

Фрактальные характеристики структуры аврорального овала по данным камеры всего неба в Апатитах за 2013-2020 гг.

Б. В. Козелов*¹ (ORCID 0000-0003-2738-2443)

1ФГБНУ Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Мурманская область,
Россия

* **Контакт:** Козелов Борис Владимирович, e-mail: bob-koz@yandex.ru

Аннотация: Пространственная структура полярных сияний описывается фрактальной размерностью флуктуаций свечения и ее анизотропией в зависимости от направления. Фрактальная размерность оценивается из наклона в логарифмических осях спектра в диапазоне 1,5-50 км, полученного дискретным вейвлет-преобразованием флуктуаций интенсивности свечения с использованием вейвлетов Добеши 5 порядка. Вариабельность структур характеризуется наклоном спектра вариации анизотропии во времени. Приведена статистика этих характеристик по данным наземной камеры всего неба Полярного геофизического института в г. Апатиты за 2013-2020 годы и сделана привязка по положению внутри аврорального овала и значениям геомагнитного поля в обсерватории Ловозеро. Обсуждается алгоритм моделирования структуры полярных сияний по данным характеристикам.

© 2024. Коллектив авторов



Ключевые слова: аврора, суббура, выпадения частиц, высокоширотная ионосфера, скейлинг, фрактальный индекс, анизотропия, пульсирующие полярные сияния, фаза расширения.

Fractal Characteristics of the Auroral Oval Structure According to the All-Sky Camera Data in Apatity for 2013-2020

B.V. Kozelov*¹ (ORCID 0000-0003-2738-2443)

¹Polar Geophysical Institute, 194209, Apatity, Murmansk region, Russia

* **Correspondence to:** Boris Kozelov, bob-koz@yandex.ru

© 2024. The Authors.



Abstract: The spatial structure of polar auroras is described by the fractal dimension of glow fluctuations and its anisotropy from direction. The fractal dimension is estimated from the slope in the logarithmic axes of the spectrum in the range of 1.5-50 km, obtained through discrete wavelet transformation of the intensity fluctuation of the glow using Daubechies wavelets of order 5. The variability of the structures is characterized by the slope of the anisotropy variation spectrum over time. The statistics of these characteristics are presented according to the data of the ground-based all-sky camera of the Polar Geophysical Institute in Apatity for 2013-2020 and referenced to the position inside the auroral oval and the values of the geomagnetic field at Lovozero observatory. An algorithm for modeling the structure of polar auroras based on these characteristics is discussed.

46
47
48

Keywords: aurora, substorm, particle precipitation, high-latitude ionosphere, scaling, fractal index, anisotropy, pulsating auroras, expansion phase.

49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93

Введение

Существенным элементом глобальных моделей верхней атмосферы и высокоширотной ионосферы Земли является моделирование воздействия энергичных частиц, высыпающихся в эту область из магнитосферы Земли и вызывающих видимые проявления в виде полярных сияний [Akasofu, 1968; Feldstein and Starkov, 1967]. Однако существующие на данный момент модели таких высыпаний, называемые также моделями аврорального овала, [Hardy et al., 1985; Milan et al., 2010; Vorobjev et al., 2013; Newell et al., 2014] ориентированы в основном на описание только границ зоны высыпаний, среднего потока и средней энергии авроральных частиц, в лучшем случае с разбиением на морфологические типы (диффузные, дискретные и т. п.). Структуры внутри этих границ модели не описывают.

Для описания структуры аврорального свечения в работах [Головчанская и Козелов, 2016; Kozelov et al., 2024] ранее использовался подход, основанный на оценке фрактальной размерности методом «лог-скейл скалограмм» [Abru et al., 2000]. Численные тесты данной методики и необходимых коррекций приведены в работе [Kozelov and Golovchanskaya, 2010]. Пространственная структура полярных сияний описывается фрактальной размерностью флуктуаций свечения при сечении области свечения в заданном направлении. Статистические распределения фрактальных характеристик по данным камеры всего неба в Апатитах за 2013-2015 гг. приводятся в [Козелов и Ролдугин, 2024].

В данной работе статистика расширена на период до 2020, охватывая все время работы однопипной камеры всего неба в Апатитах. Анализировались статистические особенности характеристик структуры аврорального свечения от положения внутри аврорального овала, индексов геомагнитной возмущенности и значений геомагнитного поля в рядом расположенной обсерватории Ловозеро.

Данные и методика обработки

Использовались изображения, полученные камерой всего неба в Апатитах (67°34"N, 33°16"E) в сезоны 2013-2020 гг. Описание камеры всего неба, входящей в систему авроральных камер MAIN, приведено в работе [Kozelov et al., 2012]. За все время работы этой камеры были выбраны события, на которых присутствовали полярные сияния выше 10° над горизонтом. Область кадра вблизи горизонта обрезалась маской. Включенные в статистику события были отобраны по строгим критериям отсутствия Луны, заметной облачности и сильной неоднородной засветки от города. Кроме того, необходимо отметить, что в использованных данных слабые диффузные сияния не видны или плохо различимы при слабой облачности и наличие ярких источников света. Нижний порог интенсивности свечения, вошедших в статистику, можно оценить как ~10 килорелей [Харгривс, 1982].

Методика обработки кадров всего неба для получения пространственных индексов флуктуаций свечения описана в [Kozelov et al., 2024], где подробно анализируется случай развития типичной авроральной суббури 13 сентября 2013 года. Коротко она заключается в следующем:

94 1) Выделяется прямоугольная область от зенита в азимутальным
95 направлении φ .

96 2) Флуктуации светимости в этой области в направлении длинной
97 стороны прямоугольника «склеиваются» в единый массив и для данного
98 массива вычисляется его дискретное вейвлет-разложение. Использовались
99 вейвлеты Добеши 5 порядка. Порядок вейвлетов выбран согласно тестам в
100 работе [Kozelov and Golovchanskaya, 2010].

101 3) По зависимости логарифма дисперсии детализирующих
102 коэффициентов от логарифма масштаба определяется спектральный индекс
103 a , характеризующий наклон в диапазоне масштабов 1,5-50 км.

104 4) Процедура повторяется для ориентаций φ прямоугольной области с
105 поворотом φ по азимуту от 0 до 360° с шагом 5° .

106 5) По зависимости $a(\varphi)$ для данного кадра определяются $\min(a)$, $\max(a)$ и
107 параметр анизотропии $\min(a)/\max(a)$.

108 Полученные величины $A=\max(a)$ и $B=\min(a)/\max(a)$ характеризуют
109 спектр пространственных флуктуации свечения в диапазоне масштабов 1,5-50
110 км в поле зрения камеры и насколько эти флуктуации свечения изотропные.

111 Временное разрешение данных 1 кадр в секунду. Вычислялось среднее
112 значение параметров A и B по 5-минутным интервалам. Из зависимости от
113 вариаций параметра B в течении 5-минутных интервалов находился
114 временной фрактальный индекс C . Индекс C вычислялся этим же методом
115 «лог-скейл скалограмм» из оценки наклона спектра с использованием тоже
116 вейвлетов Добеши, обеспечивающих фильтрацию трендов, но 3 порядка, так
117 как ряд из 300 точек достаточно короткий.

118 **Результаты**

119 Распределения значений полученных параметров для 5-минутных
120 интервалов приведены на рис.1а-в, где разными цветами выделены
121 распределения значений для некоторых морфологически различимых
122 ситуаций в поле зрения камеры:

123 1) взрывная фаза — на кеограмме есть быстрое расширение зоны сияний
124 в направлении север-юг (брейкап) или больше половины поля зрения камеры
125 занимают активные формы после брейкапа, внутри движущегося к западу
126 изгиба (WTS);

127 2) к северу от зенита кадра видны спокойные или с небольшими
128 возмущениями дуги или полосы;

129 3) в поле зрения камеры находятся, в основном, пульсирующие сияния;

130 4) в поле зрения камеры находится омега-форма, то есть бухто-образная
131 яркая форма на северной границе мультиплетной, состоящей из множества
132 узких дуг, полосы.

133 Для пространственных флуктуаций свечения приведены распределения
134 максимальных значений спектрального индекса (рис.1-а). Эти распределения
135 и распределение для временного индекса C (рис.1-в) имеют плавный вид с
136 одним выраженным максимумом. Распределение для индекса B имеет
137 широкий максимум (рис.1-б). Можно выделить две группы — анизотропную B
138 $<0,35$, основной вклад в которую дают дуги на севере, и более изотропную B
139 $>0,35$, соответствующая активным сияниям. Отметим, что индекс B — это

анизотропия не просто линейного размера пространственных флуктуаций свечения, а спектрального индекса, т. е. оценки фрактального индекса пространственных флуктуаций свечения в разных направлениях.

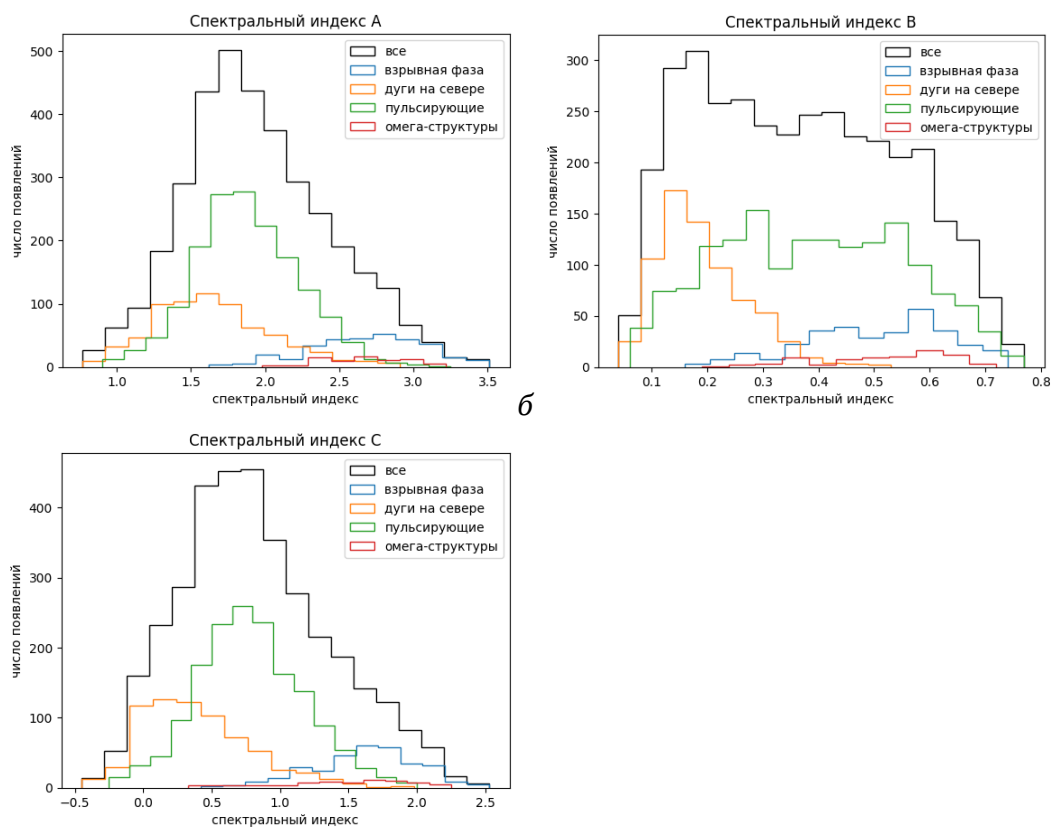


Рисунок 1. Распределения значений спектральных индексов: а — для пространственных флуктуаций свечения, максимальное значение обозначено «индекс А»; б — для анизотропии пространственных флуктуаций свечения — отношение минимального к максимальному значению (обозначено «индекс В»); в — для временных флуктуаций анизотропии (обозначено «индекс С»). Линиями разных цветов выделены некоторые морфологически различные ситуации в поле зрения камеры.

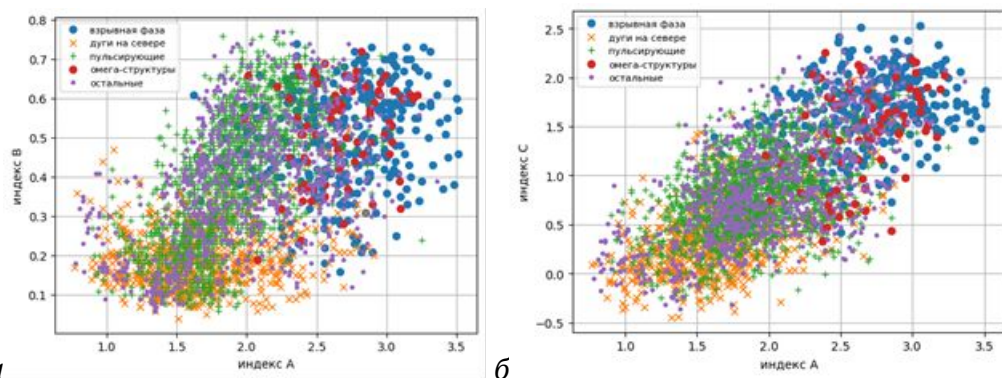


Рисунок 2. Распределения индексов: а - В от А; б - С от А. Разными символами выделены некоторые морфологически различные ситуации в поле зрения камеры (см. текст).

На рис. 2 приведены распределения полученных значений индексов B от A и C от A . Разными символами выделены некоторые морфологически различимые ситуации в поле зрения камеры, описанные ранее. Более сложные и комбинированные случаи, которые нельзя отнести однозначно к предыдущим, отнесены к группе «остальные».

Средние значения индексов со значениями стандартных отклонений для выделенных групп приведены в таблице 1. Из приведенной статистики видно, что взрывные фазы и омега-формы в среднем характеризуются большими значениями индекса $A > 2,0$ и $C > 1,0$, и индексом B , в основном, из группы $B > 0,35$. Дуги и полосы на севере кадра — в основном значениями индексов $A < 2,0$, $B < 0,35$, $C < 0,5$. Пульсирующие формы - значениями индексов A и C меньше, чем для взрывных фаз, по индексу B нет очевидной локализации.

Таблица 1. Средние значения и стандартные отклонения спектральных индексов для выделенных событий.

	Индекс A	Индекс B	Индекс C
Все точки	$1,95 \pm 0,49$	$0,36 \pm 0,17$	$0,82 \pm 0,55$
Взрывная фаза	$2,69 \pm 0,39$	$0,50 \pm 0,13$	$1,63 \pm 0,38$
Дуги на севере	$1,66 \pm 0,40$	$0,19 \pm 0,08$	$0,39 \pm 0,40$
Пульсирующие	$1,88 \pm 0,35$	$0,39 \pm 0,17$	$0,78 \pm 0,37$
Омега-структуры	$2,67 \pm 0,29$	$0,52 \pm 0,12$	$1,44 \pm 0,50$
Остальные	$1,99 \pm 0,49$	$0,39 \pm 0,16$	$0,90 \pm 0,56$

Локализация событий

Зависимости локализации выделенных выше групп событий от местного магнитного времени MLT, а также от компонент H , D , Z геомагнитного поля, измеренных в ближайшей к г. Апатиты обсерватории ПГИ Ловозеро, показаны на рис.3. Пробелы в данных Ловозеро пополнены данными близкой обсерватории ПГИ Лопарская, что не влияет на дальнейшие результаты. Наблюдения соответствуют ожидаемой морфологии основных форм в полярных сияниях [Akasofu, 1968; Харгривс, 1982]:

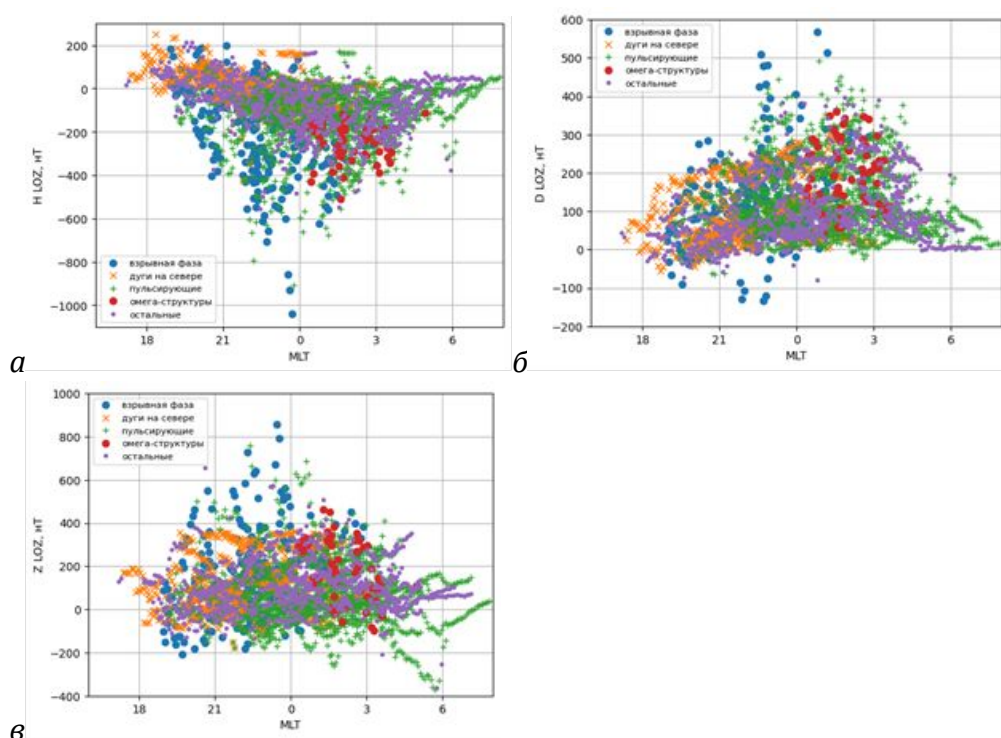
- спокойные или с небольшими возмущениями дуги или полосы к северу от зенита видны в основном вечером до полуночи при H и D компонентах от 0 до +200 нТ;

- взрывные фазы в полярных сияниях видны в основном вечером до 01 MLT, омега-формы — после 01 MLT утром;

- пульсирующие сияния наблюдаются от позднего вечера (~20 MLT) до позднего утра (~8 MLT).

191

192



193

194

195

196

197

Рисунок 3. Локализация выделенных групп событий от местного магнитного времени MLT и от компонент геомагнитного поля, измеренных в обс. Ловозеро: *а* — в осях MLT и *H*; *б* - в осях MLT и *D*; *в* - в осях MLT и *Z*.

198

199

200

201

202

203

204

205

206

207

208

209

210

211

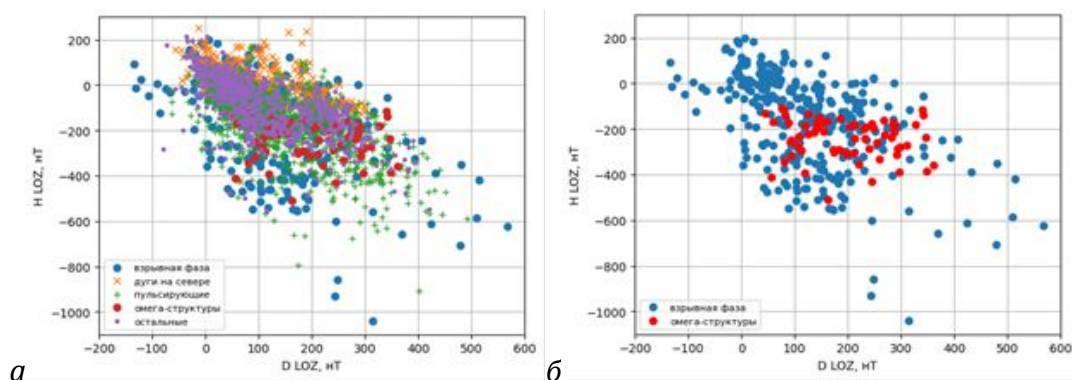


Рисунок 4. Локализация выделенных групп событий и от компонент геомагнитного поля, измеренных в обс. Ловозеро: *а* — в осях *D* и *H* компонент; *б* – то же, но только взрывные фазы и омега-структуры.

Положение выделенных групп событий от *H* и *D* компонент магнитного поля в обсерватории Ловозеро показано на рис.4-а. Видно, что есть обратная пропорциональность между *H* и *D* компонентами, при которых наблюдаются сияния в Апатитах. Это определяется пересечением точкой наблюдения аврорального овала: с ростом общей возмущенности (*H* компонента становится более отрицательной) пересечение авроральной зоны точкой наблюдения (г.Апатиты) происходит преимущественно при больших значениях *D* компоненты, то есть в среднем меняется ориентация магнитного поля относительно направления на

14

7

магнитный полюс, при котором наблюдаются сияния. На рис.4-б приведены только выборки по событиям, отнесенным к взрывным фазам и омега-формам. Сияния, отнесенные к взрывным фазам, наблюдаются в широком диапазоне значений H и D компонент, а омега-формы в более ограниченном диапазоне, при $D > 0$ нТ и -100 нТ $> H > -400$ нТ. Это, видимо, связано с тем, что омега-формы не связаны со значительными перемещениями сияний по широте, поэтому их появление на данной широте происходит примерно при одинаковом возмущении магнитного поля, обеспечивающем расширение овала полярных сияний до широты наблюдений. Во время взрывной фазы происходит расширение зоны полярных сияний, захватывающее большой диапазон широт. Поэтому появление сияний на данной широте во время взрывной фазы суббури возможно в большем диапазоне магнитных возмущений.

Надо отметить, что экстремальные значения магнитного поля (наиболее низкие значения H -компоненты и наибольшие значения D -компоненты) наблюдались во время взрывных фаз. В среднем взрывные фазы наблюдались при более низких значениях H -компоненты локального магнитного поля, чем в среднем для остальных событий при заданных значениях D -компоненты магнитного поля.

Определенных зависимостей от индексов AL, AU, AE, Dst, SYM-H на данном наборе данных выявить не удалось, что не удивительно, т. к. это глобальные индексы, а спектральные индексы и группы сияний получены по локальным наблюдениям из одной точки. На рис.5 для иллюстрации приведены распределения значений индекса A от индексов AE и Dst.

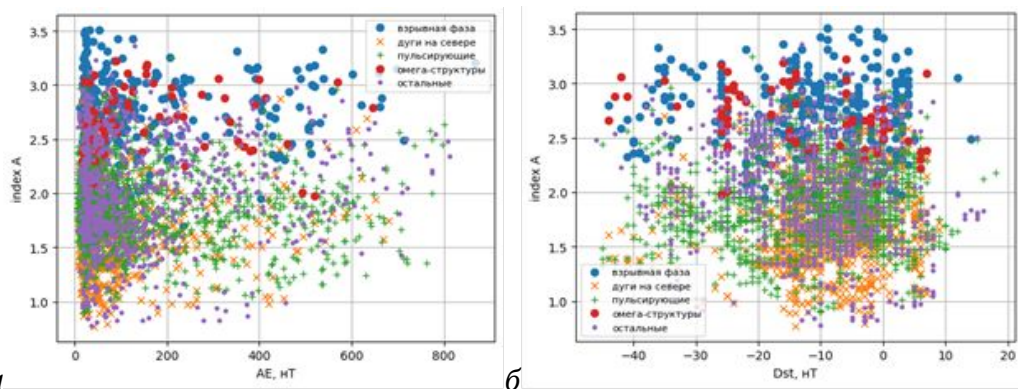


Рисунок 5. Распределение индекса A от глобальных индексов геомагнитной активности: a — от AE индекса; b – от Dst индекса. Разными цветами выделены те же группы, что на рис.2.

Обсуждение и использование результатов

Подобие авроральных структур на различных масштабах отмечалось еще в работе [Oguti, 1975]. Описание наблюдаемой структуры контуров изолиний полярных сияний с помощью фрактальной геометрии предлагалось в [Kozelov, 2003]. Теоретическое обоснование образования фрактальных, т.е. статистически самоподобных, структур в переходных процессах в космической плазме дает представление о состоянии самоорганизованной критичности [Chang, 1999; Kozelov et al., 2004]. Фрактальная структура

авроральных высыпаний, вероятно, связана с поддержанием на пороге протекания (перколяции) ионосферно-магнитосферной токовой системы [Chernyshov et al., 2013; 2017].

В данной работе приведены результаты систематического применения методики описания структур полярных сияний фрактальной размерностью и ее анизотропией. Вариабельность структур характеризуется наклоном спектра вариации анизотропии во времени. Приведена статистика этих характеристик по 5-минутным интервалам за 2013-2020 годы по данным наблюдений наземной камеры всего неба в г. Апатиты. Применение при обработке изображений вейвлетов 3 и 5 порядков обеспечивает фильтрацию полиномиальных трендов для исключения систематических ошибок в оценки спектров флуктуаций, возможных при наличие слабых засветок неба.

Многие авторы пытались и пытаются найти «характерные масштабы» в полярных сияниях. При этом неявно наблюдения фильтруются аппаратной функцией использованной камеры, ее пространственным, временным и спектральным разрешением, всегда являющимся компромиссом с возможностью регистрации свечения газа. Имея в виду, что коллективный плазменный процесс генерации потоков авроральных частиц имеет с широкий пространственно-временной спектр, из него фильтрацией можно получить разные масштабы. Как раз фрактальный подход пытается, хотя бы для части спектра, получить характеристики такого процесса. В данном случае рассматривались масштабы от 1.5 км до 50 км при временном разрешении 1 с. Регистрация производилась в широком видимом диапазоне, поэтому меньшие масштабы на этой аппаратуре не получить (время жизни для наиболее сильной видимой линии 557.7 нм \sim 0.7 с, «скорости движения» в сияниях до 1 км/с).

Использованный в статье подход характеризует коллективный свойства не только пространственно-временных масштабов, но и процессов в плазме, приводящий к высыпанию частиц в атмосферу. Известно, что наиболее очевидным механизмом образования полярных сияний (дуг), является ускорение в поле inverted-V структуры. Такое ускорение должно давать спектр электронов с максимумом. В то же время, обсуждается также механизм ускорения в кинетических альвеновских волнах. Если считать, что в этом случае должен формироваться непрерывный широкий по энергии спектр, то наиболее вероятное проявление такого механизма — это лучистые структуры. Чтобы получить луч в атмосфере надо, чтобы широкий спектр электронов с $E < 1$ кэВ спадал примерно, как $1/E^2$. Бывают случаи, когда лучи занимают значительную часть неба. Но таких случаев сравнительно немного и, обычно, одновременно на небе есть другие сияния. Поэтому такие события в нашем анализе попадает в группу «остальные» - смешанные случаи. С другой стороны, в [Kozelov, Titova, 2023] было показано, что некоторые лучи связаны с ОНЧ/КНЧ волнами, наблюдаемыми в магнитосфере вблизи экваториальной области. Видимо, разделить эти механизмы фрактальный анализ не может.

Полученные значения фрактальных характеристик для групп различных форм полярных сияний и их локализация по положению по местному магнитному времени хорошо соответствует ожидаемой

морфологии. Наибольшие значения фрактального индекса A и индекса анизотропии B соответствуют фазам расширения и брейкапам в полярных сияниях, когда наблюдается сильное расширение диапазона флуктуаций интенсивности свечения внутри области распространяющегося к западу изгиба (WTS). Видимо, большие фрактальные индексы объясняются возникновением в системе новой крупномасштабной степени свободы, связанной с формированием крупномасштабной токовой петли суббури, что приводит к другому перераспределению энергии на разные масштабы, в это время в среднем сияния более изотропные. Такие события наблюдаются вечером, обычно до полуночи по MLT.

После полуночи похожие по значениям фрактальных индексов события соответствуют омега-структурам. Эта группа выделяется по характерным крупным пространственным волнам в свечении, хотя такие события являются «смешанным» случаем, в котором одновременно есть и пульсирующие пятна, и дуги, и лучи. Видимо, такие явления можно считать проявлением крупномасштабной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца на приполюсной границе аврорального овала, которая организует другие процессы в этой зоне.

Меньшие значения фрактального индекса A , а также меньшие значения индекса анизотропии B наблюдаются при однородных или слабо возмущенных дугах на северной части неба, в основном, вечером. Такие индексы можно ожидать при небольшом числе линейных, сильно вытянутых структурах в свечении.

Сравнительно неожиданным оказалась в среднем линейная зависимость значения индекса временных флуктуаций C от спектрального индекса A , см. рис.2-б: $\langle C \rangle = \langle A \rangle - 1$. То есть, спектральный индекс вариации во времени индекса анизотропии отличаются в среднем на 1 от спектрального индекса пространственных вариаций интенсивности свечения в авроре. Необходимо дальнейшее исследование причин этой зависимости.

Определенных зависимостей спектральных индексов от индексов AL , AU , AE , Dst , $SYM-H$ на данном наборе данных выявить не удалось, в то же время, проявилась зависимость от вариаций геомагнитного поля в расположенной близко к точке наблюдения обсерватории ПГИ «Ловозеро». Отметим, что взрывные фазы суббури наблюдались при более низких значениях H -компоненты локального магнитного поля, чем в среднем для остальных событий с полярными сияниями. Кроме того, наблюдается обратная пропорциональность между H и D компонентами локального магнитного поля, при которых наблюдаются сияния на широте г.Апатиты. При отрицательных значениях H компоненты сияния могут наблюдаться и при положительных значениях D компоненты.

Результаты данного статистического анализа могут быть использованы для построения эмпирической модели структуры полярных сияний внутри аврорального овала. Прохождение радиоволн в среде с такой структурой отличается от однородно ионизированной [Суворова и др., 2022]. Пример процедуры моделирования структуры полярного сияния при заданных значениях фрактального индекса был приведен ранее в работе [Kozelov and Golovchanskaya, 2010]. Моделирование строит шершавую поверхность последовательным делением области моделирования пополам со

343 смещением точек по закону случайного Броуновского движения с заданными
344 показателями Херста $h_x = (A - 2)/2$ и $h_y = (A*B - 2)/2$, где ось x направлена
345 вдоль овала, а y — поперек овала, а показатели Херста h_x и h_y выражены
346 через индексы A и B . Здесь для упрощения считаем, что вдоль овала
347 распределение флуктуаций свечения характеризуется индексом $A = \max(a)$ и
348 поперек овала $A * B = \max(a) * \min(a) / \max(a) = \min(a)$.

349 Согласно тестам, описанным в [Kozelov, Golovchanskaya, 2010]
350 определение показателя Херста из приведенных пространственных индексов
351 A и B зависит от типа сияний, т.е. от высотного профиля свечения в сияниях
352 данного типа. Явно видимый на кадре высотный профиль добавляет 1 к
353 оценке пространственного индекса A . Так для сияний во время взрывной
354 фазы после коррекции на проекцию показатель Херста $h = (A - 2)/2$. Для
355 пульсирующих сияний высотный профиль сияний практически не влияет на
356 оценку индекса A , поэтому $h = (A - 1)/2$.

357 Дальнейшее продолжение данной работы предполагает расширение
358 статистики за счет рассмотрения данных из других точек наблюдения.

359 **Благодарность.** Авторы благодарят Дж. Х. Кинг и Н. Папаташвилли (J.H.
360 King, N. Papatashvilli) (Adnet Systems, NASA GSFC) за данные базы OMNI. Работа
361 поддержана грантом РНФ и Министерства образования и науки Мурманской
362 области №22-12-20017 «Пространственно-временные структуры в
363 околоземном космическом пространстве Арктики: от полярных сияний через
364 особенности самоорганизации плазмы к прохождению радиоволн».

366 Список литературы

- 367 1. Akasofu S.-I. Polar and magnetospheric substorm. Dordrecht: Holland, 1968. DOI: 10.1007/978-94-
368 010-3461-6
- 369 2. Feldstein Ya., Starkov S. Dynamics of Auroral Belt and Polar Geomagnetic Disturbances // Planet.
370 Space Sci. 1967. Vol. 15, no. 2. P. 209-229. DOI: 10.1016/0032-0633(67)90190-0
- 371 3. Hardy D.A., Gussenhoven M.S., Holeman E. A statistical model of auroral electron precipitation // J.
372 Geophys. Res. 1985. Vol. 90, no: A5. P. 4229-4248. DOI: 10.1029/JA090iA05p04229
- 373 4. Milan S. E., Evans T. A., and Hubert B: Average auroral configuration parameterized by geomagnetic
374 activity and solar wind conditions // Ann. Geophys. 2010. Vol. 28, no.4. P. 1003-1012. DOI:
375 10.5194/angeo-28-1003-2010
- 376 5. Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Yu.V. Auroral Precipitation Model and its applications to
377 ionospheric and magnetospheric studies // J. Atm. S.-Terr. Phys. 2013. Vol.102. P.157-171. DOI:
378 10.1016/j.jastp.2013.05.007
- 379 6. Newell P. T., Liou K., Zhang Y., Sotirelis T., Paxton L. J., Mitchell E. J. OVATION Prime-2013:
380 Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels // Space Weather. 2014.
381 Vol.12, no.6. P.368-379. DOI: 10.1002/2014SW001056
- 382 7. Головчанская И. В., Козелов Б. В. Диапазон масштабов альфвеновской турбулентности в
383 верхней ионосфере авроральной зоны // Космические исследования. 2016. Т. 54, № 1. С. 52-
384 57. DOI: 10.7868/S002342061601009X
- 385 8. Kozelov B.V., Vorobjev V.G., Titova E.E., Popova T.A. Diagnostics of the High-Latitude Ionosphere
386 and Spatiotemporal Dynamics of Auroral Precipitations // Bulletin of the Russian Academy of
387 Sciences: Physics, 2024, V. 88, No. 3, pp. 394-399. DOI: 10.1134/S1062873823705573
- 388 9. Abry P., Flandrin P., Taqqu M.S., Veitch V. Wavelets for the analysis, estimation and synthesis of

- scaling data // Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation. P. 39–88. N.J.: Wiley-Interscience, 2000. DOI: 10.1002/047120644X.ch2
10. Kozelov B.V., Pilgaev S.V., Borovkov L.P., Yurov V.E. Multi-scale auroral observations in Apatity: winter 2010–2011 // Geosci. Instrum. Method. Data Syst. 2012. Vol.1. P.1-6. DOI: 10.5194/gi-1-1-2012
 11. Oguti T. Similarity between global auroral deformations in DAPP photographs and smallscale deformations observed by TV camera // J. Atmosph. Terr. Phys. 1975. Vol. 37, no.11. P.1413-1418. DOI: 10.1016/0021-9169(75)90070-7
 12. Kozelov B. V. Fractal approach to description of the auroral structure // Ann. Geophys. 2003. Vol. 21. P. 2011–2023. DOI: 10.5194/angeo-21-2011-2003
 13. Chang T. Self-organized criticality, multi-fractal spectra, sporadic localized reconnections and intermittent turbulence in the magnetotail // Phys. Plasmas. 1999. Vol.6, P.4137–4145. DOI: 10.1063/1.873678
 14. Kozelov B. V., Uritsky V. M., Klimas A. J. Power law probability distributions of multiscale auroral dynamics from ground-based TV observations // Geophys. Res. Lett. 2004. Vol. 31, no. 20. L20804, DOI: 10.1029/2004GL020962.
 15. Chernyshov A.A., Kozelov B.V., Mogilevsky M.M. Study of auroral ionosphere using percolation theory and fractal geometry // J. Atmos. Sol.-Terr. Phy. 2017. Vol. 161. P. 127—133. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.06.013
 16. Chernyshov A.A., Mogilevsky M.M., Kozelov B.V. Use of fractal approach to investigate ionospheric conductivity in the auroral zone // J. Geophys. Res. - Space. 2013. Vol. 118, no. 7. P. 4108—4118. DOI: 10.1002/jgra.50321
 17. Харгривс Дж.К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи // Ленинград: Гидрометеиздат. 1982. URL: [https://publ.lib.ru/ARCHIVES/H/HARGRIVS Dj. K/ Hargrivs Dj.K.html](https://publ.lib.ru/ARCHIVES/H/HARGRIVS_Dj_K/Hargrivs_Dj.K.html)
 18. Суворова З.В., Мингалев И.В., Козелов Б.В. Влияние пространственных размеров областей высыпания электронов на прохождение КВ сигналов // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2022. С. 393. DOI 10.21046/20DZZconf-2022
 19. Kozelov B.V., Golovchanskaya I.V. Derivation of aurora scaling parameters from ground-based imaging observations: Numerical tests // J.Geophys. Res. 2010. Vol. 115, no.2. A02204. DOI:10.1029/2009JA014484
 20. Козелов Б. В., Ролдугин А.В. Фрактальные характеристики структуры аврорального овала на основе экспериментальных данных // Physics of auroral phenomena. 47 Annual Seminar. Abstracts. PGI-24-01-14. 2024. С.30. URL: http://pgia.ru/seminar/abstracts_2024.pdf
 21. Kozelov B.V., Titova E.E. Conjunction Ground Triangulation of Auroras and Magnetospheric Processes Observed by the Van Allen Probe Satellite near 6 Re // Universe. 2023. Vol.9, no.8, #353, DOI: 10.3390/universe9080353

Козелов Борис Владимирович – доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник, ФГБНУ Полярный геофизический институт, SPIN-код 4317-0170

ссылка на профиль в WoS <https://www.webofscience.com/wos/author/record/N-2731-2013>

Scopus <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57195623641>

ИСТИНА https://istina.msu.ru/profile/bobkoz_pgi/

ResearchGate <https://www.researchgate.net/profile/B-Kozelov>