

УДК 53.05:528.735.2

ВЫСОТА АВРОРАЛЬНОГО СВЕЧЕНИЯ НА ПОЛЮСНОЙ И ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ГРАНИЦАХ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА ПО ДАННЫМ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С МАЛОЙ БАЗОЙ

© 2022 г. Б. В. Козелов¹ *, А. В. Ролдугин¹

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

*E-mail: boris.kozelov@gmail.com

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 05.11.2021 г.

Принята к публикации 22.11.2021 г.

Проанализированы данные о высоте полярных сияний для типичных форм, наблюдаемых на приполюсной и экваториальной границах аврорального овала. Использована триангуляция по данным двух пар камер, расположенных в Апатитах и Баренцбурге, с небольшим (~4 км) пространственным разнесением камер в парах. Приведены в динамике оценки энергии высыпающихся электронов для различных авроральных структур.

DOI: 10.31857/S0367676522030139

ВВЕДЕНИЕ

Авроральное свечение атмосферы, полярные сияния, — характерное проявление магнитосферно-ионосферного взаимодействия в высоких широтах. Основная часть регистрируемых с поверхности Земли полярных сияний вызывается высыпаниями потоков электронов. Причудливые пространственные формы полярных сияний свидетельствуют о сложной динамике процессов в магнитосферно-ионосферной плазме, связанных с этими высыпаниями.

Определение энергии высыпающихся авроральных частиц дает существенную информацию о происходящих процессах. Высота аврорального свечения напрямую связана с энергией высыпающихся частиц и ее определение по данным наземных оптических наблюдений из нескольких точек возможно методом триангуляции [1]. Однако для наблюдений сложных динамичных авроральных структур из сильно разнесенных точек (более десятка километров), триангуляция осложняется сильными аспектными искажениями и проблемами с отождествлением. При небольшом разнесении точек наблюдения (<10 км) этих проблем, в основном, удастся избежать.

Ранее в работе [2] по данным наблюдений пары авроральных камер при разнесении ~4 км было показано примеры определения высотных профилей аврорального свечения в лучистых структурах вблизи магнитного зенита. Однако такой анализ требует отождествления отдельных

лучей “вручную”, что достаточно трудоемко. Менее трудоемким и поддающимся автоматизации является определение “эффективной” энергии высыпающихся электронов по всему полю зрения авроральных камер [3, 4]. В случае малого разнесения камер и небольшого поля зрения аспектные искажения не сильно искажают наблюдаемую структуру, и, фактически, камеры регистрируют одну и ту же форму авроральной структуры, смещенную на фоне удаленных звезд. Величина этого смещения позволяет сделать оценку высоты структуры и из нее — “эффективной” энергии высыпающихся электронов.

В данной работе мы анализируем данные наблюдений аврорального свечения для типичных форм полярных сияний, регистрируемых на приполюсной и экваториальной границах овала полярных сияний с помощью двух пар камер Полярного геофизического института (ПГИ), установленных вблизи п. Баренцбург (арх. Шпицберген) и вблизи г. Апатиты. Оценки энергии высыпающихся электронов приведены в процессе эволюции для нескольких типичных авроральных структур.

ОБОРУДОВАНИЕ

На архипелаге Шпицберген авроральная камера ASC (All-Sky Camera) всего неба ПГИ установлена в основном оптическом павильоне обсерватории ПГИ “Баренцбург”, в 4 км к северу от п. Баренцбург. Вспомогательная камера NAC (Narrow-field Auroral Camera) с полем зрения

$\sim 30^\circ$, направленная в магнитный зенит, размещена в поселке. Обе камеры собраны на базе RGB КМОП охлаждаемых астрокамер фирмы ZWO. Камера всего неба регистрирует изображение 274×390 пикселей с временным разрешением 1 с, а камера NAC дает изображение 450×350 пикселей с временным разрешением 2 с. Угловое разрешение камеры NAC 0.0837 град/пиксель (~ 5 угловых секунд на пиксель), для этого же поля зрения угловое разрешение камеры ASC примерно в 5.6 раза меньше. Подробное описание этих оптических приборов приведено в [4].

Две идентичные камеры системы MAIN (Multiscale Auroral Imaging Network), работающей в г. Апатиты, также образуют триангуляционную пару. Детальное описание системы камер опубликовано в статье [5]. Мы используем данные камер Gupru-1 и Gupru-2, для триангуляции высоты аврорального свечения вблизи магнитного зенита и данные камеры всего неба в Апатитах для контроля общей авроральной ситуации. Камеры Gupru-1 и Gupru-2 регистрируют изображение 376×288 пикселей с временным разрешением 1 с. Поле зрения камер $\sim 18^\circ$, угловое разрешение 0.038 град./пиксель (~ 2.3 угловых секунды на пиксель). Камеры Gupru-1 и Gupru-2 разнесены на 4.12 км, но, в отличие от камер на Шпицбергене, в направлении “восток–запад”, а не “север–юг”.

Все геометрические параметры наблюдений (ориентация, масштабные коэффициенты и относительное положение изображений) определялись и уточнялись по звездам. Синхронизация камер проводилась по сигналам GPS с точностью не хуже 1 мс и дополнительно контролировалась по прохождению в поле зрения низкоорбитальных спутников.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Использованная далее методика для обработки изображений и определения высоты аврорального свечения описана в работах [3, 4]. После уточнения ориентации и относительного положения изображений на исходных изображениях удалялись звезды. В случае камер с разным угловым разрешением (камеры в Баренцбурге) изображение с меньшим разрешением (ASC) линейной аппроксимацией приводилось к разрешению другой камеры (NAC). После этого выделение пространственной структуры свечения проводилось с использованием фильтра Собела [6] на масштабах $m = 8$ пикселей. Между полученными массивами вычислялся коэффициент корреляции при последовательном относительном смещении массивов вдоль направления между камерами. “Эффективная” высота определялась по смещению,

которому соответствует максимум коэффициента корреляции:

$$h = \frac{D \cos(w + fdy)}{\sin(fdx)} \approx \frac{D}{\sin(fdx)}. \quad (1)$$

Здесь: w – зенитный угол центра изображения, dx – относительное смещение (параллакс) вдоль направления между камерами, в пикселах, f – угловое разрешение, dy – положение в направлении перпендикулярно направлению между камерами относительно центра изображения, пиксел, D – расстояние между точками наблюдения.

Далее “эффективной” высоте аврорального свечения мы приводим в соответствие среднюю энергию потока электронов, максимум высотного распределения диссипации энергии которого в атмосфере соответствует этой высоте. Оценки проведены по модели, опубликованной в [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведен пример обработки события с появлением и началом развития лучистой дуги, наблюдаемого камерами на Шпицбергене 9 февраля 2019 г. с 21:58 UT по 22:04 UT. На рис. 1а показана кеограмма, построенная по данным камеры всего неба, т.е. зависимость от времени интенсивности свечения в проходящем через зенит сечении поля зрения камеры с севера на юг. Как и в работе [3], здесь и далее изображение полярных сияний инвертировано, т.е. черный цвет соответствует наибольшей интенсивности, белый – наименьшей. На кеограмме видно, что на фоне окончания предыдущей активизации к югу от зенита, новая лучистая дуга возникла вблизи зенита в 21:58:30 UT и в течение ~ 90 с смешалась к югу. Назовем этот интервал первой активизацией. После этого в 22:00 UT возникла новая дуга вблизи зенита и начала свое развитие с постепенным смещением к северу, это вторая активизация. Мы рассматриваем только начальные 4 мин динамики этой дуги, пока она находилась в поле зрения камеры NAC, см. кеограмму на рис. 1б. Динамика активизаций в сияниях соответствует изменениям в отрицательную сторону в h -компоненте магнитного поля по данным наблюдений магнитометра в Баренцбурге, на рис. 2 приведена магнитограмма обсерватории Баренцбург и выделены обсуждаемые участки.

На рис. 1в приведены значения “эффективной” высоты аврорального свечения по триангуляционной оценке. В интервале 21:59:30–21:59:50 UT имеется пробел, так как сияния отсутствуют в поле зрения камеры NAC. Видно, что в начале обеих активизаций сияния расположены на высоте ~ 200 км, что соответствует высыпаниям электронов с энергией ~ 200 эВ. По мере развития активизации сияния спускаются на меньшие высоты,

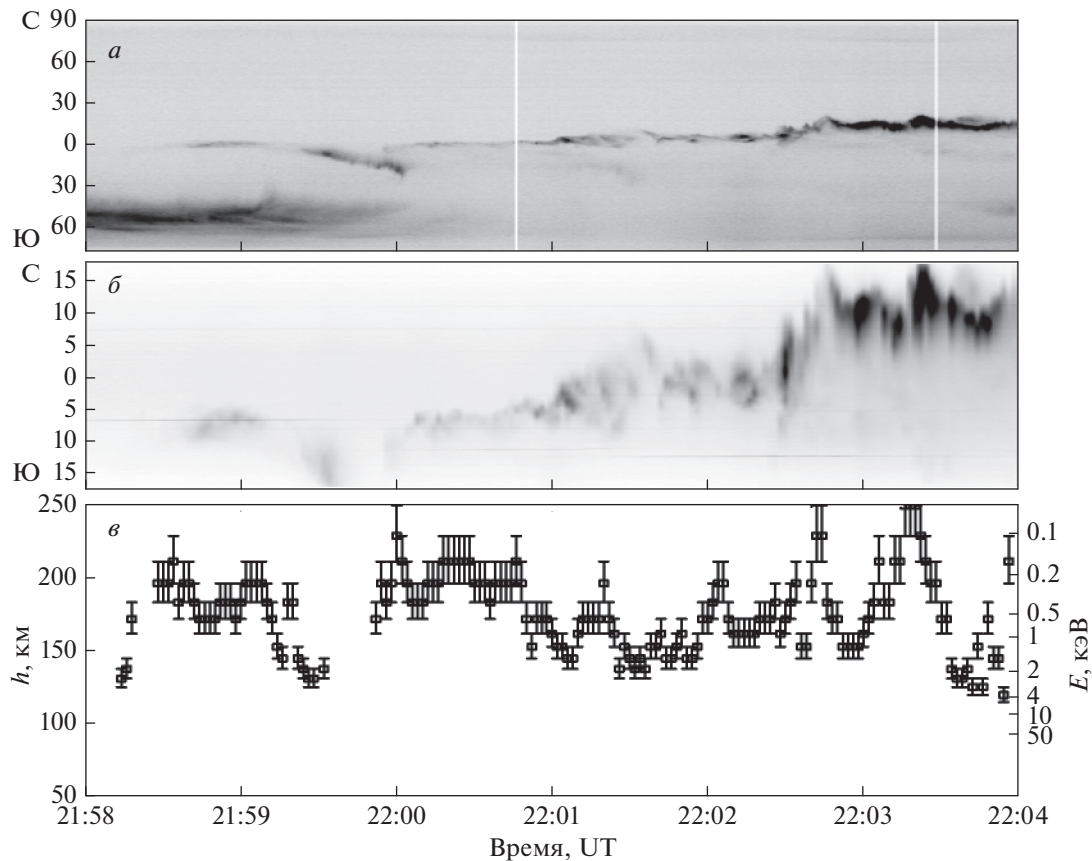


Рис. 1. Свечение неба, зарегистрированное камерами в Баренцбурге (Шпицберген) 9 февраля 2019 г. с 21:58 до 22:04 UT: кеограмма для разреза в направлении север–юг, построенная по данным камеры ASC (*а*); кеограмма для разреза в направлении север–юг, построенная по данным камеры NAC (*б*); зависимость эффективной высоты авроральных структур в поле зрения камеры NAC (*в*), ось справа – энергия электронов, высотный профиль энерговыделения для которых имеет максимум на соответствующей высоте. Зенитные углы на панелях *а* и *б* в градусах.

130 км для первой активизации и 115 км для второй, что соответствует энергии электронов 2 и 4 кэВ, соответственно. Полученные значения “эффективных” высот лучистых дуг согласуются с более детальным анализом высотных профилей свечения в отдельных лучах, проведенным в работе [2] по данным камер в Апатитах.

Следующий интервал, 22:19–22:21 UT, представленный на рис. 3, соответствует максимуму локального магнитного возмущения в этой активизации (около –150 нТл). В начале этого интервала в поле зрения камеры ASC видна широкая полоса сияний и яркая дуга ~30 градусов к северу от нее. В 22:19:25 UT эта дуга расщепляется на две дуги и их интенсивность уменьшается. В то же время интенсивность полосы в зените увеличивается, появляется внутренняя волокнистая структура, хорошо видная также на камере NAC. Высота свечения в этой полосе постепенно уменьшается с 140 до 110 км, что соответствует увеличению средней энергии электронов с 2 до 10 кэВ.

Увеличение энергии высыпающихся электронов наблюдается довольно часто в таких событиях, как появление новой дуги в начале активизации и увеличение интенсивности аврорального свечения

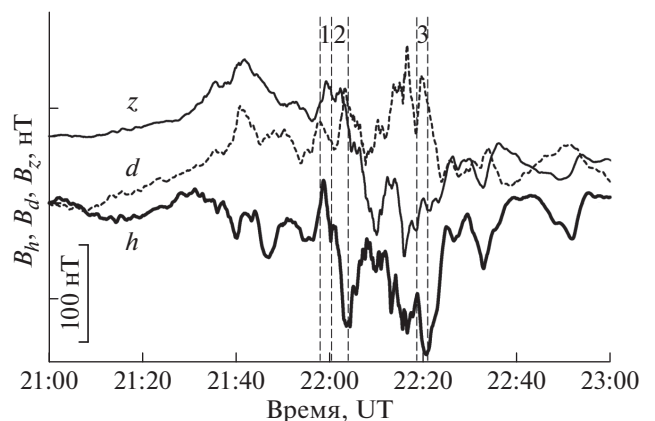


Рис. 2. Вариации магнитного поля по данным магнитометра в Баренцбурге (Шпицберген).

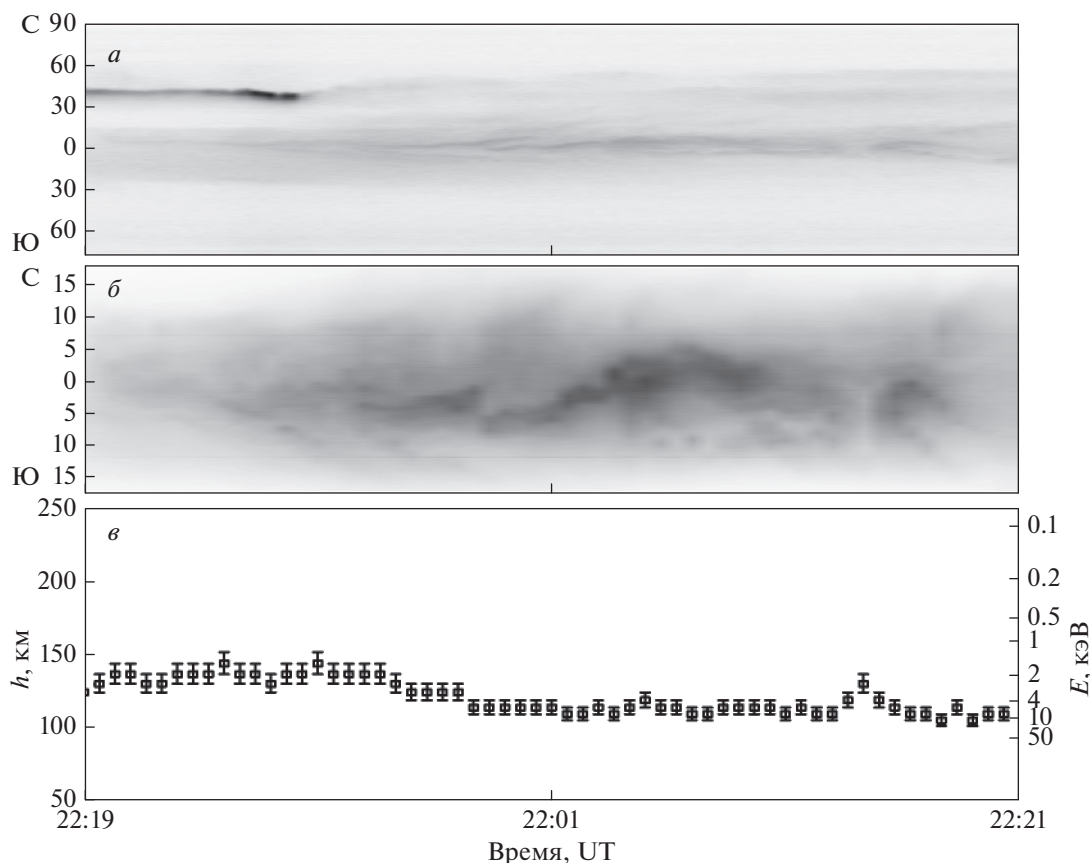


Рис. 3. То же, что на рис. 1, но для интервала 22:19–22:21 UT.

в полосе. Однако интенсивность аврорального свечения зависит от потока энергии, диссипируемой авроральными частицами, и энергия высыпавшихся электронов не всегда напрямую с ним связана. Пример такого события приведен в работе [3], где по данным триангуляционных камер системы MAIN в Апатитах рассмотрен случай 30 марта 2017 с 23:00–23:30 UT. В интервале 23:26–23:30 UT наблюдалась модуляция пульсирующих сияний с периодом около 1 мин. Высота аврорального свечения варьировалась в диапазоне высот 92–100 км, что соответствует энергиям 20–40 кэВ. Увеличение интенсивности свечения сопровождалось увеличением эффективной высоты, т.е. уменьшением эффективной энергии электронов.

Рисунок 4 иллюстрирует пример наблюдения той же системой в Апатитах 14 марта 2018 г. похожего случая с крупномасштабной модуляцией пульсирующих сияний, но прямой зависимостью интенсивности аврорального свечения и эффективной энергии электронов. На рис. 4а приведена кеограмма, построенная по данным камеры всего неба для разреза, проходящего через зенит сечения поля зрения камеры с севера на юг. Для построения кеограмм по данным камер Gyrру-1 и Gyrру-2 использован разрез в направлении раз-

несения камер, т.е. “восток-запад”, см. рис. 4б и 4в. На рис. 4г показана полученная триангуляцией высота аврорального свечения. Для упрощения рисунка погрешности нанесены не для всех точек, но для всех точек, расположенных на одной высоте погрешности одинаковы. Высота свечения в данном случае варьируется в диапазоне 120–145 км, что соответствует энергии электронов 1.5–4.0 кэВ.

На рис. 4д для наглядности приведены сглаженные с окном 40 с вариации высоты аврорального свечения и полной интенсивности аврорального свечения в поле зрения камер Gyrру-1 и Gyrру-2. Видно, что крупномасштабные вариации схожи. Коэффициент корреляции для вариаций высоты и интенсивности для камер Gyrру-1 и Gyrру-2 составляет 0.65 и 0.63, соответственно. Для более быстрых вариаций коэффициент корреляции близок к нулю.

Хотя пульсирующие полярные сияния в данном случае и в случае, представленном в [3], морфологически схожи, отличие на порядок в энергиях электронов свидетельствует о различии механизмов, вызывающих крупномасштабные (десятьки секунд – минуты) вариации сияний. Вариации потоков электронов с энергией 1.5–4.0 кэВ могут быть вызваны изменениями в области ускорения (ано-

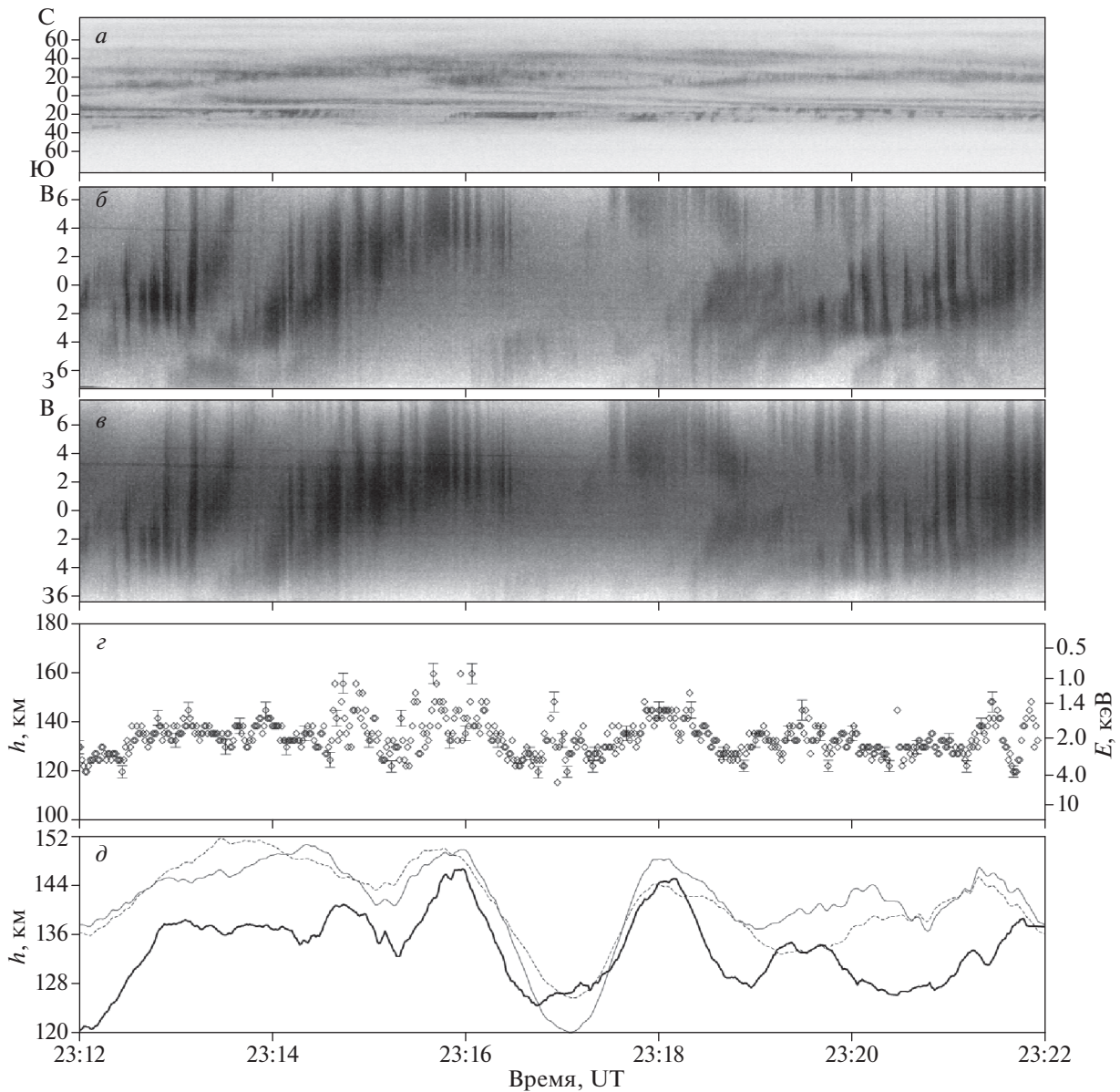


Рис. 4. Свечение неба, зарегистрированное камерами системы MAIN 14 марта 2018 г. с 23:12 до 23:22 UT: кеограмма для разреза в направлении север-юг, построенная по данным камеры всего неба (а); кеограммы для разреза вдоль линии восток-запад, построенные по данным камер Gyrro-1 и Gyrro-2 (б, в); зависимость эффективной высоты авроральных структур в поле зрения камер Gyrro-1 и Gyrro-2 (г), ось справа – энергия электронов, высотный профиль энерговыделения для которых имеет максимум на соответствующей высоте; зависимость эффективной высоты авроральных структур, сглаженная с окном 40 с, показана жирной линией (д), вариации полной интенсивности аврорального свечения в поле зрения камер Gyrro-1 и Gyrro-2, сглаженные с окном 40 с, показаны тонкой и пунктирной линиями (в произвольных единицах). Зенитные углы на панелях а–в в градусах.

мального сопротивления). Вариации потоков более энергичных электронов 20–40 кэВ, скорее всего, вызваны модуляцией потоков плазмы волновыми процессами в магнитосфере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работающие в настоящее время авроральные камеры в Апатитах и на Шпицбергене позволяют

получать высоту аврорального свечения триангуляционными измерениями с малой базой. Сравнение с модельными расчетами позволяет оценить среднюю энергию высыпающихся авроральных электронов. Представлены примеры авроральных событий, в которых на масштабе десятки секунд – минуты прослеживается прямая связь энергии электронов и интенсивности аврорального свечения: повышение интенсивности свечения сопро-

вождается уменьшением высоты, т.е. повышением энергии. Первые два события — появление и последующее увеличение яркости лучистой дуги, а также увеличение интенсивности свечения в широкой авроральной полосе — рассмотрены по данным камер на Шпицбергене, т.е. на полюсной границе аврорального овала, однако подобные события наблюдаются и на меньших широтах. Третье событие — пульсирующие сияния — характерно для экваториальной части аврорального овала и наблюдались камерами в Апатитах.

В рассмотренных случаях средняя энергия электронов не превышала 10 кэВ, а изменение энергии в событие — менее 8 кэВ. Можно предположить, что, несмотря на морфологические различия в авроральных формах и положении в авроральном овале, во всех рассмотренных случаях одновременное увеличение энергии электронов и интенсивности аврорального свечения связано с дополнительным ускорением потока частиц в околоземной области ускорения.

Полученные оценки высоты аврорального свечения и энергии электронов хорошо согласуются с результатами других исследователей [1, 8–11]. В отличие от предыдущих работ, ограничивающихся рассмотрением спокойных дуг по данным далеко (более 10 км) разнесенных камер, использование малой базы при триангуляционных измерениях позволяет в динамике оценивать высоту аврорального свечения для практически любой достаточно контрастной авроральной структуры в поле зрения. При этом не требуется использовать до-

статочно сложных и не всегда однозначных алгоритмов томографической реконструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Störmer C.* // Geofysisk Publikationer. 1921. V. 1. No. 5. 1921. P. 269.
2. *Козелов Б.В., Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е.* // Косм. иссл. 2021. Т. 59. № 4. С. 267.
3. *Козелов Б.В., Ролдугин А.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 3. С. 366; *Kozelov B.V., Roldugin A.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 3. P. 256.
4. *Kozelov B.V., Roldugin A.V., Pilgaev S.V., Grigoriev V.F.* // Proc. XLII Ann. Sem. “Physics of Auroral Phenomena” (Apatity, 2019). P. 152.
5. *Kozelov B.V., Pilgaev S.V., Borovkov L.P., Yurov V.E.* // Geosci. Instrum. Method. Data Syst. 2012. V. 1. P. 1.
6. *Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В. и др.* Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: курс лекций и практических занятий. М.: Физматкнига, 2010. 672 с.
7. *Иванов И.Е., Козелов Б.В.* Перенос электронных и протонно-водородных потоков в атмосфере Земли. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2001. 260 с.
8. *Aso T., Hashimoto T., Abe M. et al.* // J. Geomagn. Geoelectr. 1990. V. 42. P. 579.
9. *Oznovich I., McEwen D.J., Eastes R.W.* // Geophys. Res. Lett. 1993. V. 20. No. 18. P. 1995.
10. *Frey H.U., Frey S., Bauer O.H., Haerendel G.* // Proc. SPIE. 1996. V. 2827. P. 142.
11. *Frey H.U., Frey S., Lanchester B.S., Kosch M.* // Ann. Geophys. 1998. V. 16. P. 1332.

The altitude of the auroral luminescence at the pole and equatorial boundaries of the auroral oval according to the data of triangulation measurements with a small baseline

B. V. Kozelov^{a, *}, A. V. Roldugin^a

^a *Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia*

**e-mail: boris.kozelov@gmail.com*

We analyzed the altitude of auroras for typical forms observed at the polar and equatorial boundaries of the auroral oval. Triangulation was used according to data from two pairs of cameras located in Apatity and Barentsburg, with a small (~4 km) spatial separation of cameras in pairs. The dynamics of the energy estimates of precipitating electrons for various auroral structures are presented.