

УДК 550.385.4

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ САМОПОДОБИЕ НА МАЛЫХ МАСШТАБАХ В СУББУРЕВЫХ АКТИВИЗАЦИЯХ ПО ДАННЫМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КАМЕРЫ В ЛОВОЗЕРО

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

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Полярный геофизический институт, Анатиты, 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.

В активизации полярных сияний, зарегистрированной камерой всего неба в Ловозеро, найдены статистические свойства, ранее отмеченные по данным наземных телевизионных наблюдений на Шпицбергене: участки со степенным распределением в плотности вероятности характеристик авроральных пятен. Значительный шум детектора в рассмотренном случае не позволил продлить распределения на меньшие масштабы, чем опубликованы ранее.

DOI: 10.31857/S0367676522030127

ВВЕДЕНИЕ

Самоорганизация в околоземной магнитосферно-ионосферной плазме, как результат комплексного воздействия солнечного ветра, то есть единый процесс, охватывающий масштабы от возникновения основных токовых систем в магнитосфере до диссипации тонких электронных пучков в отдельных авроральных лучах, — еще практически не исследована. Ранее в работах [1, 2] по данным спутниковых и наземных телевизионных (ТВ) наблюдений было показано, что пространственно-временная динамика активизаций аврорального свечения имеет признаки состояния самоорганизованной критичности в своих статистических свойствах, указывающие на [3, 4] в магнитосферно-ионосферной плазме: для статистических распределений характеристик авроральных структур во время суббуревых активизаций типичными являются степенные законы распределения. Со стороны больших масштабов эти распределения ограничены фактически размером ночной стороны аврорального овала и характерным временем изолированной суббури. Со стороны малых масштабов распределения были ограничены по пространству разрешением телевизионных камер (~1.5 км) и характерными временами возбужденных состояний атмосферных составляющих, эмиссии которых регистрировались панхроматическими камерами (~0.7 с). Использовались данные авроральной ТВ камеры, размещенной в обсерватории “Баренцбург” на Шпицбергене, т.е. к

северу от полюсной границы статистического аврорального овала, куда на ночной стороне полярные сияния распространяются в виде “авроральных транзиентов” во время суббуревых возмущений.

Одним из нерешенных вопросов к эксперименту осталось определение минимальных масштабов, до которых имеют место степенные законы распределения. Определение этих масштабов также важно для альтернативного описания динамики магнитосферно-ионосферной плазмы как плазменной турбулентности [5, 6]. Для такого описания — это масштабы диссипации для прямого каскада трехмерной турбулентности и/или начало обратного каскада двумерной турбулентности [7].

В данной работе мы используем данные современной камеры, работающей в обсерватории Ловозеро и характеристики которой потенциально позволяют уточнить обсуждаемые пространственно-временные распределения со стороны малых масштабов. В отличие от обсерватории “Баренцбург”, расположенной в полярной шапке, т.е. к северу от статистического аврорального овала, обсерватория Ловозеро обычно попадает на южный край овала полярных сияний. Таким образом, это данные позволяют проверить наличие степенных законов распределения глубже в магнитосфере, чем это было сделано ранее.

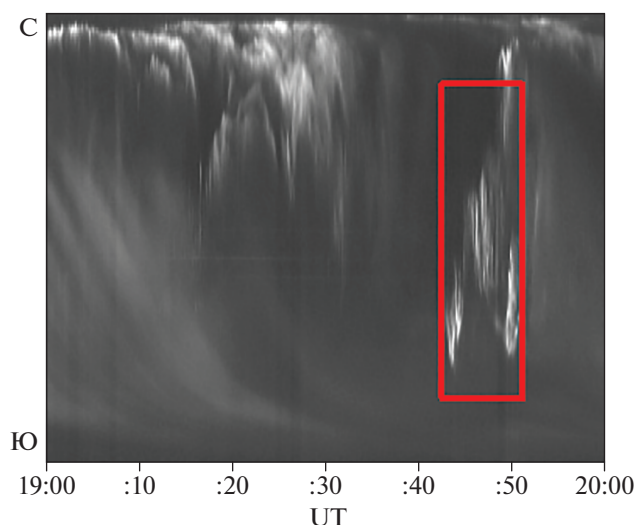


Рис. 1. Кеограмма для анализируемого случая.

ОБОРУДОВАНИЕ И НАБЛЮДЕНИЯ

Для анализа использованы данные эмиссионной камеры в обсерватории “Ловозеро”, камера канала эмиссии 427.8 нм (E142). Камера включает светосильный объектив ОСШ-1.0-ГАО(8.2), EMCCD камеру PhotonMax:512В, фильтровое колесо ZWOEFW5x2 с набором светофильтров (интерференционный светофильтр на 427.8 нм и адсорбционный светофильтр на группу 1NG 380–500 нм). Прибор обеспечивает поле зрения 180°, угловое разрешение до 0.35°, разрядность АЦП 16 бит, временное разрешение 0.1 с при синхронизации экспозиции от системы GPS. Регистра-

ция с временным разрешением 0.1 с проводилась синхронно с пролетами японского спутника ARASE (ERG).

Для анализа был отобран случай 20 марта 2020, 19:42–19:49 UT. Кеограмма для часового интервала 19:00–20:00 UT, построенная по изображениям панхроматической камеры в обсерватории Ловозеро, приведена на рис. 1. В отмеченном интервале имеем активизацию полярных сияний в центре поля зрения. Всего в отмеченном интервале имеем 4095 кадров с эмиссионной камеры.

Кроме наблюдений сияний при дальнейшей обработке для определения характеристик собственного шума детектора камеры использовались данные 10 мин записи “темнового поля”. При этом камера работала в том же режиме, что и при наблюдениях сияний, но с закрытым затвором.

ПРОЦЕДУРА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Статистическая обработка массива изображений была такой же, как в работах [1, 2] и основана на методе “анализа лавин” (avalanche analysis) [3, 4]. Поле зрения на кадре ограничивалось 75° от зенита, для исключения сильных пространственных искажений около горизонта. В этой области кадра определялись пиксели, в которых зарегистрирована повышенная интенсивность свечения (выше предварительно определенного значения I_0) (см. рис. 2а).

В этом массиве пикселей на каждом кадре выделялись связанные кластеры, т.е. соседние пиксели с повышенной интенсивностью свечения считались принадлежащими одному кластеру (авроральному пятну). “История” каждого кластера

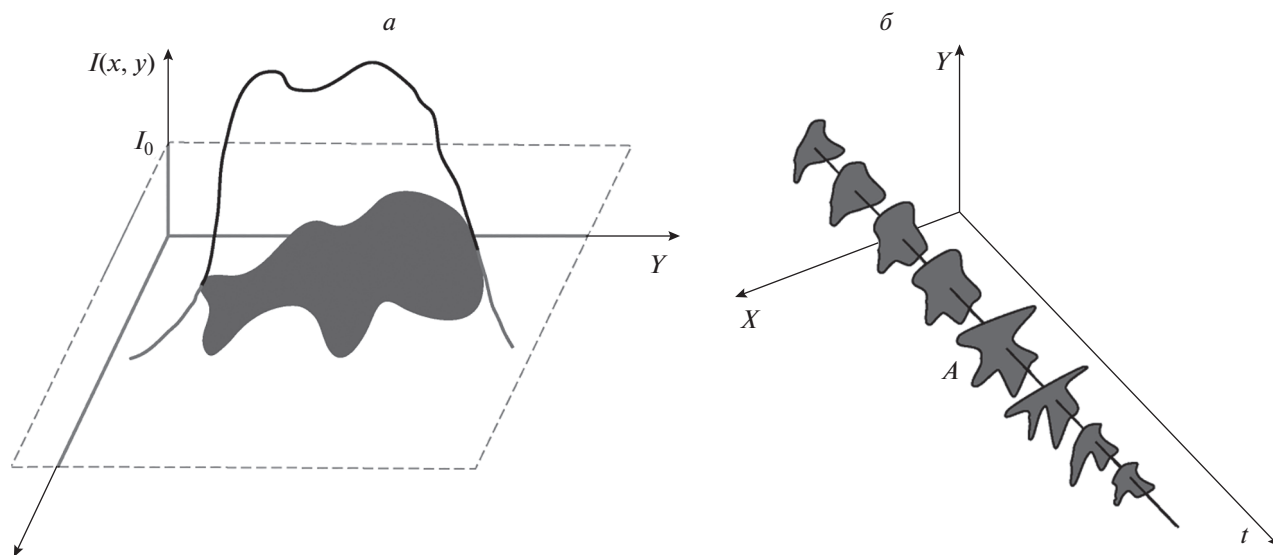


Рис. 2. Определение характеристик области аврорального свечения: выделение пятна по превышению порога интенсивности (а); эволюция пятна во времени (б).

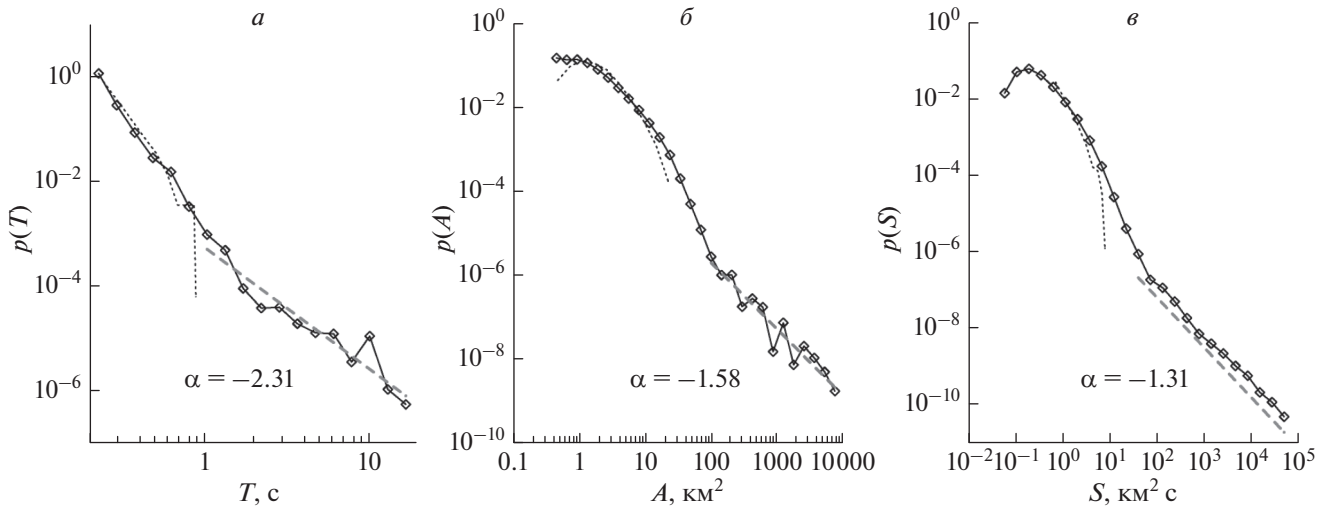


Рис. 3. Плотность распределения вероятности пространственно-временных характеристик областей аврорального свечения для случая 20 марта 2020, 19:42–19:49 UT: времени жизни (*а*), максимальной площади (*б*), интегральной площади (*в*). Плотности распределения для “темнового поля” показаны мелким пунктиром, крупный красный пунктир – аппроксимация степенным распределением.

прослеживалась во времени. Пятна, касающиеся границы поля зрения, и уединенные пиксели отбрасывались. Значение I_0 подбиралось так, чтобы число выделенных связанных кластеров было близко к максимальному и примерно соответствует потоку энергии высыпающихся электронов $2.7 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, как и в работах [1, 2]. Для каждого кластера определялись время жизни, максимальная площадь в течение его истории (с учетом искажений объектива) и интегрированная по времени площадь (см. рис. 2б). Для этих величин определялись статистические распределения.

Массив данных для “темнового поля” обрабатывался аналогично.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Всего в данном случае было выделено $N \sim 2.2 \cdot 10^6$ индивидуальных “историй” авроральных пятен. Полученные статистические плотности распре-

деления вероятности для рассмотренных характеристик авроральных пятен приведены на рис. 3.

Все распределения имеют участок примерно от середины диапазона в сторону наибольших масштабов, хорошо аппроксимируемый степенным распределением вида $\sim f^\alpha$. Показатели степени сведены в табл. 1 вместе со значениями, полученными ранее в работах [1, 2]. Достоверные интервалы масштабов, для которых получены оценки степени в распределении, также приведены в таблице. Видно, что значения, полученные в данной работе для наблюдений вблизи экваториальной границы аврорального овала, близки к значениям, полученным ранее для приполюсной границы овала по наблюдениям на Шпицбергене и глобально для всей авроральной зоны по спутниковым наблюдениям.

На малых масштабах форма распределений меняется. На графиках пунктиром нанесены аналогичные распределения, рассчитанные по данным регистрации “темнового поля”. По совпадению

Таблица 1. Показатели степенной функции для распределения характеристик авроральных пятен

Характеристика и диапазон масштабов	Из работы [1]	Из работы [2]	Данная работа
Время жизни	-2.33 ± 0.06 2–300 с	-2.25 ± 0.06 $2 \cdot 10^2$ – $2 \cdot 10^4$ с	-2.31 ± 0.22 1–18 с
Максимальная площадь	-1.86 ± 0.05 $8 - 8 \cdot 10^3 \text{ км}^2$	-1.85 ± 0.03 10^4 – 10^7 км^2	-1.58 ± 0.15 10^2 – 10^4 км^2
Интегральная площадь	-1.63 ± 0.03 10^1 – $7 \cdot 10^5 \text{ км}^2\text{с}$	-1.57 ± 0.02 10^6 – $10^{11} \text{ км}^2\text{с}$	-1.31 ± 0.03 $80 - 8 \cdot 10^4 \text{ км}^2\text{с}$

распределений видно, что форма распределений на малых масштабах определяется шумом детектора, а не зарегистрированным полезным сигналом.

Окружающая Землю магнитосферно-ионосферная система является открытой нелинейной распределенной динамической системой. Согласно достаточно общим соображениям в такой системе под действием внешнего воздействия (поступление энергии и/или массы, в данном случае – воздействие солнечного ветра) должно формироваться специфическое самоорганизованное критическое (СК) состояние [3, 4]. В таком состоянии система находится около порога возникновения переходных процессов в широком диапазоне масштабов и основные пространственно-временные характеристики возникающих в системе переходных процессов в широком диапазоне масштабов в статистике подчиняются степенным законам распределения. Это означает, что возникающие в системе переходные процессы статистически не имеют характерных масштабов.

В земной магнитосферно-ионосферной системе уникальными объектами для исследования являются авроральные транзиенты, наблюдаемые и с Земли, и из космоса. Это единственная возможность получить детальную двухмерную информацию о динамике околоземной плазмы в большом диапазоне масштабов. В работах [1, 2] было показано, что действительно пространственно-временная динамика активизаций аврорального свечения имеет статистические свойства, указывающие на признаки СК состояния. При этом специально не выделялись интервалы определенных эмпирически крупномасштабных событий – бурь и суббурь, поэтому в статистику попали как небольшие, но достаточно интенсивные авроральные пятна, так и большие области аврорального свечения, занимающие большую часть ночного сектора аврорального овала. Несмотря на разнообразие физических процессов, охватываемых этими масштабами, все они оказываются включенными в общую самоорганизующуюся структуру, подчиненную общим закономерностям.

В теории приближение к идеальному СК состоянию должно быть “бесконечно медленным”, а внешнее воздействие – “бесконечно слабым”. В реальных физических системах это не так. Поэтому некоторые вариации в значениях степенных коэффициентов в распределениях, полученных из эксперимента, могут объясняться удалением системы от пороговых значений при вариации интенсивности внешнего воздействия. В то же время детали внешнего воздействия (в данном случае – статистические характеристики распределения параметров солнечного ветра, сезон и т.п.) не должны влиять качественно на статистику в критическом состоянии.

Ранее в работе [1] при аналогичной методике обработки сравнивались результаты при различных значениях порогового параметра I_0 , так как при сравнении данных оптических приборов с различными спектральными чувствительностями проводился пересчет наблюдаемой интенсивности аврорального свечения в поток энергии высыпающихся электронов. Оценка в 30% является разумной оценкой точности такого пересчета. Было показано, что изменение I_0 в этих пределах не меняет степенной характер исследуемых распределений, а показатель степени изменяется не более, чем на 0.2. Это обстоятельство может быть еще одной причиной некоторого различия значений степенных коэффициентов, получаемых из наблюдений различными приборами.

Следует отметить, что в полученном в данной работе распределении для времени жизни пятен виден пик на 10 с, который не был отмечен ранее. Характерные времена 8–10 с типичны для псевдо-периодов пульсирующих сияний, но в данном случае анализируемый случай – морфологически другое авроральное явление. Повышенная вероятность появления авроральных пятен с определенным временем жизни во время авроральной активизации требует отдельного исследования и может зависеть как от положения точки наблюдения в авроральном овале, так и уровня магнитной возмущенности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что в наблюдениях активизаций полярных сияний камерой всего неба с фильтром 427.8 нм и частотой 10 кадров/с вблизи южной границы аврорального овала имеются статистические свойства, ранее отмеченные по данным наземных ТВ наблюдений на Шпицбергене и наблюдений спутника Поляр: участки со степенным распределением в плотности вероятности характеристик авроральных пятен. Показатели степенных распределений близки к опубликованным ранее значениям, для распределения времени жизни авроральных пятен – совпадают. К сожалению, из-за значительного шума детектора (ПЗС-матрицы) из анализа рассмотренных данных не удастся продлить распределения на меньшие масштабы, чем опубликованы ранее. Исползованная авроральная камера, несмотря на встроенное охлаждение до -70°C , не позволяет значительно понизить шум детектора, поэтому авторы продолжают попытки получить искомые распределения в области меньших масштабов на другой аппаратуре.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Полярного геофизического института.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kozelov B.V., Uritsky V.M., Klimas A.J.* // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. Art. No. L20804.
2. *Uritsky V.M., Klimas A.J., Vassiliadis D. et al.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2002. V. 107. No. A12. P. 1426.
3. *Bak P.* How nature works. The science of self-organized criticality. Oxford Univ. Press, 1997.
4. *Jensen H.J.* Self-organized criticality. Cambridge Univ. Press, 1998.
5. *Golovchanskaya I.V., Kozelov B.V., Chernyshov A.A. et al.* // Phys. Plasmas. 2014. V. 21. Art. No. 082903.
6. *Golovchanskaya I.V., Kozelov B.V.* // Cosm. Res. 2016. V. 54. No. 1. P. 47.
7. *Frisch U.* Turbulence. The legacy of A.N. Kolmogorov. Cambridge Univ. Press, 1995.

Small-scale spatial-time domain self-similarity in substorm activations according to the data of a high-speed camera in Lovozero

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

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

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

In the activation of aurora, recorded by the all-sky camera in Lovozero, statistical properties were found that were previously noted from ground-based television observations at Spitsbergen: ranges with a power-law distribution in the probability density of the characteristics of auroral spots. Significant detector noise in the considered case did not allow extending the distributions to smaller scales than those published earlier.