

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.183-186

ПЯТНА ЯРКОСТИ В ДУГЕ ПЕРЕД НАЧАЛОМ СУББУРИ - УСКОРЕНИЕ ИЛИ РАССЕЯНИЕ?

В.В. Сафаргалеев, В.Н. Митрофанов

ФГБНУ "Полярный геофизический институт", г. Апатиты, Россия
e-mails: Vladimir.safargaleev@pgia.ru; valmetr@yandex.ru

Аннотация. Представлены предварительные результаты триангуляционных измерений областей повышенной яркости (пятен светимости) в дуге перед началом брейкапа. Сравнение с невозмущенной дугой показывает, что пятно и дуга наблюдаются на одной и той же высоте, что предполагает отсутствие ускорения в процессе образования пятен. Признаки ускорения электронов обнаружены в дуге перед формированием крупномасштабной складки. Результаты могут иметь отношение к проблеме триггирования суббури.

1. Введение

Авроральная дуга является наиболее распространенной и, как следствие, наиболее изученной формой полярных сияний. Число обсуждаемых в литературе возможных механизмов генерации дуги достигает нескольких десятков. В теоретических исследованиях дуга представляется стационарной, узкой, сильно вытянутой вдоль геомагнитной широты однородной светящейся полосой. Это идеализированное представление далеко от реальности. В подавляющем большинстве случаев дуга подвержена деформациям различных масштабов и неоднородна по своей структуре. Под последним понимается наличие на дуге меняющихся во времени областей повышенной светимости в виде лучей и пятен. Исследования деформаций и неоднородностей светимости как таковых, так и их динамики, позволяют не только уточнить механизм генерации авроральной дуги, но и судить о магнитосферных процессах в плазменном слое магнитосферного хвоста в области источника.

Хотя неоднородности светимости сами по себе представляют меньший интерес, чем деформации, исследование их динамики может способствовать более глубокому пониманию ряда магнитосферных процессов, происходящих, в частности, в контексте магнитосферной суббури. В работе [Яхнин и др., 1984] делается вывод об отсутствии качественного различия в природе суббури и процессов, приводящих к локальным вспышкам дуг сияний. Изменение светимости в системе из нескольких дуг отождествлялось в работе [Сафаргалеев и Осипенко, 2001] с ионосферным «следом» триггера суббури в виде волны сжатия, распространяющейся в плазменном слое в антисолнечном направлении. Цепочка из светящихся пятен (так называемая *beading*-структура) предполагалась признаком развития баллонной неустойчивости [Keiling et al., 2012], с которой в свою очередь связывалась генерация пульсаций Pi2 и запуск магнитосферной суббури [Golovchanskaya et al., 2015]. Согласно [Сафаргалеев и др., 2000], связанное с пятном светимости локальное изменение ионосферной проводимости запускает в магнитосферу альвеновскую волну, электрическое поле которой может инициировать пересоединение в плазменном слое.

Увеличение интенсивности аврорального свечения традиционно связывается с усилением потока высыпавшихся частиц. Вопрос сопутствует ли усилению потока ускорение частиц или нет остается открытым несмотря на то, что появление ускоряющей разности потенциалов может иметь важные последствия для магнитосферно-ионосферного взаимодействия. Например, согласно Atkinson (2001), продольная разность потенциалов нарушает связь магнитосферы с ионосферой, ослабляя тормозящее влияние последней на развитие желобковой неустойчивости. С развитием желобковой неустойчивости именно по такому сценарию в работе [Safargaleev et al., 2005] связывалось появление аврорального факела.

В работе Li et al. (2013) показано, что в участке магнитосферы, сопряженной с активными формами внутри суббулевой авроральной выпуклости, высокоорбитальный спутник регистрирует признаки продольной разности потенциалов, ускоряющей электроны в ионосферу. Сияния в цитируемой работе регистрировались спутником DMSP с высоты около 800 км. Низкое пространственное разрешение оптической аппаратуры, а также движение высокоорбитального спутника не позволило сопоставить область ускорения с мелкомасштабными структурами в сияниях. Цель данной работы – поиск признаков ускорения электронов в светящемся пятне посредством триангуляционных измерений высоты пятна двумя дистанционно разнесенными камерами.

2. Аппаратура и методика

Идея метода обнаружения признаков ускорения заключается в сравнении высоты свечения в пятне и рядом с ним, то есть в «невозмущенной» дуге. Если пятно располагается ниже, значит, с большой долей вероятности, в процессе его формирования произошло ускорение электронов, благодаря чему свечение сместилось на более низкие высоты.

Для определения высоты свечения использовался метод триангуляции. Были задействованы две камеры полного обзора неба типа WMI (Watec monochromatic imager), установленные Национальным Институтом Полярных Исследований, Япония, в пунктах Кируна (KRN; 67.88°N, 20.42°E) и Чаучас (TJA; 67.31°N, 20.73°E) на севере Швеции. Эти пункты входят в оптическую сеть проекта ALIS (<http://www.alis.irf.se/>), предназначенную для исследований сияний над радаром и нагревным стендом EISCAT. Камеры ведут съемку в видимом свете с временным разрешением один кадр в секунду и расположены примерно вдоль меридиана на расстоянии около 70 км одна от другой, обеспечивая хорошее перекрытие участка неба в области зенита.

Измерения высоты проводились в два этапа. Сначала по положению звезд на снимке происходила привязка каждого пиксела изображения к декартовым координатам с началом в точке положения камеры. Используя эту информацию, снимки одного и того же участка неба, сделанные в один и тот же момент времени, но с разных позиций, совмещались в ионосфере на заданной высоте. Варьируя высоту, визуальнo добивались наилучшего совпадения выбранного фрагмента сияний. Принимая во внимания искажения, вносимые объективом «рыбий глаз» на больших расстояниях, для анализа выбирались ситуации, когда исследуемый объект находился в относительной близости зенита одной из камер (KRN в данном случае). Характеристики камер и такое их расположение относительно сияний благоприятны для проведения триангуляционных измерений наблюдавшихся внутри дуги быстро меняющихся структур, а также для измерения высоты дуги в процессе изменения ее яркости.

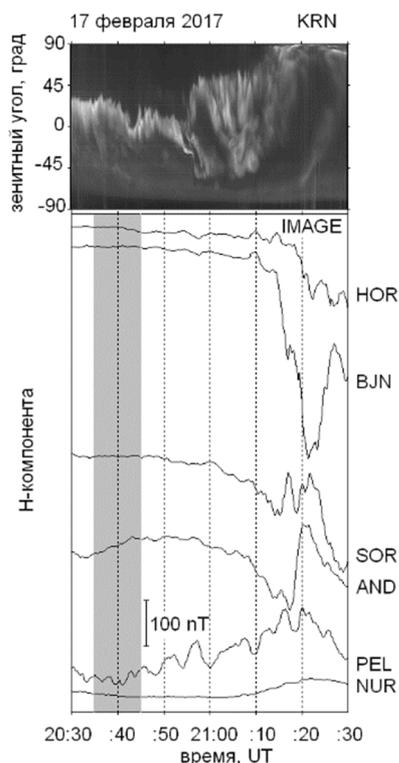


Рисунок 1. Динамика сияний над Кируной (верхняя панель) и геомагнитная активность по данным сети IMAGE (нижняя панель). Серым цветом выделен интервал, в течение которого проводились триангуляционные измерения высоты сияний.

дают основание отнести его к так называемой «полярной суббуре» (Kleimenova et al., 2012). Учитывая вышесказанное, результаты нашего исследования могут иметь отношение к проблеме триггирования суббури.

3. Геофизическая обстановка

Исследуемый интервал относится к промежутку времени между двумя суббурами и в целом характеризуется диффузными свечением в области зенита KRN, оставшимся после первого брейккапа. Внутри свечения наблюдались короткоживущие пульсирующие дугообразные формы, а полюсная граница свечения представляла широкую светящуюся полосу (дугу), практически не меняющуюся во времени и однородную в азимутальном направлении (см. кеограмму на рис. 1). Такая авроральная ситуация является типичной для множественных суббурь. В частности, именно в пульсирующей среде между двумя брейккапами были обнаружены распространяющиеся к полюсу более интенсивные образования (квазидуги), с которыми Сафаргалеев и Осипенко (2001) связали волны, запускающие следующую суббурю.

В 20:30: UT яркость дуги заметно усилилась, и, начиная с 20:36 UT, на дуге начали появляться дрейфующие с запада на восток изгибы и связанные с ними пятна свечения. Последовавший за этим десятиминутный интервал авроральной активности (выделен серым на рис.1) и был выбран для анализа.

На нижней панели рис. 1 приводятся магнитограммы, характеризующую геомагнитную активность в области оптических наблюдений, расположенной ближе к экваториальной границе аврорального овала (обсерватории AND, 69.3°N, 16.03°E и PEL, 66.9°N, 24.08°E); в центре аврорального овала (SOR 70.54°N, 22.22°E), вблизи его полюсной границы (BJN, 74.5°N, 19.2°E и HOR, 77.06°N, 15.0°E) и в субавроральной зоне (NUR, 60.5°N, 24.65°E).

Пятна на дуге начали появляться за 25 минут до начала небольшой суббури в виде плавного уменьшения Н-компоненты на станциях ближе к центру авроральной зоны и небольшим смещением сияний к полюсу. Примерно 15 минут спустя, на фоне слабой суббури началось более интенсивное возмущение, локализованное вблизи полюсной границы овала, которое также сопровождалось скачком сияний к полюсу вплоть до северного горизонта поля зрения камеры KRN (см. кеограмму на рис. 1). Положение максимума возмущения и положительная вариация Н-компоненты в более низких широтах, чем BJN, где возмущение имело традиционный вид отрицательной бухты,

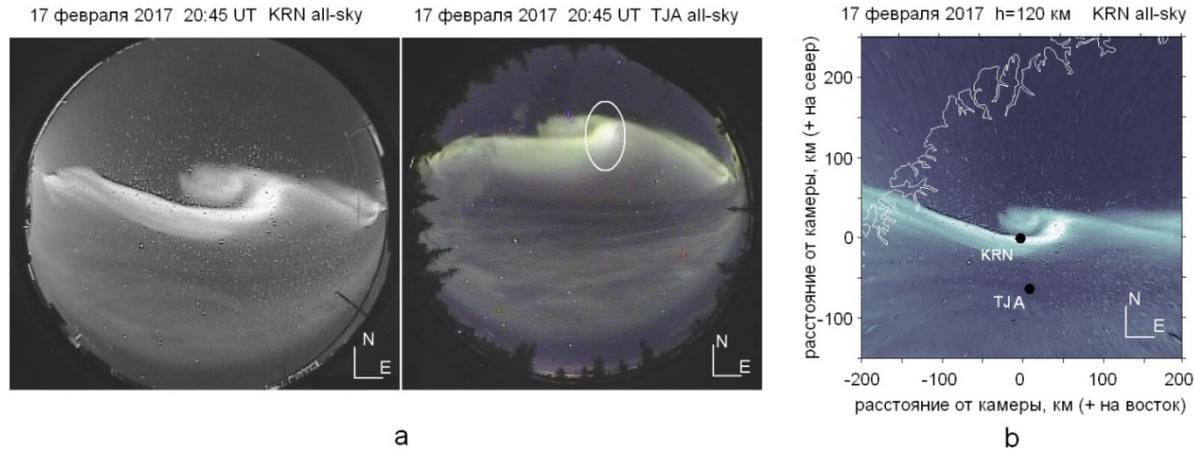


Рисунок 2. Одновременный снимок дуги с двух позиций: оригинальный кадр (а) и его проекция (b). Пятно выделено эллипсом, кружками показано положение Кируны (KRN) и Чаучас (TJA).

4. Результаты измерений

Рисунки 2 и 3 описывают пример определения высоты свечения методом триангуляции. На рис. 2а приведено изображение одной и той же авроральной структуры в один и тот же момент времени, но с разных позиций. Структура имеет форму дуги с закрученной против часовой стрелки складкой, у основания которой располагается яркое пятно. На снимке TJA это пятно выделено эллипсом. На рис. 2б представлена проекция кадра KRN на плоскую ионосферу на высоте 120 км. Черными кружками обозначено положение камер, очертание участка береговой линии показано белой извилистой линией.

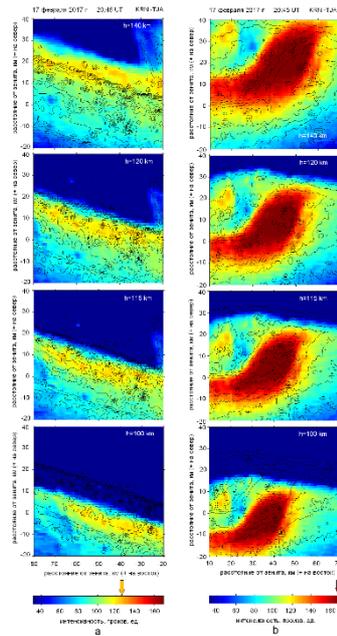


Рисунок 3. Результаты совмещения снимков дуги (а) и пятна (b) на разных высотах.

Таблица 1. Результаты триангуляционных измерений.

№	UT	$h_{\text{пятно}}$, км	$h_{\text{дуга}}$, км	I_1/I_0	Прим.
Пятно/дуга					
1	20:36:31	120	120	1.2	-
2	20:37:53	120	120	1.3	
3	20:39:41	118	118	1.2	
4	20:45:00	115	115	1.4	
Дуга/складка					
5	20:42:36		120/120		Дуга/складка
Дуга в динамике					
6	20:44:04 20:44:28		118 123	1.2	яркая слабая

Процесс совмещения фрагмента дуги и пятна на снимках с разнесенных камер демонстрируется на рис. 3. Изображение сияний на кадре TJA делалось в псевдоцвете, а на кадре KRN – в виде семейства изолиний. Наилучшее совпадение как для пятна, так и для дуги достигается на высоте 115 км. При изменении высоты на 5 км несовпадение изолиний с цветным изображением уже становится заметным. Стрелками соответствующего цвета на шкалах интенсивности указаны интенсивность свечения в дуге и в пятне. Хотя интенсивность пятна оказалась почти в полтора раза больше, он находится примерно на той же высоте, что и дуга. Вывод: при формировании пятна ускорение электронов с большой долей вероятности не имело места.

Нами было исследовано еще 5 событий (рис. 4 и табл. 1). В таблице, кроме высоты, приводится отношение интенсивности свечения более яркого элемента, к более слабому (I_1/I_0). Три случая аналогичны описанному выше (рис. 4а, строки 1-3 в таблице). Дополнительно мы провели измерение высоты складки диффузного свечения и высоты дуги рядом с ней (рис. 4б и строка 5 в таблице) и измерение высоты дуги, интенсивность которой меняется в начальной стадии формирования складки (рис. 4б и строка 6 в таблице).

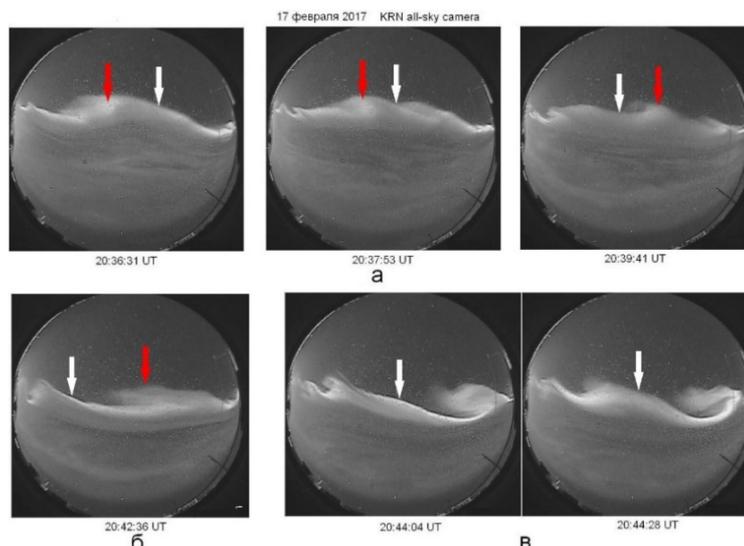


Рисунок 4. Пробегающие по дуге волны светимости по данным камеры в Кируне. Стрелками указаны области, высота которых измерялась методом триангуляции. Белые стрелки – элементы дуги, красные стрелки – пятна светимости на дуге (*а*) и неоднородность в виде языка диффузного свечения (*б*). На всех кадрах север вверху, восток справа.

5. Обсуждение и выводы

Результаты измерения высоты области повышенного свечения показывают, что она расположена на той же высоте, что и дуга (случаи 1 - 4). С большой долей вероятности это указывает на отсутствие ускорения частиц в процессе формирования пятна. Увеличение потока частиц, приводящее к усилению яркости, могло быть вызвано дополнительной порцией высыпавшихся частиц, рассеянных в конус потерь в результате взаимодействия с МГД-волнами [Сафаргалеев и Осипенко, 2001; Golovchanskaya et al., 2015].

Признаки ускорения обнаружены в случае 6, когда (в процессе эволюции) в момент большей яркости дуга наблюдалась на меньшей высоте. При этом случаи 5 и 6 показывают, что ускорение частиц скорее предшествует, чем сопровождает формирование складки на дуге. Результат соответствует высказанным ранее предположениям о роли продольной разности потенциалов в процессе развития желобковой неустойчивости [Akasofu and Kimball, 1964] и генерации крупномасштабной авральной структуры в виде факела [Safargaleev et al., 2005].

Исследование в данном направлении будет продолжено.

Благодарности. Данные камер KRN и TJA находятся в свободном доступе на сайте <http://pc115.seg20.nipr.ac.jp/www/opt/index.html>. Пакет программ для триангуляционных измерений подготовлен Б. Густавссоном (Университет Тромсе). Данные магнитометров сети IMAGE доступны на сайте проекта MIRACLE (<https://space.fmi.fi/MIRACLE/>). We are indebted to the PsA project and NIPR for operating the Watec aurora imagers in Kiruna and Tjautjas and supplying the data. Работа поддержана грантом РФФИ 19-52-50025ЯФ-а.

Литература

1. Яхнин А.Г., Сергеев В.А., Иевенко И.Б. и др. Характеристики явлений, сопровождающих локальные вспышки дуг сияний / Магнитосферные исследования. №5. М.: ВИНТИ. с. 93-110. 1984.
2. Сафаргалеев В., Осипенко С. Предвестники магнитосферной суббури в пульсирующих и диффузных сияниях // Геомагнетизм и аэрономия. 41 (6). 791. 2001.
3. Golovchanskaya I., Kornilov I., Kornilova T. East-west type precursor activity prior to the auroral onset: Ground-based and THEMIS observations // J. Geophys. Res. 120 (2). 1109–1123. doi:10.1002/2014JA020081. 2015.
4. Keiling A., Shiokawa K., Uritsky V. et al. Auroral signatures of the dynamic plasma sheet. In: Keiling, A. et al. (eds): Auroral Phenomenology and Magnetospheric Processes: Earth And Other Planets, Geophys. Monogr, 197, 317–336, American Geophysical Union, Washington, D.C., <https://doi.org/10.1029/2012GM001231>. 2012.
5. Safargaleev V.V., Sergienko T.I., Nilsson H. et al. Combined optical, EISCAT and magnetic observations of the omega bands/Ps6 pulsations and an auroral torch in the late morning hours: a case study // Ann. Geophysicae. 23 (5). P.1821. doi: 10.5194/angeo-23-1821-2005. 2005.
6. Kleimenova N.G., Antonova E.E., Kozyreva O.V. et al. Wave structure of magnetic substorms at high latitudes // Geomagn.Aeron. (Engl. Transl.). 52. 746–754. <https://doi.org/10.1134/S0016793212060059>, 2012.