

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛУЧИСТЫХ СТРУКТУР В ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЯХ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ: 1. ВЫСОТНЫЙ ПРОФИЛЬ ОБЪЕМНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕЧЕНИЯ

© 2021 г. Б. В. Козелов<sup>1</sup>, \*, Ж. В. Дашкевич<sup>1</sup>, В. Е. Иванов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

\*boris.kozelov@gmail.com

Поступила в редакцию 02.11.2020 г.

После доработки 14.12.2020 г.

Принята к публикации 22.01.2021 г.

Представлена методика восстановления высотных профилей объемной интенсивности свечения и оценки поперечных размеров лучистых структур в полярных сияниях по данным триангуляционных наблюдений. Особенностью экспериментальных данных является использование камер, регистрирующих излучение в широком сине-зеленом спектральном интервале длин волн (380–580 нм) и небольшое расстояние между камерами (4.12 км). Восстановлены высотные профили объемной интенсивности излучения для примеров полярных сияний с ярко выраженной лучистой структурой.

DOI: 10.31857/S0023420621040038

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Лучистые структуры являются довольно характерными для полярных сияний образованиями. Они наблюдаются как виде лучистых дуг и полос, так и отдельных лучей или совокупности лучей, получившей название корона. По сравнению с дугами и полосами для лучистых структур характерна более значительная высотная протяженность и небольшие поперечные размеры. Кроме того, в отличие от дуг и полос, лучистые структуры не являются спокойными и долгоживущими образованиями. Быстрая пространственная динамика и флуктуации интенсивности излучения делают их труднодоступными для прямого исследования на космических аппаратах. Альтернативным подходом к задачам исследования лучистых структур может служить наземная регистрация сияний при одновременном наблюдении из разнесенных пунктов. Результаты подобных триангуляционных наблюдений позволяют получать оценки вертикальной протяженности светимости и поперечных размеров лучистых структур и, как следствие, восстанавливать высотные профили объемной интенсивности свечения. Высотные профили объемной интенсивности свечения являются тем экспериментальным материалом, который позволяет восстанавливать и исследовать вид энергетического спектра выпадающих электронов. Исследования особенностей восстановленных энергетических спектров позволяет приблизиться к лучшему пониманию механизмов формирования и сброса в ионосферу электрон-

ных потоков, формирующих лучистые структуры в полярных сияниях.

Целью данной работы является восстановление высотных профилей объемной интенсивности свечения в лучистых структурах по данным триангуляционных наблюдений полярных сияний. Высотные профили объемной интенсивности излучения восстанавливались из данных, полученных на сети территориально распределенных камер системы MAIN (Multiscale Auroral Imaging Network), разработанной в Полярном геофизическом институте [1].

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТЫ СВЕЧЕНИЯ

Полярные сияния регистрировались системой авроральных камер MAIN в Апатитах в течение сезонов 2011–2020 гг. Две камеры Guppy-1 и Guppy-2 в этой системе идентичны, имеют поле зрения 18 градусов по диагонали и расположены на расстоянии 4.12 км друг от друга в направлении восток-запад. Камеры ориентированы на область вблизи магнитного зенита, и их работа синхронизована по сигналам GPS. Несмотря на небольшое расстояние между камерами, углового разрешения в 0.038 градусов на пиксел оказывается достаточно для того, чтобы определить угловой параллакс для определения эффективной высоты структур аврорального свечения. В то же время, из-за малого расстояния существенно возрастает уверенность в правильной идентификации одних и тех же элементов сияния на разных изображе-

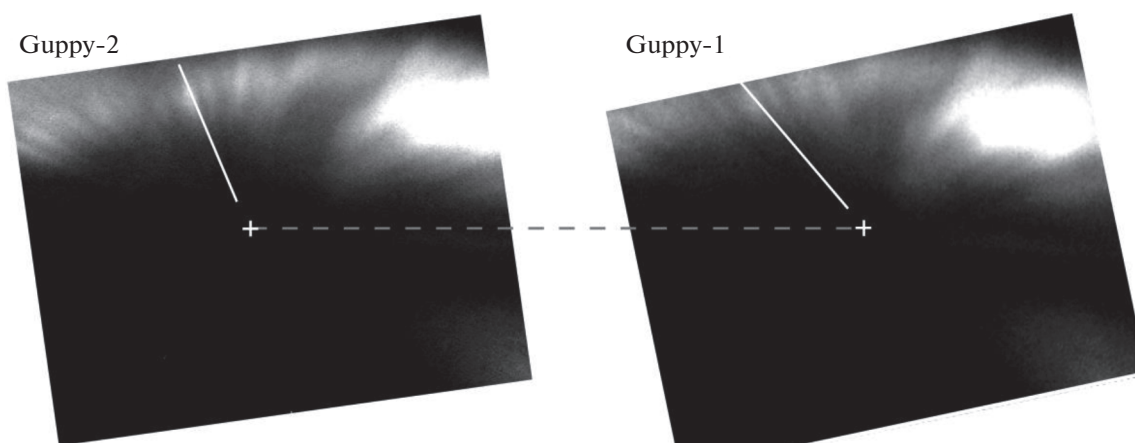


Рис. 1. Пример одновременной регистрации лучистой структуры полярных сияний двумя камерами.

ниях, что не всегда возможно при большем разнесении камер. Камеры снабжены одинаковыми стеклянными фильтрами, подавляющими красную часть спектра. С коротковолновой части спектра полоса регистрируемых длин волн ограничена полосой чувствительности ПЗС матрицы. В итоге спектральная полоса пропускания камер ограничена диапазоном 380–580 нм. Полоса пропускания и калибровка регистрируемых скоростей счета этих камер к абсолютным значениям обсуждались в работе [2]. Как будет показано далее, при известном составе сине-зеленой части регистрируемого спектра полярных сияний этой информации достаточно для получения высотных профилей объемной интенсивности излучения.

Точная ориентация изображений с обеих камер определялась по звездам. Для обработки были отобраны пары изображений с явно различимыми лучами без заметного перекрытия авроральных структур. Пары изображений анализировались с использованием экиполярной геометрии, описание которой можно найти в книге [3]. Здесь опишем упрощенно для наглядности необходимые понятия. Экиполярной плоскостью назовем плоскость, проходящая через наблюдаемую точку и точки, в которых расположены камеры. Пересечение этой плоскости с плоскостью изображения каждой камеры дает экиполярные линии. Пары снимков с камер для наглядности удобно трансформировать таким образом, чтобы экиполярные линии для соответствующих точек совпадали и были ориентированы на результирующих парах изображений справа-налево. Соответствие точек устанавливалось по звездам, которые для нас являются бесконечно удаленными объектами. Для всех таких точек отрезки экиполярных линий, соединяющие их изображения на паре снимков, имеют одинаковую длину  $x_\infty$ . Для наблюдаемых точек, расположенных на конечных расстояниях, отрезки экиполярных линий  $x$  будут тем короче, чем ближе к наблюдателю расположена точка. Та-

ким образом, разность  $dx = x_\infty - x$  характеризует относительное смещение (параллакс), наблюдаемый для данной точки парой камер на фоне звезд.

На рис. 1 приведен пример регистрации лучистой полосы полярных сияний парой камер системы MAIN. Звезды удалены фильтрацией, положения магнитного зенита на изображениях отмечено крестом и соединены пунктирным отрезком соответствующей экиполярной линии. Отрезками сплошной линией выделены изображения одного и того же аврорального луча. Видно, что отрезки по-разному ориентированы на кадрах, что соответствует большему относительному смещению (параллаксу) вблизи максимума интенсивности луча и уменьшению параллакса при приближении к магнитному зениту. Относительное смещение (параллакс) точек пересечения отрезков вдоль луча с экиполярной линией дает эффективную высоту точки на профиле луча согласно формуле:

$$h = \frac{D \cos(w + fy)}{\sin(f dx)}, \quad (1)$$

где  $dx$  – параллакс вдоль экиполярной линии в пикселях;  $y$  – положение экиполярной линии относительно центра изображения в пикселях;  $w = 12^\circ$  – зенитный угол центра изображения;  $f = 0.038$  градусов на пиксел – угловое разрешение камер;  $D = 4.12$  км – расстояние между точками наблюдения.

Рассчитанное согласно формуле (1) соответствие параллакса в пикселях и высоты авроральной структуры приведены на рис. 2.

При обработке данных вдоль выделенного аврорального луча по формуле (1) в каждой точке определялась эффективная высота и ей ставилась в соответствие интенсивность свечения  $I_c$  (в отсчетах в секунду), зарегистрированная на обоих изображениях. Для каждого луча получается два независимых высотных распределения интенсивности свечения от высоты (зарегистрированные

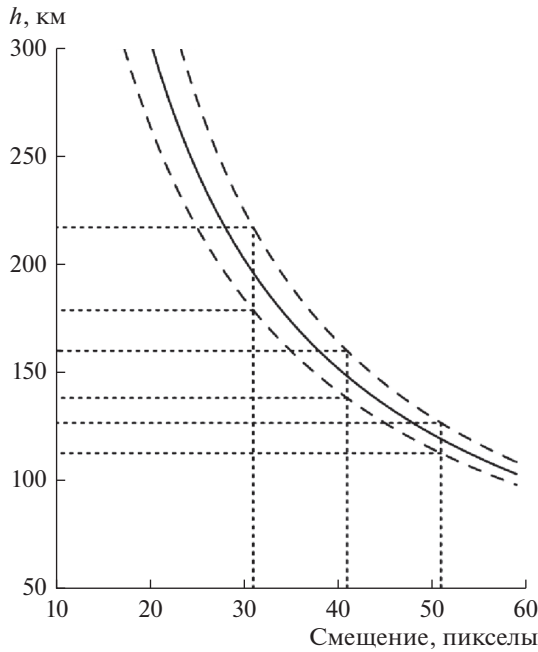


Рис. 2. Соответствие наблюдаемого параллакса в пикселах и высоты авроральной структуры.

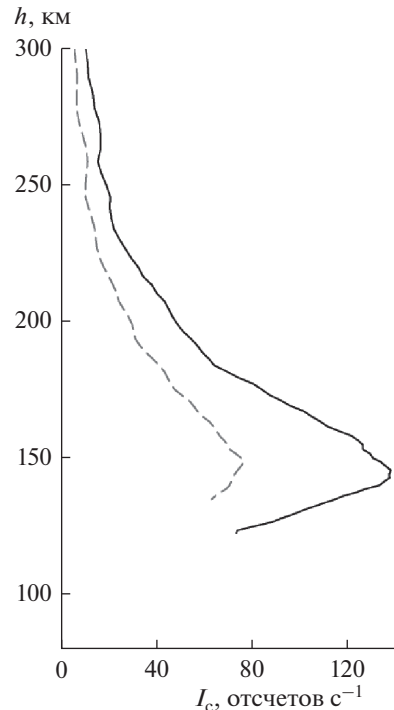


Рис. 3. Высотные распределения зарегистрированной интенсивности свечения вдоль выделенного луча на кадрах 14.IX.2014 16.51.28 UT: сплошная линия – для камеры GURRU-2, пунктир – для камеры GURRU-1.

на правом и левом изображении). Высотные распределения интенсивности вдоль луча в рассматриваемом примере приведены на рис. 3. Из рисунка видно, что максимум высотного профиля в данном луче лежит на 145 км.

### 3. ЭФФЕКТИВНЫЙ КАЛИБРОВОЧНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ

При известном составе линий и полос свечений в регистрируемом спектре можно определить связь между единицами отсчета ПЗС матрицы с величиной поверхностной интенсивности свечения (фотон  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ ). В камерах GURRU приемниками сигналов служат ПЗС матрицы, которые регистрируют суммарную скорость отсчетов в широком интервале длин волн в диапазоне спектральной чувствительности приемника. График спектральной чувствительности использованной оптической системы взят из работы [2] и приведен на рис. 4. Здесь же схематически изображены наиболее сильные по интенсивности линии и полосы полярного сияния, попадающие в спектральный диапазон камер. Из рисунка видно, что камеры эффективно регистрируют эмиссии и полосы, лежащие в диапазоне 380–580 нм. В этом диапазоне длин волн находятся следующие линии и полосы: зеленая линия атомарного кислорода OI 557.7 нм; более 20-ти полос Первой отрицательной системы иона молекулярного азота 1NG  $\text{N}_2^+$ , наиболее сильные из них – это полосы (1.1) – 388.4 нм, (0.0) – 391.4 нм, (1.2) – 423.6 нм, (0.1) – 427.8 нм, (1.3) – 465.1 нм, (0.2) – 470.9 нм; более 50-ти по-

лос системы VK Вегарда–Каплана молекулярного азота, из них наиболее сильные – (3.13) – 385.6 нм, (1.12) – 397.8 нм, (2.13) – 407.2 нм, (3.14) – 416.9 нм, (2.14) – 442.4 нм, (3.15) – 453.4 нм; более 20-ти полос Второй положительной системы молекулярного азота 2PG  $\text{N}_2$ , наиболее сильные из них – (0.2) – 380.4 нм, (2.5) – 394.3 нм, (1.4) – 399.8 нм, (0.3) – 405.8 нм, (1.5) – 426.8 нм [4]. Оценки показывают, что эмиссия 557.7 нм и полосы систем 1NG  $\text{N}_2^+$ , VK и 2PG  $\text{N}_2$  составляют более 90% от суммарной интенсивности излучения, регистрируемого камерами.

Введем понятие эффективного калибровочного коэффициента  $k_{eff}$ , который связывает скорость счета широкополосного приемника с интенсивностью излучения:

$$I = k_{eff} I_c, \tag{2}$$

где  $I$  – поверхностная интенсивность свечения, фотон  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ ;  $I_c$  – регистрируемая поверхностная интенсивность свечения, отсчет  $\text{с}^{-1}$ ;  $k_{eff}$  – эффективный калибровочный коэффициент, фотон  $\text{см}^{-2} \text{отсчет}^{-1}$ .

Через входящие в диапазон регистрации спектральные компоненты, эффективный калибровочный коэффициент  $k_{eff}$  можно выразить в виде:

$$k_{eff} = \sum_{\lambda} I_{\lambda} / \sum_{\lambda} (I_{\lambda} / k_{\lambda}), \tag{3}$$

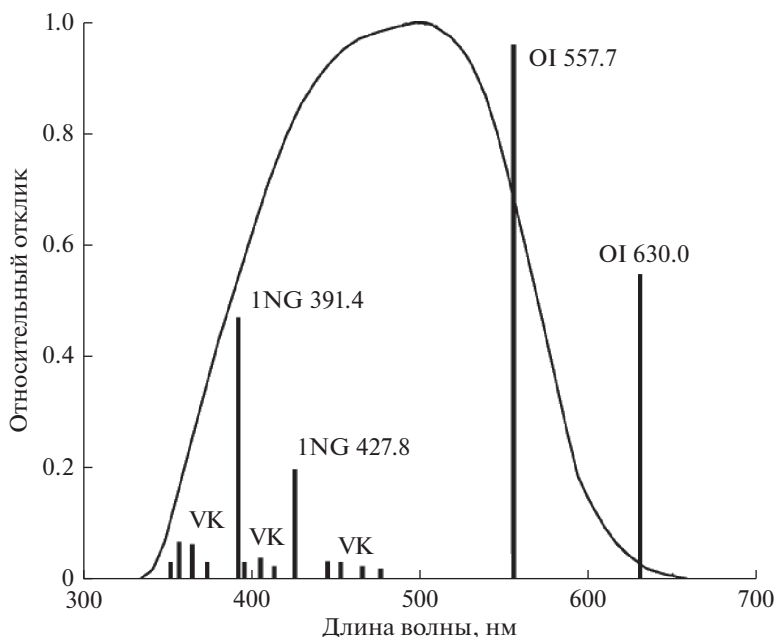


Рис. 4. Спектральная чувствительность камер Gery, входящих в систему MAIN.

где  $I_\lambda$  — интенсивность свечения эмиссии или полосы с длиной волны  $\lambda$ , фотон  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ ;  $k_\lambda$  — соответствующий спектральный калибровочный коэффициент,  $\text{см}^{-2} \text{отсчет}^{-1}$ .

В общем случае относительный вклад  $I_\lambda$  для разных длин волн  $\lambda$ , может зависеть от параметров высыпающего потока электронов, поэтому далее мы исследовали поведение  $k_{eff}$  в области полярных сияний в рамках нестационарной модели авроральной ионосферы, представленной в работе [5]. С этой целью моделировались высотные профили интенсивностей эмиссий и полос, лежащих в диапазоне спектральной чувствительности камер. Расчеты проводились в модели нейтральной атмосферы MSIS-90 [6]. Энергетический спектр высыпающих электронов задавался в виде максвелловского распределения с изотропным распределением по питч-углам в нижней полусфере:

$$f(E) = N_0 E_0 \exp(-E/E_0) / E_0^2, \quad (4)$$

где  $N_0$  и  $E_0$  — начальный поток и характеристическая энергия соответственно.

Характеристическая энергия  $E_0$  варьировалась в интервале 1–10 кэВ, поток энергии — в интервале 1–10 эрг  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ . Данный диапазон начальных параметров электронного потока, инициирующего полярные сияния, охватывает широкий интервал интенсивностей излучения в эмиссии 557.7 нм от  $2 \cdot 10^8$  до  $1.5 \cdot 10^{10}$  фотон  $\text{см}^{-2}$  (т.е. от 0.2 до 15 килорелей). Поскольку содержание окиси азота NO в области полярных сияний оказывает значительное влияние на интенсивность излучения зеленой линии 557.7 нм, величина плотности NO в

максимуме ее высотного профиля варьировалась в диапазоне  $10^6$ – $10^8 \text{ см}^{-3}$ , что соответствует наблюдаемым в полярных сияниях плотностям окиси азота [7, 8]. Спектральный калибровочный коэффициент  $k_\lambda$  для камер Gery взят из работы [2]. На рис. 5 приведена рассчитанная усредненная зависимость  $k_{eff}$  от высоты  $h$ . Горизонтальным

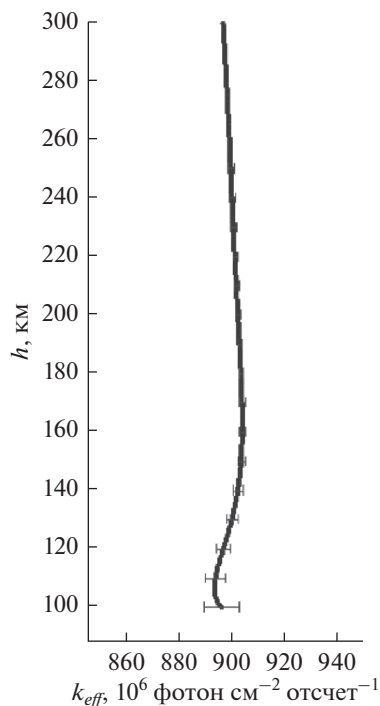
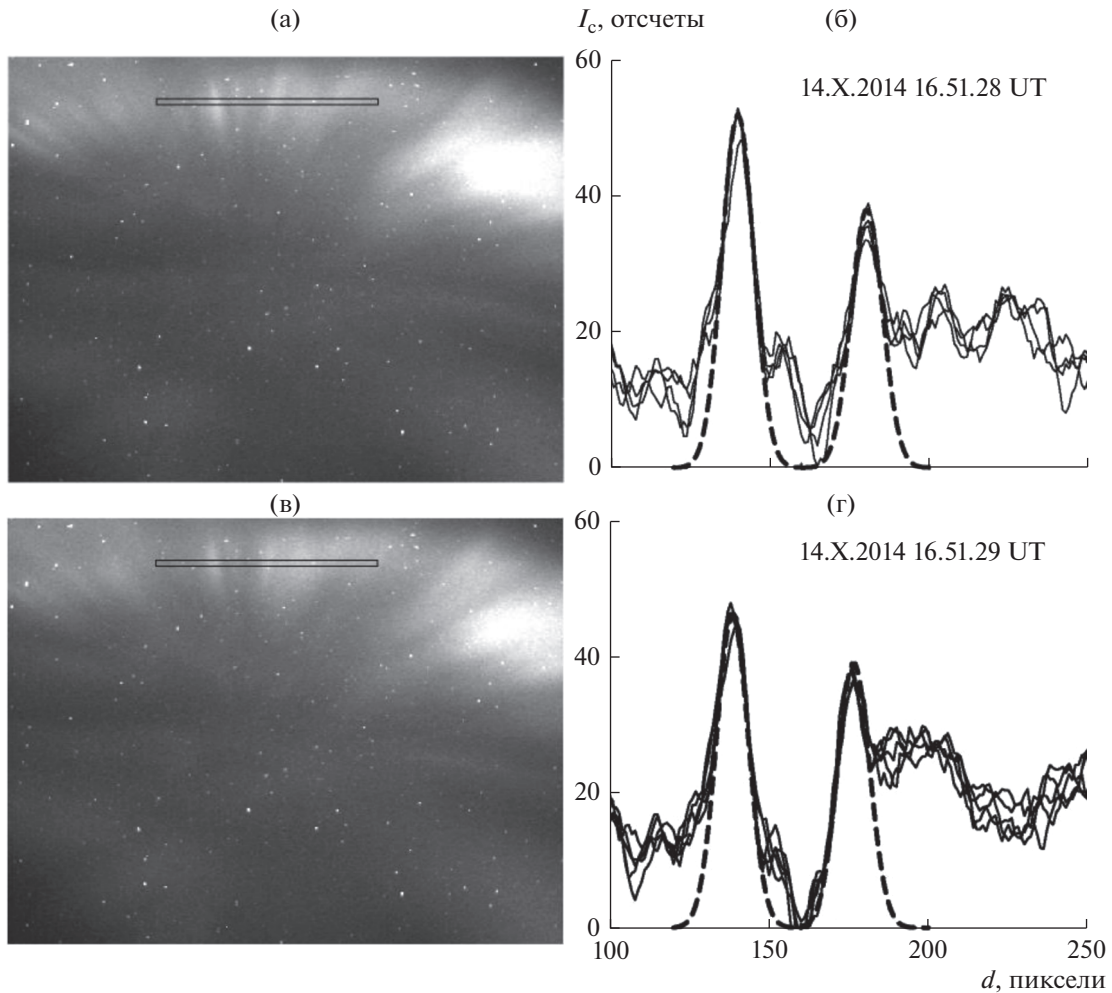


Рис. 5. Высотная зависимость эффективного коэффициента  $k_{eff}$ .



**Рис. 6.** Пример анализа поперечной структуры лучистой формы: а – кадр с камеры Gyrro-2; б – зависимость интенсивности для сечений изображения в выделенной на (а) области, пунктиром нанесены гауссоиды с полушириной 5 пикселей, в – кадр с камеры Gyrro-2 через 1 с; г – зависимость интенсивности для сечений изображения в выделенной на (в) области.

черточкам соответствуют среднеквадратичные отклонения, которые не превышают 2% во всем интервале высот. Из рисунка видно, что во всем диапазоне высот эффективный калибровочный коэффициент  $k_{eff}$  можно считать константой, равной  $9 \cdot 10^8$  фотон  $\text{см}^{-2}$  отсчет $^{-1}$ .

#### 4. ОБЪЕМНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ СВЕЧЕНИЯ

Для перехода к объемным интенсивностям свечения необходимо более детальное рассмотрение геометрии области свечения, а именно, как излучение распределено вдоль луча зрения, проектирующегося на каждый пиксел ПЗС матрицы. В общем случае такая задача требует полной томографической реконструкции и большего числа точек наблюдений, однако для нашего частного случая свечения лучевых структур под удачными ракурсными углами может быть решена по имею-

щимся изображениям при разумных предположениях относительно геометрии пучка электронов, формирующего авроральный луч. Такими необходимыми предположениями являются: 1 – осевая симметрия поперечного сечения высыпавшегося пучка электронов, 2 – поперечный профиль распределения в высыпавшемся пучке имеет вид гауссоиды. Тогда полуширину аврорального луча можно оценить по имеющимся изображениям. Рассмотрим это на примере, приведенном на рис. 1. Высотное распределение зарегистрированной интенсивности свечения вдоль луча показано ранее на рис. 3.

Для определения характерного поперечного размера луча рассмотрим детально левый кадр рис. 1. Сделаем сечение изображения в отмеченной области на рис. 6а в направлении поперек луча вблизи максимумов высотного профиля. На рис. 6а эта область отмечена прямоугольником. Отложим ход регистрируемой интенсивности све-

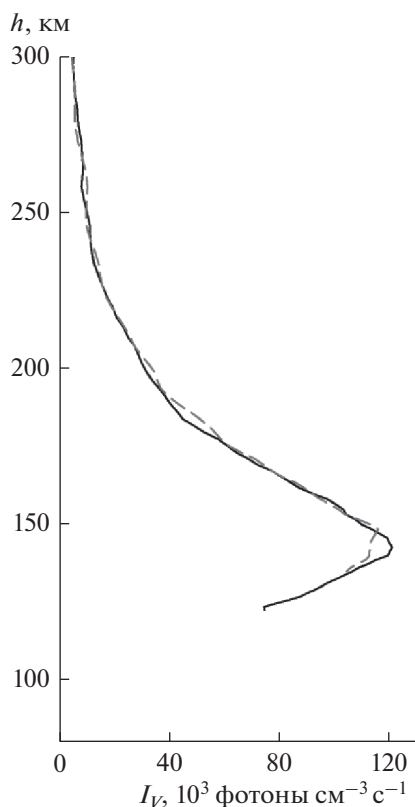


Рис. 7. Высотные профили объемной интенсивности свечения вдоль луча 14.IX.2014 16.51.28 UT, сплошная линия – для камеры Gyrro-2, пунктир – для камеры Gyrro-1.

чения вдоль этого сечения, и удалим в нем фоновую подложку (рис. 6б). Теперь мы видим, что два выраженных пика имеют вид гауссовой кривой с полушириной 5 пикселей (нанесены пунктиром).

Для пересчета размеров на изображении в линейные размеры используем формулу (1). Из вычислений по формуле (5) следует, что 1 пиксел на высоте 150 км соответствует 100 м, то есть полуширина рассматриваемых лучей  $d = 500$  м. Для кадра, полученного в следующую секунду за кадром на рис. 6а, проведена аналогичная оценка. Ее результаты иллюстрирует рис. 6в, 6г. Из сравнения положения пиков можно оценить скорость поперечного “смещения” лучей: для левого пика – 150 м/с, для правого пика – 400 м/с. Отсюда следует, что частично видимая поперечная ширина луча объясняется “смазыванием” во время экспозиции. Для уверенно различимых лучей скорости “смещения” не превышают 500 м/с.

Теперь можно провести калибровку и коррекцию высотного профиля для получения объемной интенсивности свечения.

$$I_v = \frac{I}{L} = \frac{k_{eff} I_c}{2d/\sin \nu} = \frac{k_{eff} I_c \sin(f\sqrt{x^2 + y^2})}{2d}. \quad (5)$$

Здесь  $I$  – поверхностная интенсивность свечения, фотон  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ ;  $I_c$  – регистрируемая поверхностная интенсивность свечения, отсчет  $\text{с}^{-1}$ ;  $k_{eff}$  – эффективный калибровочный коэффициент, фотон  $\text{см}^{-2}$  отсчет $^{-1}$ ;  $L$  – эффективная длина пути луча зрения в авроральном луче;  $d$  – полуширина поперечного сечения аврорального луча, см;  $\nu$  – угол луча зрения с направлением на магнитный зенит;  $x, y$  – положение пиксела на изображении относительно проекции магнитного зенита;  $f = 0.038$  градусов – угловое разрешение камер.

Полученные высотные профили объемной интенсивности свечения в рассматриваемом авроральном луче после калибровки и коррекции приведены на рис. 7. Как видим, профили по данным обеих камер совпадают как по форме, так и по абсолютным значениям с погрешностью, не превышающей 10%. Это является дополнительной проверкой корректности всей процедуры от идентификации луча до получения профиля объемной интенсивности свечения.

Для дальнейшего исследования характеристик лучистых форм полярных сияний были выбраны четыре разнесенных по времени события. Зарегистрированные камерами изображения полярных сияний вместе с вычисленными для выделенных на них лучей высотными профилями объемной интенсивности свечения в выбранных событиях показаны на рис. 8. На изображениях крестом отмечено положение магнитного зенита, сплошной линией выделен луч, штриховой-проходящая через магнитный зенит экиполярная линия. Высотные профили объемной интенсивности: сплошная линия – для камеры Gyrro-2, пунктир – для камеры Gyrro-1. Во всех случаях профили по данным обеих камер совпадают как по форме, так и по абсолютным значениям с погрешностью, не превышающей 10%. Максимумы в профилях лежат на высотах 130–150 км и составляют от  $4.5 \cdot 10^4$  до  $2.2 \cdot 10^5$  фотон  $\text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$ .

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ

Получение информации о плазме в околоземном космическом пространстве из наземных наблюдений полярных сияний всегда было заманчивой задачей для исследователей. Вместе с тем многие очевидные факторы осложняют ее решение: большая пространственная и временная изменчивость, большой динамический диапазон интенсивностей свечения (включая очень малые значения), зависимость от метеорологических условий, необходимость детального моделирования для интерпретации наблюдений. В этом смысле лучистые структуры в полярных сияниях являются наиболее сложными и интересными из-за своей динамичности, непредсказуемости и большой высотной протяженности. В научной литературе нам не известны детальные исследования

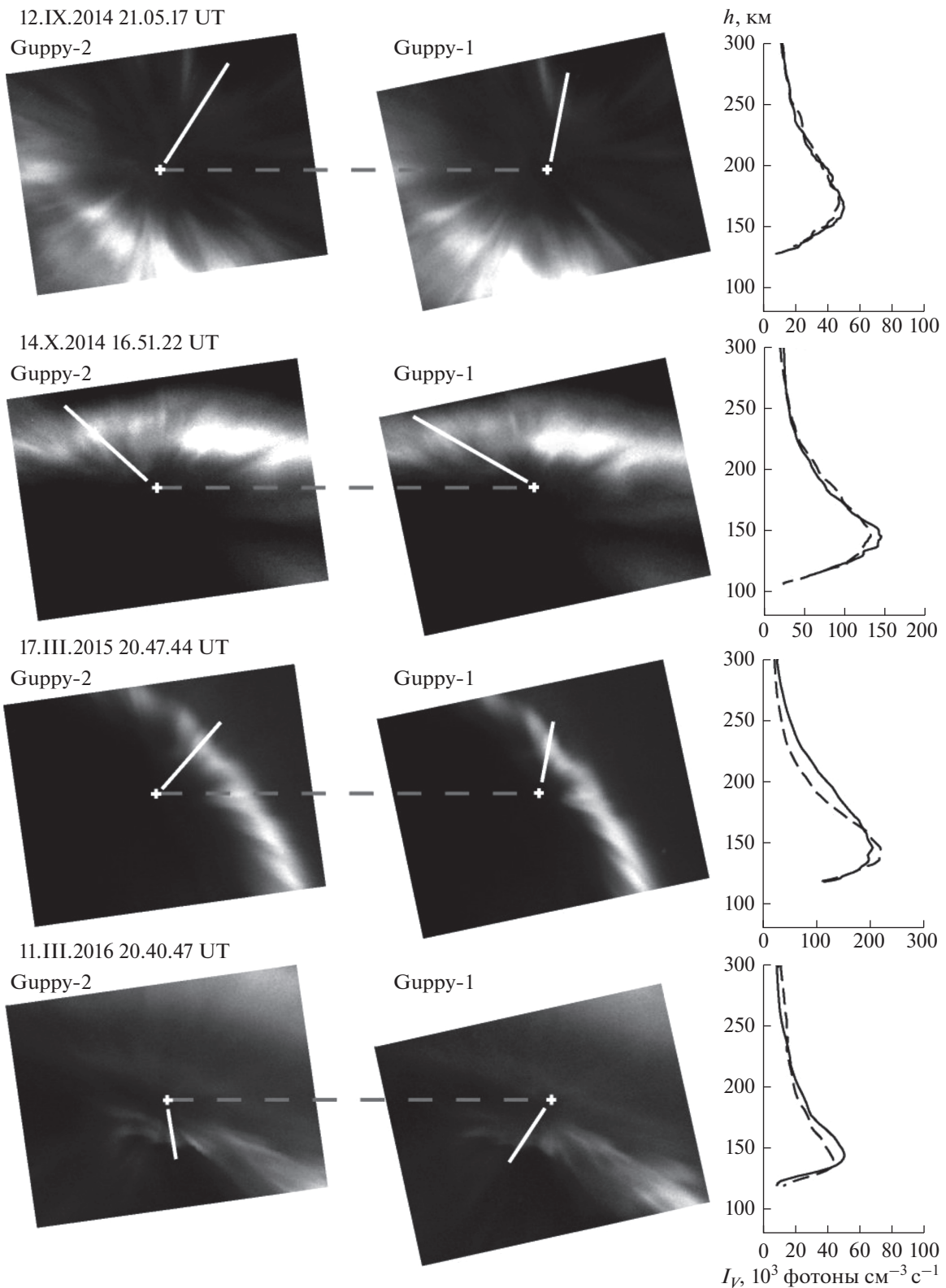


Рис. 8. Примеры обработки для четырех пар изображений полярных сияний.

высотных зависимостей интенсивности свечения в таких структурах, но из морфологии известно, что они возникают при интенсификациях спо-

койных дуг, во время авроральных брейкапов и псевдо-брейкапов, преимущественно на приплюсненной границе аврорального овала.

В данной работе мы использовали данные систематических наблюдений, проводимых в Апатитах, что несколько южнее статистического аврорального овала в данном секторе, поэтому в поле зрения лучистые структуры попадали не столь часто. Однако приведенные выше примеры являются достаточно типичными для зарегистрированных случаев.

Необходимо отметить, что в использованных данных существуют аппаратные ограничения, которые необходимо учитывать при обобщении полученных результатов. Время экспозиции (1 с) для данных камер определяется полосой пропускания, включающей яркую линию 557.7 нм с характерным временем 0.7 с. Такая полоса пропускания является компромиссом между использованием простых в эксплуатации камер и возможностью регистрации сияний. Вместе с тем, время экспозиции ограничивает возможность идентификации на снимках структур, “перемещающихся” со скоростями больше  $500 \text{ км с}^{-1}$ .

Другим ограничением является динамический диапазон интенсивностей, регистрируемый камерой. В представленных примерах видны белые участки сияния, на которых камера “ушла в насыщение”. На таких участках, вблизи максимума в высотном профиле теряется информация об интенсивности сияния. Дело в том, что АЦП камеры имеет 12 бит, что дает полный динамический диапазон 2048 градаций, но для сохранения изображения может быть использовано только 8 бит (256 градаций), которые выбираются программно по полной интенсивности в предыдущую секунду. Для динамичных лучистых структур, внезапно появляющихся в поле зрения, этот автоматический выбор не всегда оптимален. Кроме того, высотные профили с изменением интенсивности вдоль профиля более 256 раз, которые присутствуют в сияниях, не могут быть зарегистрированы полностью.

Несколько слов о погрешностях представленных результатов. Погрешность определения высоты по относительному смещению структуры на паре изображений показана на рис. 2 из соображений, что положение структуры на изображениях определено с точностью  $\pm 3$  пиксела. Это несколько завышенная оценка погрешности, так как из рис. 6 видно, что положение лучей по положению пиков хорошо локализуется с точностью  $\pm 1$  пиксела. Погрешность абсолютных значений интенсивности определяется калибровкой камер, описанной в [2]. Высотное изменение спектрального состава зарегистрированного свечения, как видно из рис. 5 не может привести к отклонениям более 2%.

Информация о высоте свечения, по относительному смещению структуры на паре изображений, является общей для изображений в паре.

Однако интенсивность свечения регистрируется камерами независимо. Как видим из приведенных на рис. 7 и 8 результатам, профили по данным обеих камер совпадают как по форме, так и по абсолютным значениям с погрешностью, не превышающей 10%. Это является дополнительной проверкой корректности всей процедуры от идентификации луча до получения профиля объемной интенсивности свечения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены систематические (с 2011 по 2020 гг.) триангуляционные наблюдения полярных сияний с использованием камер, регистрирующих излучение в спектральном интервале длин волн 380–580 нм. Для этих данных разработаны методики восстановления высотных профилей объемной интенсивности свечения и оценки поперечных размеров лучистых структур в полярных сияниях. Рассчитан коэффициент, определяющий связь между скоростью отсчетов ПЗС матрицы камеры и полной интенсивностью свечения (в единицах фотон  $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ). Показано, что характерные поперечные размеры лучистых форм сияний, разрешимых при времени экспозиции 1 с, составляют 500 м. Восстановлены высотные профили объемной интенсивности свечения для пяти выбранных случаев с ярко выраженной лучистой структурой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kozelov B.V., Pilgaev S.V., Borovkov L.P. et al. Multi-scale auroral observations in Apatity: winter 2010–2011 // *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* 2012. V. 1. P. 1–6.
2. Kozelov B.V., Brändström B.U.E., Sigernes F. et al. Practice of CCD cameras' calibration by LED low-light source // *Physics of Auroral Phenomena. Proc. XXXVI Annual Seminar. Apatity.* 2013. P. 151–154.
3. 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.
4. Jones A.V. *Aurora.* Boston: D. Reidel Published Company, 1974.
5. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Сергиенко Т.И. и др. Физико-химическая модель авроральной ионосферы // *Космич. исслед.* 2017. Т. 55. № 2. С. 94–106.
6. Hedin A.E. Extension of the MSIS Thermospheric Model into the Middle and Lower Atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 1159.
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.