

А. А. Исавнин, Н. А. Смирнова

## СКЕЙЛИНГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УНЧ-ИЗЛУЧЕНИЙ ПО МАТЕРИАЛАМ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ БАРЕНЦБУРГ

### Введение

Известно, что вариации магнитного поля Земли оказывают сильное влияние на жизнедеятельность человека. Электромагнитные волны, возбуждаемые в магнитосфере, приводят к высыпанию энергичных частиц, которые, в свою очередь, могут вызывать выход из строя спутниковых систем и электронных приборов. Волны определенных частот могут влиять на здоровье человека (например, за счет вступления волн в резонанс с сердечными ритмами человека). В этой связи исследование структуры естественных электромагнитных полей Земли в разных частотных диапазонах и изучение их динамики в зависимости от меняющихся геофизических условий является важной задачей современной геофизики. В данной работе проводится спектральный и фрактальный анализы цифровых записей вариаций магнитного поля Земли, зарегистрированных с разрешением 10 Гц на высокоширотной обсерватории Баренцбург в течение 2008 г. Цель исследований — изучение скейлинговых (масштабно-инвариантных) характеристик УНЧ-излучений в диапазоне  $f = 0.002\text{--}1$  Гц и выявление их динамики в зависимости от геомагнитной активности и локального времени.

### 1. Специфика изучаемого региона

Флуктуации магнитного поля в магнитосфере происходят вследствие взаимодействия собственного магнитного поля Земли (принимаемого в первом приближении за дипольное) с потоком плазмы солнечного ветра, который, как известно, не является постоянным ни по скорости его движения, ни по величине и ориентации в замороженном в него межпланетного магнитного поля (ММП). Вследствие такого взаимодействия магнитосфера Земли принимает характерную форму (рис. 1). Особый интерес представляют области стыковки замкнутых и разомкнутых силовых линий — дневные полярные каспы.

Это наиболее уязвимые области для проникновения плазмы из солнечного ветра вглубь магнитосферы, поэтому естественно полагать, что возмущения магнитного поля будут оказывать существенное влияние на структуру полярных каспов и на происходящие в них физические процессы. Учитывая вышесказанное, а также малоизученность вариаций магнитного поля на высоких широтах, для данных исследований были выбраны записи вариаций магнитного поля, полученные на высокоширотной обсерватории Баренцбург о. Шпицберген ( $\Phi_m = 76^\circ N$ ;  $\Lambda_m = 115^\circ$ ;  $LT =$

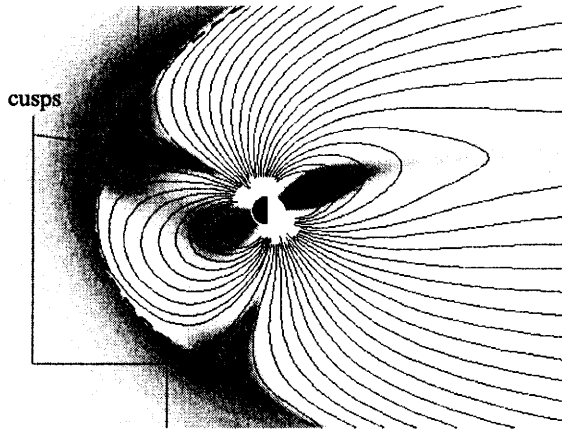


Рис. 1. Магнитосфера Земли (меридиональное сечение). На схеме отмечены дневные полярные каспы (cusps) — области, разделяющие замкнутые и разомкнутые силовые линии

UT + 0100) и предоставленные нам Полярным геофизическим институтом (база данных ПГИ).

## 2. Описание экспериментального материала

Экспериментальные данные представляют собой цифровые записи вариаций  $H$ -,  $D$ - и  $Z$ -компонент магнитного поля Земли с разрешением 10 Гц. Пример типичной записи, получаемой в Баренцбурге за одни сутки, представлен на рис. 2. Характерным частотным диапазоном магнитосферных альвеновских волн является диапазон 0.002–1 Гц, так называемый диапазон ULF (ultra low frequencies) эмиссий, или в русском варианте УНЧ (ультранизкочастотных) излучений. Поэтому для наших исследований был выбран именно этот диапазон частот. Следует отметить, что частотная характеристика приемной аппаратуры позволяет уверенно выделять вариации в выбранном частотном диапазоне (согласно критерию Найквиста, для анализа спектров в диапазоне ULF (УНЧ) достаточно уже оцифровки 2–3 Гц). Таким образом, все выявленные нами закономерности можно будет считать истинными, свойственными изучаемой системе, а не связанными с особенностями регистрирующей аппаратуры.

## 3. Методика анализа данных

Наиболее зарекомендовавшим себя математическим аппаратом для изучения частотных характеристик временных рядов является спектральный анализ. Традиционным методом спектрального анализа является метод PSD (power spectral density).

Для фрактального временного ряда спектр имеет степенную форму:  $S(f) = 1/f^\beta$ , где  $S$  — спектральная плотность мощности на частоте  $f$ . Типичный спектр, полученный PSD-методом, изображен на рис. 3, а в двойном логарифмическом масштабе. Важной скейлинговой характеристикой спектра является его наклон, определяющий спектральный индекс  $\beta$ . Спектральный индекс (или угловой коэффициент наклона спектра) ха-

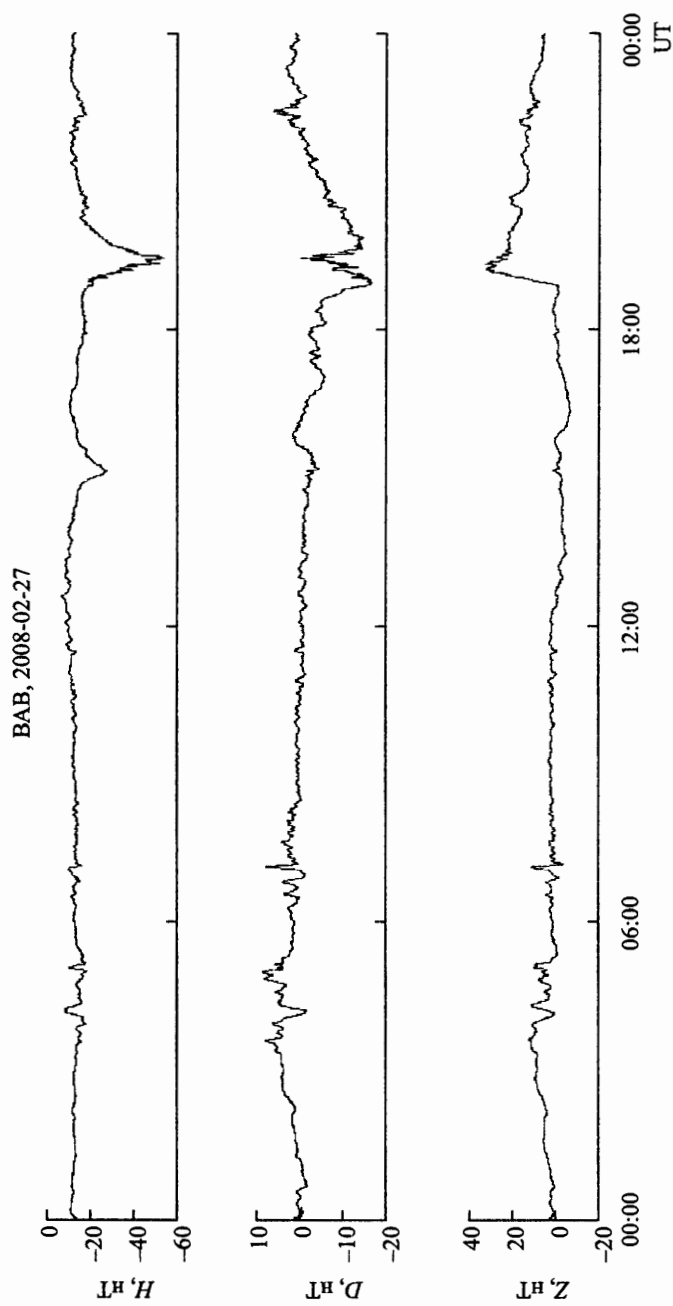


Рис. 2. Пример записи вариаций  $H$ -,  $D$ - и  $Z$ -компонент магнитного поля в обсерватории Баренцбург (ВАН) за одни сутки (27.02.08)

рактически характеризует распределение энергии по частотам, содержащимся в сигнале. Вариации этого параметра свидетельствуют о перераспределении энергии по временным масштабам. Помимо PSD-метода мы используем фрактальный анализ. Типичный результат фрактального анализа, выполненного по методу Хигучи [1], изображен на рис. 3, б. Фрактальная размерность определяется по наклону прямой линии, представляющей зависимость длины кривой, соответствующей временному ряду (или моделирующей временной ряд), от шага ее разбиения. Фрактальная размерность  $D$  и спектральный индекс  $\beta$  связаны линейно формулой Берри:  $\beta = 5 - 2D$  [2] (следует отметить, что формула Берри верна только вблизи  $D = 1.5$  [3]). На практике  $\beta$  определяется через тангенс угла наклона спектра мощности PSD, представленного в log-log- форме (рис. 3, а).

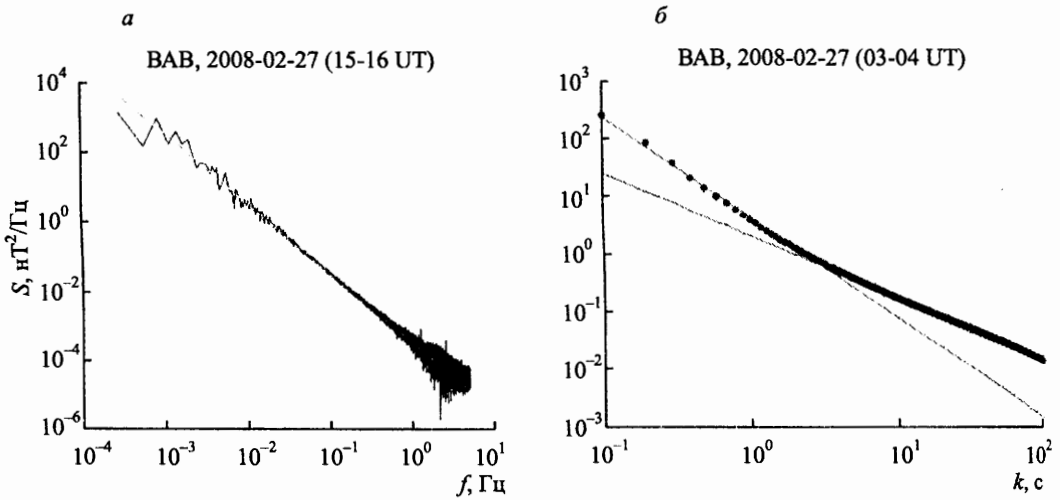


Рис. 3. Пример типичного спектра мощности УНЧ-излучений в двойном логарифмическом масштабе (а). Зависимость длины кривой  $L$ , представляющей  $H$ -компоненту УНЧ-излучений за 1 ч от масштаба  $k$  ее разбиения по методу Хигучи (б)

При расчете фрактальной размерности мы используем метод Хигучи, который имеет значительные преимущества перед другими методами, например, методом Бурлаги и Клайна [4]. Метод Хигучи заключается в следующем. Пусть  $X(n)$  — эквидистантная последовательность, состоящая из  $N$  элементов. Разобьем  $X(n)$  на  $k$  последовательностей:

$$X_m^k = \left\{ X(m), X(m+k), X(m+2k), \dots, X\left(m + \left[\frac{N-m}{k}\right]k\right) \right\}, \quad (1)$$

где  $m = 1, 2 \dots k$ . Найдем длины кривых для полученных последовательностей:

$$L_m(k) = \left( \sum_{i=1}^{\left[\frac{N-m}{k}\right]} |X(m+ik) - X(m+(i-1)k)| \frac{N-1}{\left[\frac{N-m}{k}\right]k} \right) \frac{1}{k}. \quad (2)$$

Тогда полная средняя длина кривой при заданном  $k$

$$\langle L(k) \rangle = \frac{\sum_{m=1}^k L_m(k)}{k}. \quad (3)$$

Если выполняется условие  $\langle L(k) \rangle \sim k^{-D}$ , то последовательность  $X(n)$  фрактальна с фрактальной размерностью  $D$ , которая определяется по наклону зависимости  $\log L$  от  $\log k$  (рис. 3, б). Метод Хигучи применялся последовательно к временным рядам, представляющим вариации горизонтальных ( $H$ ,  $D$ ) и вертикальной ( $Z$ ) компонент геомагнитного поля, зарегистрированных на станции Баренцбург. Суточные данные разбивались на 24 часовых интервала. Фрактальный анализ проводился отдельно для каждого часового интервала, чтобы была возможность исследовать суточный ход в вариациях фрактальной размерности. С учетом 10 Гц оцифровки, каждый анализируемый временной ряд состоял из 36000 отсчетов. Масштаб разбиения  $k$  варьировался от 1 до 1000, что соответствует временным интервалам от 0,1 до 100 с (диапазон УНЧ).

Проанализирован годовой интервал наблюдений (январь–декабрь 2008 г.). Исследована зависимость фрактальной размерности УНЧ-излучений от индексов магнитной активности в разное время суток и получены соответствующие регрессионные соотношения. Выявлены суточные вариации осредненной фрактальной размерности и построен суточный ход корреляции фрактальной размерности и  $K_p$ -индекса. Проведено сравнение с соответствующими корреляционными зависимостями, полученными на более низких широтах.

## 4. Результаты фрактального анализа

Уже первые расчеты фрактальной размерности, выполненные по приведенной схеме, выявили характерную особенность — излом фрактального спектра в окрестности масштабов  $k = 1-10$  с. Подобный излом показан на рис. 3, б на примере анализа  $H$ -компоненты за часовой интервал 03–04 UT (04–05 LT) 27 февраля 2008 г. Отчетливо видны два разных интервала скейлинга (два масштабнo-инвариантных участка). Левый участок соответствует малым временным масштабам (и, соответственно, более высоким частотам), правый — более длинным масштабам и, соответственно, низким частотам. Наклон высокочастотной ветви круче, чем наклон низкочастотной (эффект ножниц), что означает, что фрактальная размерность высокочастотной ветви больше фрактальной размерности ветви низких частот. Поскольку эффект ножниц наблюдается практически постоянно (однако при этом меняется масштаб  $k$ , на котором происходит излом, и варьируются наклоны ветвей фрактального спектра), имеет смысл проводить анализ отдельно для высокочастотной (high frequency hf) и низкочастотной (low frequency lf) ветвей. Такое разделение оказалось правомерным: результаты для обеих ветвей получились разные: в одних случаях — противоположные, а в других — взаимодополняющие. Ниже приводятся наиболее значимые результаты.

### 4.1. Связь фрактальной размерности УНЧ-излучений с уровнем магнитной активности

Результаты линейного регрессионного анализа связи между фрактальной размерностью УНЧ-излучений и планетарным индексом геомагнитной активности ( $K_p$ -индекс) отражены на рис. 4 и 5. Зависимость фрактальной размерности УНЧ-излучений от  $K_p$ -индекса геомагнитной активности на широте полярного каспа оказалась более сложной, чем для низкоширотных станций, результаты для которых представлены в работах [5–7]. Как видно из рис. 4, для низкочастотной ветви корреляция  $D$  с  $K_p$ -индексом практически отсутствует (коэффициент корреляции  $r < 0.4$  для всех трех компонент

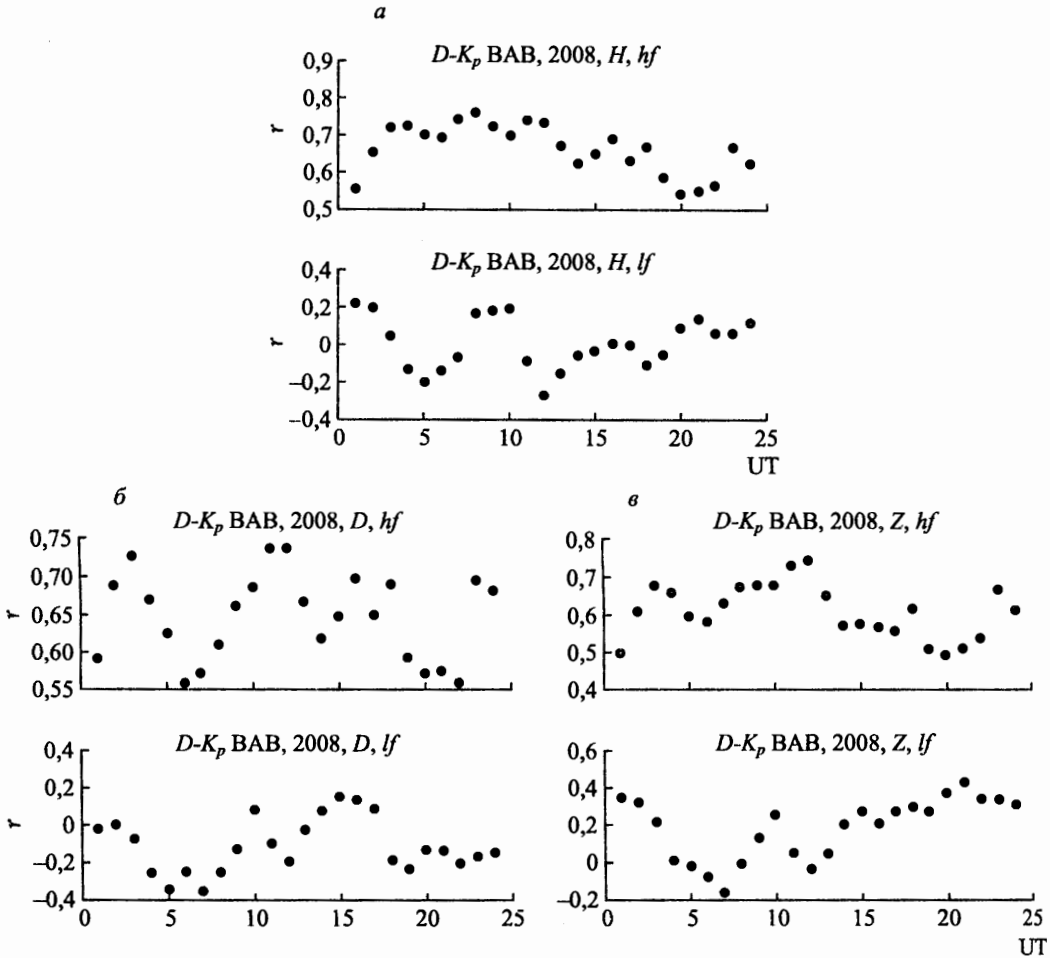


Рис. 4. Суточный ход коэффициента корреляции между фрактальной размерностью  $H$ -(*a*),  $D$ -(*б*) и  $Z$ -(*в*)-компонент УНЧ-излучений и  $K_p$ -индексом геомагнитной активности для двух ветвей фрактального скейлинга

УНЧ-излучений). Для высокочастотной ветви корреляция между  $D$  и  $K_p$  значительно выше — коэффициенты корреляции  $r > 0.5$ , а в отдельные часы суток они достигают  $r = 0.8$ . Это значит, что высокие частоты, присутствующие в вариациях магнитного поля, лучше характеризуют геомагнитную обстановку. Данный вывод также хорошо иллюстрируется регрессионными зависимостями (рис. 5).

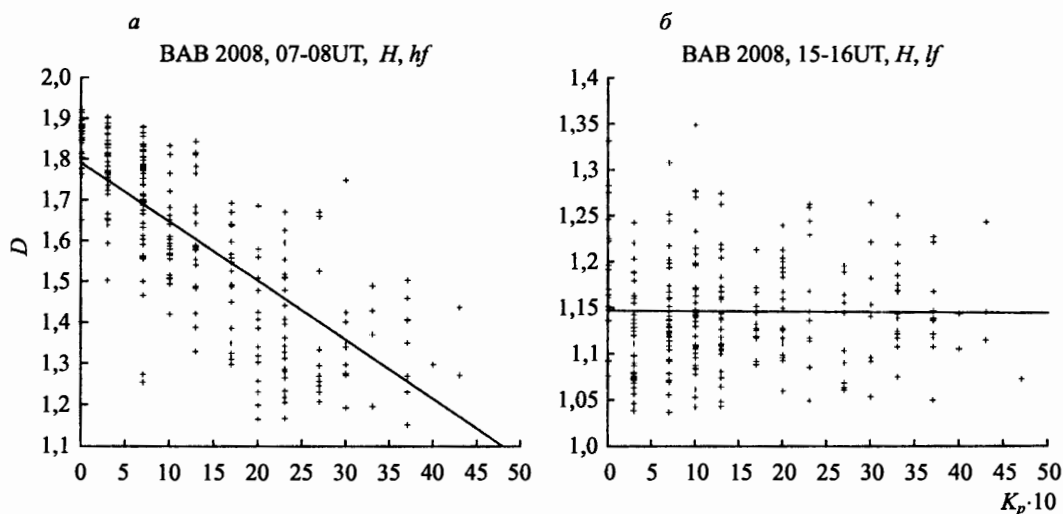


Рис. 5. Пример линейной регрессионной зависимости фрактальной размерности УНЧ-излучений ( $H$ -компонента) от  $K_p$ -индекса для высокочастотной ( $a$ ) и низкочастотной ( $б$ ) ветвей скейлинга

В ходе анализа также была выявлена связь фрактальной размерности с авроральным АУ-индексом, характеризующим интенсивность восточного электроджета. Полученные корреляционные зависимости и их суточный ход представлены на рис. 6.

Как и в случае с планетарной магнитной активностью, здесь также наблюдается хорошая связь для высокочастотной ветви фрактального скейлинга и ее отсутствие для ветви низких частот. Для всех  $H$ -,  $D$ -,  $Z$ -компонент наблюдается максимум корреляции с АУ-индексом в вечернем секторе в районе 16 UT (17 LT). В эти часы коэффициенты корреляции более 0.7. И опять-таки информативной оказывается лишь высокочастотная ветвь рассмотренных вариаций.

#### 4.2. Суточный ход фрактальной размерности

Суточный ход фрактальной размерности представлен на рис. 7. Видно, что высокочастотная и низкочастотная компоненты развиваются в течение суток противофазно. Это означает, что наклоны ветвей скейлинговой зависимости всегда меняются разнонаправленно (эффект ножниц).

### Выводы

Таким образом, рассчитаны фрактальные размерности компонент  $H$ ,  $D$  и  $Z$  УНЧ-излучений, зарегистрированных на высокоширотной станции Баренцбург в течение

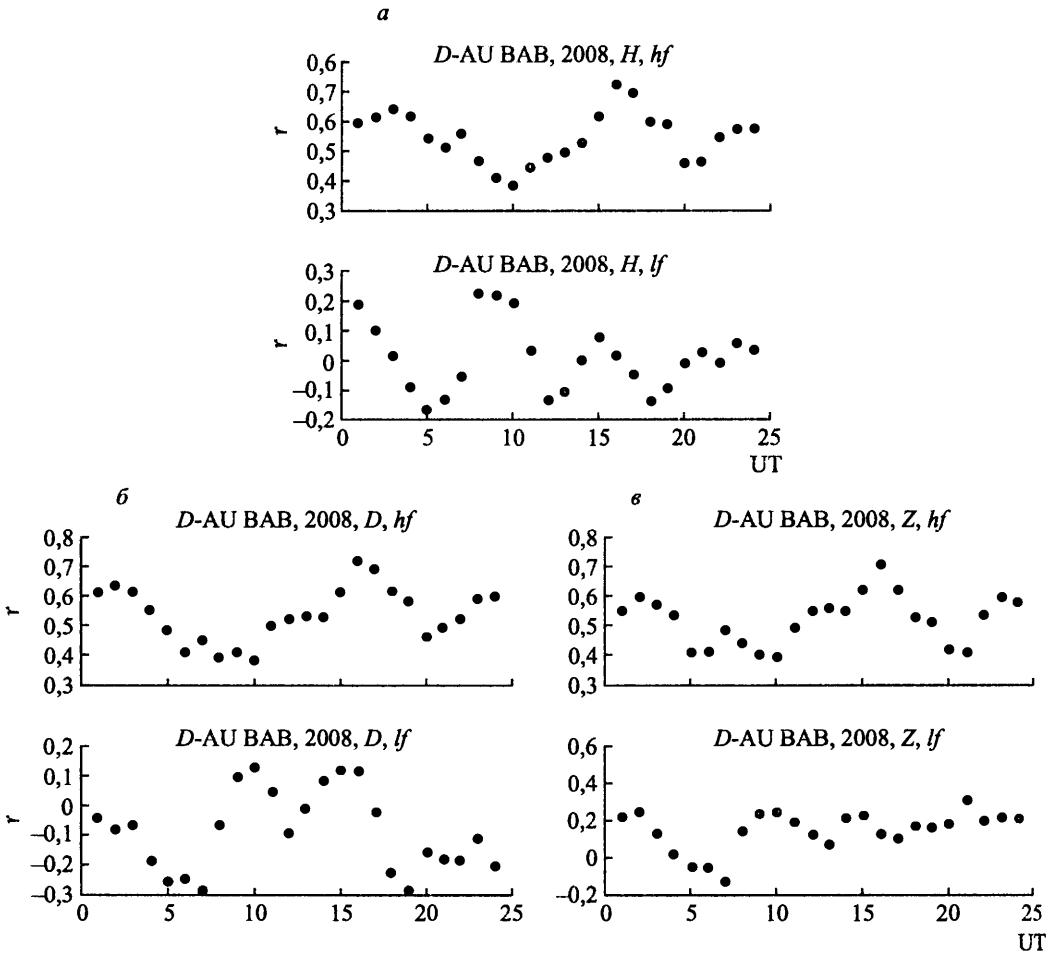


Рис. 6. Зависимость от времени суток коэффициента корреляции между фрактальной размерностью УНЧ-излучений и AU-индексом для  $H$ - (а),  $D$ - (б) и  $Z$ - (в) компонент



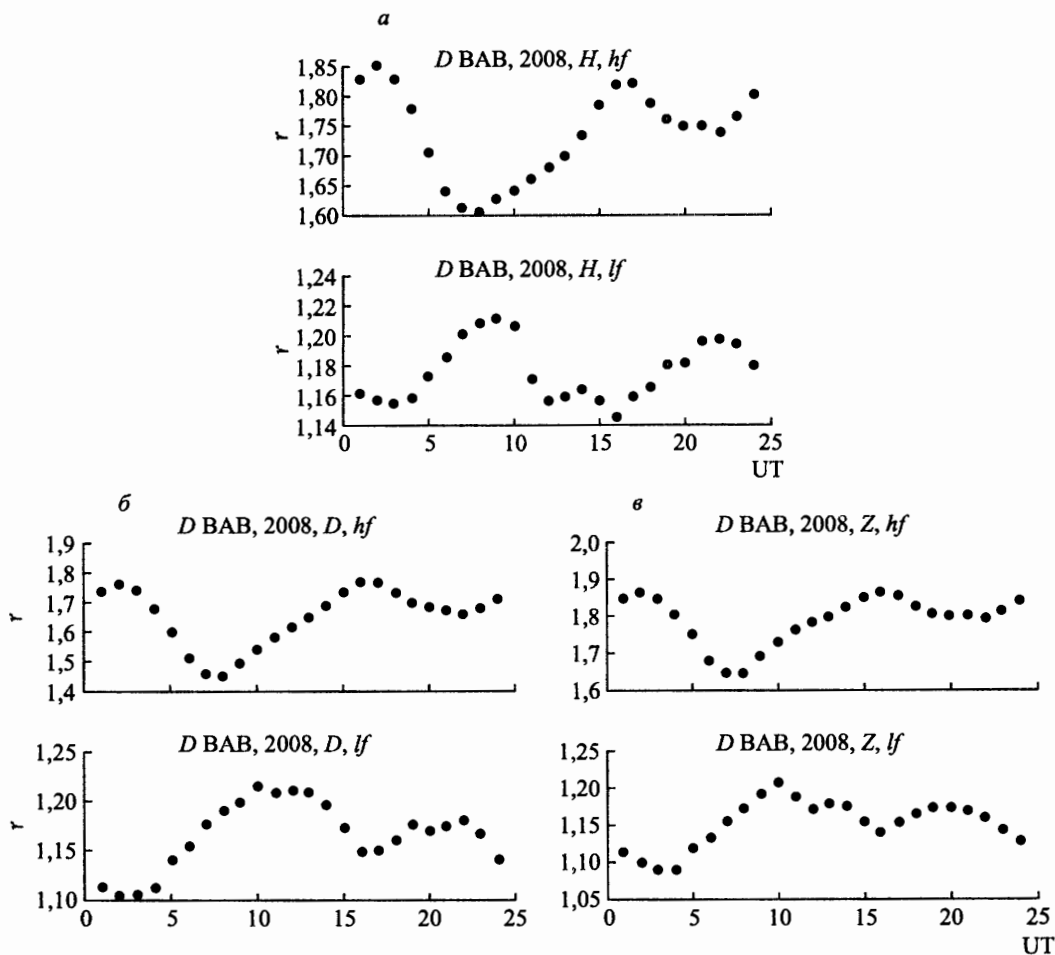


Рис. 7. Суточный ход усредненной фрактальной размерности для H- (а), D- (б) и Z- (в) компонент УНЧ-излучений

2008 г. с учетом излома в ходе фрактальной кривой, вычисленной по методу Хигучи.

Графики корреляций и суточные ходы рассчитывались для обеих ветвей (до излома — ветвь малых масштабов  $k$  — high frequency и после излома — ветвь больших масштабов  $k$  — low frequency).

В суточном ходе фрактальной размерности замечена интересная особенность — суточные ходы этих двух ветвей идут практически в противофазе, что доказывает факт перекачки энергии по частотам. Если в суточном ходе высокочастотная составляющая растет, то низкочастотная падает, и наоборот.

По корреляционной зависимости также наблюдается интересный эффект. С  $K_p$ -индексом обнаруживается хорошая корреляция только для высокочастотной составляющей. Низкочастотная практически не зависит от геомагнитной возмущенности. Также была обнаружена корреляция фрактальной размерности с AU-индексом. Данные корреляционные кривые могут использоваться для выявления времени суток, наиболее пригодного для магнитосферных (сильная связь с геомагнитной активностью) или литосферных (слабая связь с геомагнитной активностью) измерений. Факт сильной связи высокочастотной и слабой связи низкочастотной фрактальной размерности с индексами геомагнитной активности может служить обоснованием для удаления низкочастотных трендов (detrended analysis) из экспериментальных данных без риска потери информации.

Следует отметить, что аналогичный излом в PSD-спектре УНЧ-излучений, правда, в более низкочастотном диапазоне (вблизи частоты  $f \sim 3 \cdot 10^{-2}$  Гц ( $T \sim 30$  с)) обнаружен ранее по материалам дрейфующей станции «Северный Полюс-30» (North Pole-30,  $\Phi_m = 75^\circ N$ ,  $\Lambda_m = 172^\circ$ ) в сеансе апрель 1989 г. [8]. Это означает, что выявленный эффект носит достаточно регулярный характер, и по его динамике (смещению точки излома фрактальной кривой и соотношению высокочастотного и низкочастотного скейлингов) можно судить о структурной (пространственно-временной) перестройке магнитосферы в разных секторах местного времени в зависимости от уровня возмущенности и цикла солнечной активности.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ПГИ и, в частности, Ю. Каткалову за предоставленные данные.

Исследования выполнялись при частичной поддержке гранта Президента РФ НШ-1243.2008.05 и государственного контракта № 02.740.11.0331.

#### Указатель литературы

1. Higuchi T. Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory // Physica D. 1988. V. 31. P. 277–283.
2. Berry M. V. Diffraction // J. Phys. A Math. Gen. 1979. V. 12. P. 207–220.
3. Higuchi T. Relationship between the fractal dimension and the power-law index for a time series: a numerical investigation // Physica D. 1990. V. 46. P. 254–264.
4. Burlaga L. F., Klein L. W. Fractal Structure of the interplanetary magnetic field // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. NA1. P. 347–350.
5. Smirnova N., Hayakawa M., Gotoh K., Volobuev D. Scaling characteristics of the ULF geomagnetic fields at the Guam seismoactive area and their dynamics in relation to the earthquake // Natural Hazards Earth System Sci. 2001. V. 1. P. 119–126.
6. Varlamov A. A., Smirnova N. A. Peculiarities of the ULF emission fractal characteristics obtained at the stations of 210 GM // Proceedings of the 7th International Conference «Prob-

lems of Geocosmos» (St. Petersburg, May 26–30, 2008). Ed. by Troyan V. N., Hayakawa M. and Semenov V. S. SPb., 2008. P. 487–491.

7. *Смирнова Н. А., Абрамова Т. В.* Особенности фрактальных характеристик УНЧ-излучений по материалам обсерватории Гуам // Настоящий сборник. С. 128–139.
8. *Smirnova N. A., Hayakawa M.* Fractal characteristics of the ground-observed ULF emissions in relation to geomagnetic and seismic activities // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2007. V. 69. P. 1833–1841.