

УДК 533.9.08:533.95

ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ И ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА АВРОРАЛЬНЫХ ВЫСЫПАНИЙ

© 2024 г. Б. В. Козелов¹, *, В. Г. Воробьев¹, Е. Е. Титова¹, Т. А. Попова¹

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение “Полярный геофизический институт”,
Апатиты, Россия

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

Поступила в редакцию 24.08.2023

После доработки 13.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

По данным высокоширотных наблюдений Полярного геофизического института изучено развитие типичной авроральной суббури 13 сентября 2013 г. Событие по спутниковым данным привязано к параметрам солнечного ветра, физическим магнитосферным доменам и границам. Определены характеристики пространственной структуры полярных сияний (показатели скейлинга, анизотропия) для типичных авроральных форм (спокойные и лучистые дуги, брейкап, пульсирующие полосы, омега-формы).

DOI: , EDN:

ВВЕДЕНИЕ

Диагностика состояния высокоширотной ионосферы имеет большое значение для решения значительного круга научных и практических задач. В ночное время определяющим для этого состояния являются высыпания энергичных авроральных частиц [1]. Исследования пространственно-временной динамики авроральных высыпаний и построение ее модели затрагивают многие вопросы физики магнитосферы, околоземной плазмы, солнечного ветра, солнечно-земных связей [2]. Типичным состоянием возмущенной околоземной плазмы является турбулентность в широком смысле [3, 4]. Это наглядно можно видеть с Земли в структурах полярных сияний и может использоваться для диагностики ионосферы [5] и прикладных вопросах [6]. Методы фрактальной геометрии применяются для описания столь неоднородных, нерегулярных структур [7]. Как показано в работах [7, 8], фрактальная структура авроральных высыпаний, вероятно, связана с поддержанием на пороге протекания (перколяции) ионосферно-магнитосферной токовой системы.

В работе по данным высокоширотных наблюдений Полярного геофизического института проанализирована типичная авроральная суббури, во время которой полярные сияния долгое время находились в поле зрения камер в г. Апатиты и были хорошие условия для наблюдений. Использованы данные авроральных камер в г. Апатиты и магнитные измерения обсерватории “Ловозеро”. Событие

привязано к параметрам солнечного ветра, физическим магнитосферным доменам и границам, фазе магнитосферного возмущения. В работе ставится задача описать пространственную структуру аврорального свечения, используя фрактальные характеристики (показатели скейлинга a). Имея в виду явную выделенность одного направления (вдоль овала сияний), рассмотрены показатели скейлинга вдоль и поперек структуры ($\max(a)$ и $\min(a)$), а также показатель изотропности ($\min(a)/\max(a)$). Определены характеристики пространственной структуры полярных сияний в типичных авроральных формах (спокойные и лучистые дуги, брейкап, пульсирующие полосы, омега-формы).

НАБЛЮДЕНИЯ

Рассмотрим случай с 12.09.2013 19:00 UT до 13.09.2013 01:00 UT. На рис. 1 приведена авроральная кеограмма, т. е. развитие во времени аврорального свечения атмосферы в сечении с севера на юг поля зрения камеры в Апатитах ($67^{\circ}34'N$, $33^{\circ}16'E$), и полные изображения всего неба в отдельные моменты. Описание камеры в составе системы MAIN приведено в работе [9].

Наземные магнитометрические наблюдения в обсерватории “Ловозеро” Полярного геофизического института приведены на рис. 2. Бухта H -компоненты магнитного поля началась ~ 20:30 UT и продолжалась до 01:30 UT, в начале бухты наблюдались три вспышки магнитных

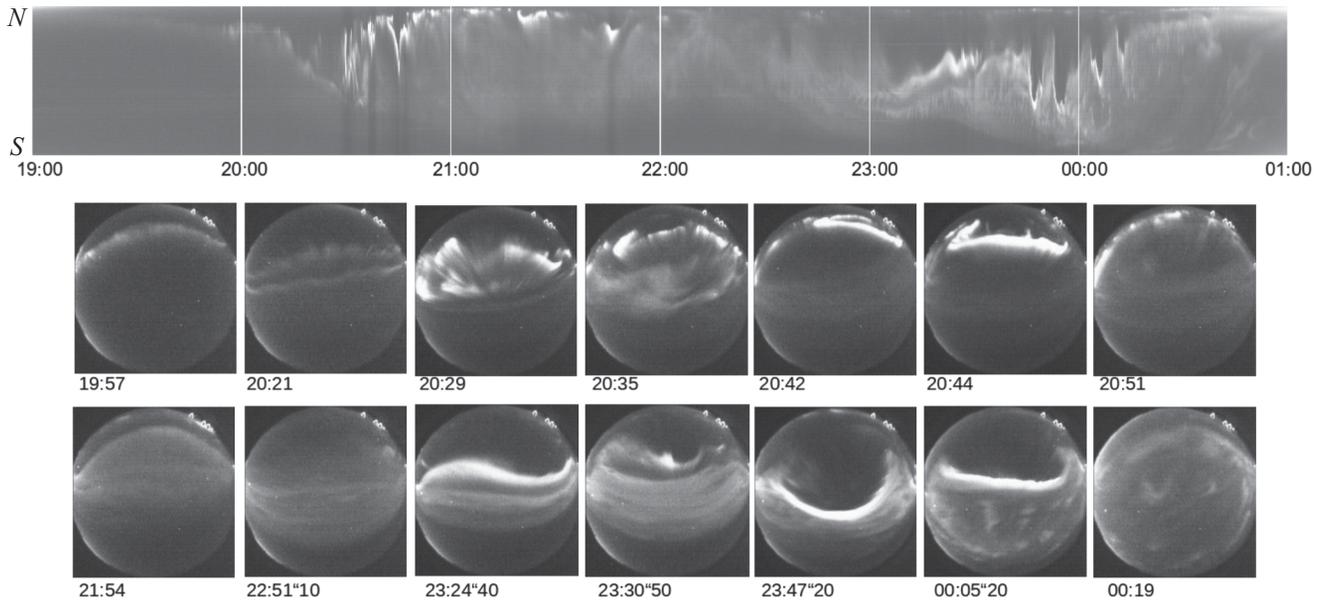


Рис. 1. Наблюдения полярных сияний камерой всего неба в г. Апатиты 12—13.09.2013: сверху — авроральная кеограмма за весь интервал; ниже — изображения всего неба в определенные моменты времени. Время — UT (Universal Time).

пульсаций — в 20:30 UT, 20:37 UT и 20:47 UT. По наземным проявлениям в рассмотренном случае наблюдалась типичная авроральная суббура: появление на севере спокойной дуги, ее дрейф к югу, расщепление дуги, быстрое увеличение яркости и расширение области свечения к северу и к югу (брейккап). Брейккап и расширение сияний к полюсу начался в 20:30 UT, после этого к югу от ярких

дискретных сияний осталась широкая зона диффузных пульсирующих сияний, формируются несколько омега-структур (23:47 UT, 23:54 UT, 00:07 UT, 00:12 UT). После этого активность уменьшается, пульсирующие сияния смещаются к северу.

По данным OMNI, дополненным данными со спутника ACE в солнечном ветре, можно сказать, что предварительная фаза суббури началась

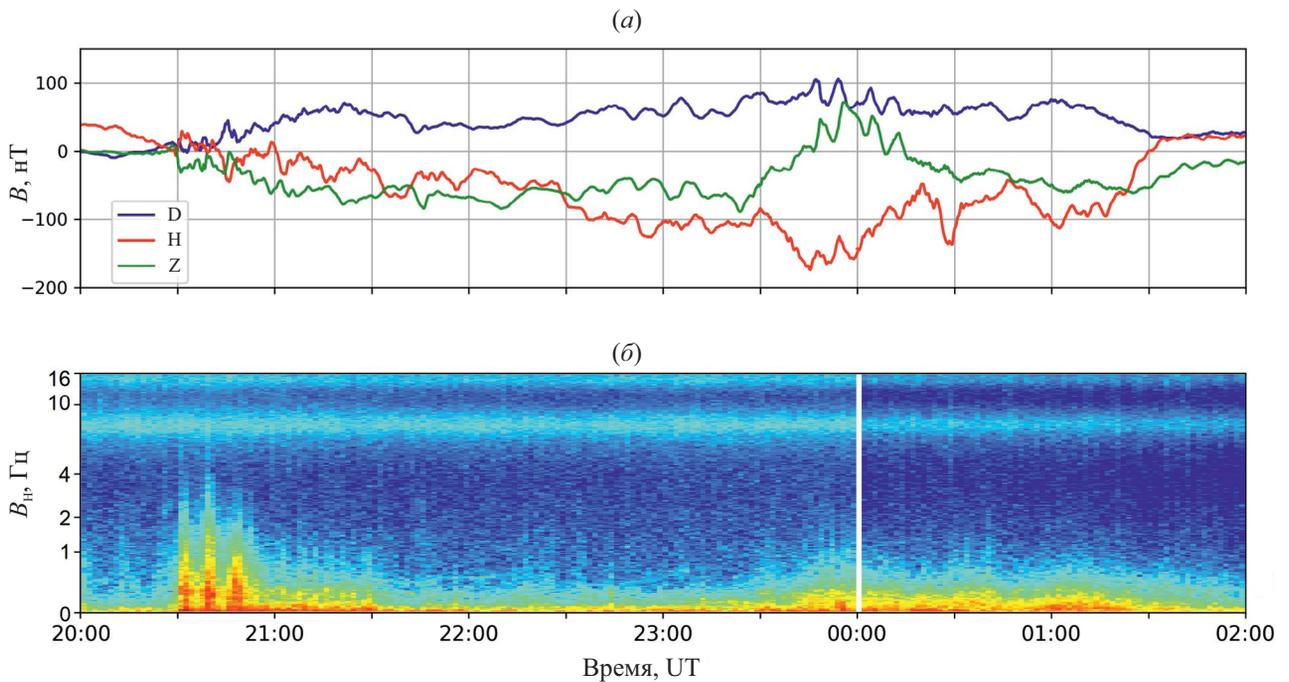


Рис. 2. Магнитные измерения 12—13.09.2013 в обсерватории ПГИ “Ловозеро”: три компоненты магнитного поля (а); КНЧ-пульсации в *H*-компоненте магнитного поля (б).

с поворота B_z межпланетного магнитного поля (ММП) в отрицательные значения (“к югу”), зарегистрированного на спутнике в $\sim 18:10$ UT. В данных OMNI в подсолнечной точке в это время пробел, однако можно предполагать, что это возмущение дошло до магнитосферы не более, чем на 50–55 мин позже. Еще ~ 20 мин возмущение проходило из магнитосферы в ионосферу, в сияниях $\sim 19:20$ UT мы видим появление дуги полярных сияний на севере ее медленное движение на юг. Процедура заполнения пробела в данных OMNI B_z по исходным данным со спутника ACE проиллюстрирована на рис. 3.

Кратковременное повышение и возвращение B_z к нулю (начиная с $\sim 19:50$ UT, рис. 3, ϵ) привело

к росту авроральной активности с $20:10$ UT и ускорению движения дуг с севера на юг. Индекс AE в это время увеличивается до ~ 150 нТ (рис. 3, ζ), SYM/H начинает уменьшение (рис. 3, δ). По данным Metop-01 (не показаны), изотропная граница 40 кэВ электронов в $20:15$ UT в этом секторе аврорального овала находилась на 65.5° N. Примерно в $20:20$ дуга расщепляется и в $20:28$ UT начинается взрывная фаза суббури. Таким образом, можно сделать вывод, что в данном случае взрывная фаза суббури, вероятно, стимулирована положительной вариацией B_z ММП на фоне длительного интервала отрицательных значений B_z ММП [10].

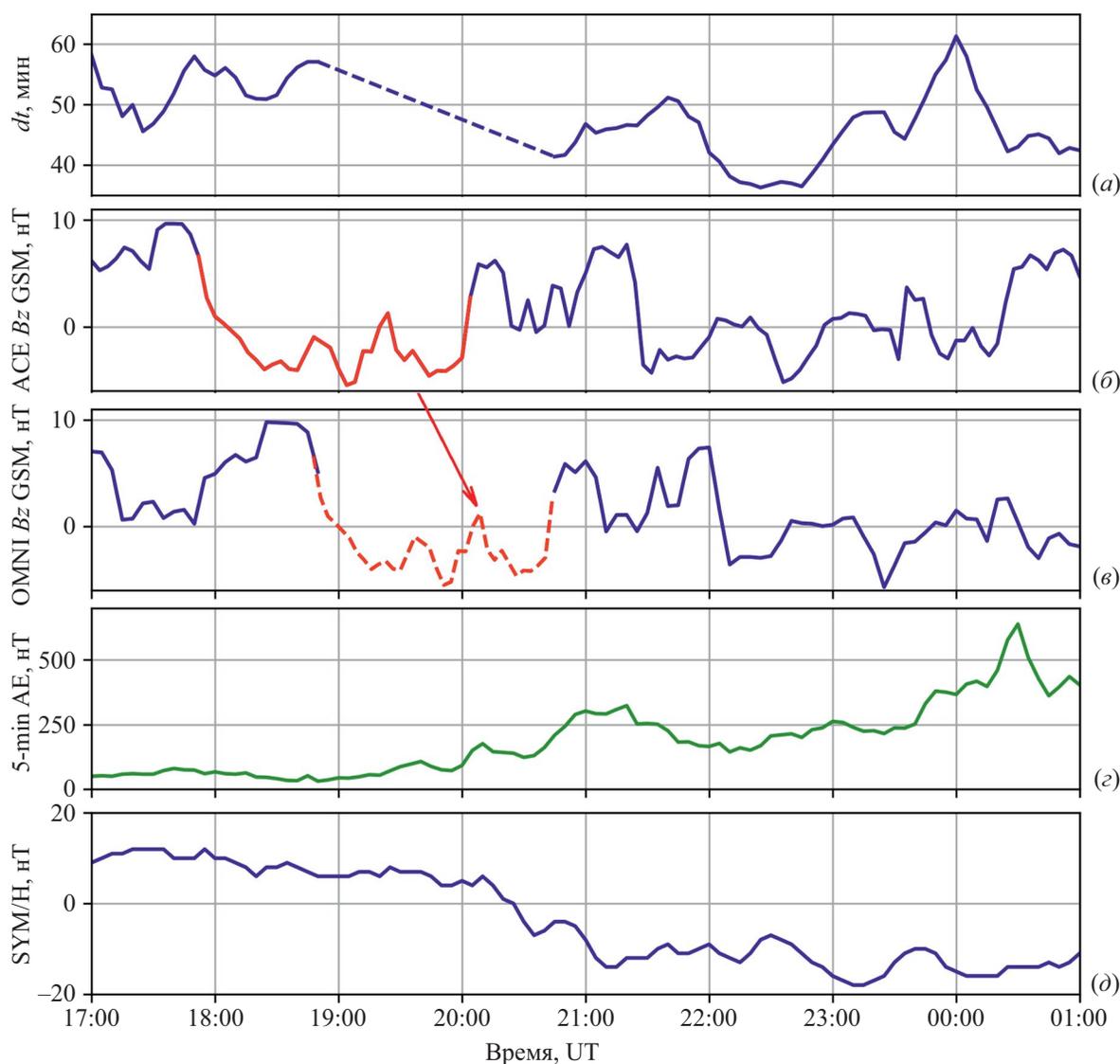


Рис. 3. Данные по межпланетному полю и индексы активности для 12–13.09.2013: задержка в данных со спутника ACE до подсолнечной точки магнитосферы (данные OMNI) (а); z -компонента межпланетного магнитного поля B в GSM-координатах, красным выделен участок пробела в данных OMNI (б); z -компонента межпланетного магнитного поля B в GSM-координатах в подсолнечной точке по данным OMNI, красным пунктиром показан участок, взятый из данных ACE (в); 5-минутный AE-индекс (г); SYM/H-индекс (д).

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ

Каждый кадр в течение данного события обрабатывался следующим образом методом, основанном на методе [11]:

1. Выделена прямоугольная область от зенита в азимутальном направлении φ (рис. 4, *a*).
2. Флуктуации светимости в этой области в направлении длинной стороны “склеены” в единый массив, и для данного массива получено его дискретное вейвлет-разложение. Использовались вейвлеты Добеши 5-го порядка.
3. По зависимости логарифма дисперсии детализирующих коэффициентов от логарифма масштаба определялся спектральный индекс a — наклон в диапазоне масштабов 1.5–50 км (рис. 4, *b*).
4. Процедура повторялась для другой ориентации φ прямоугольной области с поворотом φ по азимуту от 0 до 360° с шагом 5°.
5. Пример полученных значений спектрального индекса a от φ для данного кадра приведен на рис. 4, *в* в полярных координатах. Полученные значения показывают, в какой части неба наблюдаются флуктуации свечения.
6. По зависимости $a(\varphi)$ для данного кадра определены $\min(a)$, $\max(a)$ и параметр анизотропии $\min(a)/\max(a)$. Полученные величины показывают, насколько флуктуации свечения изотропны.

Результаты обработки для двух одночасовых интервалов, в качестве примеров, приведены на рис. 5 и 6. Некоторые моменты на рисунках обозначены цифрами. На рис. 5 интервал 20:00–21:00 UT соответствует переходу от однородной спокойной дуги (точка 1) к активизации и удвоению дуги (точка 2) и далее к брейкапу (точка 3). Для спокойной дуги $\max(a) \sim 1$, что соответствует линейному объекту. Значение $\min(a) \sim 0.2$ – 0.25 соответствует несвязанным точкам в сечении поперек дуги и в основном определяется шумом на изображении.

Возмущение в виде лучей дает увеличение $\max(a) \sim 1.5$ – 2.0 , так как на изображении такая дуга имеет вид 2-мерного объекта с пробелами. В поперечном направлении $\min(a)$ немного увеличивается. В случае дуг диапазон изменения интенсивностей на изображениях небольшой, поэтому использованный метод дает размерности, примерно соответствующие размерности объектов на плоскости.

После брейкапа (точка 3) яркости полярных сияний резко возрастает, значения $\max(a)$ и $\min(a)$ увеличиваются примерно на 1, т.е. становится ясно, что светится область в 3-мерном пространстве, $\max(a) \sim 2.5$ и $\min(a) \sim 1.5$. Возрастает индекс изотропности $\min(a)/\max(a)$ до ~ 0.5 – 0.7 .

После 20:36 UT $\min(a)$ уменьшается до значений менее 1, но $\max(a)$ значительно не меняется. Полярные сияния вытягиваются в одном направлении, на небе широкая полоса из мультиплетных дуг. Активизация северной дуги (точка 4) несколько повышает $\max(a)$.

Затем (точка 5) на небе остается широкая область пульсирующих пятен, $\max(a) \sim 1.5$ и $\min(a) \sim 0.5$. Далее в течение 2 ч все небо занимают пульсирующие сияния, в которых к 23:00 UT появляются крупные пятна, что повышает характеристики до $\max(a) \sim 2.0$ и $\min(a) \sim 0.7$, при этом $\min(a)/\max(a) \sim 0.3$ практически не изменяется (см. рис. 6, точка 6).

Затем северный край полосы полярных сияний становится ярче, $\max(a) > 2.5$, а пульсации к югу увеличивают вариации $\min(a)$ до диапазона 0.6–1.2 (см. рис. 6, точка 7). Однако $\min(a)/\max(a)$ выше 0.5 не растет.

Значительный рост $\min(a)/\max(a)$ до 0.7–0.8 происходит в моменты, отмеченные точками 8 и 9, когда поле зрения проходят омега-формы. При этом $\max(a) \sim 2.5$ и происходит рост $\min(a)$ до значений 1.7–1.9.

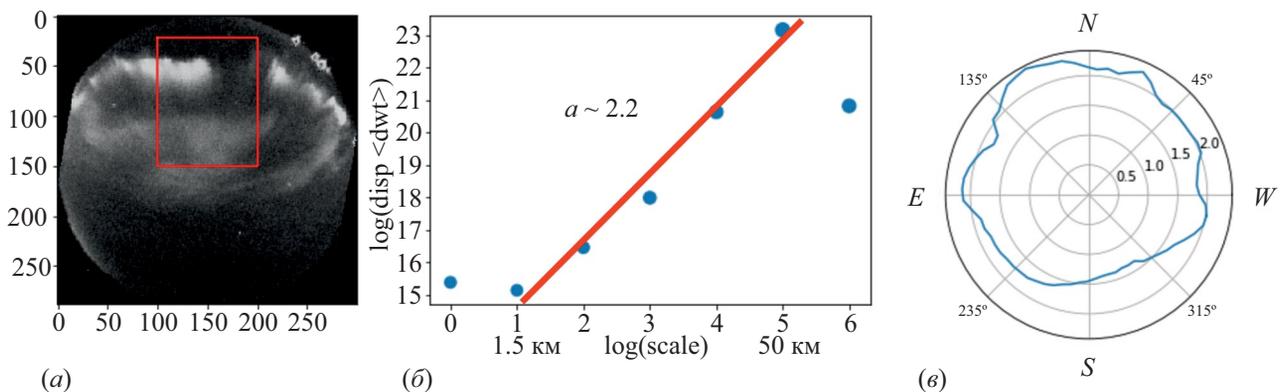


Рис. 4. Обработка изображения: кадр с камеры всего неба (*a*), красная рамка — выделение области на изображении с учетом ориентации; определение наклона (спектрального индекса) по логарифмическому графику дисперсии детализирующих коэффициентов от масштаба для выбранной области по методу из [11] в диапазоне масштабов 1.5–50 км (*b*); зависимость спектрального индекса от азимутального направления (ориентации маски) (*в*).

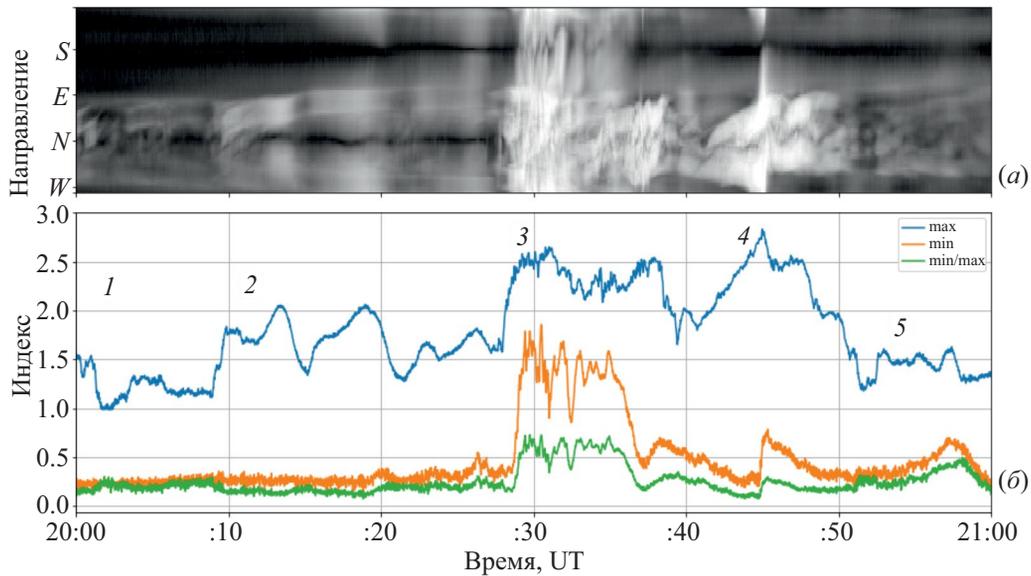


Рис. 5. Результаты обработки оптических данных для интервала 20:00—21:00 UT, 12.09.2013: зависимость спектрального индекса a в координатах “время — направление”, стороны света показаны на оси направления (а); зависимости $\max(a)$, $\min(a)$ и $\min(a)/\max(a)$ от времени (б). Отдельные моменты отмечены точками 1—5, которые обсуждаются в тексте.

ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее, в работе [12], была исследована эволюция скейлингового индекса, характеризующего флуктуации аврорального свечения в начале взрывной фазы суббури. По изображениям UVI со спутника Polar показано, что этот индекс обычно изменяется от значений менее единицы до 1.5, увеличиваясь по мере развития аврорального брейкапа. Фактически, в терминах данной работы, определялся индекс $\min(a)$ поперек аврорального овала на масштабах 50—400 км, что хорошо

согласуется со значениями рис. 5, б, 20:29—20:35 UT, полученными для меньших масштабов. Сравнение с фрактальным броуновским движением дает $\min(a) / 2 = H$, где H — показатель Херста. То есть при такой интерпретации скейлингового индекса во время брейкапа мы имеем переход от зашумленного антиперсистентного ($H < 0.5$) сигнала к более сглаженному персистентному ($H > 0.5$) сигналу, что согласуется с аналогичным результатом работы [14], полученным на основе анализа показателя шероховатости распределения аврорального свечения во время суббури. В общем

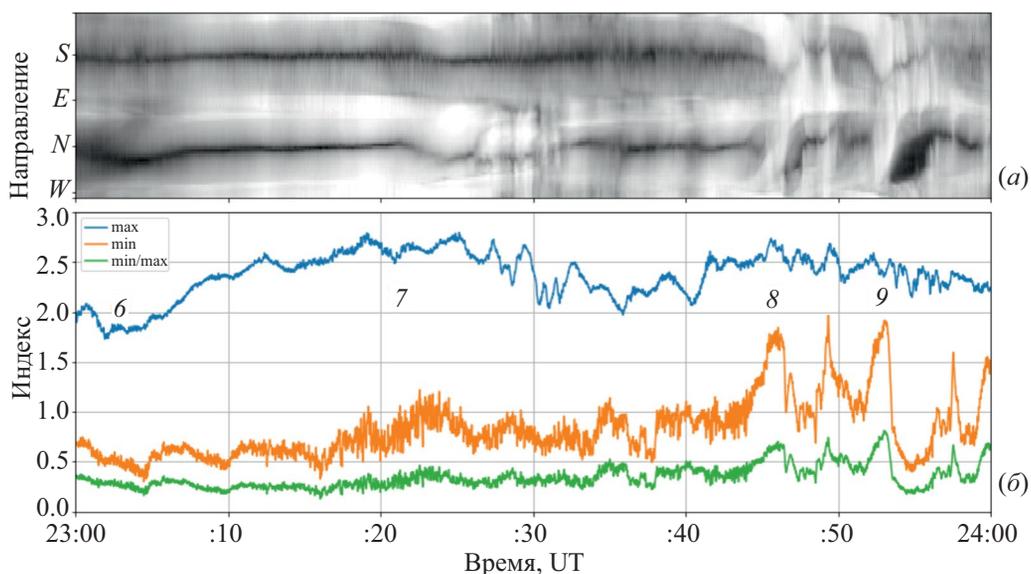


Рис. 6. То же, что на рис. 5, но для 23:00–24:00 UT, 12.09.2013. Отдельные моменты отмечены точками 6—9.

Таблица 1. Значения спектральных индексов, характеризующих пространственные неоднородности аврорального свечения для типичных авроральных структур

Структура	Параметр		
	max	min	min/max
Спокойная дуга	1.0	Менее 0.25	Менее 0.25
Дуги с лучами	1.5–2.0	Менее 0.25	Менее 0.25
Брейкап	Более 2.5	Более 1.5	0.8
Пульсирующие полосы	1.5–2.0	0.5–1.0	0.25–0.5
Омега-структуры	2.0–2.5	1.5–2.0	0.7

виде скейлинговый индекс $a = 2H + 1$ для сигнала, который является кривой обобщенного (или фрактального) броуновского движения, однако в нашем случае значение меньше на 1 из-за другой нормировки вейвлетов. В процедуре разложения вейвлеты для нормировки L_2 дополнительно делятся на квадратный корень из масштаба.

В работах [2, 7] приведены примеры расчетов $\min(a)$ и $\max(a)$ по данным камеры с диагональным полем зрения 67 (камерой 4 в зеленом канале, см. табл. 1 в [9]). Использовался такой же метод, как в данной работе, однако из-за отмеченной выше нормировки вейвлетов, индексы тоже отличаются на 1. В работах учтены поправки на искажения, обсуждавшиеся в [13]. Такие данные имеются и для интервала, рассмотренного в данной работе. Диапазон масштабов для этой камеры составляет 0.5–20 км. С учетом более редкого попадания структур в меньшее поле зрения камеры спектральные индексы мало отличаются от представленных для камеры всего неба.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным камеры всего неба в Апатитах методом вейвлет-разложения по пространственным масштабам флуктуаций интенсивности свечения для типичной авроральной суббури получены спектральные индексы, характеризующие пространственные неоднородности аврорального свечения для типичных авроральных структур в диапазоне масштабов 1.5–50 км, приведенных в табл. 1. Для флуктуаций вблизи магнитного зенита (в поле зрения ~67° авроральной камеры Guppy-C системы MAIN) в диапазоне масштабов 0.5–20 км спектральные индексы такие же, с учетом попадания структур в поле зрения. Найденные в работе спектральные индексы могут быть использованы при построении модели возмущенной высокоширотной ионосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Министерства образования и науки Мурманской области

(проект № 22-12-20017 “Пространственно-временные структуры в околоземном космическом пространстве Арктики: от полярных сияний через особенности самоорганизации плазмы к прохождению радиоволн”). Авторы благодарят Дж. Х. Кинг и Н. Папаташвилли (J. H. King, N. Papatashvilli) (AdnetSystems, NASA GSFC) за данные базы OMNI и Н. Несс (N. Ness) (Bartol Research Institute) за данные спутника ACE, а также сервис CDAWeb.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akasofu S.-I. // Planet. Space Sci. 1964. V. 12. P. 273.
2. Козелов Б. В. // Косм. иссл. 2023. Т. 61. № 3. С. 179; Kozelov B. V. // Cosmic Res. 2023. V. 61. No. 3. P. 185.
3. Frisch U. Turbulence: the legacy of A. N. Kolmogorov. Cambridge University Press, 1995.
4. Головчанская И. В., Козелов Б. В. // Косм. иссл. 2016. Т. 54. № 1. С. 52; Golovchanskaya I. V., Kozelov B. V. // Cosmic Res. 2016. V. 54. No. 1. P. 47.
5. Козелов Б. В., Ролдугин А. В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 3. С. 366; Kozelov B. V., Roldugin A. V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 3. P. 256.
6. Сахаров Я. А., Мингалева И. В., Козелов Б. В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 3. С. 386; Sakharov Ya. A., Mingaleva I. V., Kozelov B. V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 3. P. 310.
7. Chernyshov A. A., Kozelov B. V., Mogilevsky M. M. // J. Atm. Solar.-Terr. Phys. 2017. V. 161. P. 127.
8. Chernyshov A. A., Mogilevsky M. M., Kozelov B. V. // J. Geophys. Res. 2013. V. 118. No. 7. P. 4108.
9. Kozelov B. V., Pilgaev S. V., Borovkov L. P., Yurov V. E. // Geosci. Instrum. Meth. Data Syst. 2012. V. 1. P. 1.
10. Козелова Т. В., Пудовкин М. И., Лазутин Л. Л. // Геомагн. и аэронаом. 1989. Т. 29. № 6. С. 910; Kozelova T. V., Pudovkin M. I., Lazutin L. L. // Geomagn. Aeronomy. 1989. V. 29. No. 6. P. 910.
11. Abry P., Flandrin P., Taqqu M. S., Veitch D. Wavelets for the analysis, estimation and synthesis of scaling data.

- Self-similar network traffic and performance evaluation. 13. *Kozelov B. V., Golovchanskaya I. V.* // J. Geophys. Res. N. J.: Wiley-Interscience, Hoboken, 2000. P. 39. 2010. V. 115. Art. No. A02204.
12. *Kozelov B. V., Golovchanskaya I. V., Mingalev O. V.* // 14. *Uritsky V. M., Klimas A. J., Vassiliadis D.* // Adv. Space Ann. Geophys. 2011. V. 29. P. 1349. Res. 2006. V. 37. P. 539.

Diagnosis of the high-latitude ionosphere and spatio-temporal dynamics of auroral precipitation

B. V. Kozelov*, V. G. Vorobjev, E. E. Titova, T. A. Popova

Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia

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

Using high-latitude observations by the Polar Geophysical Institute, the development of a typical auroral substorm on September 13, 2013, is traced. The event, according to satellite data, is linked to solar wind parameters, physical magnetospheric domains, and boundaries. The characteristics of the spatial structure of polar auroras (scaling indices, anisotropy) have been determined for typical auroral structures (quiet and rayed arcs, breakup, pulsating bands, omega structures).