

УДК 550.38

ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОСТИ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ НА ОБСЕРВАТОРИИ “БЕЛЬСК”

© 2023 г. С. А. Рябова^{1,2,*}

Представлено академиком РАН В.В. Адушкиным 14.09.2022 г.

Поступило 14.09.2022 г.

После доработки 28.09.2022 г.

Принято к публикации 03.10.2022 г.

Исследование динамики периодических вариаций с периодами от 1 до 27 сут с применением вейвлет-преобразования и анализа скейлинга методом максимумов модулей коэффициентов вейвлет-преобразования выполняется с привлечением результатов инструментальных наблюдений за геомагнитным полем, выполненных на Центральной геофизической обсерватории “Бельск” в 2008 г. и 2018 г. (низкая солнечная активность) и в 2014 г. (высокая солнечная активность). Установлено изменение интенсивности периодических вариаций. Показан близкий к монофрактальному характер суточных геомагнитных вариаций. 27-суточная вариация и ее гармоники имеют более высокую степень мультифрактальности во время максимума солнечной активности по сравнению с минимумом солнечной активности.

Ключевые слова: магнитное поле Земли, вариации, фрактальность, вейвлет-преобразование, скейлинг, солнечная активность

DOI: 10.31857/S2686739722601892, **EDN:** GGKHNH

Геомагнитное поле, формирующееся в результате сложных конвективных движений и магнитогидродинамических процессов в жидком ядре Земли, не является постоянным и подвержено ряду воздействий как экзогенного, так и эндогенного происхождения [1]. Все геомагнитные вариации являются суммой магнитных полей от различных источников, таких как медленно меняющееся главное поле; регулярные суточные вариации поля, магнитные поля вихревых токов, наведенных в океане, проводящей земле; быстро меняющиеся поля магнитных бурь [2].

Вариации геомагнитного поля имеют сложную нерегулярную структуру и содержат разномасштабные локальные особенности [3, 4].

При понимании характеристик геомагнитных вариаций одним из анализируемых признаков являются ее фрактальные свойства [5, 6], представляющие собой характеристики самоподобия, которыми обладает конкретный объект при воздействии на него факторов различной степени [7].

Теория фракталов и мультифракталов в настоящее время широко используется для описания свойств самоподобия и сложного скейлинга геофизических данных. Что касается геомагнитного поля, то в известных работах были изучены изменения характеристик скейлинга лишь в период сильных возмущений (больших магнитных бурь).

В настоящей работе исследуется динамика периодических вариаций с периодами от 1 до 27 сут с применением вейвлет-преобразования и анализа скейлинга методом максимумов модулей коэффициентов вейвлет-преобразования.

В качестве исходных данных используются результаты инструментальных наблюдений за геомагнитным полем, выполненных на Центральной геофизической обсерватории “Бельск” Геофизического института Польской академии наук (географические координаты: 51.837° с.ш., 20.792° в.д.).

Регистрация вариаций трех компонент геомагнитного поля на обсерватории “Бельск” выполняется с помощью торсионного кварцевого вариометра системы В.Н. Боброва. Этот магнитометр имеет хорошую долгосрочную стабильность базовых значений (несколько нТл в год) и разрешение около 0.01 нТл. Температурный коэффициент вариометра составляет 0.2 нТл/К. Данные регистрации компонент геомагнитного поля на обсерватории “Бельск” размещены на сайте

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта
Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: riabovasa@mail.ru

Международной сети INTERMAGNET (<http://www.intermagnet.org>).

Первичная обработка временных рядов компонент магнитного поля на обсерватории сводилась к редакции данных, выявлению технических сбоев, восстановлению пропусков методом линейной интерполяции и методом с использованием пары преобразований Фурье [8]. В результате обработки был сформирован банк данных, который содержит временные ряды с дискретизацией 1 ч.

В настоящей работе с целью исследования динамики периодичностей использовалось непрерывное вейвлет-преобразование [9]. В качестве материнского вейвлета был выбран комплексный вейвлет Морле [10] из-за близости его формы к форме анализируемых в работе временных рядов, а также из-за возможности разделения фазовой и амплитудной компонент, что существенно облегчает анализ полученных результатов. Результатом вейвлет-преобразования одномерного временного ряда является двумерный массив значений коэффициентов. Визуализация вейвлет-спектров (амплитуды и фазы) осуществлялась с помощью изображения значений вейвлет-преобразования разными цветами, по осям откладывались время и период, что позволяет увидеть изменение во времени временного ряда на разных масштабах. При выполнении вейвлет-преобразования конечного временного ряда возникают ошибки в расчете вейвлет-спектров на концах временного ряда. Для выделения области влияния краевых эффектов строился конус влияния (область, в которой автокорреляции значений вейвлет-преобразования увеличиваются в e раз на каждом масштабе [11]).

Для того, чтобы проверить коэффициенты вейвлет-разложения на точность, в настоящей работе проводилась реконструкция исходного ряда [12]. Отличие восстановленного по коэффициентам вейвлет-разложения от оригинального составило не более 15%, что свидетельствует о корректности применения вейвлет-анализа.

С целью анализа скейлинга применялся метод максимума модуля вейвлет-преобразования, основанный на определении для каждого масштабного коэффициента локального максимума амплитуды (модуль) коэффициентов вейвлет-преобразования как функции от времени. Полученные таким способом кривые, линии локальных максимумов (скелет), содержат информацию об иерархической структуре сингулярностей исследуемого временного ряда. По коэффициентам вейвлет-разложения вычислялась “статистическая сумма”, а по ней находились параметр Херста (показатель Гельдера), спектр скейлинговых экспонент и спектр сингулярностей. Подробное описание метода приведено в статье [13]. Монофрактальным временным рядом считается такой

ряд, для которого показатель Херста постоянен, спектр скейлинговой экспоненты представляет собой линейную зависимость. Наоборот, нелинейная кривая является показателем функций, обладающих мультифрактальными свойствами, при этом показатель Херста является флуктуирующей величиной. Ширина спектра сингулярности определяет степень мультифрактальности временного ряда, чем шире (уже) спектр сингулярности, тем более сильный (более слабый) мультифрактальный характер имеет временной ряд.

Из свойств преобразования Лежандра:

$$\begin{cases} q = dD/dh \\ \tau(q) = q\alpha - D(h) \end{cases}$$

можно получить, что однородным монофрактальным временным рядом будет такой ряд, для которого показатель Херста $h = \partial\tau/\partial q$ постоянен и спектр $\tau(q)$ является линейной функцией q . Наоборот, нелинейная кривая $\tau(q)$ является показателем функций, обладающих мультифрактальными свойствами, при этом показатель Херста $h(x)$ является флуктуирующей величиной. Спектр сингулярностей $D(h)$ мультифрактала отображает его колоколообразная форма, которая характеризует прерывистые флуктуации, соответствующие значениям показателя Херста, охватывающим весь интервал $[h_{\min}, h_{\max}]$, где $h_{\min}$ и $h_{\max}$ являются показателями Херста минимальной и максимальной сингулярности соответственно.

Информацию о динамике периодических вариаций геомагнитного поля дают результаты вейвлет-анализа, представленные на рис. 1. Из представленных вейвлет-спектров видно, что выделяется несколько хорошо выраженных периодичностей в вариациях магнитного поля Земли. Вейвлет-спектры демонстрируют наличие вариаций с периодами, равными примерно 27 сут, периодичностей с периодами ~6–7, ~8–9 и ~13–14 сут, а также суточной вариации. Картина вейвлет-спектров коэффициентов вейвлет-преобразования (рис. 1) свидетельствует о подверженности 27-суточной периодичности, ее гармоник и суточной вариации влиянию разномасштабных по времени процессов и об изменчивости во времени интенсивности периодических вариаций.

Данные, приведенные на рис. 1, демонстрируют иерархическую структуру геомагнитных вариаций. При этом хорошо просматриваются линии локальных максимумов. Дробление масштаба отмечается появлением в распределении коэффициентов характерных “вилочек” — раздвоением локальных максимумов: каждая из линий, характеризующих положение локальных максимумов, раздваивается, расходясь на два независимых локальных максимума. Это повторяется с увеличением масштаба, свидетельствуя о самоподобии

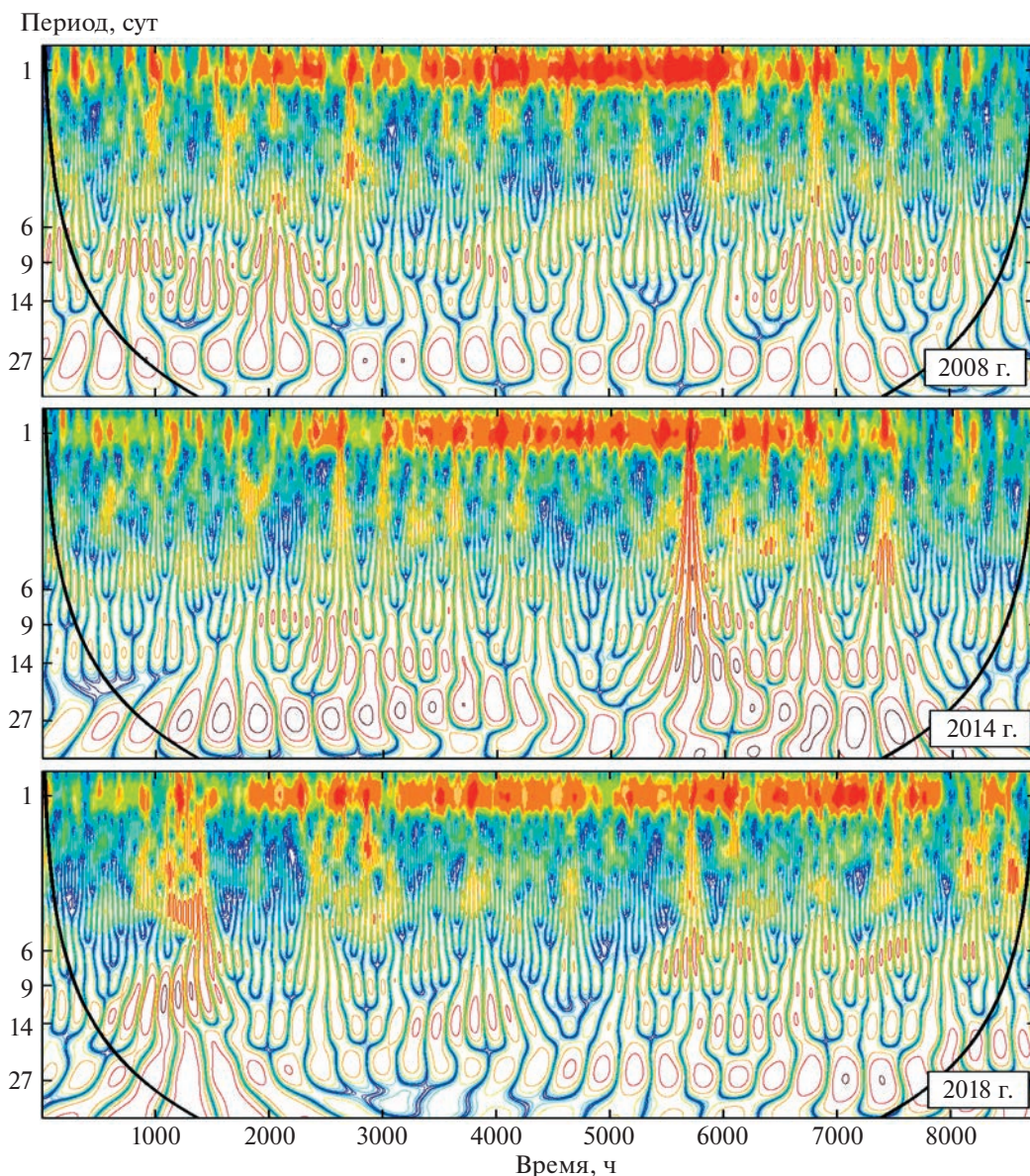


Рис. 1. Вейвлет-спектр геомагнитных вариаций, зарегистрированных на обсерватории “Бельск” в 2008 и 2018 г. (низкая солнечная активность) и в 2014 г. (высокая солнечная активность); черной линией показан конус влияния.

процесса [14]. Выполненный анализ самоподобных свойств геомагнитного поля на обсерватории “Бельск” на основе картины вейвлет-коэффициентов носит, в основном, качественный характер.

В настоящей работе дальнейший анализ скейлинга проводился на основе метода максимумов модулей коэффициентов вейвлет-преобразования.

В качестве примера рассмотрим результаты анализа для вариаций геомагнитного поля в магнитоспокойные дни за 2008 г. (год, характеризующийся самой низкой геомагнитной активностью). На рис. 2 представлена зависимость статистических сумм $Z_q(s)$ от масштаба декомпозиции s

при различных значениях моментов q в двойных логарифмических координатах, аппроксимация которой линейной зависимостью дает значение показателя Херста [15]: $D(h) = 1.76$. Значение $0.24 < 0.5$ говорит о антиперсистентности геомагнитных вариаций в 2008 г. В целом динамику магнитного поля Земли можно описать как рост после падения и падение после роста.

Более детальную информацию о динамике геомагнитного поля дает метод максимумов модулей коэффициентов вейвлет-преобразования, примененный не ко всему временному ряду, а к отфильтрованным данным в полосе частот, соответствующей суточной вариации и 27-суточной

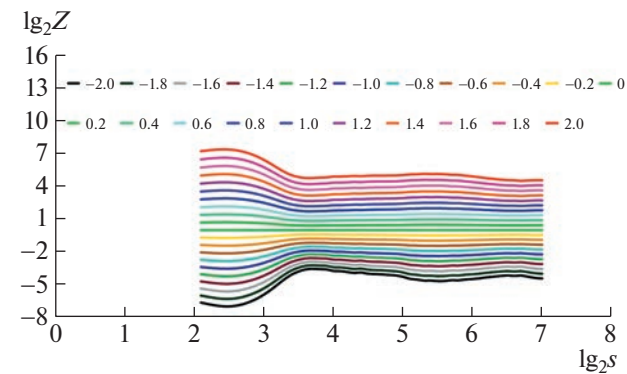


Рис. 2. Статистическая сумма $Zq(s)$ в зависимости от масштаба декомпозиции s при различных значениях моментов.

периодичности и ее гармоникам. В качестве примера на рис. 3 представлены скейлинговая функция и мультифрактальный спектр для суточной вариации. Так как монофрактал имеет узкий спектр фрактальных размерностей, а мультифрактал характеризуется уширением данного спектра, ширина спектра $\Delta h \approx 0.17$, приведенного на рис. 3 б, свидетельствует о почти монофрактальном характере суточной вариации магнитного поля Земли. Это подтверждает и практически линейный вид кривой скейлинговой функции $\tau(q)$ (рис. 3 а). Анализ полученных результатов свидетельствует в пользу предположения о проявлении свойств монофрактальности суточной вариации геомагнитного поля, причем вне зависимости от солнечной активности (табл. 1).

В целом вариации геомагнитного поля не обладают простым монофрактальным поведением скейлинга, которое можно описать одной скейлинговой экспонентой, а характеризуются более сложным поведением скейлинга, которое можно описать только несколькими скейлинговыми экспонентами (мультифрактальное поведение). В отличие от суточной вариации 27-суточная вариация и ее гармоники показывают более высокую степень мультифрактальности во время максимума солнечной активности по сравнению с минимумом солнечной активности (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение ширины мультифрактального спектра для минимума солнечной активности (2008 и 2018 г.) и максимума солнечной активности (2014 г.) на обсерватории “Бельск”

Период (сут)	2008 г.	2014 г.	2018 г.
1	0.17	0.19	0.18
9	1.09	1.21	1.08
13.5	0.77	0.90	0.78
27	0.87	0.92	0.86

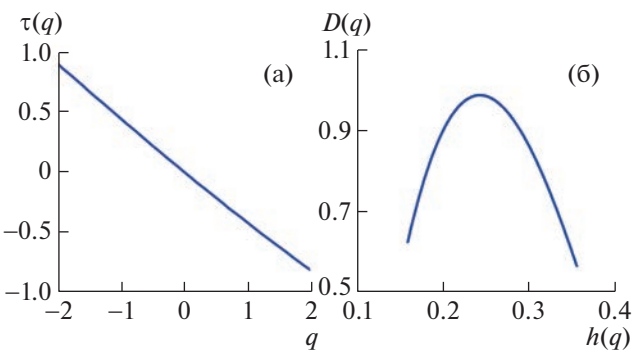


Рис. 3. Скейлинговая функция $\tau(q)$ (а) и спектр сингулярностей $D(h)$ (б) для суточных вариаций геомагнитного поля.

Установленные в работе особенности скейлинга вариаций геомагнитного поля подтверждают исследования последних лет, показавшие, что в целом, вариации геомагнитного поля формируются под воздействием разномасштабных по времени процессов, т.е. имеют мультифрактальный характер [16, 17]. В отсутствие возмущений суточные геомагнитные вариации характеризуются почти монофрактальным поведением, а во время возмущенных периодов наблюдается нестационарность [18–20].

Итак, проведенные в работе расчеты показали, что интенсивность периодических вариаций (27-суточной периодичности, ее гармоник и суточной вариации) магнитного поля, зарегистрированных на Центральной геофизической обсерватории “Бельск”, не постоянна во времени. На основе максимумов модулей коэффициентов вейвлет-преобразования установлен почти монофрактальный характер суточной геомагнитной вариации, причем он не зависит от солнечной активности. При исследовании 27-суточной вариации и ее гармоник выявлена более высокая степень мультифрактальности во время максимума солнечной активности по сравнению с минимумом солнечной активности.

Полученные в настоящей работе данные будут актуальны при описании и моделировании динамики магнитного поля Земли.

Установленные на обсерватории “Бельск” особенности геомагнитных вариаций позволяют предполагать, что они, вероятнее всего, характерны для средних широт. Подтверждение этого предположения требует проведения дальнейших исследований. Кроме того, увеличение длины временных рядов также может выявить дополнительные особенности периодических вариаций геомагнитного поля.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИДГ РАН № 1220329000185-5 “Проявление процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях” и государственного задания ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rikitake T.* Electromagnetism and the Earth's interior / Amsterdam-London-New York: Elsevier, 2012. 320 p.
2. *Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А.* Геомагнитные эффекты природных и техногенных процессов. М.: ГЕОС, 2021. 264 с.
3. *Рябова С.А., Спивак А.А.* Особенности геомагнитных вариаций на средних широтах Восточно-Европейской платформы // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57. № 2. С. 217–225. <https://doi.org/10.7868/S0016794017020122>
4. *Рябова С.А.* Особенности вековой вариации геомагнитного поля на среднеширотных обсерваториях “Михнево” и “Бельск” // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 1. С. 125–136. <https://doi.org/10.1134/S0016794018060147>
5. *Bolzan M.J.A., Rosa R.R., Sahai Y.* Multifractal analysis of low-latitude geomagnetic fluctuations // *Annales Geophysicae*. 2009. V. 27. P. 569–576. <https://doi.org/10.5194/angeo-27-569-2009>
6. *Riabova S.* Application of the wavelet transform modulus maxima method to analyze the multifractal behavior of geomagnetic variations // 19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2019. Conference proceedings. 2019. V. 19. Informatics, geoinformatics and remote sensing. No. 2.1. Informatics Geoinformatics. P. 769–775.
7. *Falconer K.* Fractals: A very short introduction, 1st ed. / Oxford, UK: Oxford University Press, 2013. 152 p.
8. *Рябова С.А., Спивак А.А.* Геомагнитные вариации в приземной зоне Земли / М.: Графитекс, 2019. 150 с.
9. *Витязев В.В.* Вейвлет-анализ временных рядов / СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2001. 58 с.
10. *Foufoula-Georgiou E., Kumar P.* Wavelets in geophysics / New York: Academic Press, 1995. 373 p.
11. *Torrence C., Compo G.P.* A practical guide to wavelet analysis. // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1998. V. 79. P. 605–618.
12. *Meyer Y.* Wavelets: Algorithms and applications / Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1993. 134 p.
13. *Riabova S.* Application of wavelet analysis to the analysis of geomagnetic field variations // *Journal of Physics Conference Series*. 2018. 1141:012146. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1141/1/012146>
14. *Астафьева Н.М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физических наук*. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.
15. *Muzy J.F., Bacry E., Arneodo A.* The multifractal formalism revisited with wavelets // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 1994. V. 4. P. 245–302.
16. *Rifqi F.N., Hamid N.S.A., Rabi A.B., Yoshikawa A.* Identification of fractal properties in geomagnetic data of Southeast Asian region during various solar activity levels // *Universe*. 2021. V. 7. <https://doi.org/10.3390/universe7070248>
17. *Toledo B., Medina P., Blunier S., Rogan J., Stepanova M., Valdivia J.A.* Multifractal characteristics of geomagnetic field fluctuations for the Northern and Southern Hemispheres at Swarm altitude // *Entropy*. 2021. V. 23. <https://doi.org/10.3390/e23050558>
18. *Wanliss J.A.* Fractal properties of SYM-H during quiet and active times // *Journal of Geophysical Research*. 2005. V. 110. A03202. <https://doi.org/10.1029/2004JA010544>
19. *Wei H.L., Billings S.A., Balikhin M.* Analysis of the geomagnetic activity of the Dst index and self-affine fractals using wavelet transforms // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2004. V. 11. P. 303–312.
20. *Zaourar N., Hamoudi M., Manda G., Balasis G., Holschneider M.* Wavelet-based multiscale analysis of geomagnetic disturbance // *Earth, Planets and Space*. 2013. V. 65. P. 1525–1540.

STUDY OF THE MULTIFRACTALITY OF GEOMAGNETIC VARIATIONS AT THE BELSK OBSERVATORY

S. A. Riabova^{a,b,#}

^a *Schmidt United Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b *Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: riabovasa@mail.ru*

Presented by Academician of the RAS V.V. Adushkin September 14, 2022

The study of the dynamics of periodic variations with periods from 1 to 27 days using the wavelet transform and scaling analysis by the method of maxima of the modules of the wavelet transform coefficients is carried out using the results of instrumental observations of the geomagnetic field performed at the Belsk Central Geophysical Observatory in 2008 and 2018 (low solar activity) and in 2014 (high solar activity). A change in the intensity of periodic variations is established. Close to monofractal nature of diurnal geomagnetic variations is shown. The 27-day variation and its harmonics have a higher degree of multifractality during solar activity maximum compared to solar activity minimum.

Keywords: Earth's magnetic field, variations, fractality, wavelet transform, scaling, solar activity