

ФРАКТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА ПО ДАННЫМ КАМЕРЫ ВСЕГО НЕБА В АПАТИТАХ ЗА 2013–2020 ГГ.

Б. В. Козелов* 

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

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

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 (All-Sky camera) 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.

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

Цитирование: Козелов, Б. В. Фрактальные характеристики структуры аврорального овала по данным камеры всего неба в Апатитах за 2013–2020 гг. // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Т. 25. — ES3004. — DOI: 10.2205/2025es000989 — EDN: EIOXXJ

Введение

Существенным элементом глобальных моделей верхней атмосферы и высокоширотной ионосферы Земли является моделирование воздействия энергичных частиц, выпадающих 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; Newell et al., 2014; Vorobjev et al., 2013] 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» [Abry 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 (All-Sky camera) в Апатитах за 2013–2015 гг. приводятся в [Козелов и Ролдугин, 2024].

<https://elibrary.ru/EIOXXJ>

Получено: 30 сентября 2024 г.

Принято: 15 января 2025 г.

Опубликовано: 7 апреля 2025 г.



© 2025. Автор.

В данной работе статистика расширена на период до 2020 г., охватывая все время работы однотипной камеры всего неба в Апатитах. Были проанализированы статистические особенности характеристик структуры аврорального свечения в зависимости от положения внутри аврорального овала, индексов геомагнитной возмущенности и значений геомагнитного поля, зарегистрированных в обсерватории Ловозеро.

Данные и методика обработки

Использовались изображения, полученные камерой всего неба в Апатитах ($67^{\circ}34'$ с. ш., $33^{\circ}16'$ в. д.) 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 наличии ярких источников света. Нижний порог интенсивности свечения, вошедших в статистику, можно оценить как ~ 10 кРл [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:

1. Выделяется прямоугольная область от зенита в азимутальном направлении φ .
2. Флуктуации светимости в этой области в направлении длинной стороны прямоугольника «склеиваются» в единый массив и для данного массива вычисляется его дискретное вейвлет-разложение. Использовались вейвлеты Добеши 5 порядка. Порядок вейвлетов выбран согласно тестам в работе [Kozelov and Golovchanskaya, 2010].
3. По зависимости логарифма дисперсии детализирующих коэффициентов от логарифма масштаба определяется спектральный индекс a , характеризующий наклон в диапазоне масштабов 1,5–50 км.
4. Процедура повторяется для ориентаций φ прямоугольной области с поворотом φ по азимуту от 0 до 360° с шагом 5° .
5. По зависимости $a(\varphi)$ для данного кадра определяются $\min(a)$, $\max(a)$ и параметр анизотропии $\min(a)/\max(a)$.

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

Временное разрешение данных – 1 кадр в секунду. Вычислялось среднее значение параметров A и B по 5-минутным интервалам. Из зависимости вариаций параметра B в течение 5-минутных интервалов вычислялся временной фрактальный индекс C . Для его расчёта использовался метод «лог-скейл скалограмм», который позволяет оценить наклон спектра, с применением вейвлетов Добеши для фильтрации трендов третьего порядка, что было необходимо из-за короткой длины ряда (300 точек).

Результаты

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

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

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

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

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

Для пространственных флуктуаций свечения приведены распределения максимальных значений спектрального индекса (рис. 1а). Эти распределения и распределение для временного индекса C (рис. 1в) имеют плавный вид с одним выраженным максимумом. Распределение для индекса B имеет широкий максимум (рис. 1б). Можно выделить две группы – анизотропную $B < 0,35$, основной вклад в которую дают дуги на севере, и более изотропную $B > 0,35$, 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.

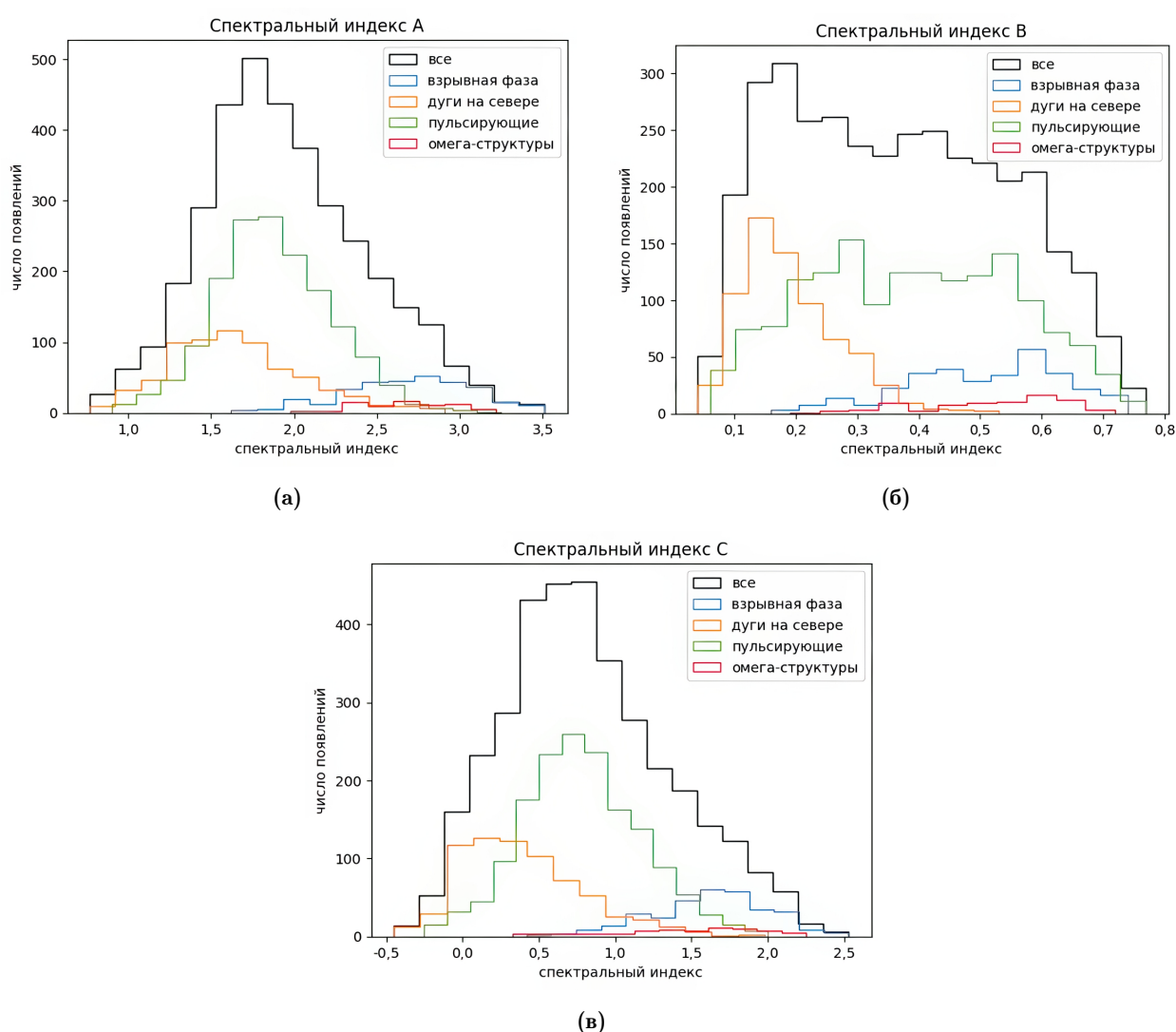


Рис. 1. Распределения значений спектральных индексов: (а) — для пространственных флуктуаций свечения, максимальное значение обозначено «индекс А»; (б) — для анизотропии пространственных флуктуаций свечения – отношение минимального к максимальному значению (обозначено «индекс В»); (в) — для временных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

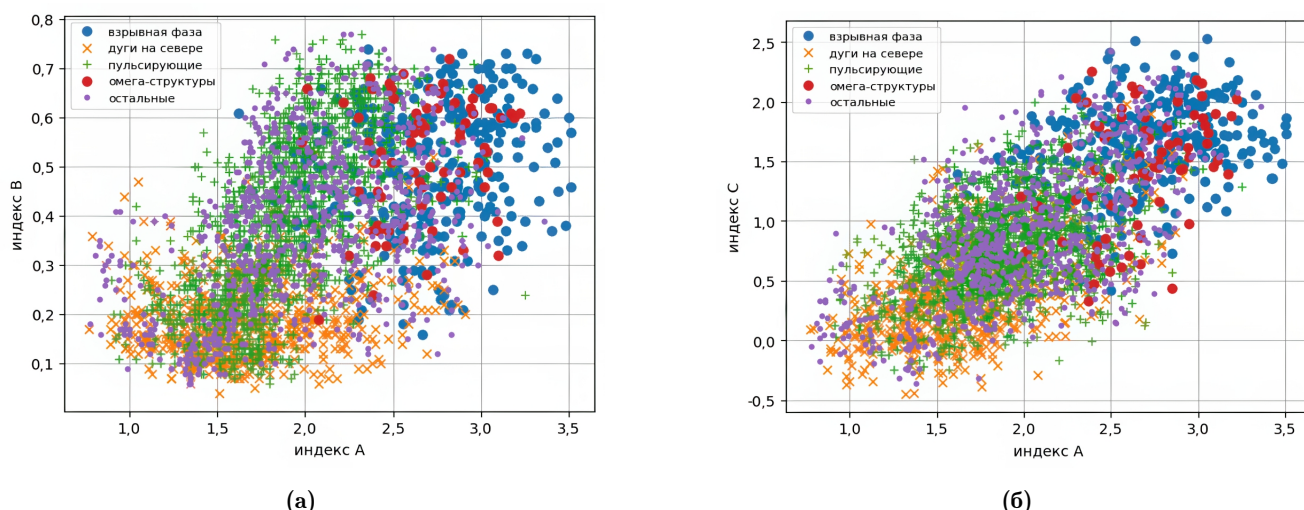


Рис. 2. Распределения индексов: (а) – B от A ; (б) – C от A . Разными символами выделены некоторые морфологически различные ситуации в поле зрения камеры (см. текст).

На рис. 2 приведены распределения полученных значений индексов B от A и C от A . Разными символами выделены некоторые морфологически различные 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 табл. 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	$1,95 \pm 1,95$	$0,36 \pm 0,36$	$0,82 \pm 0,82$
Взрывная фаза	$2,69 \pm 2,69$	$0,50 \pm 0,50$	$1,63 \pm 1,63$
Дуги на севере	$1,66 \pm 1,66$	$0,19 \pm 0,19$	$0,39 \pm 0,39$
Пульсирующие	$1,88 \pm 1,88$	$0,39 \pm 0,39$	$0,78 \pm 0,78$
Омега-структуры	$2,67 \pm 2,67$	$0,52 \pm 0,52$	$1,44 \pm 1,44$
Остальные	$1,99 \pm 1,99$	$0,39 \pm 0,39$	$0,90 \pm 0,90$

Локализация событий

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

- 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 (~ 08 MLT).

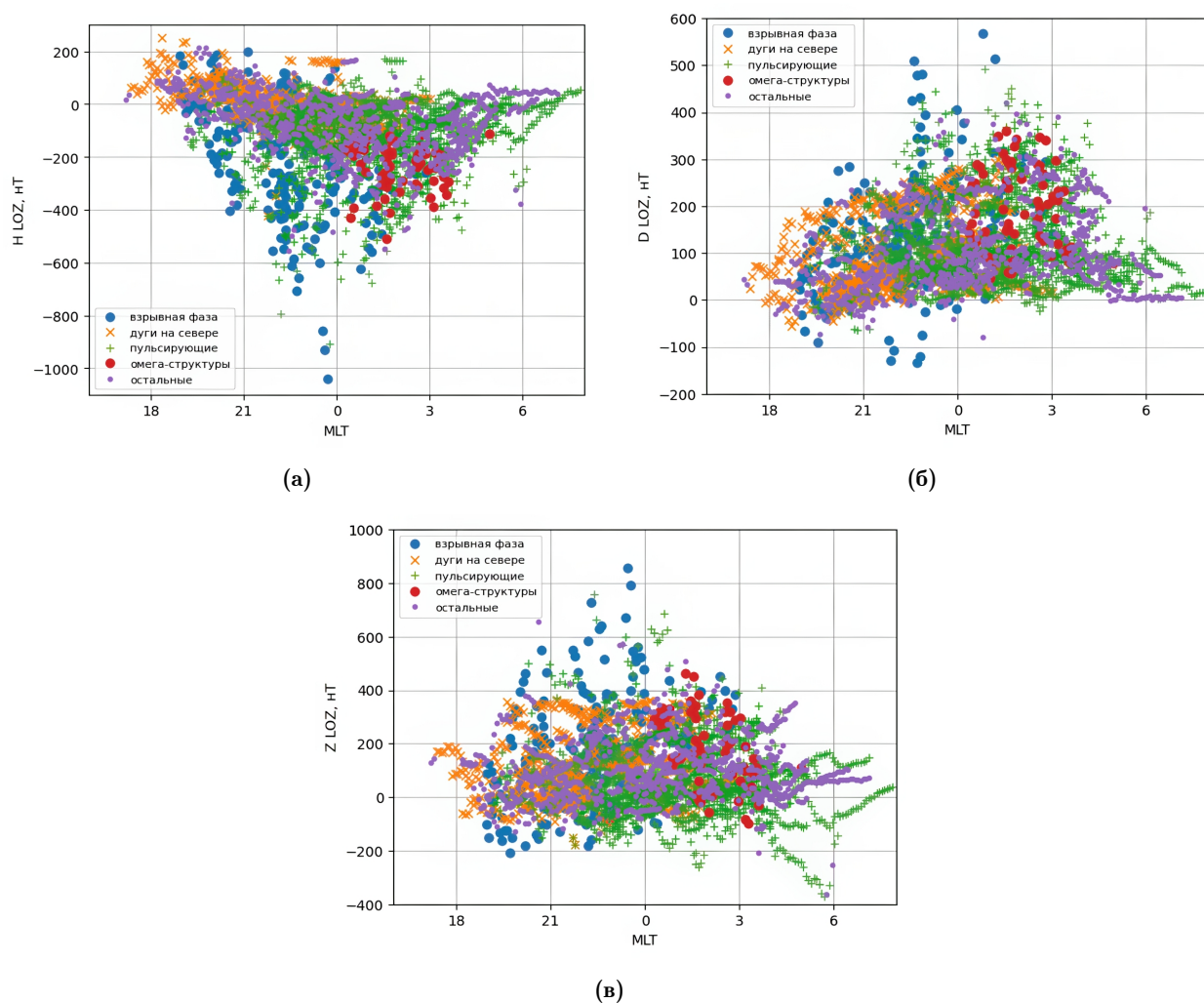


Рис. 3. Локализация выделенных групп событий от местного магнитного времени MLT и от компонент геомагнитного поля, измеренных в обсерватории «Ловозеро»: (а) – в осях MLT и H; (б) – в осях MLT и D; (в) – в осях MLT и Z.

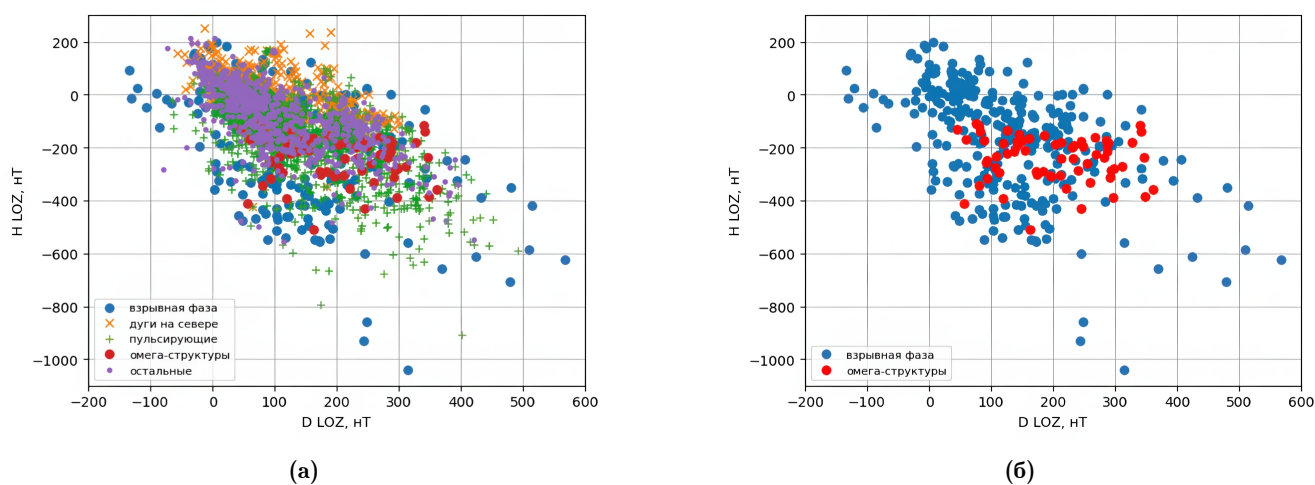


Рис. 4. Локализация выделенных групп событий и от компонент геомагнитного поля, измеренных в обсерватории «Ловозеро»: (а) – в осях D- и H-компонент; (б) – то же, но только взрывные фазы и омега-структуры.

Положение выделенных групп событий в зависимости от H - и D -компонент магнитного поля в обсерватории «Ловозеро» показано на рис. 4а. 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 магнитный полюс, при котором наблюдаются сияния. На рис. 4б 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 $D > 0$ и $-400 < H < -100$ 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 .

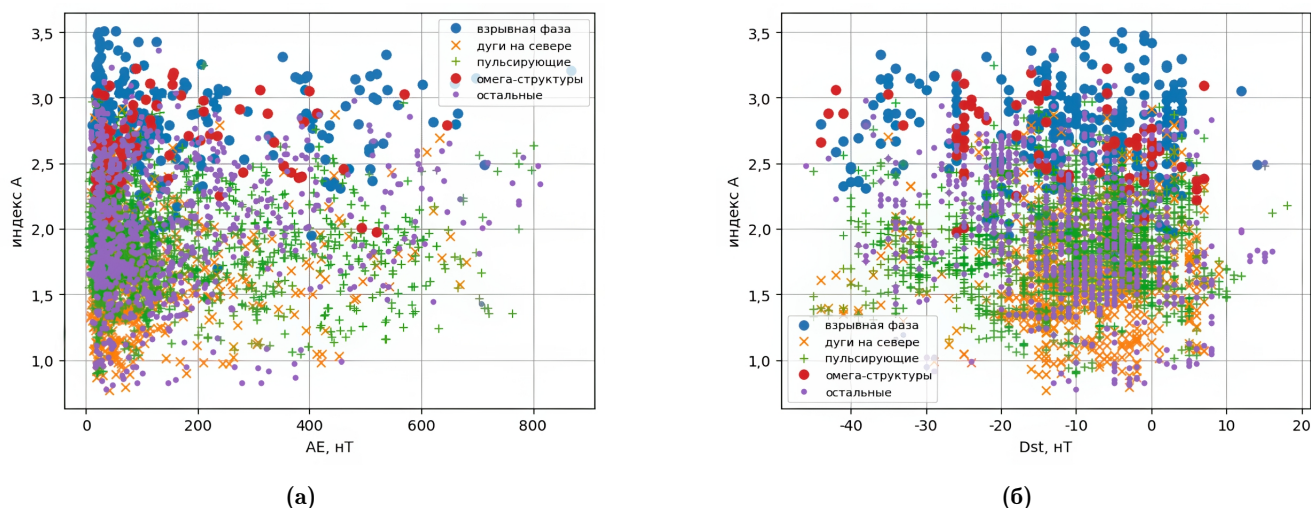


Рис. 5. Распределение индекса A от глобальных индексов геомагнитной активности: (а) – от AE -индекса; (б) – от Dst -индекса. Разными цветами выделены те же группы, что на рис. 2.

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 самоор-

ганизированной 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., 2017, 2013].

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 оценке спектров флуктуаций, возможных при наличии 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 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 коллективные свойства не только пространственно-временных масштабов, но и процессов в плазме, приводящих 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 попадают в группу «остальные» – смешанные случаи. С другой стороны, в [Kozelov and Titova, 2023] было показано, что некоторые лучи связаны с очень-низкочастотными (ОНЧ) и крайне-низкочастотными (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 изотропны. 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 структур в свечении.

Сравнительно неожиданным оказалась в среднем линейная зависимость значения индекса временных флуктуаций C от спектрального индекса A , см. рис. 2б: $\langle C \rangle = \langle A \rangle - 1$. 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 , $SUM-H$ на данном наборе данных выявить не удалось, в то же время, проявилась зависимость от вариаций геомагнитного поля в расположенной близко к точке наблюдения обсерватории «Ловозеро» ПГИ. 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 сильно 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 смещением точек по закону случайного броуновского движения с заданными показателями Хёрста $h_x = (A - 2)/2$ и $h_y = (A \cdot B - 2)/2$, где ось x направлена вдоль овала, а y – поперек овала, а показатели Хёрста h_x и h_y выражены через индексы A и B . Здесь для упрощения считаем, что вдоль овала распределение флуктуаций свечения характеризуется индексом $A = \max(a)$ и поперек овала $A \cdot B = \max(a) \cdot \min(a) / \max(a) = \min(a)$.

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

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

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

Список литературы

- Головчанская И. В., Козелов Б. В. Диапазон масштабов альфвеновской турбулентности в верхней ионосфере авроральной зоны // Космические исследования. — 2016. — Т. 54, № 1. — С. 52–57. — DOI: [10.7868/S002342061601009X](https://doi.org/10.7868/S002342061601009X).
- Козелов Б. В., Ролдугин А. В. Фрактальные характеристики структуры аврорального овала на основе экспериментальных данных // 47-й ежегодный Апатитский семинар «Физика авроральных явлений». Тезисы докладов. — Апатиты : Полярный геофизический институт, 2024. — С. 30.
- 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». — Институт космических исследований РАН, 2022. — DOI: [10.21046/20DZZconf-2022a](https://doi.org/10.21046/20DZZconf-2022a).
- Харгривс Дж. К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи: Введение в физику околоземной космической среды. — Ленинград : Гидрометеиздат, 1982.
- Abry P., Flandrin P., Taqqu M. S., et al. Wavelets for the Analysis, Estimation, and Synthesis of Scaling Data // Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation. — Wiley, 2000. — P. 39–88. — DOI: [10.1002/047120644x.ch2](https://doi.org/10.1002/047120644x.ch2).
- Akasofu S.-I. Polar and Magnetospheric Substorms. — Springer Netherlands, 1968. — DOI: [10.1007/978-94-010-3461-6](https://doi.org/10.1007/978-94-010-3461-6).
- Chang T. Self-organized criticality, multi-fractal spectra, sporadic localized reconnections and intermittent turbulence in the magnetotail // Physics of Plasmas. — 1999. — Vol. 6, no. 11. — P. 4137–4145. — DOI: [10.1063/1.873678](https://doi.org/10.1063/1.873678).
- Chernyshov A. A., Kozelov B. V., Mogilevsky M. M. Study of auroral ionosphere using percolation theory and fractal geometry // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2017. — Vol. 161. — P. 127–133. — DOI: [10.1016/j.jastp.2017.06.013](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.06.013).
- Chernyshov A. A., Mogilevsky M. M., Kozelov B. V. Use of fractal approach to investigate ionospheric conductivity in the auroral zone // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2013. — Vol. 118, no. 7. — P. 4108–4118. — DOI: [10.1002/jgra.50321](https://doi.org/10.1002/jgra.50321).
- Feldstein Y. I., Starkov G. V. Dynamics of auroral belt and polar geomagnetic disturbances // Planetary and Space Science. — 1967. — Vol. 15, no. 2. — P. 209–229. — DOI: [10.1016/0032-0633\(67\)90190-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(67)90190-0).
- Hardy D. A., Gussenhoven M. S., Holeman E. A statistical model of auroral electron precipitation // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 1985. — Vol. 90, A5. — P. 4229–4248. — DOI: [10.1029/ja090ia05p04229](https://doi.org/10.1029/ja090ia05p04229).
- Kozelov B. V. Fractal approach to description of the auroral structure // Annales Geophysicae. — 2003. — Vol. 21, no. 9. — P. 2011–2023. — DOI: [10.5194/angeo-21-2011-2003](https://doi.org/10.5194/angeo-21-2011-2003).
- Kozelov B. V., Golovchanskaya I. V. Derivation of aurora scaling parameters from ground-based imaging observations: Numerical tests // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2010. — Vol. 115, A2. — DOI: [10.1029/2009ja014484](https://doi.org/10.1029/2009ja014484).
- Kozelov B. V., Pilgaev S. V., Borovkov L. P., et al. Multi-scale auroral observations in Apatity: winter 2010-2011 // Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems. — 2012. — Vol. 1, no. 1. — P. 1–6. — DOI: [10.5194/gi-1-1-2012](https://doi.org/10.5194/gi-1-1-2012).
- 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. — P. 353. — DOI: [10.3390/universe9080353](https://doi.org/10.3390/universe9080353).
- Kozelov B. V., Uritsky V. M., Klimas A. J. Power law probability distributions of multiscale auroral dynamics from ground-based TV observations // Geophysical Research Letters. — 2004. — Vol. 31, no. 20. — DOI: [10.1029/2004GL020962](https://doi.org/10.1029/2004GL020962).
- Kozelov B. V., Vorobjev V. G., Titova E. E., et al. Diagnostics of the High-Latitude Ionosphere and Spatiotemporal Dynamics of Auroral Precipitations // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2024. — Vol. 88, no. 3. — P. 394–399. — DOI: [10.1134/S1062873823705573](https://doi.org/10.1134/S1062873823705573).
- Milan S. E., Evans T. A., Hubert B. Average auroral configuration parameterized by geomagnetic activity and solar wind conditions // Annales Geophysicae. — 2010. — Vol. 28, no. 4. — P. 1003–1012. — DOI: [10.5194/angeo-28-1003-2010](https://doi.org/10.5194/angeo-28-1003-2010).
- Newell P. T., Liou K., Zhang Y., et al. OVATION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels // Space Weather. — 2014. — Vol. 12, no. 6. — P. 368–379. — DOI: [10.1002/2014SW001056](https://doi.org/10.1002/2014SW001056).
- Oguti T. Similarity between global auroral deformations in DAPP photographs and small scale deformations observed by a TV camera // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. — 1975. — Vol. 37, no. 11. — P. 1413–1418. — DOI: [10.1016/0021-9169\(75\)90070-7](https://doi.org/10.1016/0021-9169(75)90070-7).
- Vorobjev V. G., Yagodkina O. I., Katkalov Yu. V. Auroral Precipitation Model and its applications to ionospheric and magnetospheric studies // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2013. — Vol. 102. — P. 157–171. — DOI: [10.1016/j.jastp.2013.05.007](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.007).

FRACTAL CHARACTERISTICS OF THE AURORAL OVAL STRUCTURE ACCORDING TO THE ALL-SKY CAMERA DATA IN APATITY FOR 2013–2020

B. V. Kozelov** 

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

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

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.

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

Citation: Kozelov, B. V. (2025), Fractal Characteristics of the Auroral Oval Structure According to the All-Sky Camera Data in Apatity for 2013–2020, *Russian Journal of Earth Sciences*, 25, ES3004, <https://doi.org/10.2205/2025ES000989>, EDN: EIOXXJ

Received: 30 September 2024

Accepted: 15 January 2025

Published: 7 April 2025



© 2025. The Authors.

References

- Abry P., Flandrin P., Taqqu M. S., et al. Wavelets for the Analysis, Estimation, and Synthesis of Scaling Data // Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation. — Wiley, 2000. — P. 39–88. — DOI: [10.1002/047120644x.ch2](https://doi.org/10.1002/047120644x.ch2).
- Akasofu S.-I. Polar and Magnetospheric Substorms. — Springer Netherlands, 1968. — DOI: [10.1007/978-94-010-3461-6](https://doi.org/10.1007/978-94-010-3461-6).
- Chang T. Self-organized criticality, multi-fractal spectra, sporadic localized reconnections and intermittent turbulence in the magnetotail // Physics of Plasmas. — 1999. — Vol. 6, no. 11. — P. 4137–4145. — DOI: [10.1063/1.873678](https://doi.org/10.1063/1.873678).
- Chernyshov A. A., Kozelov B. V., Mogilevsky M. M. Study of auroral ionosphere using percolation theory and fractal geometry // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2017. — Vol. 161. — P. 127–133. — DOI: [10.1016/j.jastp.2017.06.013](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.06.013).
- Chernyshov A. A., Mogilevsky M. M., Kozelov B. V. Use of fractal approach to investigate ionospheric conductivity in the auroral zone // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2013. — Vol. 118, no. 7. — P. 4108–4118. — DOI: [10.1002/jgra.50321](https://doi.org/10.1002/jgra.50321).
- Feldstein Y. I., Starkov G. V. Dynamics of auroral belt and polar geomagnetic disturbances // Planetary and Space Science. — 1967. — Vol. 15, no. 2. — P. 209–229. — DOI: [10.1016/0032-0633\(67\)90190-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(67)90190-0).
- Golovchanskaya I. V., Kozelov B. V. The range of Alfvénic turbulence scales in the topside auroral ionosphere // Cosmic Research. — 2016. — Vol. 54, no. 1. — P. 47–51. — DOI: [10.1134/s0010952516010093](https://doi.org/10.1134/s0010952516010093).
- Hardy D. A., Gussenhoven M. S., Holeman E. A statistical model of auroral electron precipitation // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 1985. — Vol. 90, A5. — P. 4229–4248. — DOI: [10.1029/ja090ia05p04229](https://doi.org/10.1029/ja090ia05p04229).
- Hargreaves J. K. The Upper Atmosphere and Solar-Terrestrial Relations: An introduction to the aerospace environment. — Leningrad : Gidrometeoizdat, 1982. — (In Russian).
- Kozelov B. V. Fractal approach to description of the auroral structure // Annales Geophysicae. — 2003. — Vol. 21, no. 9. — P. 2011–2023. — DOI: [10.5194/angeo-21-2011-2003](https://doi.org/10.5194/angeo-21-2011-2003).

- Kozelov B. V., Golovchanskaya I. V. Derivation of aurora scaling parameters from ground-based imaging observations: Numerical tests // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2010. — Vol. 115, A2. — DOI: [10.1029/2009ja014484](https://doi.org/10.1029/2009ja014484).
- Kozelov B. V., Pilgaev S. V., Borovkov L. P., et al. Multi-scale auroral observations in Apatity: winter 2010-2011 // *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*. — 2012. — Vol. 1, no. 1. — P. 1–6. — DOI: [10.5194/gi-1-1-2012](https://doi.org/10.5194/gi-1-1-2012).
- Kozelov B. V., Roldugin A. V. Fractal characteristics of the auroral oval structure based on experimental data // *The 47th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena». Abstracts*. — Apatity : Polar Geophysical Institute, 2024. — P. 30. — (In Russian).
- 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. — P. 353. — DOI: [10.3390/universe9080353](https://doi.org/10.3390/universe9080353).
- Kozelov B. V., Uritsky V. M., Klimas A. J. Power law probability distributions of multiscale auroral dynamics from ground-based TV observations // *Geophysical Research Letters*. — 2004. — Vol. 31, no. 20. — DOI: [10.1029/2004GL020962](https://doi.org/10.1029/2004GL020962).
- Kozelov B. V., Vorobjev V. G., Titova E. E., et al. Diagnostics of the High-Latitude Ionosphere and Spatiotemporal Dynamics of Auroral Precipitations // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. — 2024. — Vol. 88, no. 3. — P. 394–399. — DOI: [10.1134/S1062873823705573](https://doi.org/10.1134/S1062873823705573).
- Milan S. E., Evans T. A., Hubert B. Average auroral configuration parameterized by geomagnetic activity and solar wind conditions // *Annales Geophysicae*. — 2010. — Vol. 28, no. 4. — P. 1003–1012. — DOI: [10.5194/angeo-28-1003-2010](https://doi.org/10.5194/angeo-28-1003-2010).
- Newell P. T., Liou K., Zhang Y., et al. OVATION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels // *Space Weather*. — 2014. — Vol. 12, no. 6. — P. 368–379. — DOI: [10.1002/2014SW001056](https://doi.org/10.1002/2014SW001056).
- Oguti T. Similarity between global auroral deformations in DAPP photographs and small scale deformations observed by a TV camera // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. — 1975. — Vol. 37, no. 11. — P. 1413–1418. — DOI: [10.1016/0021-9169\(75\)90070-7](https://doi.org/10.1016/0021-9169(75)90070-7).
- Suvorova Z. V., Mingalev I. V., Kozelov B. V. The Effect of Spatial Dimensions of Electron Precipitation Regions on the Passage of HF Signals // *Proceedings of the 20th International Conference «Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space»*. — Space Research Institute Russian Academy of Sciences, 2022. — DOI: [10.21046/20DZZconf-2022a](https://doi.org/10.21046/20DZZconf-2022a). — (In Russian).
- Vorobjev V. G., Yagodkina O. I., Katkalov Yu. V. Auroral Precipitation Model and its applications to ionospheric and magnetospheric studies // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2013. — Vol. 102. — P. 157–171. — DOI: [10.1016/j.jastp.2013.05.007](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.007).