшением энергии близкое к степенной зависимости $E^{-\alpha}$. Подобный харак-

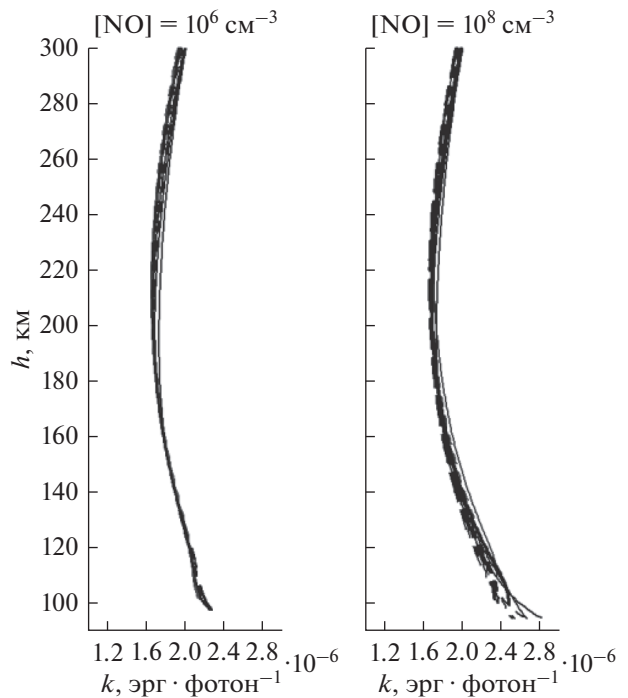


Рис. 2. Рассчитанные отношения полной выделившейся энергии $W(h)$ к суммарной интенсивности излучения $I(h)$ в диапазоне 380–580 нм. Каждая линия соответствует паре определенных значений E_0 и F_0 .

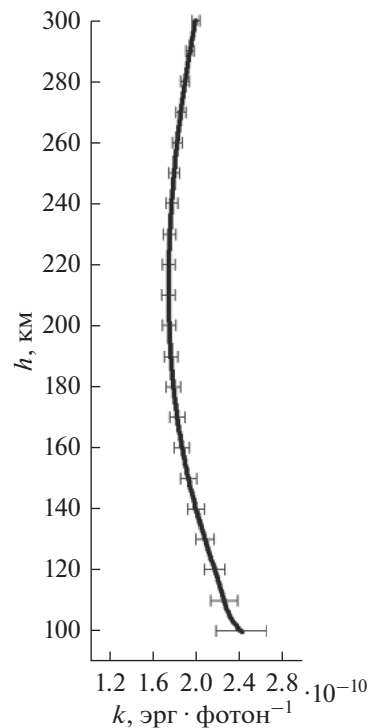


Рис. 3. Усредненная высотная зависимость коэффициента $k(h)$.

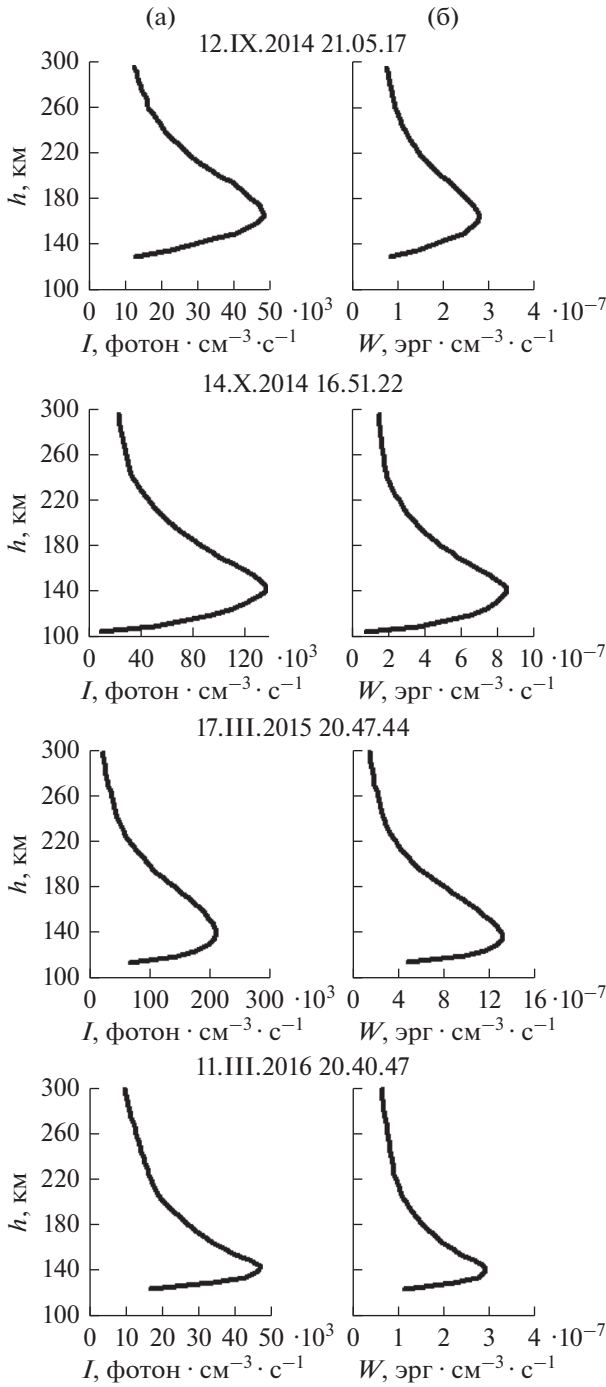


Рис. 4. Результаты преобразования высотных профилей экспериментально полученных объемных интенсивностей излучения [2] (панель “а”) в высотные профили энерговыделения $W(h)$ (панель “б”).

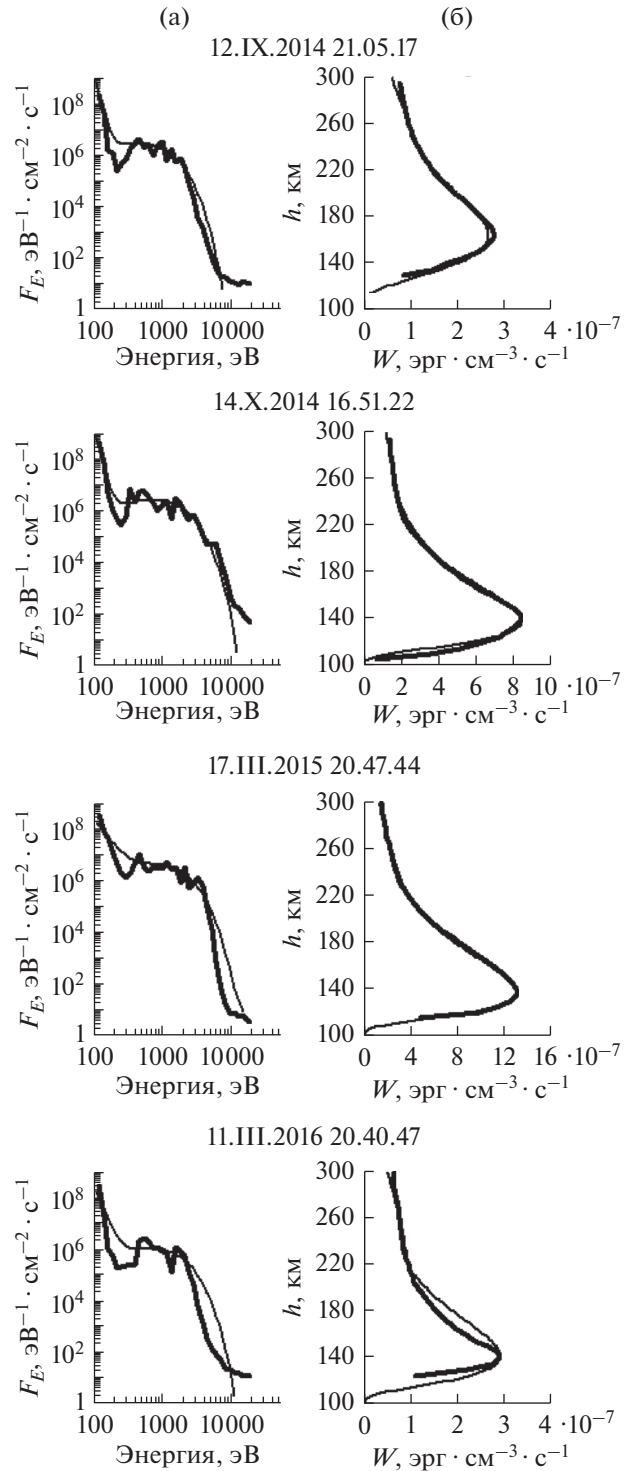


Рис. 5. Сравнение экспериментально восстановленных и аппроксимированных результатов. Панель “а” – восстановленные энергетические спектры $f(E)$ (толстая линия) и аппроксимация $f(E)$ (тонкая линия). Панель “б” – высотные профили энерговыделения $W(h)$, восстановленные (толстая линия) и рассчитанные для аппроксимированных потоков $f(E)$ (4).

тер поведения кривой $f(E)$ позволяет аппроксимировать восстановленные энергетические спектры суммой следующих функций:

$$f(E) = N_1 E^{-\alpha} + N_2 E \exp(-E/E_0)/E_0^2, \quad (4)$$

где N_1 и N_2 – константы, E – энергия электронов в эВ, E_0 – характеристическая энергия в эВ.

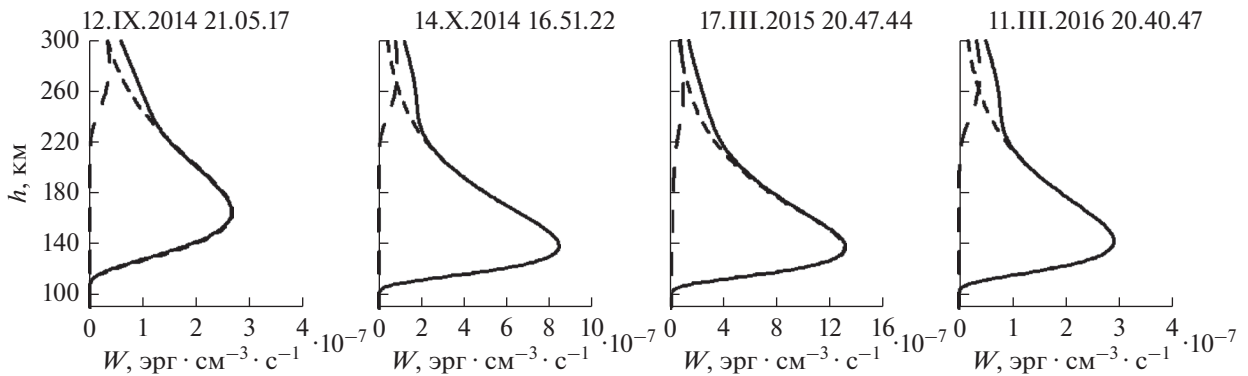


Рис. 6. Вклады в энерговыделение $W(h)$ (сплошная линия) потоков с различным распределением по энергиям: максвелловское распределение – короткий пунктир, степенное распределение – длинный пунктир.

На рис. 5 на панели “а” показаны результаты аппроксимации функционалом (4) восстановленных ранее энергетических спектров. Рассчитанные для этих аппроксимированных потоков интегральные интенсивности эмиссии 557.7 нм лежат в интервале от 4.4–15 кРл, что соответствует величинам, наблюдаемым в полярных сияниях. На рис. 5 панель “б” показано сравнение рассчитанных с использованием формулы (4) высотных профилей энерговыделения и профилей, восстановленных ранее по экспериментальным данным работы [2]. Как видно, полученные различными путями профили энергии, выделившейся при высыпании электронных потоков, демонстрируют хорошее согласие. Таким образом, энергетический спектр высыпающихся электронов, формирующих лучистые структуры полярных сияний, аппроксимируется суммой двух функций, носящих степенной характер на малых энергиях и максвелловское распределение по энергиям на энергиях >250 эВ.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим парциальные вклады в суммарное высотное энерговыделение $W(h)$ электронных потоков, имеющих различный характер распределения по энергиям для рассматриваемых ранее случаев лучистых полярных сияний. На рис. 6 приведены высотные профили энерговыделения для электронных потоков, имеющих степенной энергетический спектр и максвелловское распределение по энергиям. Из рисунка видно, что на высотах больше 250 км именно потоки электронов со степенным распределением по энергии формируют значительную вертикальную протяженность энерговыделения, и, следовательно, интенсивности излучения, в лучистых структурах, что является принципиальным отличием от высотного распределения энерговыделения в спокойных дугах и полосах полярных сияний.

Морфологически события, рассмотренные в данной работе, представляли собой лучистые полосы [2]. Поэтому, полученные результаты позволяют предположить, что лучистые структуры в полярных сияниях формируются благодаря сбросу в ионосферу электронов, имеющих степенное распределение по энергиям. Такое распределение может формироваться при попадании тепловых электронов ионосферного происхождения, имеющих степенное распределение плотности по высоте, в околоземную часть области ускорения. В этом случае за счет разного пройденного пути в ускоряющем поле степенное высотное распределение электронов преобразуется в степенное распределение по энергии в высыпающемся пучке. Детальное рассмотрение формирования энергетического спектра высыпающихся электронов требует комплексного моделирования динамики магнитосферно-ионосферного взаимодействия, что выходит за рамки данной работы.

ВЫВОДЫ

В работе представлена методика восстановления высотных профилей энерговыделения, сформированных потоками высыпающихся электронов, с использованием камер, регистрирующих излучение в широком спектральном диапазоне длин волн (380.0–580.0 нм). Восстановлены и исследованы особенности энергетических спектров высыпающихся электронов $f(E)$, формирующих лучистые структуры в полярных сияниях. Показано, что в поведении $f(E)$ наблюдаются две характерные особенности. В области энергий $E \sim 500$ –1000 эВ наблюдается локальный максимум, в то время как в области энергий $E \leq 250$ эВ величина дифференциального потока электронов демонстрирует резкое возрастание с уменьшением энергии близкое к степенной зависимости $E^{-\alpha}$. Показано, что полученные распределения $f(E)$ хорошо аппроксимируются суммой двух функций, носящих степенной характер на малых

энергиях и максвелловское распределение по энергиям на энергиях >250 эВ. Высказано предположение, что лучистые структуры в полярных сияниях формируются благодаря сбросу в ионосферу электронов, имеющих степенное распределение по энергиям. Обсужден физический механизм формирования такого распределения электронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В.Е., Козелов Б.В.* Прохождение электронных и протонно-водородных пучков в атмосфере Земли. Апатиты: Кольский научный центр, 2001.
2. *Козелов Б.В., Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е.* Исследование лучистых структур триангуляционными методами: 1. Интенсивность излучения // *Космич. исслед.* 2021. Т. 59. № 4. С. 267–274.
3. *Jones A.V.* *Aurora*. Boston: D.Reidel Published Company, 1974.
4. *Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Сергиенко Т.И., Козелов Б.В.* Физико-химическая модель авроральной ионосферы // *Космич. исслед.* 2017. Т. 55. № 2. С. 94–106.
5. *Hedin A.E.* Extension of the MSIS Thermospheric Model into the Middle and Lower Atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 1159.
6. *Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е.* Оценка концентрации NO в области полярных сияний по интенсивностям эмиссий 391.4, 557.7 и 630.0 нм // *Космич. исслед.* 2017. Т. 55. № 5. С. 337–341. <https://doi.org/10.7868/S0023420617050028>
7. *Swider W., Narcisi R.S.* Auroral E-region: Ion composition and nitric oxide // *Planet. Space Sci.* 1977. V. 25. P. 103–116.
8. *Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е.* Оценка содержания окиси азота в полярных сияниях по данным наземных фотометрических наблюдений // *Солнечно-земная физика.* 2019. Т. 5. С. 77–81.