

Статистика фрактальных характеристик структуры аврорального овала по данным камеры всего неба в Апатитах за 2023-2020 гг.

Б. В. Козелов

Полярный геофизический институт

Апатиты, Мурманская область, Россия

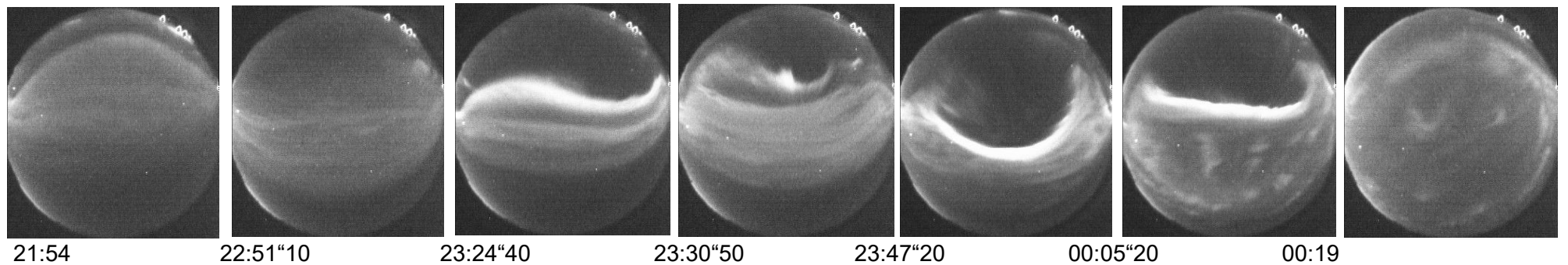
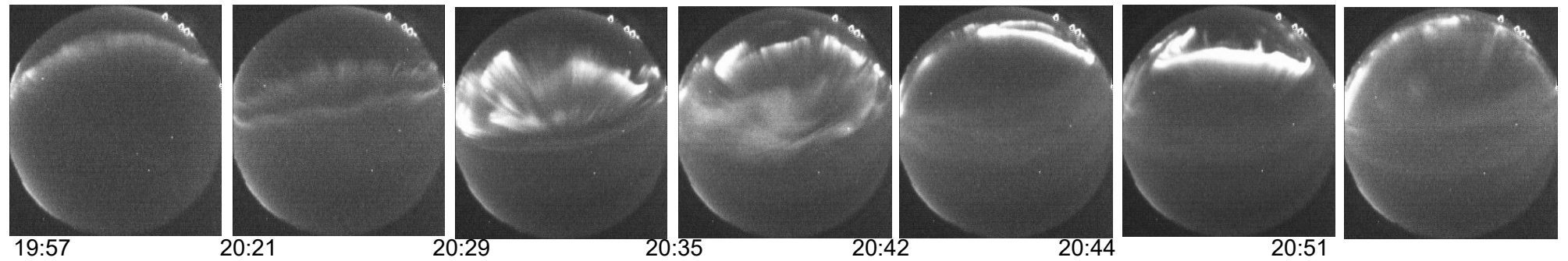
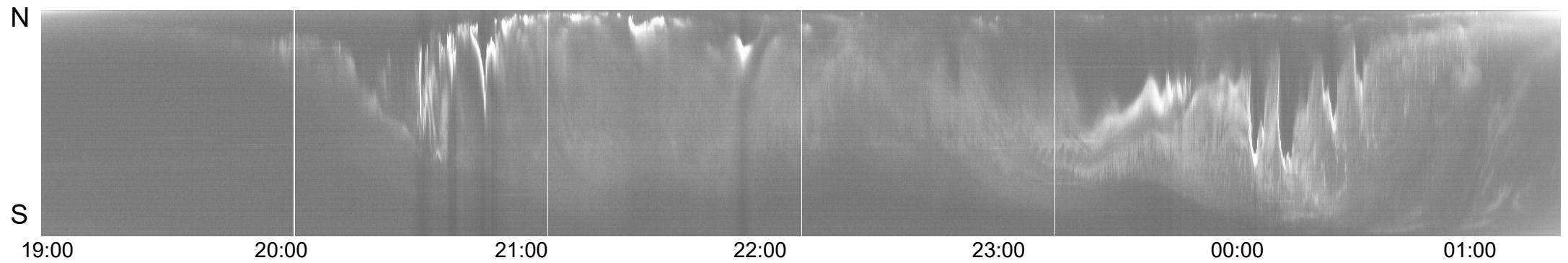
E-mail: boris.kozelov@gmail.com

Аннотация

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

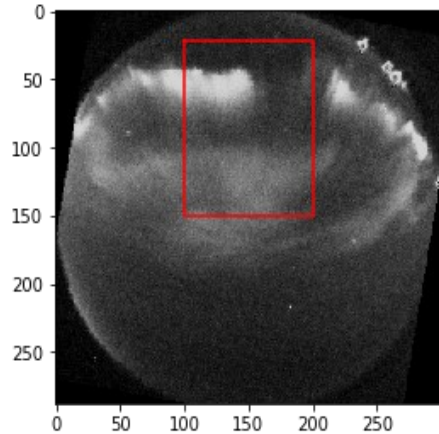
- Подобие авроральных структур на различных масштабах отмечалось еще в работе [Oguti, 1975]. Описание наблюдаемой структуры контуров изолиний полярных сияний с помощью фрактальной геометрии предлагалось в [Kozelov, 2003].
- Теоретическое обоснование образования фрактальных, т.е. статистически самоподобных, 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].
- **Благодарность.** 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».

Пример структуры полярных сияний на камере всего неба г.Апатиты ($67^{\circ}34''N$, $33^{\circ}16''E$):
пространственные и временные вариации интенсивности аврорального свечения.



Метод анализа пространственных неоднородностей

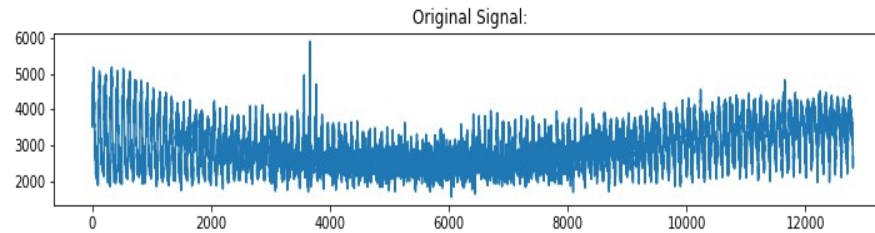
Маска для выделения области на изображении



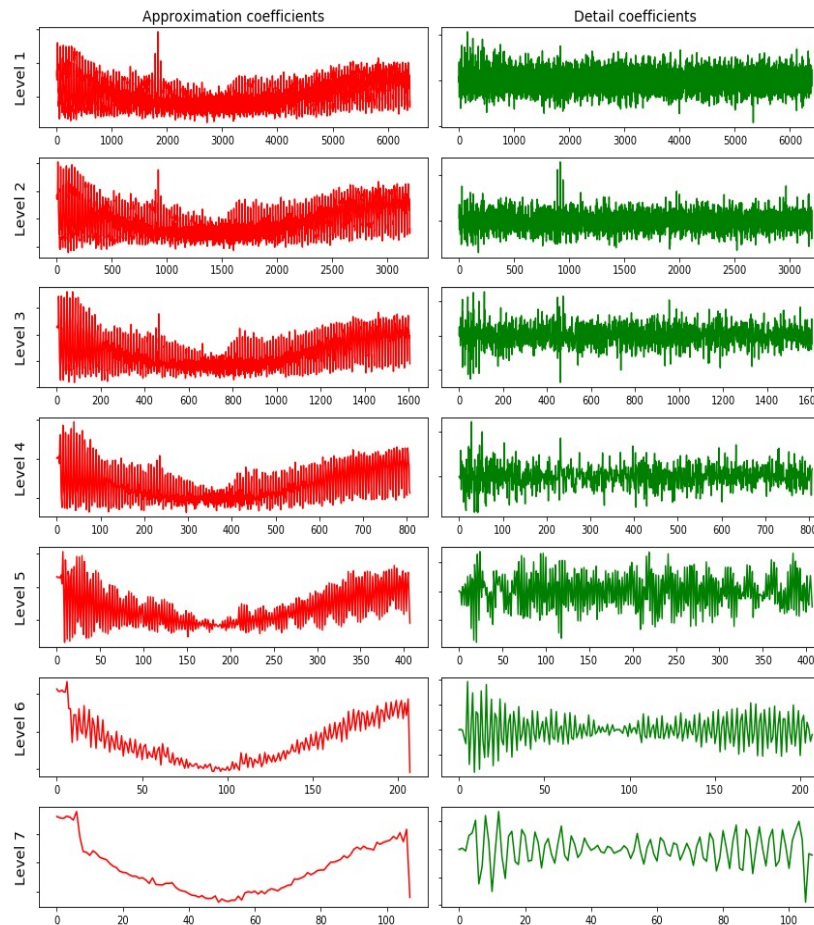
[Abry P., Flandrin P., Taqqu M.S. et al. Wavelets for the analysis, estimation and synthesis of scaling data // in Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation, edited by Park K. and Willinger W. 2000. Wiley-Interscience. Hoboken N.J. P. 39–88.]

[Головчанская И. В., Б. В. Козелов. Диапазон масштабов альфвеновской турбулентности в верхней ионосфере авроральной зоны // Космические исследования. 2016, 54, № 1, с. 52–57. DOI: 10.7868/S002342061601009X]

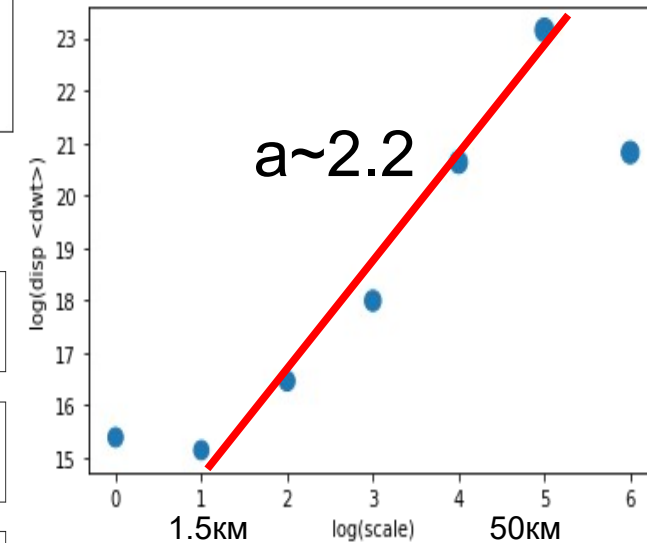
[B. V. Kozelov, V. G. Vorobjev, E. E. Titova, and T. A. Popova, Diagnostics of the High-Latitude Ionosphere and Spatiotemporal Dynamics of Auroral Precipitations // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2024, V. 88, No. 3, pp. 394–399.]



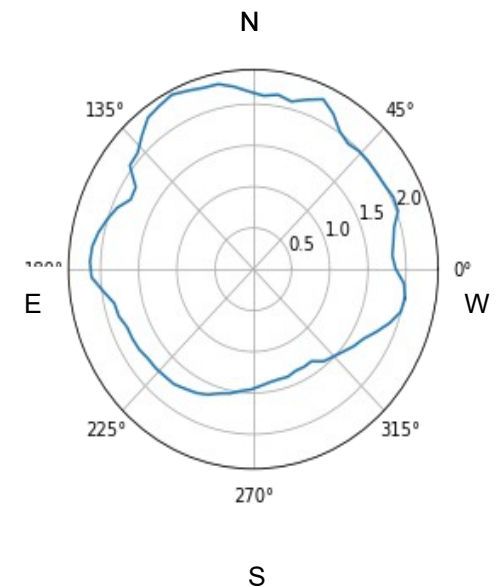
Дискретное вейвлет разложение, вейвлеты Добеши db5



Дисперсия детализирующих коэффициентов от масштаба



Спектральный индекс от направления



Метод анализа пространственных неоднородностей

В данной работе приведены результаты систематического применения методики описания структур полярных сияний фрактальной размерностью и ее анизотропией.

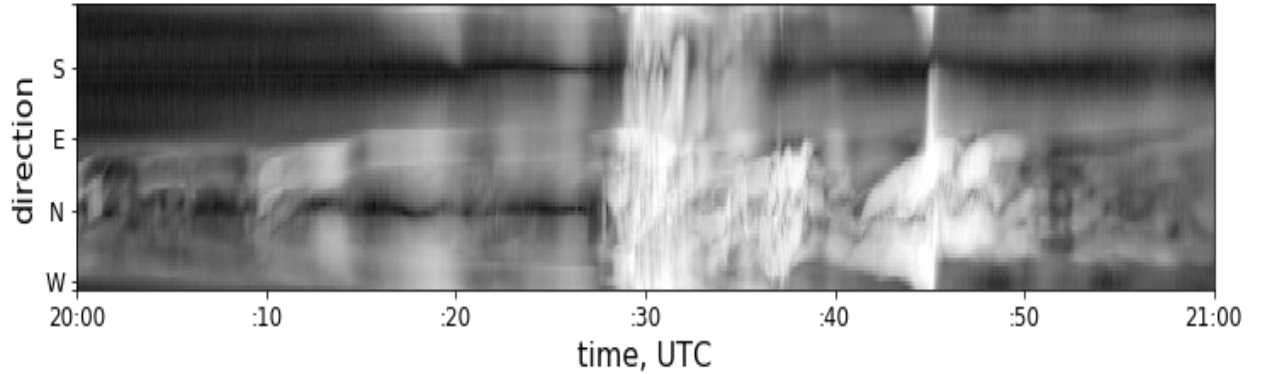
Вариабельность структур характеризуется наклоном спектра вариации анизотропии во времени.

Приведена статистика этих характеристик по 5-минутным интервалам за 2013-2020 годы по данным наземной камеры всего неба в г. Апатиты.

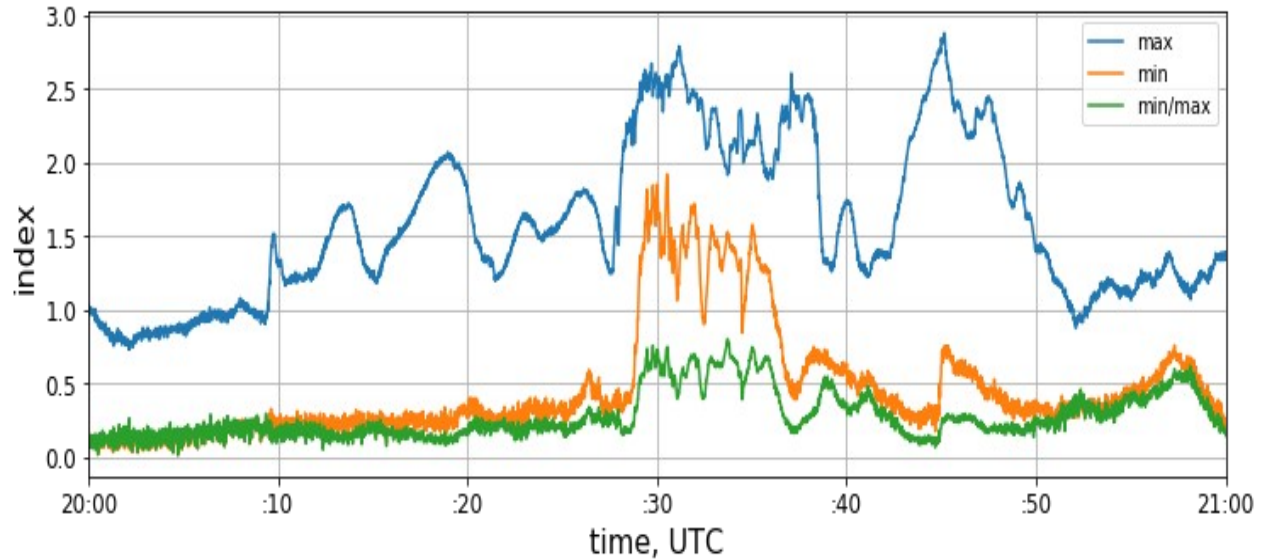
Применение при обработке изображений вейвлетов 3 и 5 порядков обеспечивает фильтрацию полиномиальных трендов для исключения систематических ошибок в оценки спектров флуктуаций, возможных при наличие слабых засветок неба.

Пример расчета для ASC 20:00-21:00 UT

Спектральный индекс от ориентации маски в течении времени. Показывает в какой части неба наблюдаются флуктуации свечения и насколько флуктуации изотропны.



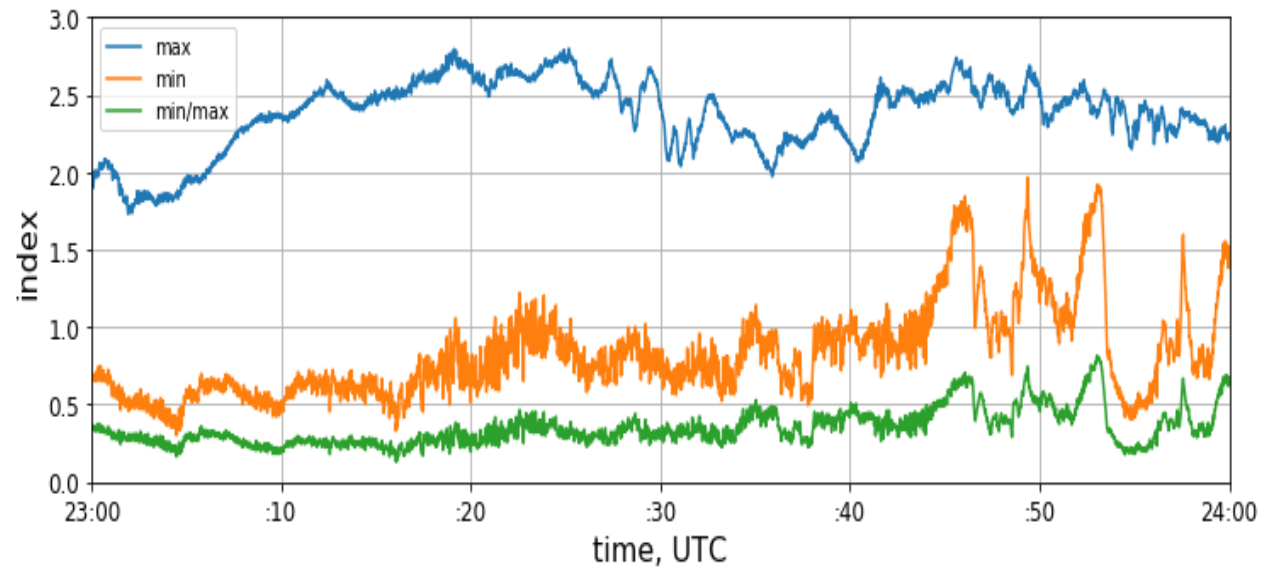
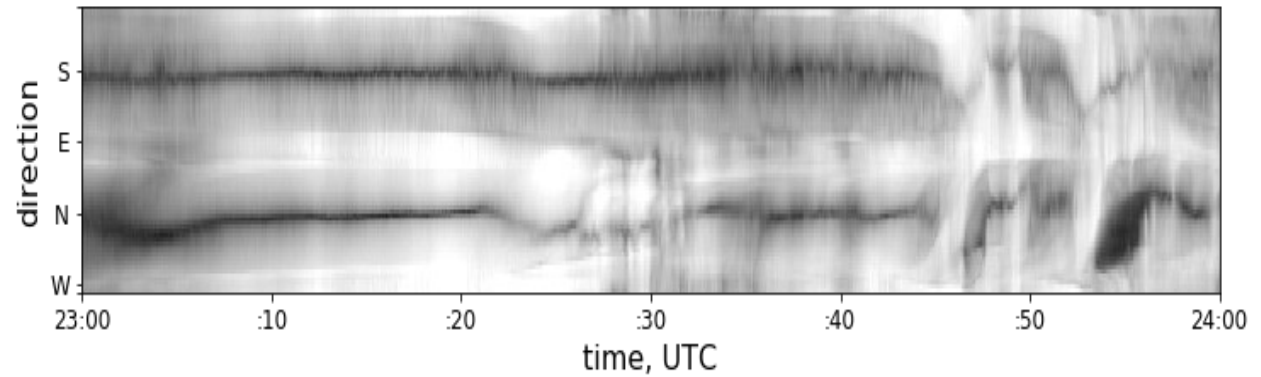
Динамика максимального (max), минимального индекса (min) и параметра изотропности (min/max).



- 1 - одиночная дуга,
- 2 - спокойная дуга и возмущенная дуга,
- 3 - брейкап - расширение к полюсу
- 4 - активизация на полюсной дуге
- 5 - пульсирующие сияния

1-----2-----3-----5-----4-----5-----

Пример расчета для ASC 23:00-24:00 UT



- 1 - пульсирующие сияния
- 2 - активизация на полюсной дуге
- 3 - омега-структура

1-3-----2-1-----3-3-1---

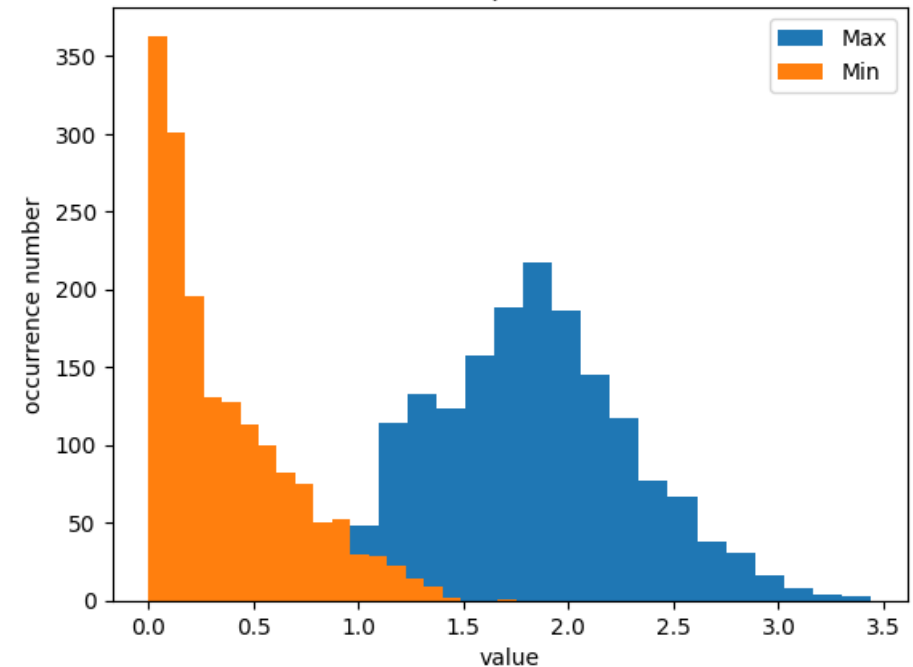
Статистика по 2013-2015 гг.

Фрактальные индексы:

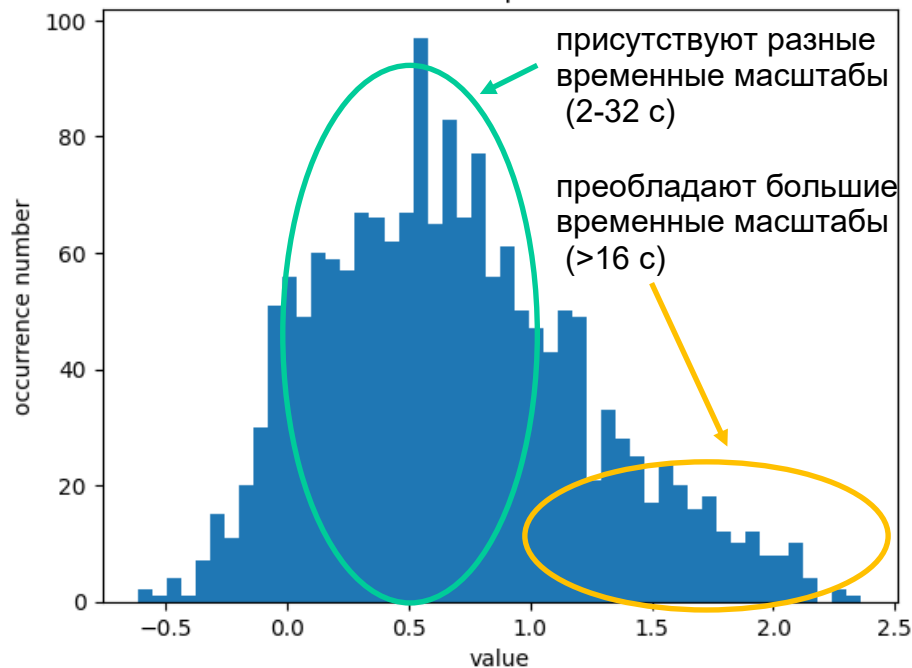
По каждому кадру из зависимости спектрального индекса от направления находим максимальный (max) – индекс А, минимальный индекса (min) и параметр изотропности (min/max) - индекс В.

Из зависимости параметра изотропности за 5 минут находим временной фрактальный индекс (используем db3) - индекс С.

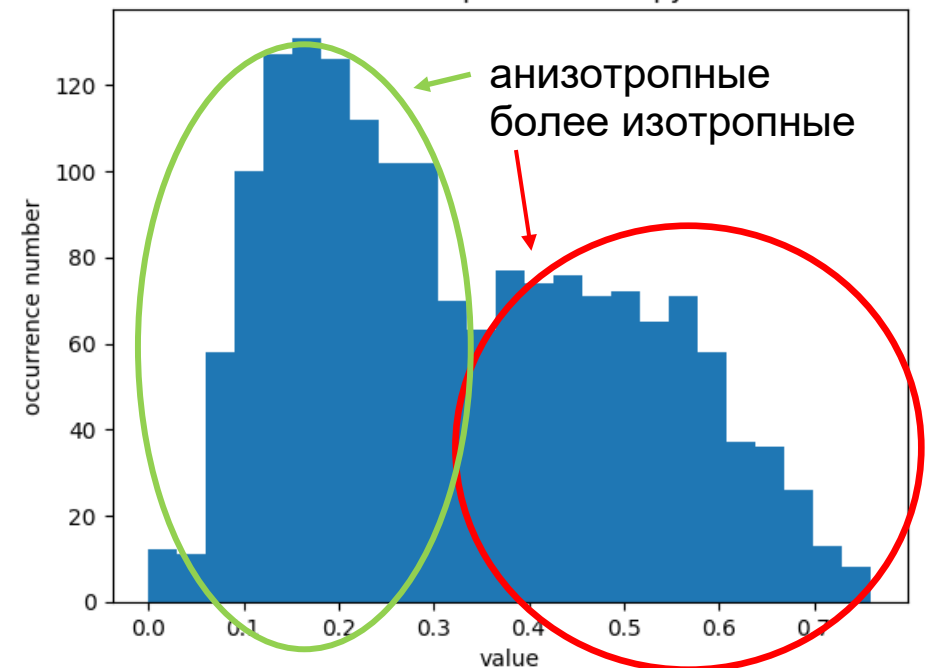
Distribution of spatial fractal index



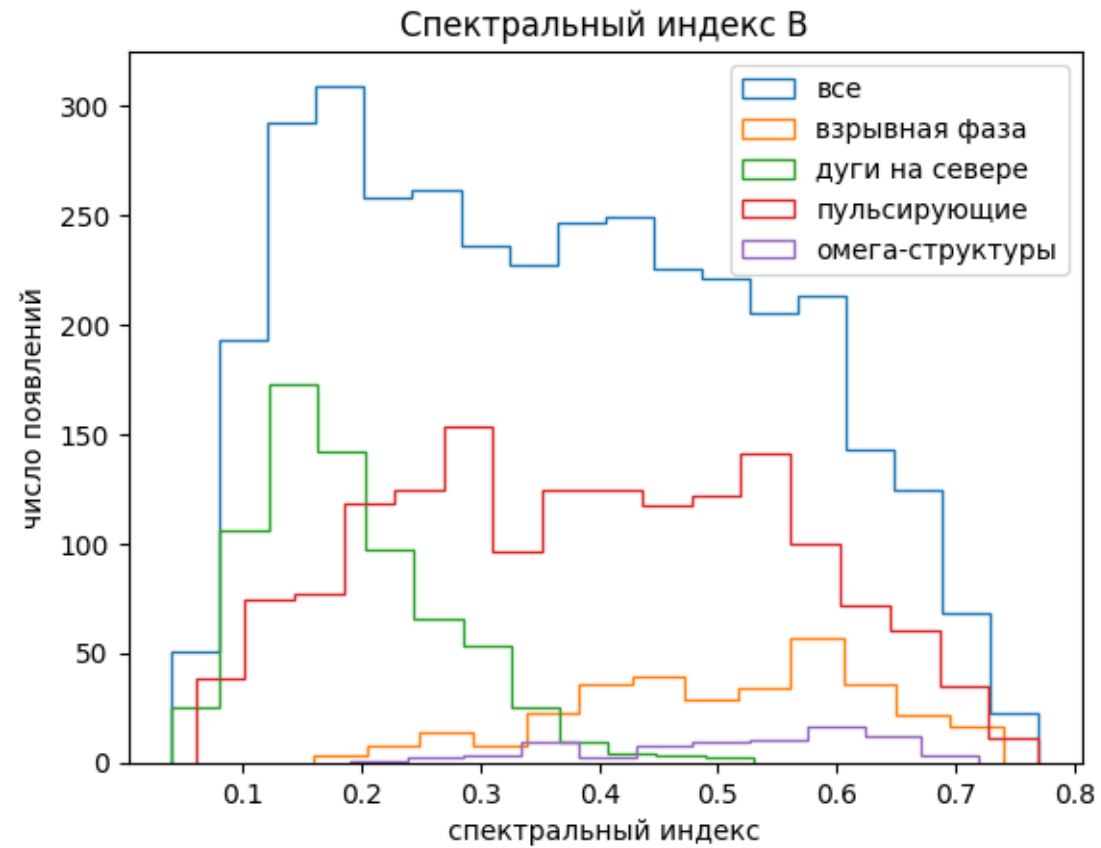
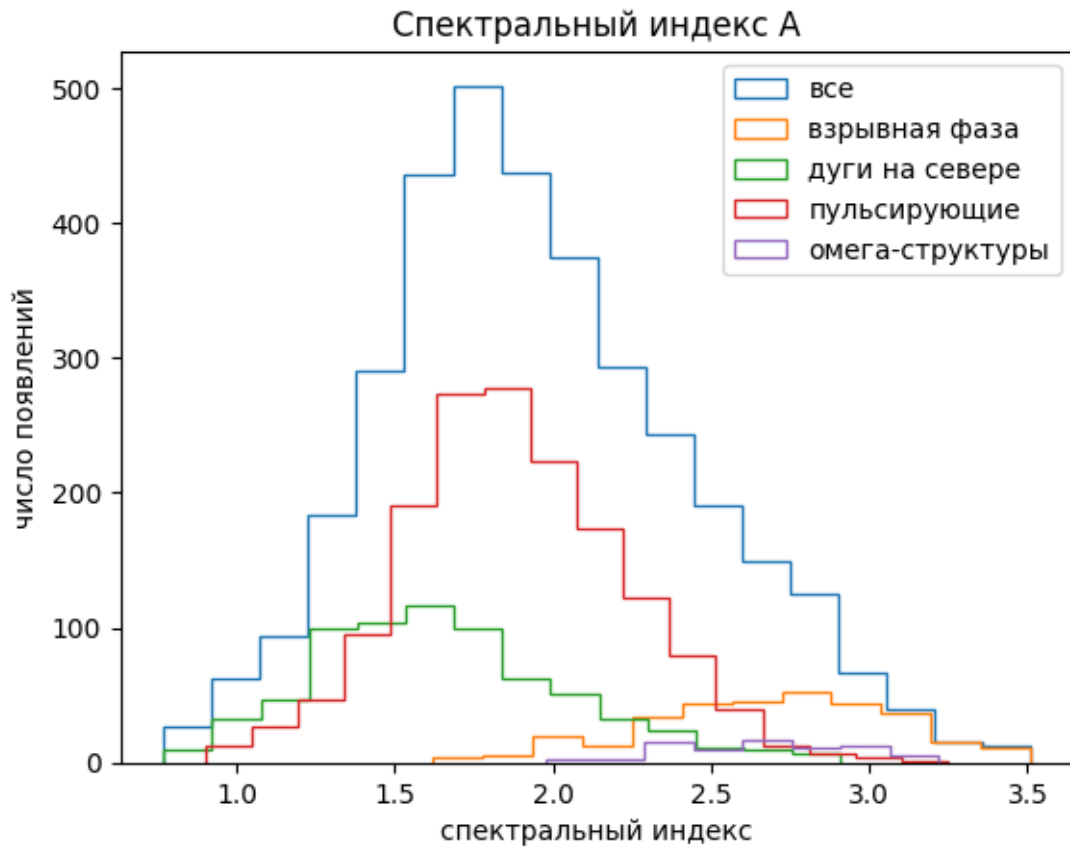
Distribution of temporal fractal index



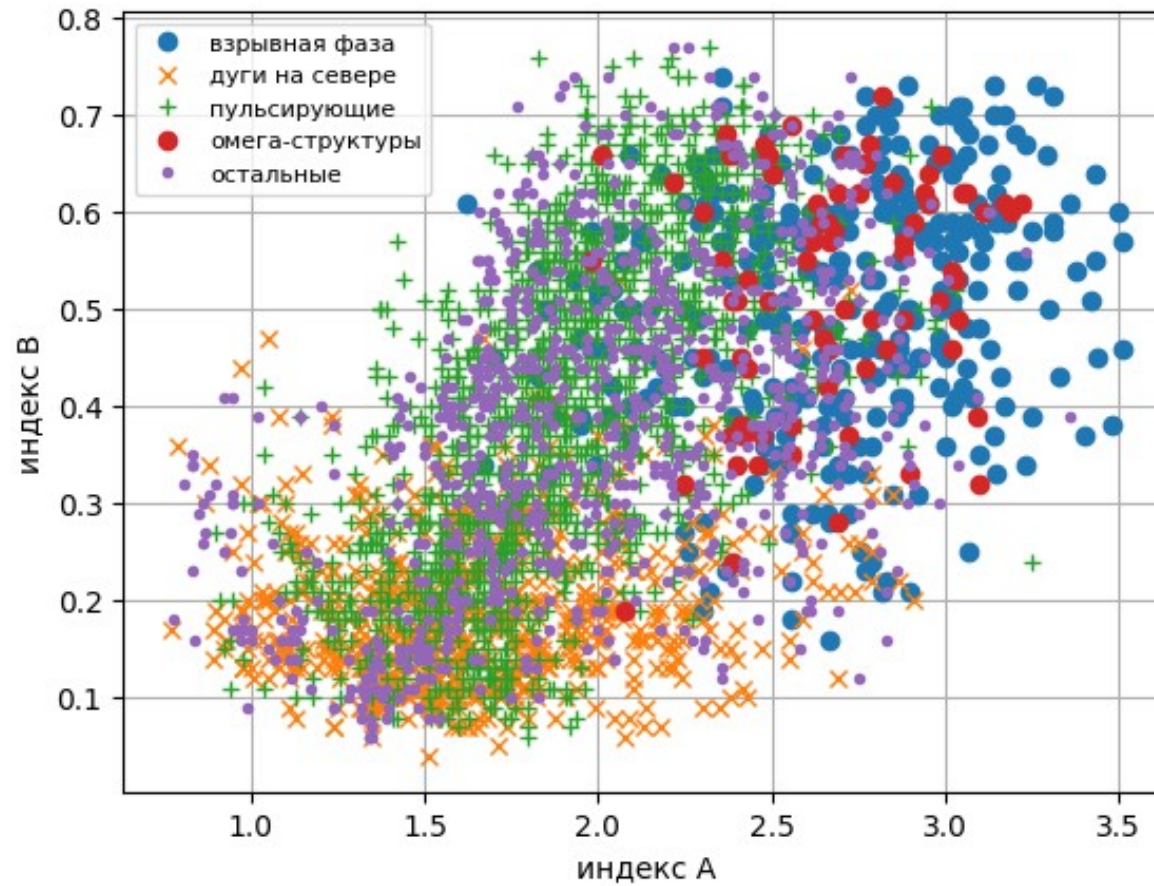
Distribution of spatial anisotropy index



Статистика 2013 - 2020 гг.

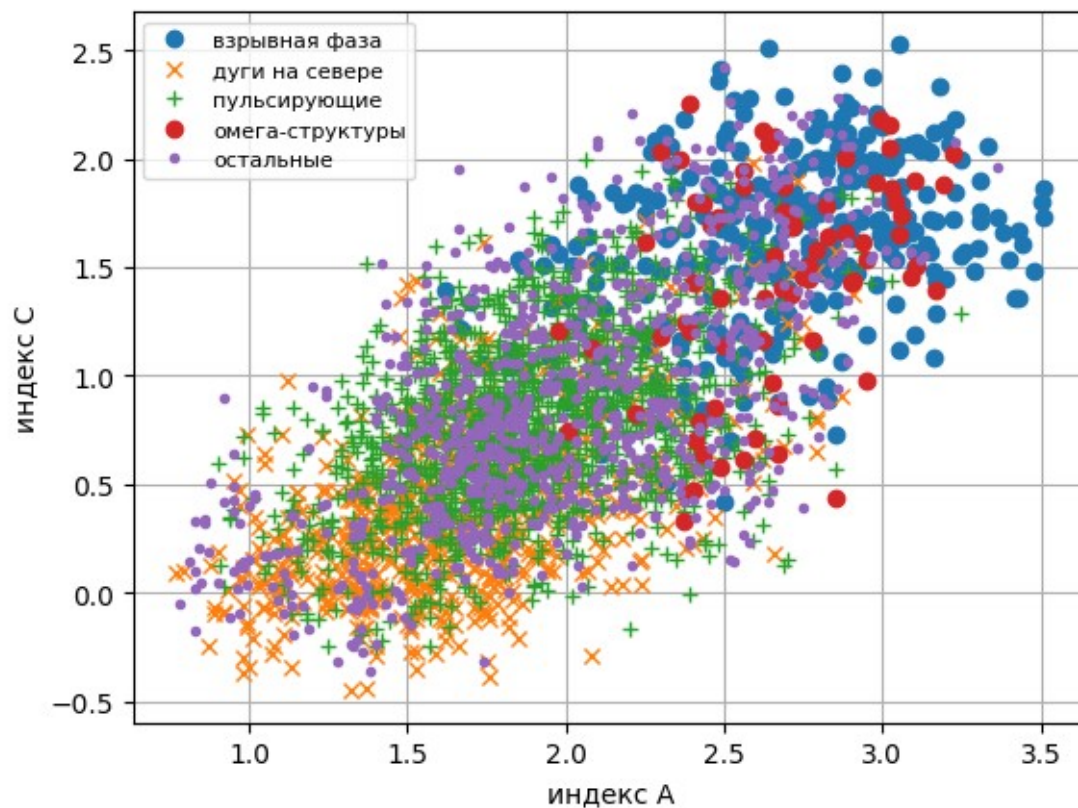
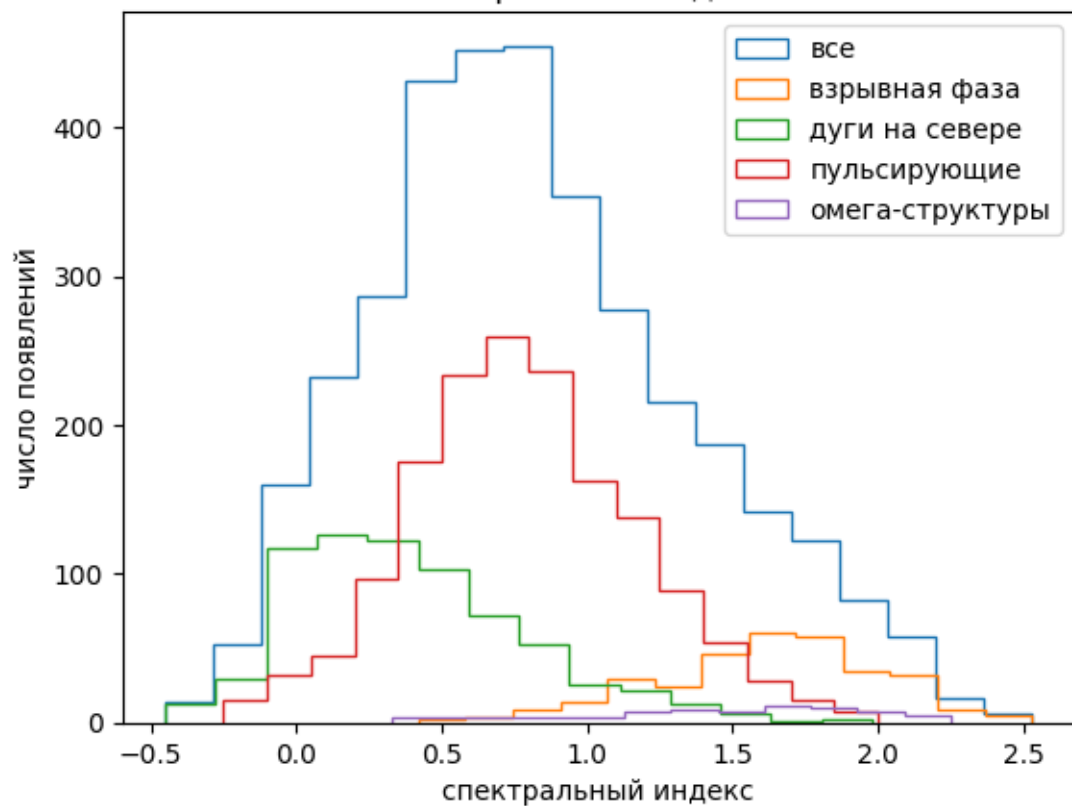


Статистика 2013 - 2020 гг.



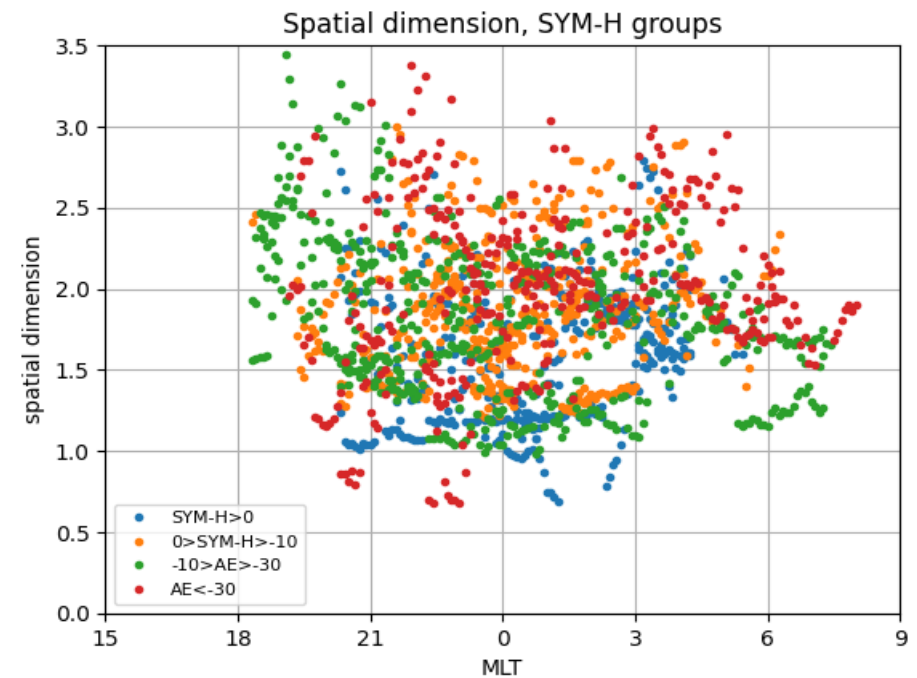
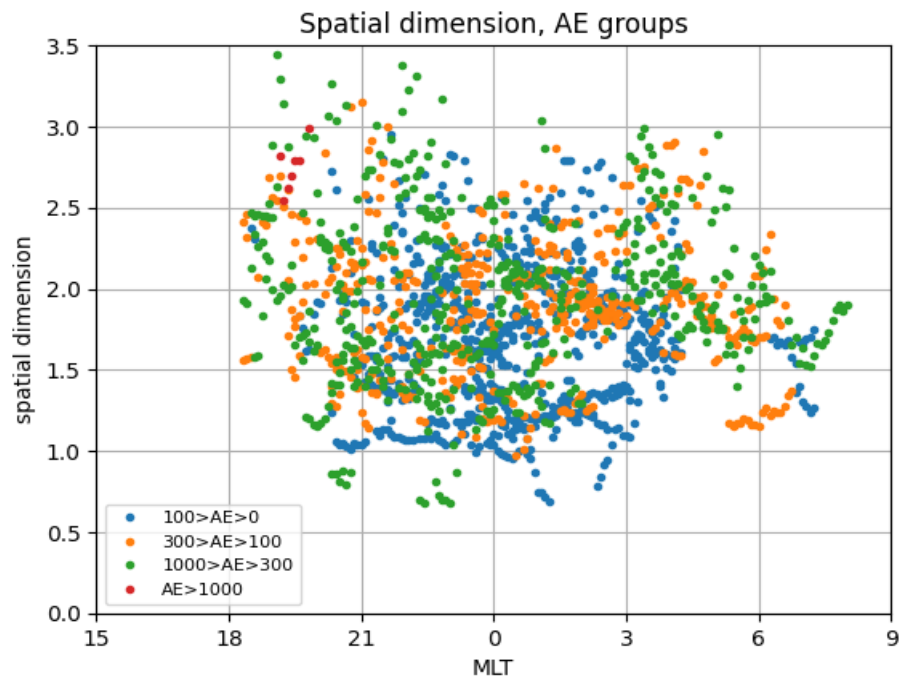
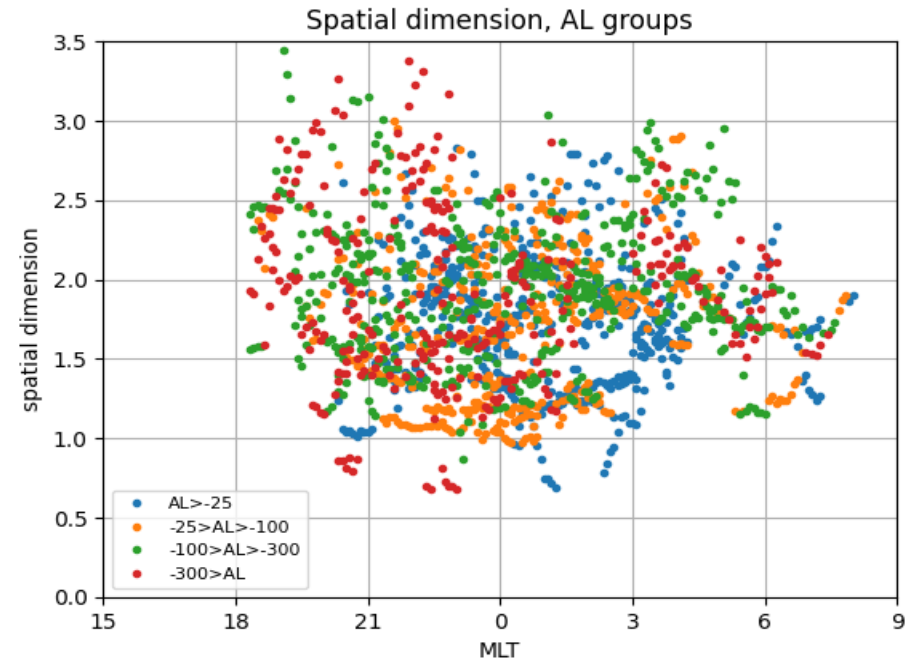
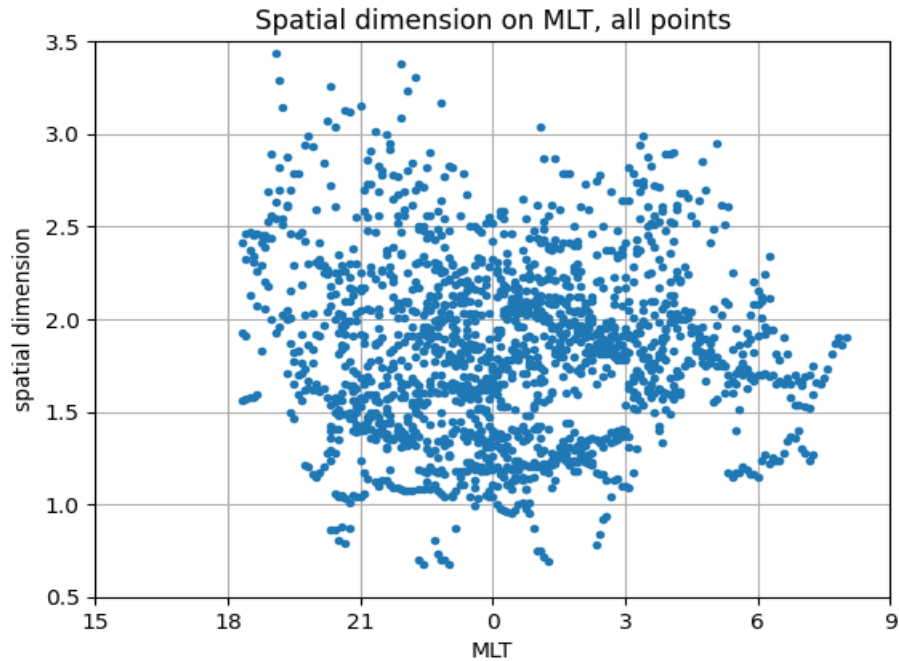
Статистика 2013 – 2020 гг.

Спектральный индекс С



Неожиданным оказалась в среднем линейная зависимость значения индекса временных флуктуаций С от спектрального индекса А: $\langle C \rangle = \langle A \rangle - 1$.

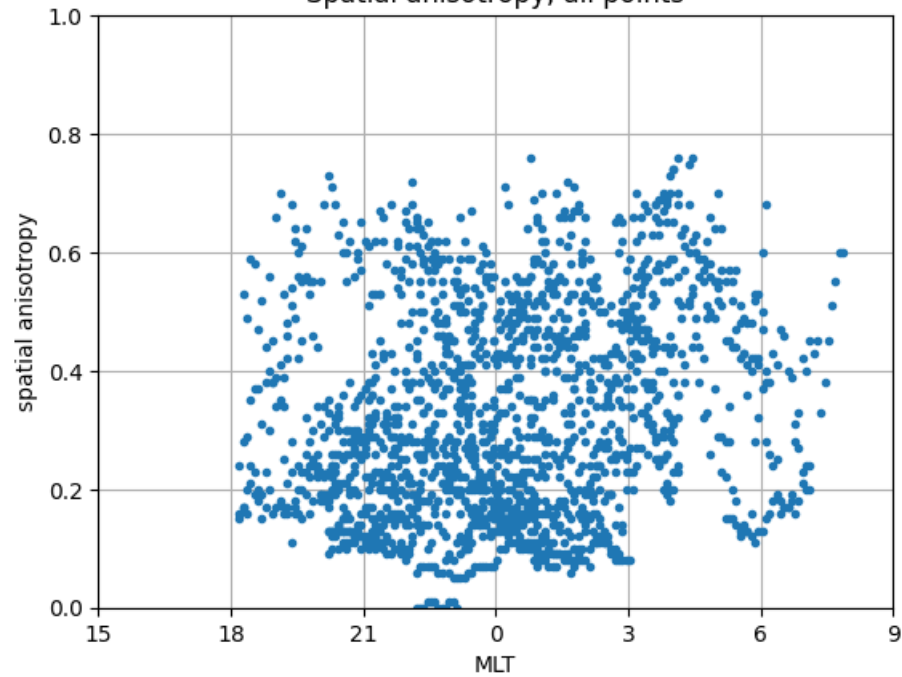
Статистика по 2013-2015 гг.



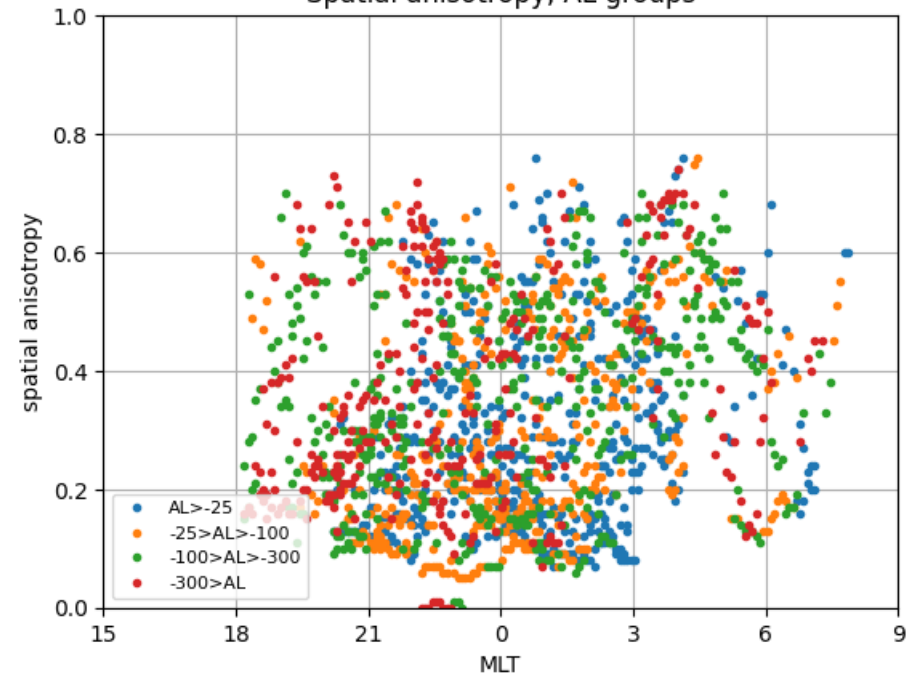
Определенных зависимостей спектральных индексов от индексов AL, AU, AE, SYM-H выявить не удалось

Статистика по 2013-2015 гг.

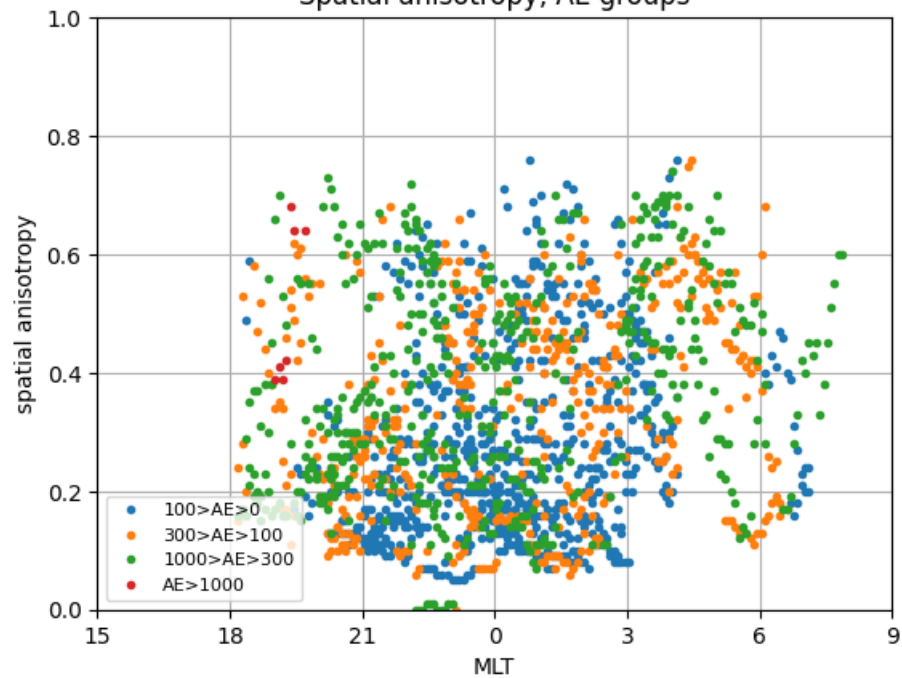
Spatial anisotropy, all points



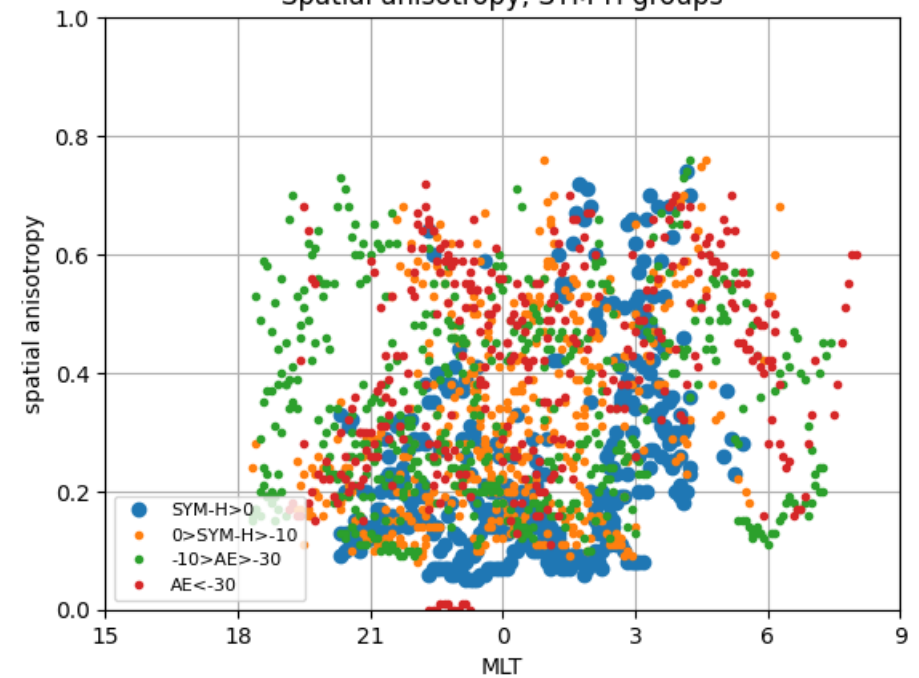
Spatial anisotropy, AL groups



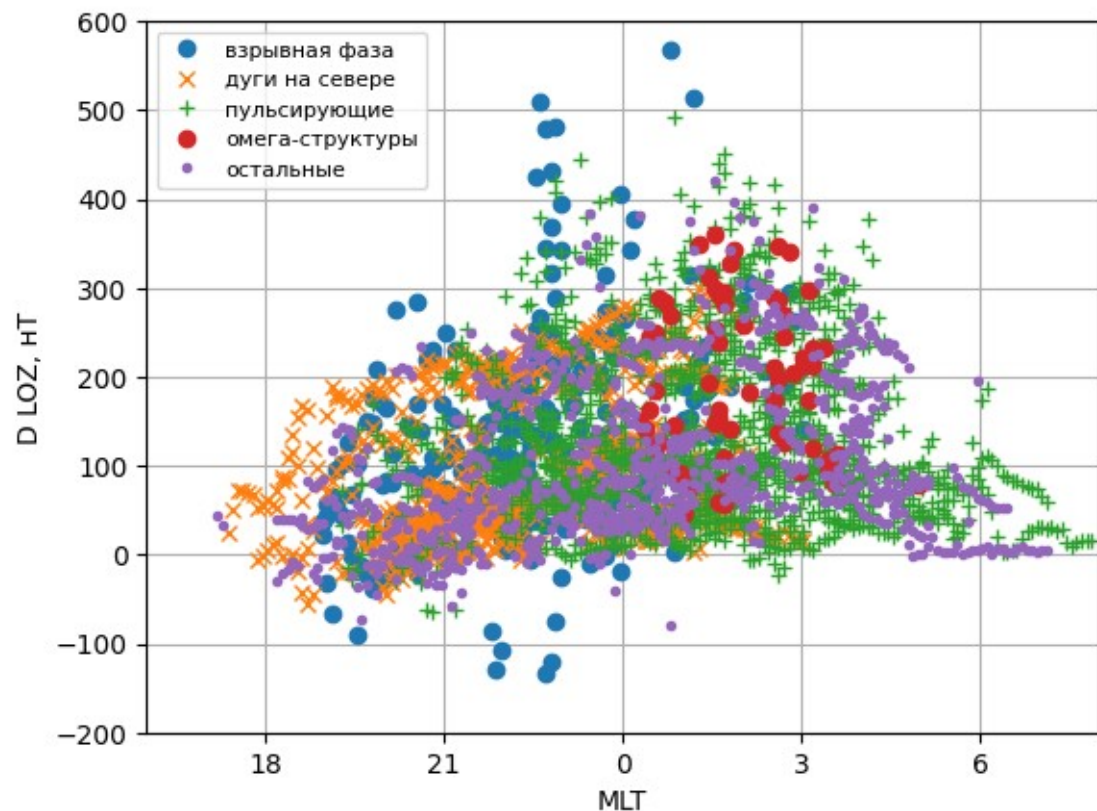
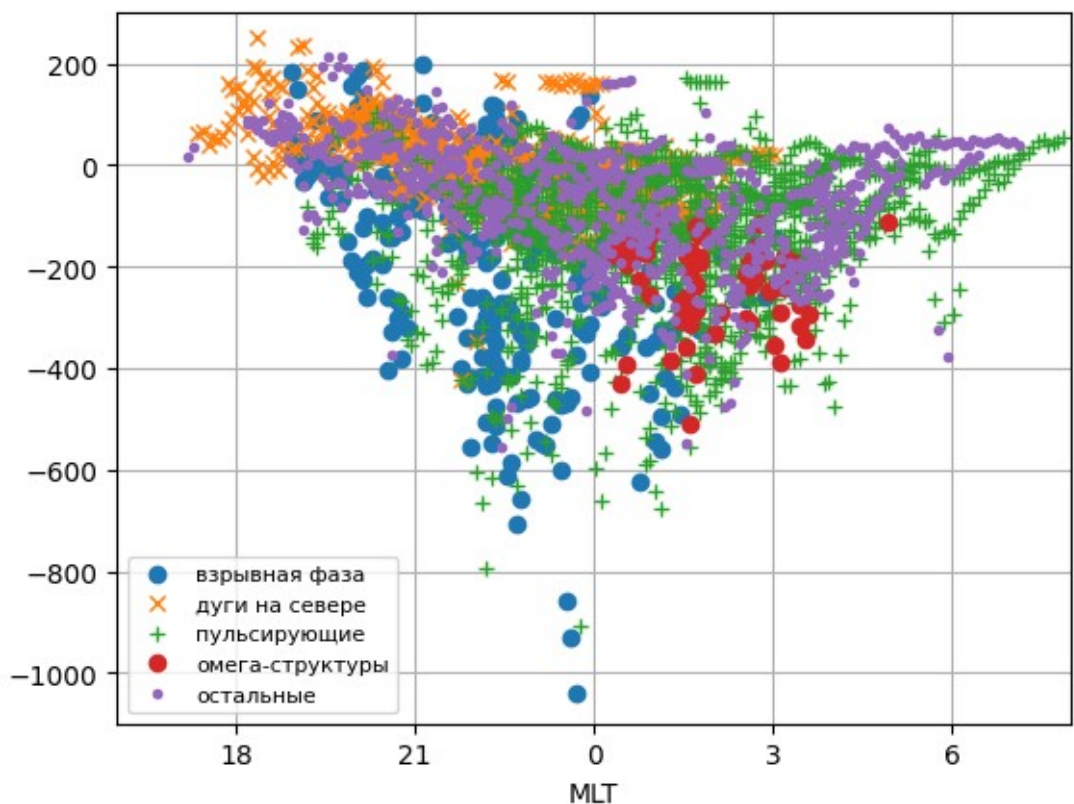
Spatial anisotropy, AE groups



Spatial anisotropy, SYM-H groups



Статистика 2013 – 2020 гг.

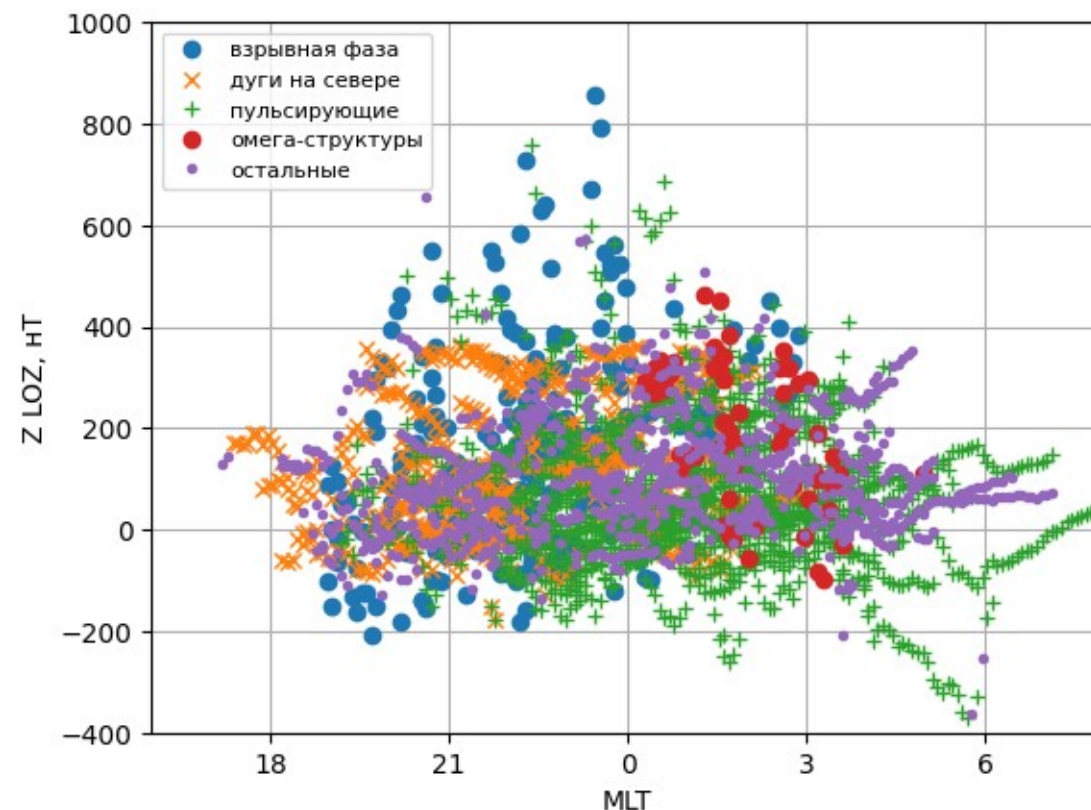


Локализация выделенных групп событий от местного магнитного времени MLT и от компонент геомагнитного поля, измеренных в obs. Ловозеро:
а — в осях MLT и H; б - в осях MLT и D

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

Статистика 2013 – 2020 гг.

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

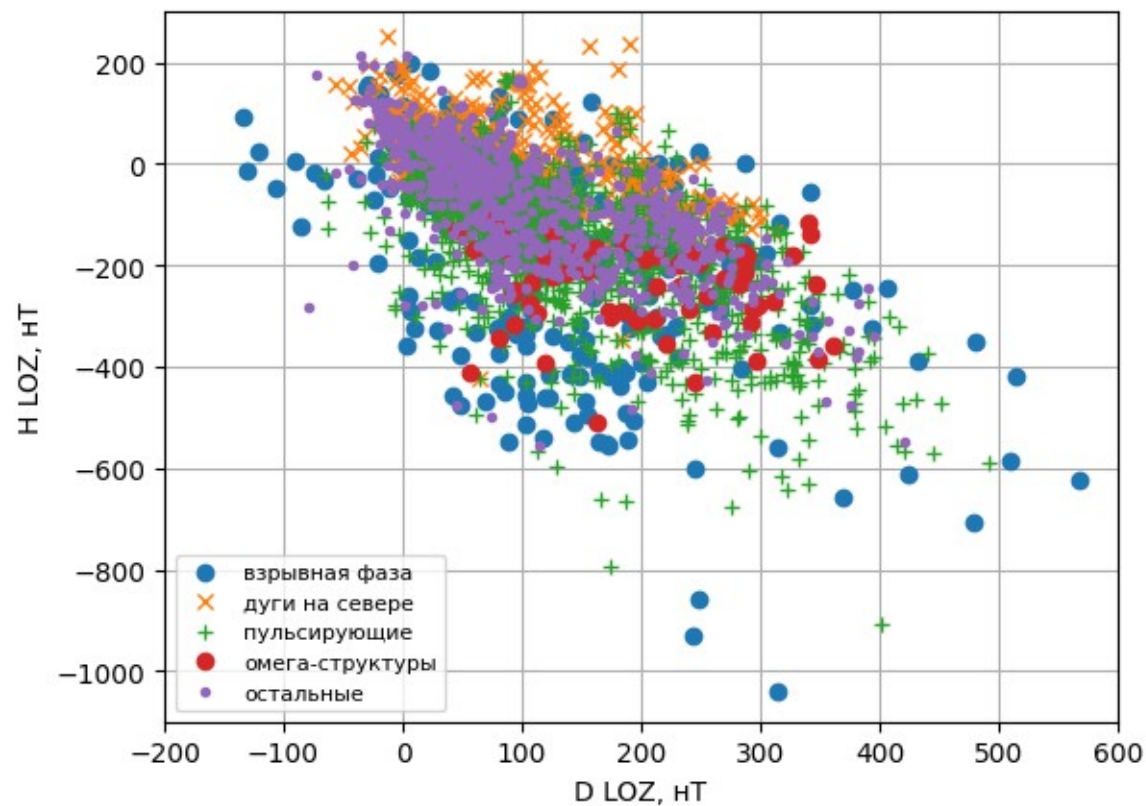


Локализация выделенных групп событий от местного магнитного времени MLT и от компонент геомагнитного поля, измеренных в obs. Ловозеро в осях MLT и Z

Статистика 2013 – 2020 гг.

Локализация выделенных групп событий и от компонент геомагнитного поля, измеренных в обс. Ловозеро в осях D и H компонент.

Взрывные фазы суббури наблюдались при более низких значениях H-компоненты локального магнитного поля, чем в среднем для остальных событий с полярными сияниями.

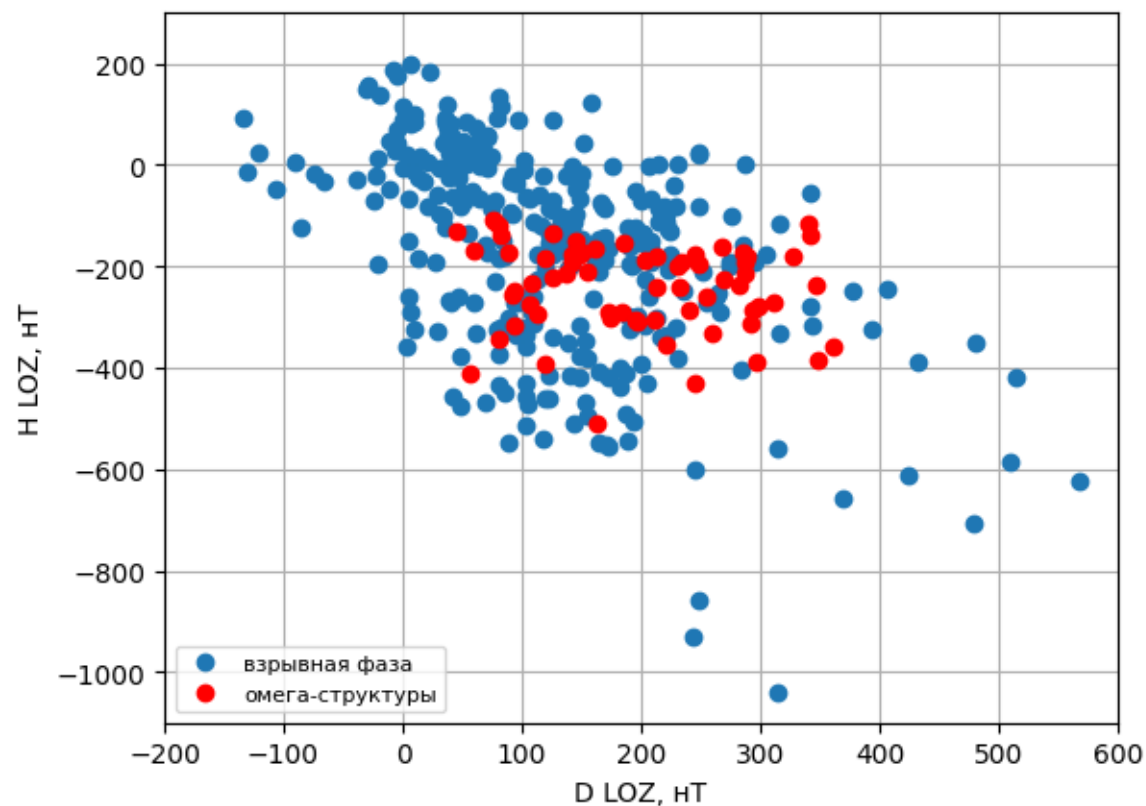


Статистика 2013 – 2020 гг.

Взрывные фазы суббури наблюдались при более низких значениях Н-компоненты локального магнитного поля, чем в среднем для остальных событий с полярными сияниями.

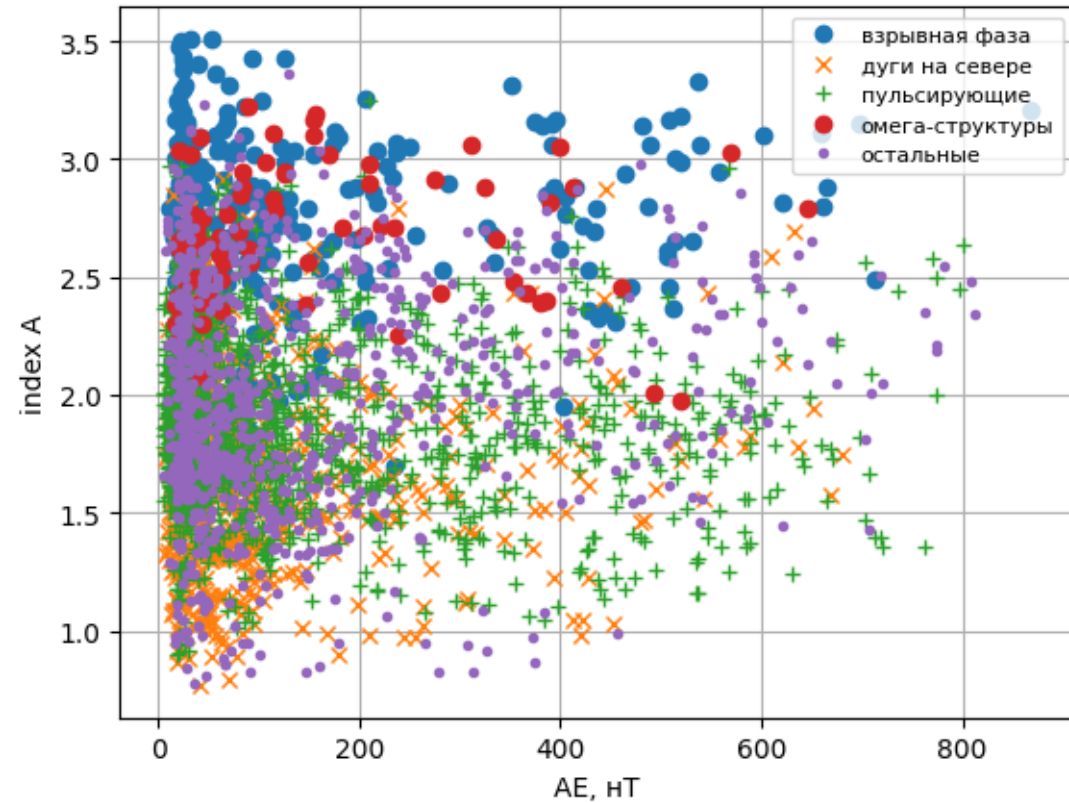
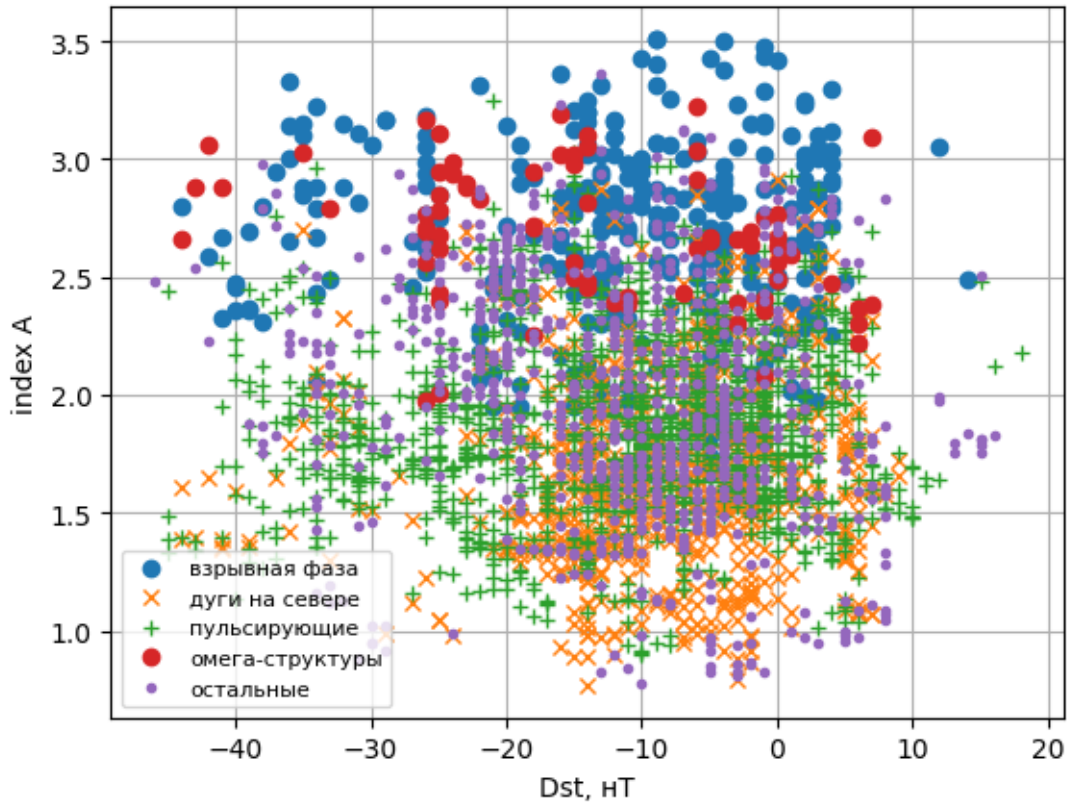
Наблюдается обратная пропорциональность между Н и D компонентами локального магнитного поля, при которых сияния появляются на широте г.Апатиты.

При отрицательных значениях Н компоненты сияния наблюдаются и при положительных значениях D компоненты.



Локализация выделенных групп событий и от компонент геомагнитного поля, измеренных в обл. Ловозеро в осях D и H компонент только взрывные фазы и омега-структуры.

Статистика 2013 – 2020 гг.



Выводы

1. Методом лог-скейл скалограмм по данным камеры всего неба в Апатитах за 2013-2020 гг получены спектральные индексы, характеризующие пространственные неоднородности аврорального свечения для типичных авроральных явлений в диапазоне масштабов 1.5-50 км:

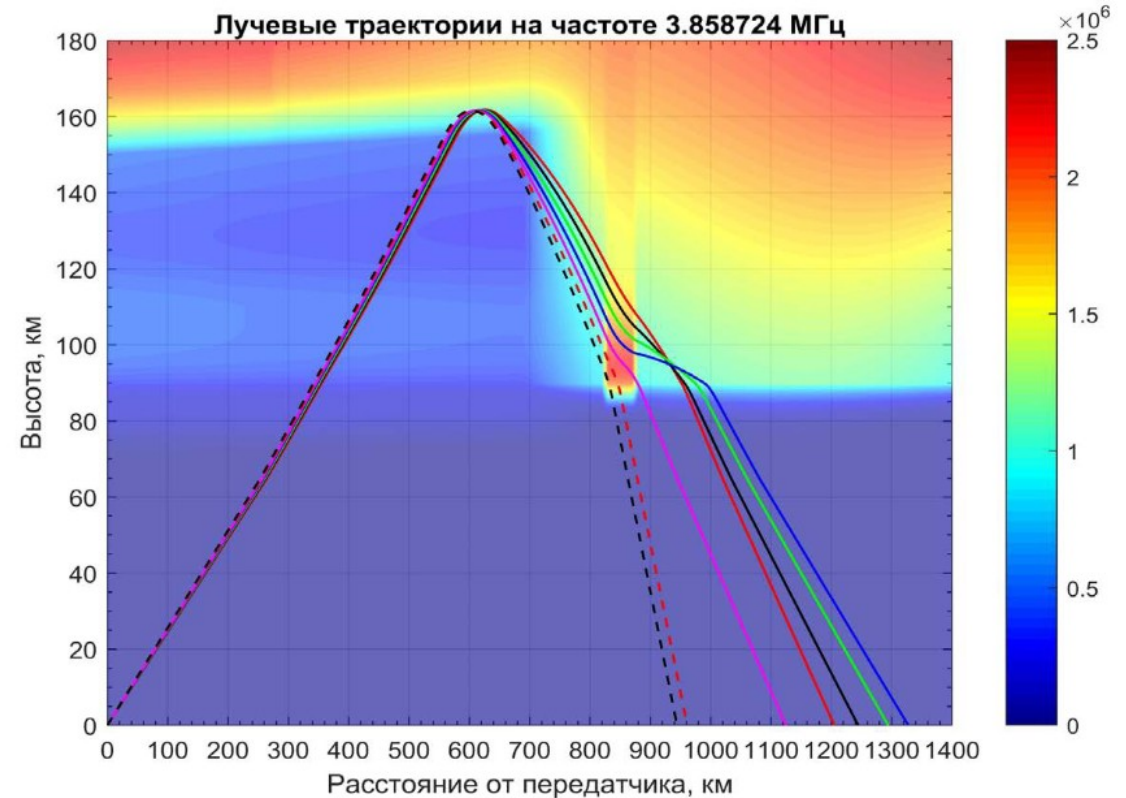
	Индекс А	Индекс В	Индекс С
Все точки	$1,95 \pm 0,49$	$0,36 \pm 0,17$	$0,82 \pm 0,55$
Взрывная фаза	$2,69 \pm 0,39$	$0,50 \pm 0,13$	$1,63 \pm 0,38$
Дуги на севере	$1,66 \pm 0,40$	$0,19 \pm 0,08$	$0,39 \pm 0,40$
Пульсирующие	$1,88 \pm 0,35$	$0,39 \pm 0,17$	$0,78 \pm 0,37$
Омега-структуры	$2,67 \pm 0,29$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

2. Наибольшие значения фрактального индекса А и индекса изотропии В 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 А, а также меньше индекс изотропия В наблюдаются при однородных или слабо возмущенных дугах на северной части неба, в основном, вечером.

4. Определенных зависимостей спектральных индексов от индексов AL, AU, AE, 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».

Возможное применение

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].



Литература

Головчанская И. В., Б. В. Козелов. Диапазон масштабов альфвеновской турбулентности в верхней ионосфере авроральной зоны // Космические исследования. 2016 г., 54, № 1, с. 52–57. DOI: 10.7868/S002342061601009X

В.Г. Воробьев, О.И. Ягодкина, Е.Е. Антонова, Влияние скорости и плотности плазмы солнечного ветра на интенсивность изолированных магнитосферных суббурь // Physics of Auroral Phenomena. Proc. XLI Annual Seminar, Apatity, P.30-33. 2018

Козелов Б.В., Ролдугин А.В. Получение информации об ионосферно-магнитосферной плазме по наблюдениям полярных сияний // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С.366-371. DOI: 10.31857/S0367676521030157

B. V. Kozelov, Space–Time Structures in the Auroral Oval: Approaches to Modeling // Cosmic Research, 2023, Vol. 61, No. 3, pp. 185–193, Russian text published in Kosmicheskie Issledovaniya, 2023, Vol. 61, No. 3, pp. 179–188.

B. V. Kozelov, V. G. Vorobjev, E. E. Titova, and T. A. Popova, 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, pp. 394–399.

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-2022a

Козелов Б.В. Фрактальные характеристики структуры аврорального овала по данным камеры в Апатитах за 2013-2020 гг. // RJES, 2024 (submitted)