

УДК 533.9.08, 533.95

ФРАКТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

© 2024 г. Б. В. Козелов

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный
геофизический институт», Апатиты, Россия*

E-mail: boris.kozelov@gmail.com

Поступила в редакцию
После доработки
Принята к публикации

В работе приводится описание пространственной структуры полярных сияний фрактальной размерностью и ее анизотропией. Вариабельность структур характеризуется наклоном спектра вариации анизотропии во времени. Приведена статистика этих характеристик по данным камеры Полярного геофизического института в г. Апатиты за 2013-2015 годы и привязка по положению внутри аврорального овала и значениям геомагнитного поля в обл. Ловозеро.

Ключевые слова: аврора, суббурия, высыпания частиц, высокоширотная ионосфера, скейлинг, анизотропия

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование авроральных высыпаний является необходимым элементом глобальных моделей верхней атмосферы и ионосферы Земли высоких широт, имеющей многие теоретические и практические применения. Однако существующие на данный момент модели таких высыпаний (модели аврорального) овала [1-6] описывают только границы зоны высыпаний, средний поток и среднюю энергию авроральных частиц, в лучшем случае с разбиением на морфологические типы (диффузные, дискретные и т. п.). Структуры внутри этих границ модели не описывают.

В данной работе ставилась задача получить статистические данные о характеристиках, которые описывают пространственную и временную структуру свечения атмосферы в области авроральных высыпаний. Для описания структуры аврорального свечения используется подход, ранее использованный в [7, 8] и основанный на оценке фрактальной размерности методом лог-скейл скалограмм [9]. Анализировались статистические особенности характеристик структуры аврорального свечения от положения внутри аврорального овала, индексов геомагнитной возмущенности и значений геомагнитного поля в обл. Ловозеро за 2013-2015 гг.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Использовались изображения, полученные камерой всего неба в Апатитах ($67^{\circ}34'N$, $33^{\circ}16'E$) в сезоны 2013-2015 гг. Описание камеры всего неба, входящей в систему авроральных камер MAIN, приведено в работе [10]. Были выбраны события, на которых присутствовали полярные сияния выше 10° над горизонтом и не было заметных облаков, Луны и сильной неоднородной засветки от города.

Методика обработки кадров всего неба для получения пространственных индексов флуктуаций свечения описана в [8], где подробно рассмотрен случай развития типичной авроральной суббури 13 сентября 2013 г. Если 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 «склеваются» в единый массив и для данного массива вычисляется его дискретное вейвлет-разложение. Использовались вейвлеты Добеши 5 порядка.
- 3) По зависимости логарифма дисперсии детализирующих коэффициентов от логарифма масштаба определяется спектральный индекс a - наклон в диапазоне масштабов 1.5-50 км.
- 4) Процедура повторяется для другой ориентации 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 флуктуации 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. По зависимости вариаций изотропии $\min(a)/\max(a)$ от времени в течении 5-минутных интервалов находился временной фрактальный индекс C . Индекс C вычислялся этим же методом лог-скейл скалограмм из оценки наклона спектра с использованием вейвлетов Добеши 3 порядка. Порядок вейвлета в данном случае взят меньше, чтобы при построении спектра не сглаживалась информация о пульсациях в диапазоне 2-3 сек, которые часто присутствуют в полярных сияниях.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Распределения значений полученных параметров для 5-минутных интервалов приведены на рис.1а-в. Для для пространственных флуктуаций свечения приведены распределения минимального и максимальное значения значений спектрального индекса. Эти распределения и распределение для временного индекса C имеют плавный вид с одним максимумом. Распределение для индекса B имеет два максимума. В соответствии с этим, можно выделить

две группы — анизотропную $B < 0.36$ и более изотропную $B > 0.36$. Отметим, что это анизотропия не просто линейного размера пространственных флуктуаций свечения, а спектрального индекса, т. е. оценки фрактального индекса пространственных флуктуаций свечения в разных направлениях.

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:

- 1) взрывная фаза — 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);
- 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, т.е. бухто-образная яркая форма на полюсной (северной) границе мультиплетной (состоящей из множества узких дуг) полосы;
- 5) другие, в основном, более сложные и комбинированные случаи, которые нельзя отнести однозначно к предыдущим.

Средние значения индексов со значениями стандартных отклонений для выделенных групп приведены в таблице 1. На рис.2 символы, относящиеся к взрывным фазам и омега-формам, явно локализируются в среднем при больших

значениях индекса А и С, и при индексе В, в основном, из группы $B > 0.36$. Дуги и полосы на севере кадра — в основном при значениях индексов $A < 2.0$, $B < 0.36$, $C < 0.5$. Пульсирующие формы - при значениях индексов А и С меньше, чем для взрывных фаз, по индексу В нет очевидной локализации.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ СОБЫТИЙ ПО ДРУГИМ ДАННЫМ

Полученные значения спектральных индексов анализировались с целью выявить возможные зависимости от индексов AL, AU, AE, SYM-H, местного магнитного времени MLT, а также от компонент D, H, Z геомагнитного поля, измеренных в ближайшей к г. Апатиты обсерватории ПГИ «Ловозеро» (пробелы в данных пополнены данными близкой обсерватории ПГИ «Лопарская», что не влияет на дальнейшие результаты). Определенных зависимостей от индексов AL, AU, AE, SYM-H на данном наборе данных выявить не удалось, что не удивительно, т. к. это глобальные индексы, а спектральные индексы получены по локальным наблюдениям из одной точки. Зависимости локализации выделенных выше групп событий от местного магнитного времени MLT, а также от компонент D, H геомагнитного поля, показаны на рис.3, что соответствует ожидаемой морфологии основных форм в полярных сияниях [1]:

- 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 +100 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 (~21 MLT) до позднего утра (~8 MLT);
- есть обратная пропорциональность между Н и D компонентами, при которых наблюдаются взрывные фазы в сияниях, омега-формы и пульсирующие сияния;
- взрывные фазы наблюдались при более низких значениях Н-компоненты локального магнитного поля, чем в среднем для остальных событий.

От Z-компоненты магнитного поля в обс. «Ловозеро» распределения всех трех индексов симметричны относительно нуля и не имеют каких-либо явных особенностей, поэтому здесь не приведены.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Подобие авроральных структур на различных масштабах отмечалось еще [11]. Описание наблюдаемой структуры изолиний (контуров) полярных сияний с помощью фрактальной геометрии предлагалось в [12]. Теоретическое обоснование образования фрактальных, т.е. статистически самоподобных, структур в переходных процессах в космической плазме дает представление о состоянии самоорганизованной критичности [13, 14]. Фрактальная структура авроральных высыпаний, вероятно, связана с поддержанием на пороге

протекания (перколяции) ионосферно-магнитосферной токовой системы [15, 16].

В данной работе приведены результаты систематического применения 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 2013-2015 годы по данным наземной камеры всего неба в г. Апатиты.

Включенные в статистику события были отобраны по строгим критериям отсутствия Луны и заметной облачности. 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 [17]. 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.

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 изотропии B соответствуют фазам расширения и брейкапам в полярных сияниях, когда

наблюдается сильное расширение диапазона флуктуаций интенсивности свечения внутри области распространяющегося к западу изгиба (WTS). Такие события наблюдаются вечером, обычно до полуночи по MLT. После полуночи похожие по значениям фрактальных индексов события соответствуют омега-структурам. Меньшие значения фрактального индекса A , а также меньше индекс изотропии B наблюдаются при однородных или слабо возмущенных дугах на северной части неба, в основном, вечером.

Сравнительно неожиданным оказалась в среднем линейная зависимость значения индекса временных флуктуаций C от спектрального индекса A , см. рис.2-б: $\langle C \rangle = \langle A \rangle - 1$. Другими словами, спектральный индекс вариации во времени индекса изотропии 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 , $SUM-N$ 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 взрывные фазы в сияниях, омега-формы и

пульсирующие сияния, см. рис.3-в. При отрицательных значениях H компоненты сияния наблюдаются и при положительных значениях D компоненты.

Результаты данного статистического анализа будут использованы для построения эмпирической модели структуры полярных сияний внутри аврорального овала. Прохождение радиоволн в среде с такой структурой отличается от однородно ионизированной [18]. Пример моделирования структуры полярного сияния при заданных значениях фрактального индекса был приведен в работе [19]. Дальнейшее продолжение данной работы предполагает расширение статистики за счет рассмотрения данных за другие сезоны и из других точек наблюдения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Дж. Х. Кинг и Н. Папаташвилли (J.H. King, N. Papatashvilli) (AdnetSystems, NASA GSFC) за данные базы OMNI.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа поддержана грантом РФФИ 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».

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

	Индекс А	Индекс В	Индекс С
Все точки	1.88 ± 0.44	0.35 ± 0.17	0.74 ± 0.51
Взрывная фаза	2.49 ± 0.44	0.51 ± 0.14	1.52 ± 0.36
Дуги на севере	1.63 ± 0.38	0.19 ± 0.07	0.34 ± 0.36
Пульсирующие	1.82 ± 0.31	0.38 ± 0.17	0.74 ± 0.37
Омега-структуры	2.57 ± 0.33	0.48 ± 0.14	1.34 ± 0.5
Остальные	2.03 ± 0.48	0.38 ± 0.15	0.88 ± 0.54

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Akasofu S.-I.* Polar and magnetospheric substorm // Dordrecht. Holland. 1968.

Перевод:

Акасофу С.-И. Полярные и магнитосферные суббури // Москва: Мир. 1971.

2. *Feldstein Ya., Starkov S.* // Planet. Space Sci. 1967. V.15. P. 209.

3. *Hardy D.A., Gussenhoven M.S., Holeman E.* // J. Geophys. Res. 1985. V.90.

P.4229.

4. *Milan S. E., Evans T. A., Hubert, B.* // Ann. Geophys. 2010. V.28, P.1003.

5. *Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Yu.V.* // J. Atm. S.-Terr. Phys. 2013. V.102.

P.157–171.

6. *Newell P.T. at al.* // Space Weather. 2014. V.12. №6. С.368.

7. *Головчанская И. В., Козелов Б. В.* // Космические исследования. 2016, Т.54,

№1, С. 52.

Перевод: *Golovchanskaya I.V., Kozelov B.V.* // *Cosmic Research*. 2016. V.54. No.1.

P.47.

8. *Козелов Б. В., Воробьев В. Г., Титова Е. Е., Попова Т. А.* // Известия РАН:

Серия физическая. 2024. V. 88. N. 3. P. ??

Перевод: *Kozelov B. V., Vorobjev V. G., Titova E. E., Popova T. A.* // Bulletin of the

Russian Academy of Sciences: Physics. 2024. V. 88. N. 3. P. 394.

9. *Abry P., Flandrin P., Taqqu M.S. et al.* Wavelets for the analysis, estimation and

synthesis of scaling data // in Self-Similar Network Traffic and Performance

Evaluation, edited by Park K. and Willinger W. 2000. Wiley-Interscience. Hoboken N.J. P. 39–88.

10. *Kozelov B.V., Pilgaev S.V., Borovkov L.P., Yurov V.E.* // Geosci. Instrum. Method. Data Syst. 2012. V.1. P.1.

11. *Oguti T.* // J. Atmosph. Terr. Phys. 1975. V.37. N.11. P.1413.

12. *Kozelov B. V.* // Ann. Geophys., 2003. V.21, P. 2011.

13. *Chang T.* // Phys. Plasmas. 1999, V.6, P.4137.

14. *Kozelov B. V., Uritsky V. M., Klimas A. J.* // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31, L20804.

15. *Chernyshov A.A., Kozelov B.V., Mogilevsky M.M.* // J. Atmos. Solar-Terrest. Phys. 2017. V.161. P. 127.

16. *Chernyshov A.A., Mogilevsky M.M., Kozelov B.V.* // J. Geophys. Res. 2013. V. 118. No.7. P. 4108.

17. *Харгривс Дж.К.* Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи // Ленинград: Гидрометеоиздат. 1982. 351 с.

Перевод: Hargreaves J. K. The Upper Atmosphere and Solar-Terrestrial Relations // University of Lancaster. Lancaster. England.

18. *Суворова З.В., Мингалев И.В., Козелов Б.В.* Влияние пространственных размеров о бластей 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.

Перевод: Suvorova Z.V., Mingalev I.V., Kozelov B.V. The influence of the spatial dimensions of electron precipitation areas on the passage of HF signals // Proceedings of the 20th International Conference “Modern problems of remote sensing of the Earth from space”. Moscow: IKI RAS, 2022. P.393. DOI 10.21046/20DZZconf-2022.

19. *Kozelov B.V., Golovchanskaya I.V.* // J.Geophys. Res. 2010. V. 115, A02204.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис.1. Распределения значений спектральных индексов: a — для пространственных флуктуаций свечения, минимальное и максимальное значения (максимальное значение далее обозначено «индекс А»); b — для анизотропии пространственных флуктуаций свечения — отношение минимального к максимальному значению (далее обозначено «индекс В»); v — для временных флуктуаций анизотропии (далее обозначено «индекс С»).

Рис.2. Распределения индексов: a - В от А; b - С от А. Разными символами выделены некоторые морфологически различимые ситуации в поле зрения камеры (см. Текст).

Рис. 3. Локализация выделенных групп событий от местного магнитного времени MLT и от компонент геомагнитного поля, измеренных в обс. Ловозеро: a — в осях MLT и H; b - в осях MLT и D; v - в осях D и H.

РИСУНКИ

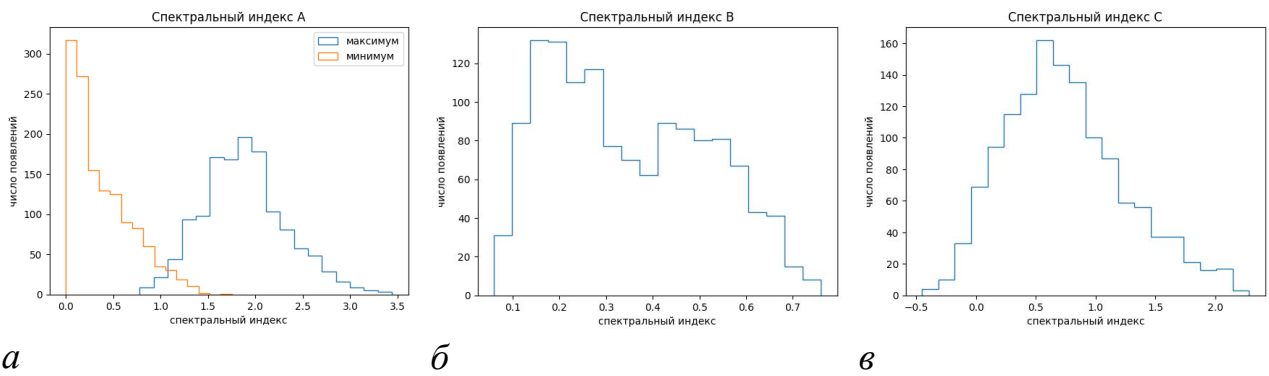


Рис.1.

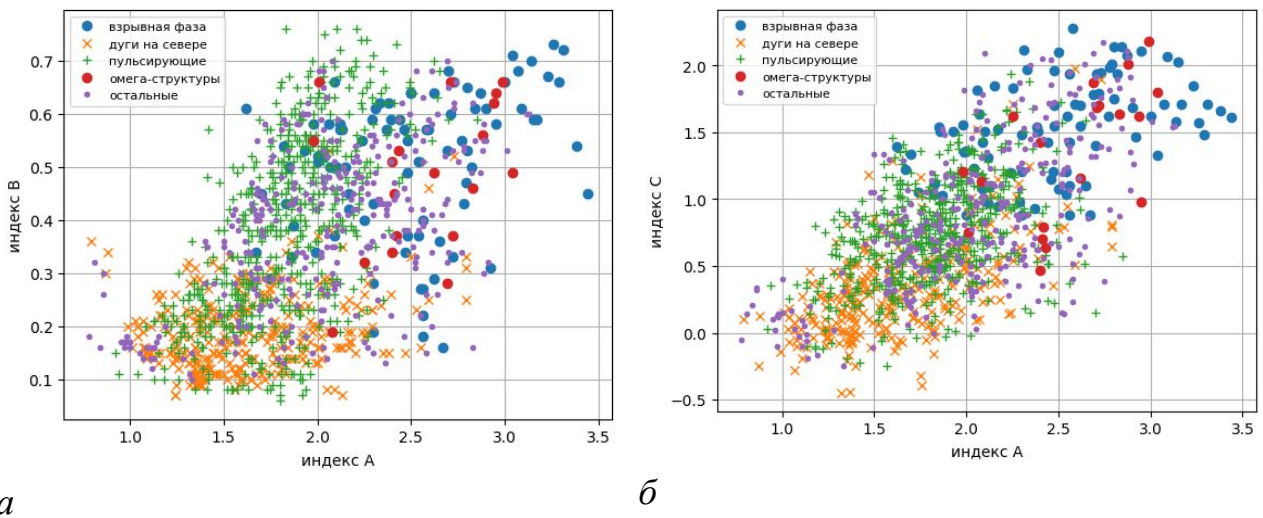
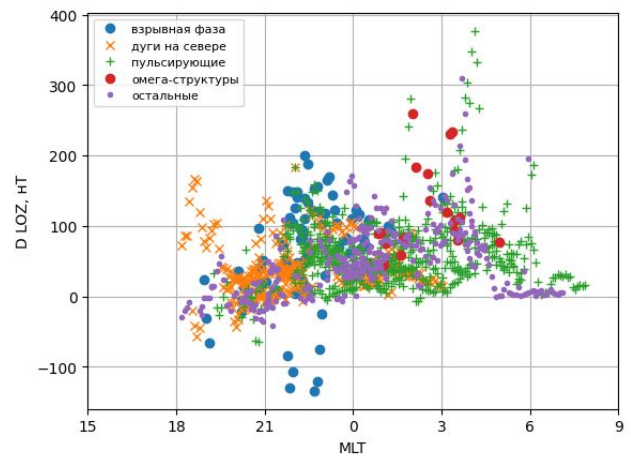
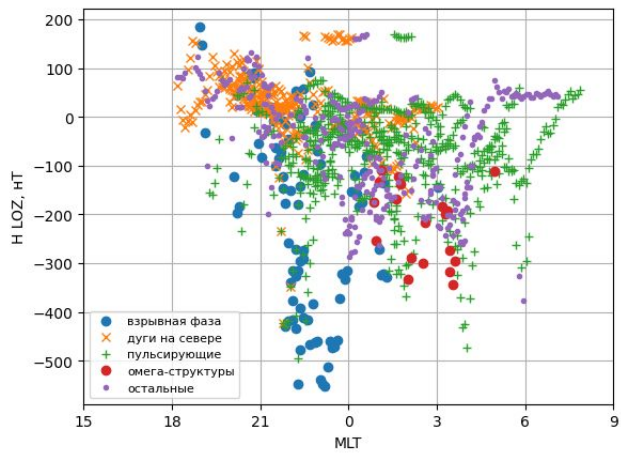


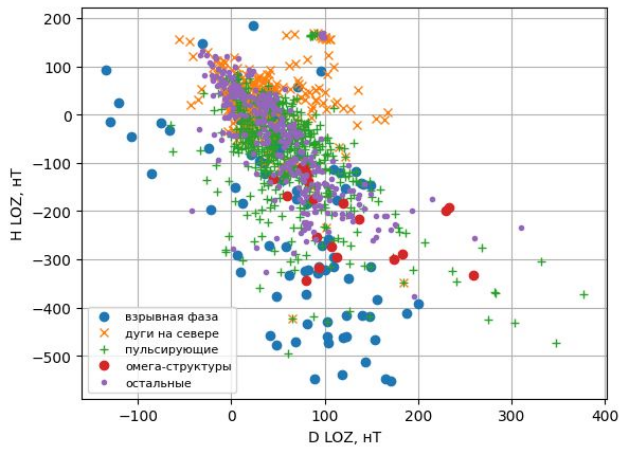
Рис.2.



a

б

Рис. 3.



в

**FRACTAL CHARACTERISTICS OF THE AURORAL OVAL STRUCTURE
BASED ON EXPERIMENTAL DATA**

© 2024 **B.V. Kozelov**

Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia

E-mail: boris.kozelov@gmail.com

The work provides a description of the structures of aurora by fractal dimension and its anisotropy. The variability of structures is characterized by the slope of the spectrum of anisotropy variation over time. Statistics of these characteristics are presented based on data from the ground camera of the Polar Geophysical Institute in Apatity for 2013-2015 and referenced by position inside the auroral oval and geomagnetic field values in the Lovozero observatory.

Key words: aurora, substorm, particle precipitation, high-latitude ionosphere, scaling, anisotropy