



Анализ вариаций геомагнитного поля по результатам интерактивной системы «Аврора»

Ю. А. Полозов*, О. В. Мандрикова

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, Паратунка, ул. Мирная 7, Россия

Аннотация. В статье описана геомагнитная компонента системы «Аврора», выполняющая оценку состояния магнитного поля Земли по данным станций «Паратунка» (Камчатский край, 52.97° N, 158.24° E) и «Хабаровск» (47.61° N, 134.69° E). Данные получены путем прямых измерений на магнитных обсерваториях. Геомагнитная компонента системы «Аврора» разработана в ИКИР ДВО РАН. Функции данной компоненты базируются на новых подходах и методах, построенных коллективом ученых лаборатории Системного анализа. Разработанные методы основаны на синтезе элементов теории вейвлет-преобразования с методами теории вероятностей и математической статистики. Система обеспечивает комплексную оценку состояния магнитного поля Земли в возмущенные и спокойные периоды и дает возможность изучать пространственно-временные особенности и динамику процессов в магнитосфере Земли. Заключение о состоянии магнитного поля формируется в оперативном режиме. Анализ работы системы в периоды рассмотренных в статье событий подтвердил возможность возникновения слабых короткопериодных синхронных геомагнитных возмущений, предшествующих началу магнитных бурь. Рассмотренная в статье геомагнитная компонента дополняет комплексный анализ данных геофизического мониторинга в системе и является важнейшей ее частью. Результаты геомагнитной компоненты системы «Аврора» могут быть использованы в качестве дополнительного инструмента в задачах оперативного прогноза космической погоды.

Ключевые слова: геомагнитное поле, анализ данных, вейвлеты, магнитные бури

Получение: 28.10.2024; Исправление: 21.11.2024; Принятие: 25.11.2024; Публикация онлайн: 28.11.2024

Для цитирования. Полозов Ю. А., Мандрикова О. В. Анализ вариаций геомагнитного поля по результатам интерактивной системы «Аврора» // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2024. Т. 49. № 4. С. 112-124. EBN: IVINBR. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-112-124>.

Финансирование. Работа выполнена за счет Гос. задания ИКИР ДВО РАН (рег. № темы 124012300245-2).

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

*Корреспонденция: ✉ E-mail: polozov@ikir.ru

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License



© Полозов Ю. А., Мандрикова О. В., 2024

© ИКИР ДВО РАН, 2024 (оригинал-макет, дизайн, составление)



Analysis of Geomagnetic Field Variations Based on the Results of the «Aurora» Interactive System

*Y. A. Polozov**, *O. V. Mandrikova*

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Russia,
684034, Paratunka, Mirnay St. 7

Abstract. This paper describes the geomagnetic component of the Aurora system, which assesses the state of the Earth's magnetic field using data from the Paratunka (Kamchatka Krai, 52.97° N, 158.24° E) and Khabarovsk (47.61° N, 134.69° E) stations. The data were obtained by direct measurements at magnetic observatories. The geomagnetic component of the Aurora system was developed at IKIR FEB RAS. The functions of this component are based on new approaches and methods developed by the team of scientists of the System Analysis Laboratory. The developed methods are based on the synthesis of elements of wavelet transform theory with methods of probability theory and mathematical statistics. The system provides a comprehensive assessment of the state of the Earth's magnetic field in disturbed and calm periods and enables the study of spatial and temporal features and dynamics of processes in the Earth's magnetosphere. The conclusion about the state of the magnetic field is formed in the operational mode. The analysis of the system operation during the periods of the events considered in the article confirmed the possibility of weak short-period synchronous geomagnetic disturbances preceding the onset of magnetic storms. The geomagnetic component considered in the article complements the complex analysis of geophysical monitoring data in the system. The results of the geomagnetic component of the Aurora system can be used as an additional tool in the tasks of operational space weather forecasting.

Key words: geomagnetic field, data analysis, wavelets, magnetic storms.

Received: 28.10.2024; Revised: 21.11.2024; Accepted: 25.11.2024; First online: 28.11.2024

For citation. Polozov Y. A., Mandrikova O. V. Analysis of geomagnetic field variations based on the results of the «Aurora» interactive system. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2024, 49: 4, 112-124. EDN: IVINBR. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-112-124>.

Funding. The work was supported by IKIR FEB RAS State Task (subject registration No. 124012300245-2).

Competing interests. The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

*Correspondence:  E-mail: polozov@ikir.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Polozov Y. A., Mandrikova O. V., 2024

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2024 (original layout, design, compilation)



Введение

Регистрируемые геофизические параметры содержат важную информацию о состоянии природной среды. Анализ данных околоземного космического пространства (параметры состояния межпланетного пространства, магнитосферы, ионосферы и др.), являющихся объектом этого исследования, позволяет получить важную информацию о состоянии космической погоды [1–3]. Своевременная обработка и анализ поступающих данных измерений дает возможность оперативно выявлять аномальные процессы, давать заключение о состоянии околоземного пространства и формировать прогноз ожидаемых явлений.

В статье описаны функции геомагнитной компоненты системы «Аврора» (<http://lsaoperanalysis.ikir.ru:9180/lsaoperanalysis.html>) и приведены результаты её функционирования в периоды магнитных бурь. Геомагнитная компонента системы «Аврора» разработана в ИКИР ДВО РАН. Функции данной компоненты базируются на новых подходах и методах, построенных коллективом ученых лаборатории Системного анализа [4, 5]. Разработанные методы основаны на синтезе элементов теории вейвлет-преобразования с методами теории вероятностей и математической статистики. Вейвлет-преобразование позволяет исследовать нестационарные изменения в геофизических данных и широко применяется в области физики и, в частности, в геофизике. Использование вейвлетов обеспечивает возможность обнаружения и анализа короткопериодных вариаций, возникающих в данных в периоды повышенной солнечной активности и магнитных бурь [6–10].

Предметом данного исследования являются вариации магнитного поля Земли, получаемые путем прямых измерений на магнитных обсерваториях (станция «Паратунка» и станция Хабаровск, ИКИР ДВО РАН) [11]. Архивные и текущие массивы геомагнитных данных, открытый доступ к которым организован в системе «Аврора», дают возможность изучать пространственно-временные особенности и динамику процессов в магнитосфере Земли [12, 13]. В статье приведены примеры регистрируемых вариаций геомагнитного поля в спокойные и возмущенные периоды. Показаны выделенные системой «Аврора» короткопериодные синхронные возмущения на станциях «Паратунка» и «Хабаровск» накануне и во время магнитных бурь. Рассмотренная в статье геомагнитная компонента дополняет комплексный анализ данных геофизического мониторинга в системе и является важнейшей её частью.

Описание функций геомагнитной компоненты

Программные модули геомагнитной компоненты выполняют обработку минутных данных горизонтальной компоненты (Н-компоненты) напряженности магнитного поля Земли. Функции системы обеспечивают оценку интенсивности геомагнитных возмущений и выполняют выделение периодов слабой и сильной геомагнитной активности. Данные функции описаны ниже.

Оценка интенсивности геомагнитных возмущений выполняется на основе применения непрерывного вейвлет-преобразования. Непрерывное вейвлет-преобразование данных, определяется формулой [14, 15]

$$W_{\Psi}f_{b,a} := |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (1)$$

где a — масштаб Ψ — базисный вейвлет.

Замечание. Преобразование (1) выполняется численно по алгоритму, аналогичному алгоритму, реализованному в системе Matlab. Перед выполнением преобразования (1) для уменьшения влияния краевого эффекта временной ряд данных $f_N = \{f_n\}_{n=0, \overline{N}}$ дополняется значениями по правилу:

$$f_{N+2L} = \{f_L, \dots, f_2, f_1, f_0, \dots, f_N, f_{N-1}, f_{N-2}, \dots, f_{N-L}\},$$

где $L = \Omega * a_{\max}$, $(2\Omega + 1)$ — носитель вейвлета (см. (1)), a_{\max} — наибольший масштаб вейвлет-преобразования. После выполнения вейвлет-преобразования коэффициенты $W_{\Psi}f_{b,a}$, соответствующие дополненным значениям, удаляются. Интенсивность геомагнитных возмущений в момент времени $t = b$ на анализируемом масштабе a оценивается на основе величины:

$$e_{b,a} = |(W_{\Psi}f)(b, a)|$$

Интенсивность возмущений поля в $t = b$ оценивается по формуле:

$$E_b = \sum_a e_{b,a}.$$

В обработке используется базисный вейвлет Добеши порядка 3 (см. рис. 1), имеющий следующие свойства: ортогональный, обладает компактным носителем.

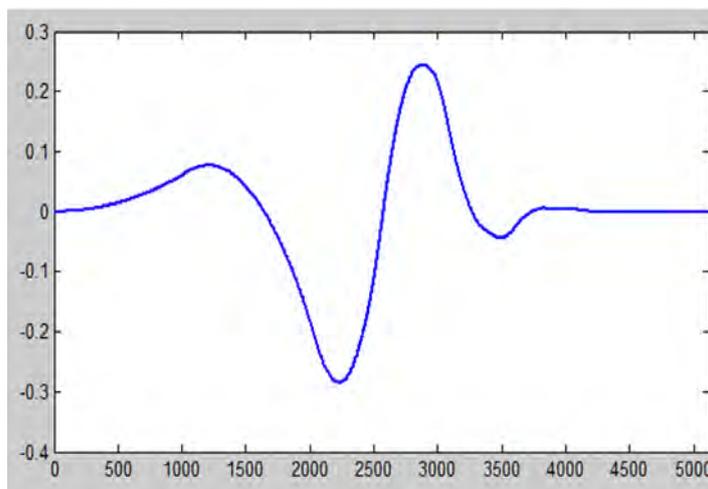


Рис. 1. Вейвлет Добеши порядка 3.
[Figure 1. Dobeshi wavelet of order 3.]

Ортогональность вейвлета обеспечивает численную устойчивость разложений данных, компактный носитель вейвлета позволяет минимизировать погрешности при аппроксимации данных (см. *Определение*).

Определение [14]. Если базисный вейвлет Ψ имеет компактный носитель, равный $[-\Omega, \Omega]$, то носитель $\Psi_{b,a}$ на масштабе a равен $[b - \Omega a, b + \Omega a]$. Точка ξ содержится в носителе $\Psi_{b,a}$, если $|b - \xi| \leq \Omega a$.

Выделение периодов слабой и сильной геомагнитной активности выполняется на каждом масштабе a непрерывного вейвлет-преобразования на основе применения следующих пороговых функций:

$$P_{T_{a,1}}(e_{b,a}) = \begin{cases} 0, & \text{если } e_{b,a} < T_{a,1} \\ e_{b,a}, & \text{если } e_{b,a} \geq T_{a,1} \end{cases}, \quad P_{T_{a,2}}(e_{b,a}) = \begin{cases} 0, & \text{если } e_{b,a} < T_{a,2} \\ e_{b,a}, & \text{если } e_{b,a} \geq T_{a,2} \end{cases},$$

где пороги $T_{a,1}$ на каждом масштабе выделяют слабые и сильные возмущения, а пороги значения $T_{a,2}$ на каждом масштабе выделяют сильные возмущения.

Оценка порогов $T_{a,1}$ и $T_{a,2}$ выполнялась путем минимизации апостериорного риска. Экспериментальной базой в оценках являлись геомагнитные данные обсерватории «Паратунка» (Камчатский край) за период 2002-2010 г. Путем обработки «спокойных» дней (трехчасовые значения К-индекса которых не превышали значения 2, а суммарные суточные не превышали значения 8) на каждом масштабе a были оценены пороговые значения $T_{a,1}$. На основе обработки «слабовозмущенных» дней (трехчасовые значения К-индекса которых не превышали значения 4, а суммарные суточные не превышали значения 18) на каждом масштабе a были оценены пороговые значения $T_{a,2}$. Результаты расчета $T_{a,1}$ и $T_{a,2}$ для рассматриваемых масштабов показаны на рис. 2.

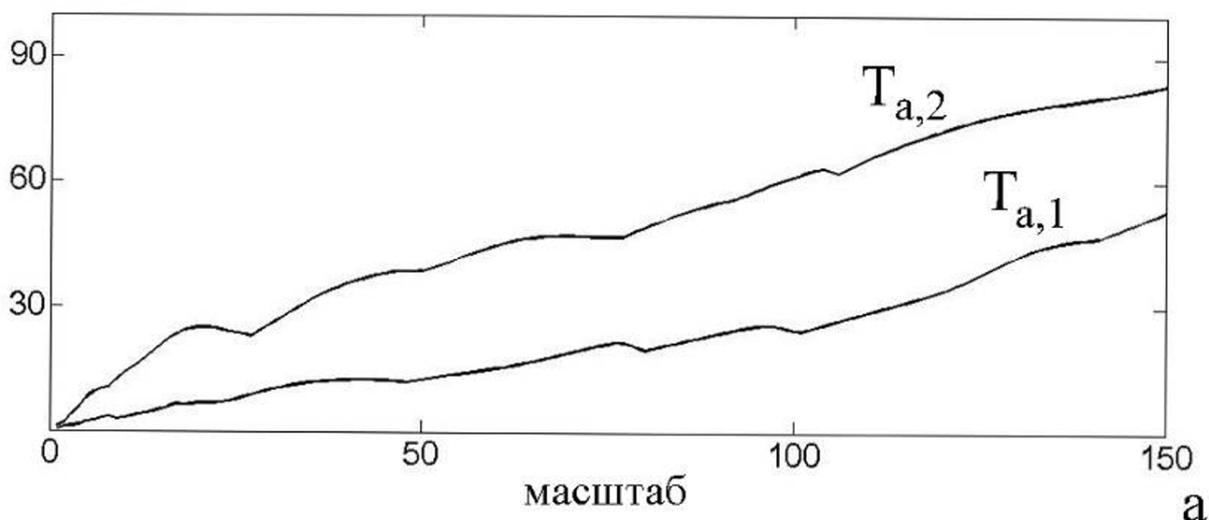


Рис. 2. Результаты расчета пороговых значений $T_{a,1}$ и $T_{a,2}$. На оси ox отмечены масштабы a , на оси oy — значения $T_{a,1}$ и $T_{a,2}$.

[Figure 2. Calculation results for threshold values $T_{a,1}$ and $T_{a,2}$. On the ox axis are the scales of a , on the oy axis are the values of $T_{a,1}$ и $T_{a,2}$.]

Общая схема оценки состояния геомагнитных данных для станций «Паратунка» и «Хабаровск» показана на рис. 3.

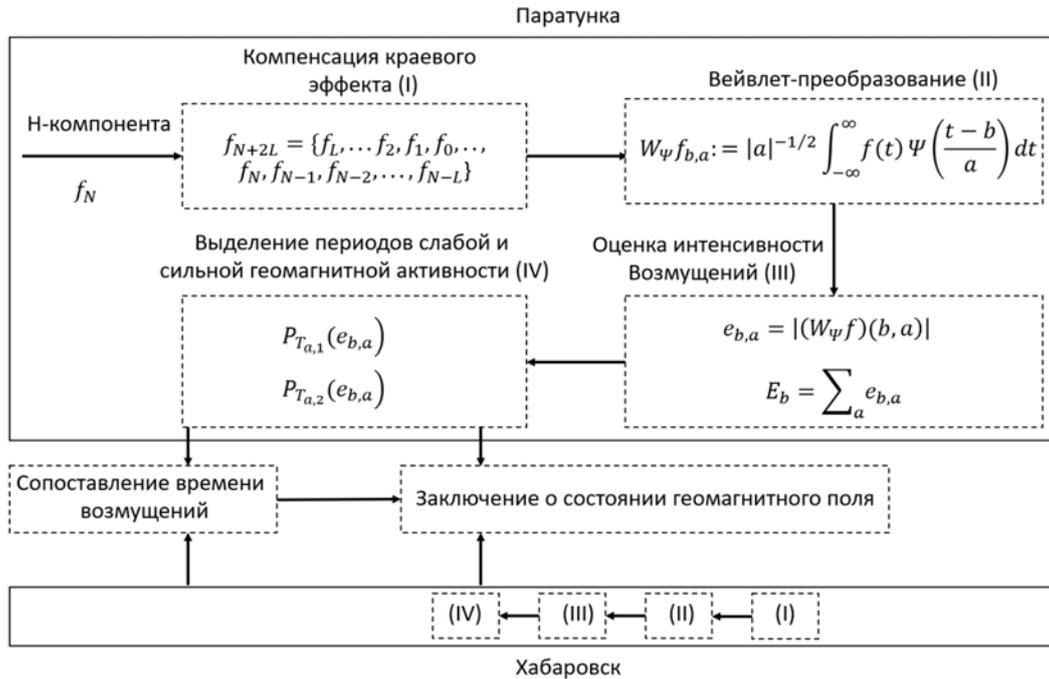


Рис. 3. Схема оценки состояния геомагнитных данных.
[Figure 3. Geomagnetic data state estimation scheme.]

Результаты работы геомагнитной компоненты системы «Аврора»

Обработка магнитных данных в системе выполняется один раз в час. Дискретизация данных составляет одну минуту. Система предоставляет в текстовом виде результаты оценки состояния геомагнитного поля станции «Паратунка» (Камчатка) и «Хабаровск» за последние 24 часа.

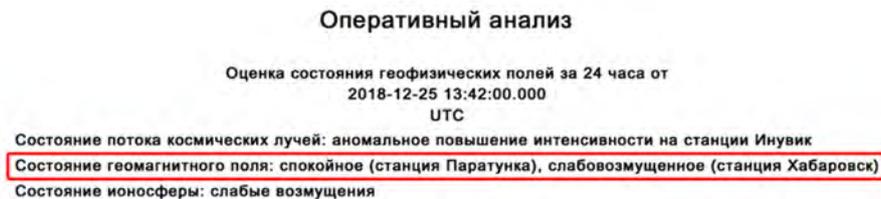


Рис. 4. Результаты экспертной оценки состояния геомагнитного в системе «Аврора».

[Figure 4. Results of expert assessment of the geomagnetic state in the «Aurora» system.]

Формируемое системой заключение о состоянии поля (рис. 4) может принимать одно из следующих значений: спокойное (амплитуды возмущений соответствуют значениям К-индекса 0 и 1); слабовозмущенное (амплитуды возмущений соответствуют значениям К-индекса в интервале от 2-х до 3-х) и возмущенное (амплитуды возмущений соответствуют значениям К-индекса равным 4 и более).

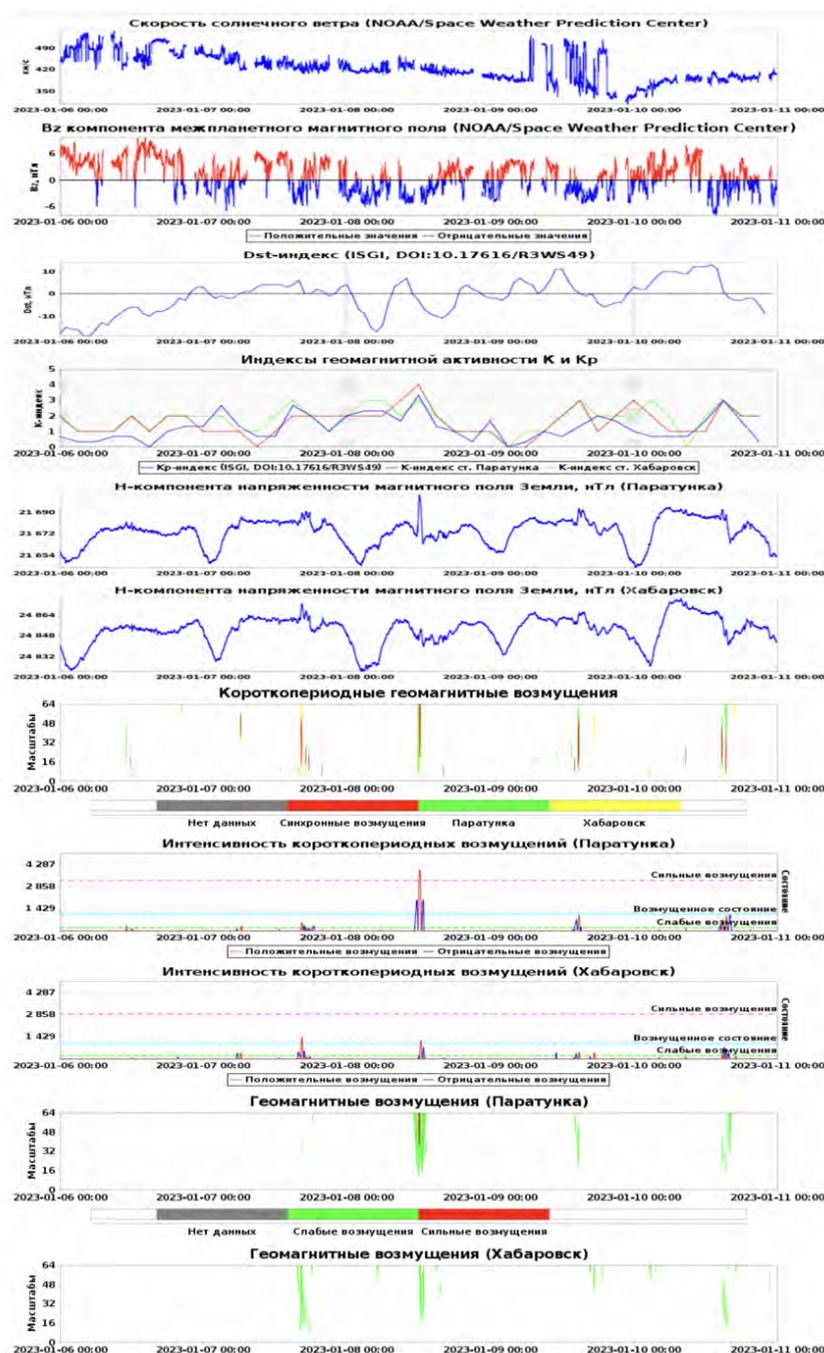


Рис. 5. Результаты работы геомагнитной компоненты системы «Аврора» в период 06–10 января 2023 г.

[Figure 5. Results of the geomagnetic component of the «Aurora» system for the period 06–10 January 2023.]

Визуальный анализ результатов обработки данных вариаций геомагнитного поля может быть выполнен в системе с помощью следующих данных (рис. 5):

- исходные минутные данные скорости солнечного ветра (NOAA, Space Weather Prediction Center);
- исходные минутные данные Vz-компоненты межпланетного магнитного поля (NOAA, Space Weather Prediction Center);
- исходные часовые данные Dst-индекса (International Service of Geomagnetic Indices);
- исходные трехчасовые данные Kp-индекса (International Service of Geomagnetic Indices);
- исходные минутные данные H-компоненты напряженности магнитного поля Земли станции «Паратунка» и станции Хабаровск;
- результаты выделения короткопериодных синхронных возмущений геомагнитного поля;
- результаты выделения слабых (амплитуды возмущений соответствуют значениям K-индекса в интервале от 2-х до 3-х) и сильных (амплитуды возмущений соответствуют значениям K-индекса, равным 4 и более) геомагнитных возмущений;
- результаты оценки интенсивности выделенных геомагнитных возмущений.

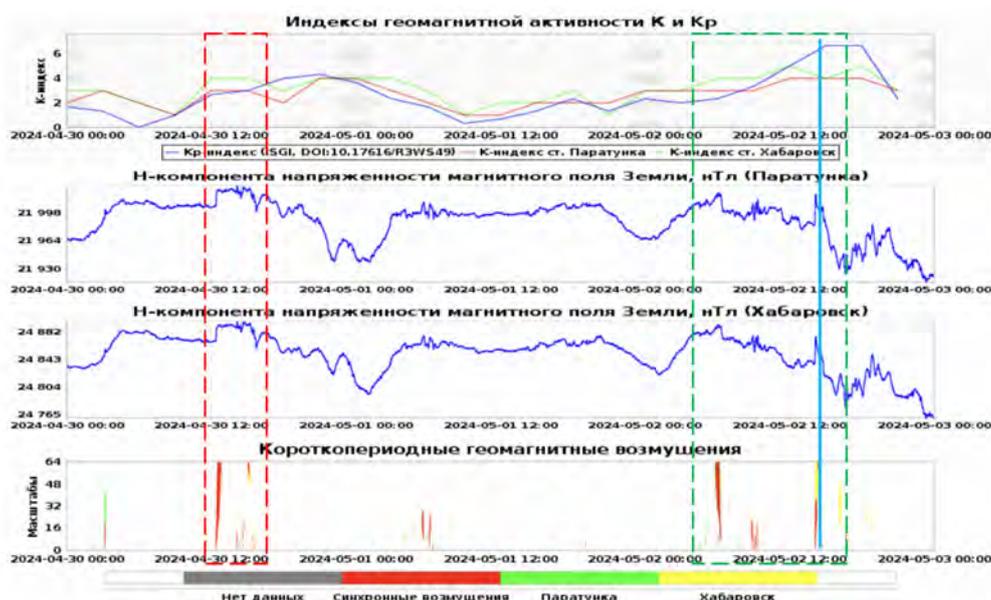


Рис. 6. Результаты работы системы «Аврора» в период 30 апреля – 02 мая 2024 г. [Figure 6. «Aurora» system results for the period 30 April – 02 May 2024.]

В качестве примера работы системы, на рис. 6 приведены результаты обработки магнитных данных во время магнитной бури 02 мая 2024 г. По данным космической погоды (<http://ipg.geospace.ru/>) в начале описываемого периода 30 апреля в 11.// UTC пришел неоднородный ускоренный поток от выброса корональной массы (СМЕ от 27 апреля), концентрация протонов которого составила 27 частиц/см³, флуктуации южной компоненты усилились до $B_z = -10$ нТл, скорость солнечного ветра увеличилась до 420 км/сек. В течение часа после прихода СМЕ в исходных геомагнитных данных станций «Паратунка» и «Хабаровск» возникла бухтообразная особенность (рис. 6, красный прямоугольник). Результаты системы показывают в этот период возникновение синхронных короткопериодных возмущений на обеих анализируемых станциях, которые продолжались несколько часов. Значения Кр-индекса в это время возрастали до 5, рассчитанные локальные индексы геомагнитной активности на станциях «Паратунка» и «Хабаровск» также подтверждают возникновение геомагнитных возмущений (рис. 6).

Далее, 02 мая в 13.// UTC пришел неоднородный ускоренный поток от выброса корональной массы (СМЕ от 01 мая), концентрация протонов которого составила 15 частиц/см³, флуктуации южной компоненты усилились до $B_z = -19$ нТл, скорость солнечного ветра начала возрастать и к 02.// UTC 03 мая достигла значения 510 км/сек (<http://ipg.geospace.ru/>). По данным <http://kakioka-jma.go.jp/> 02 мая 2024 г. в 14:07 UT началась геомагнитная буря (рис. 6, синяя вертикальная линия). После прихода СМЕ в системе на станциях «Паратунка» и «Хабаровск» выделены синхронные возмущения (рис. 6, зеленый прямоугольник). Особый интерес в задачах космической погоды имеют выделенные системой синхронные возмущения, произошедшие менее, чем за 12 часов до начала магнитной бури (рис. 6, зеленый прямоугольник). После начала магнитной бури система также показывает наличие возмущений в данных Н-компонент станций «Хабаровск» и «Паратунка» и возрастание локальных геомагнитных индексов (рис. 6).

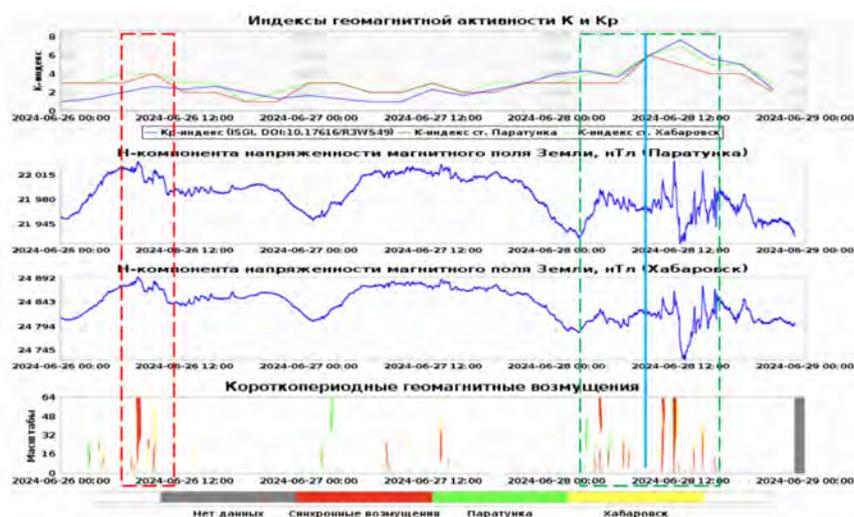


Рис. 7. Результаты работы системы «Аврора» в период 26-28 июня 2024 г.
[Figure 7. «Aurora» system results for the period 26-28 June 2024.]

На рис. 7 показаны результаты работы системы во время экстремальной магнитной бури, произошедшей 28 июня 2024 г. В анализируемый период 26 июня пришел неоднородный ускоренный поток от выброса корональной массы (СМЕ от 23 июня), скорость солнечного ветра увеличилась от 320 до 370 км/сек, южная компонента ММП флуктуировала от $B_z = -9$ нТл до $B_z = +11$ нТл (<http://ipg.geospace.ru/>). После прихода СМЕ система регистрирует яркие синхронные возмущения геомагнитного поля на обеих анализируемых станциях, в этот период значения локальных геомагнитных индексов не превышают значения 4 (рис. 7, красный прямоугольник).

Основное событие началось 28 июня 2024 г. в 10:12 UT (<http://kakioka-jma.go.jp/>), что отмечено на рис. 7 синей вертикальной линией. По данным <http://ipg.geospace.ru/> 28 июня в 08:// UTC пришел неоднородный ускоренный поток от корональной дыры (СІR), концентрация протонов которого составила 40 частиц/см³, флуктуации южной компоненты усилились до $B_z = -24$ нТл, скорость солнечного ветра начала увеличиваться и к 16:// UTC 28 июня достигла значения 500 км/сек. После прихода потока СІR системой зарегистрированы синхронные короткопериодные геомагнитные возмущения, локальные геомагнитные индексы превысили значение 7 (рис. 7, зеленый прямоугольник). Отметим, что накануне магнитной бури, за несколько часов до прихода потока СІR системой выделены короткопериодные возмущения на станции «Паратунка» и, с небольшой задержкой по времени, возмущения на станции «Хабаровск» (рис. 7, зеленый прямоугольник).

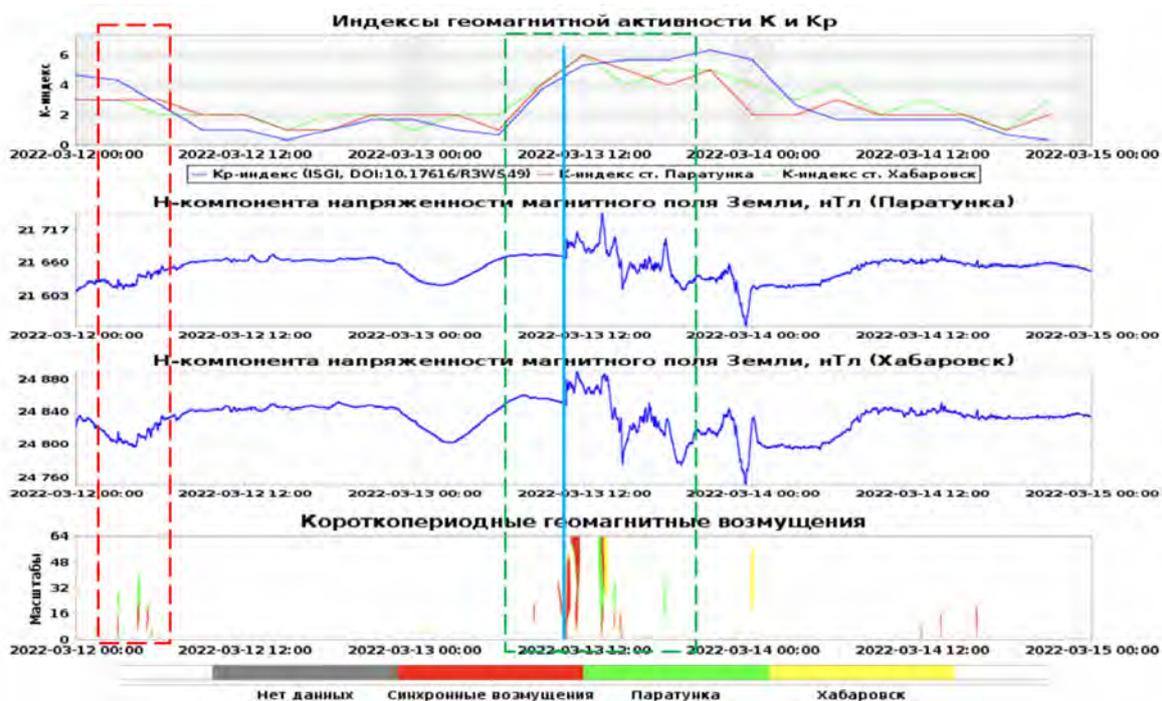


Рис. 8. Результаты работы системы «Аврора» в период 12-14 марта 2022 г.

[Figure 8. «Aurora» system results for the period 12-14 March 2022.]

На рис. 8 показана работа системы в период сильной магнитной бури с началом 13 марта 2022 в 10:45 UT (<http://kakioka-jma.go.jp/>). По данным космической погоды (<http://ipg.geosrsc.ru/>) накануне события 12 марта из-за влияния корональной дыры скорость солнечного ветра была в пределах от 380 км/сек до 410 км/сек, южная компонента флуктуировала от $B_z = -3$ нТл до $B_z = +3$ нТл. По результатам системы «Аврора» в это время наблюдается ряд слабых синхронных возмущений в геомагнитном поле (рис. 8, красный прямоугольник).

На следующий день 13 марта пришел неоднородный ускоренный поток от выброса корональной массы (СМЕ, сопровождавшее распад солнечного волокна 10 марта), концентрация протонов которого составила 44 частицы/см³, флуктуации южной компоненты усилились до $B_z = -24$ нТл, скорость солнечного ветра возросла до 600 км/сек (<http://kakioka-jma.go.jp/>). После начала магнитной бури (рис. 8, синяя вертикальная линия) системой зарегистрированы синхронные короткопериодные геомагнитные возмущения на обеих анализируемых станциях и произошло повышение геомагнитных индексов до значения 6 (рис. 8, зеленый прямоугольник). Накануне магнитной бури геомагнитная обстановка была спокойной, в этот период системой зарегистрировано слабое синхронное короткопериодное возмущение (рис. 8, зеленый прямоугольник).

Выводы

Геомагнитная компонента системы «Аврора» обеспечивает комплексную оценку состояния магнитного поля Земли в возмущенные и спокойные периоды. Накануне и в периоды магнитных бурь система позволяет на анализируемых станциях «Паратунка» и «Хабаровск» обнаружить синхронные короткопериодные геомагнитные возмущения. На примере рассмотренных в статье событий подтверждено, что результаты геомагнитной компоненты системы «Аврора» обеспечивают достоверную оценку состояния магнитного поля Земли и могут быть использованы в качестве дополнительного инструмента при выполнении оперативного прогноза космической погоды.

Список литературы

1. Singh A. K., Bhargawa A., Siingh D., Singh R. P. Physics of Space Weather Phenomena: A Review // *Geosciences*, 2021. vol. 11, pp. 286 DOI: 10.3390/geosciences11070286.
2. Despirak I. V., Kleimenova N. G., Gromova L. I., Gromov S. V., Malysheva L. M. Supersubstorms during Storms of September 7–8, 2017 // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2020. vol. 60, pp. 292–300 DOI: 10.1134/S0016793220030044.
3. Bailey R. L., Leonhardt R. Automated Detection of Geomagnetic Storms with Heightened Risk of GIC // *Earth, Planets and Space*, 2016. vol. 68, pp. 99 DOI: 10.1186/s40623-016-0477-2.
4. Mandrikova O. V. Application of the New Wavelet–Decomposition Method for the Analysis of Geomagnetic Data and Cosmic Ray Variations // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2021. vol. 61, pp. 492–507 DOI: 10.1134/S0016793221030117.
5. Mandrikova O. V., Stepanenko A. A. Automated method for calculating the Dst-index based on the wavelet model of geomagnetic field variations // *Computer Optics*, 2020. vol. 44, pp. 797–808 DOI: 10.18287/2412-6179-CO-709.
6. Gogatishvili I. M. Geomagnetic precursors of intense earthquakes in the spectrum of geomagnetic pulsations with frequencies of 1–0.02 Hz // *Geomagnetism and Aeronomy*, 1984. vol. 24, pp. 697–700.

7. Agayan S., Bogoutdinov S., Krasnoperov R., Sidorov R. Multiscale Approach to Geomagnetic Storm Morphology Analysis Based on DMA Activity Measures // *Applied Sciences*, 2021. vol. 11, pp. 12120 DOI: 10.3390/app112412120.
8. Zelinsky N.R.; Kleimenova N.G.; Gromova L.I. Applying the New Method of Time-Frequency Transforms to the Analysis of the Characteristics of Geomagnetic Pc5 Pulsations // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2017. vol. 57, pp. 559–565 DOI: 10.1134/S0016793217050188.
9. Agayan S., Bogoutdinov S., Soloviev A., Sidorov R. The Study of Time Series Using the DMA Methods and Geophysical Applications // *Data Science Journal*, 2016. vol. 15, pp. 16 DOI: 10.5334/dsj-2016-016.
10. Rabie E., Hafez A. G., Saad O. M., El-Sayed A.–H. M., Abdelrahman K., Al–Otaibi N. Geomagnetic Micro-Pulsation Automatic Detection via Deep Learning Approach Guided with Discrete Wavelet Transform // *Journal of King Saud University — Science*, 2021. vol. 33, pp. 101263 DOI: 10.1016/j.jksus.2020.101263.
11. Хомутов С. Ю. Магнитные измерения на обсерваториях ИКИР ДВО РАН: от настоящего к будущему // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2022. Т. 41, № 4, С. 209–224 DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-209-224.
12. Chiaha S. O., Ugonabo O. J., Okpala K. C. A study on the effects of solar wind and interplanetary magnetic field on geomagnetic H-component during geomagnetic storms // *International Journal of Physical Sciences*, 2019. vol. 14, no. 5, pp. 38-44 DOI: 10.5897/IJPS2018.4772.
13. Mandrikova O., Polozov Y., Khomutov S. Wavelet Model of Geomagnetic Field Variations and Its Application to Detect Short-Period Geomagnetic Anomalies // *Applied Sciences*, 2022. vol. 12, pp. 2072 DOI: 10.3390/app12042072.
14. Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. San Diego: Academic Press, 1999. 620 pp.
15. Daubechies I. *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. 357 pp.

Информация об авторах



Полозов Юрий Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории Системного анализа, ИКИР ДВО РАН, Россия,  ORCID 0000-0001-6960-8784.



Мандрикова Оксана Викторовна – доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией Системного анализа, ИКИР ДВО РАН, Россия,  ORCID 0000-0002-6172-1827.

References

- [1] Singh A. K., et. al. Physics of Space Weather Phenomena: A Review, Geosci., 2021, vol. 11, 286. DOI: 10.3390/geosciences11070286
- [2] Despirak I. V., et. al. Supersubstorms during Storms of September 7–8, 2017, Geomagnetism and Aeronomy, 2020, vol. 60, pp. 292–300 DOI: 10.1134/S0016793220030044
- [3] Bailey R. L., Leonhardt R. Automated Detection of Geomagnetic Storms with Heightened Risk of GIC, Earth, Planets and Space, 2016, vol. 68, p. 99 DOI: 10.1186/s40623-016-0477-2
- [4] Mandrikova O. V. Application of the New Wavelet–Decomposition Method for the Analysis of Geomagnetic Data and Cosmic Ray Variations, Geomagnetism and Aeronomy, 2021, vol. 61, pp. 492–507. DOI: 10.1134/S0016793221030117
- [5] Mandrikova O. V., Stepanenko A. A. Automated method for calculating the Dst-index based on the wavelet model of geomagnetic field variations, Computer Optics, 2020, vol. 44, pp. 797–808. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-709
- [6] Gogatishvili I.M Geomagnetic precursors of intense earthquakes in the spectrum of geomagnetic pulsations with frequencies of 1–0.02 Hz, Geomag. and Aeron., 1984, vol. 24, P. 697–700.
- [7] Agayan S., Bogoutdinov S., Krasnoperov R., Sidorov R. Multiscale Approach to Geomagnetic Storm Morphology Analysis Based on DMA Activity Measures, Applied Sciences, 2021, vol. 11, p. 12120. DOI: 10.3390/app112412120
- [8] Zelinsky N. R., Kleimenova N. G., Gromova L. I. Applying the New Method of Time-Frequency Transforms to the Analysis of the Characteristics of Geomagnetic Pc5 Pulsations. Geomag. and Aeron., 2017, vol. 57, P. 559–565. DOI: 10.1134/S0016793217050188
- [9] Agayan S., et. al. The Study of Time Series Using the DMA Methods and Geophysical Applications, Data Science Journal, 2016, vol. 15, 16. DOI: 10.5334/dsj-2016-016
- [10] Rabie E., Hafez A. G., Saad O. M., El-Sayed A.–H. M., Abdelrahman K., Al–Otaibi N. Geomagnetic Micro–Pulsation Automatic Detection via Deep Learning Approach Guided with Discrete Wavelet Transform, Journal of King Saud University – Science, 2021, vol. 33, p. 101263. DOI: 10.1016/j.jksus.2020.101263
- [11] Khomutov S. Y. Magnetic measurements at observatories of IKIR FEB RAS: from the present to the future, Vestnik KRAUNC. Fiz.-Mat. Nauki, 2022, 41, no. 3, pp. 209–224. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-209-224 (In Russian)
- [12] Chiaha S. O., Ugonabo O. J., Okpala K. C. A study on the effects of solar wind and interplanetary magnetic field on geomagnetic H–component during geomagnetic storms, Inter. Jour. of Phys. Sci., 2019, vol.14, no. 5, pp. 38–44. DOI: 10.5897/IJPS2018.4772
- [13] Mandrikova O., Polozov Y., Khomutov S. Wavelet Model of Geomagnetic Field Variations and Its Application to Detect Short–Period Geomagnetic Anomalies, Applied Sciences, 2022, vol. 12, p. 2072. DOI: 10.3390/app12042072
- [14] Mallat S. A Wavelet Tour of Signal Processing. San Diego, Academic Press, 1999, 620 p.
- [15] Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets. Philadelphia, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992, 357 p.

Information about the authors



Yurii Alexandrovich Polozov – Ph. D. (Tech.), Senior Researcher Laboratory of System Analysis, IKIR FEB RAS, Russia,  ORCID 0000-0001-6960-8784.



Mandrikova Oksana Viktorovna – D. Sci. (Tech.), Professor, Head Laboratory of System Analysis, IKIR FEB RAS, Russia,  ORCID 0000-0002-6172-1827.