

# Анализ данных геомагнитного поля в периоды повышенной солнечной активности и магнитных бурь

О.В. Мандрикова<sup>1,2</sup>, А.И. Родоманская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Мирная 7, с. Паратунка, Камчатский край, Россия, 684034

<sup>2</sup>Камчатский государственный технический университет, Ключевская 35, Петропавловск-Камчатский, Россия, 683980

**Аннотация.** Описан автоматизированный метод анализа магнитных данных и выделения геомагнитных возмущений, основанный на вейвлет-преобразовании. Параметры вычислительных алгоритмов позволяют оценивать характеристики разномасштабных особенностей в вариациях геомагнитного поля, возникающих в периоды повышения геомагнитной активности. На основе метода по данным сети наземных станций проведен анализ геомагнитных данных накануне и в периоды магнитных бурь. Выделены периоды повышения геомагнитной активности, предшествующие и сопутствующие магнитным бурям. Детально рассмотрена динамика вариации геомагнитного поля в авроральной зоне. Показана связь выделенных возмущений с параметрами межпланетного магнитного поля и АЕ-индексом.

## 1. Введение

Анализ геомагнитных данных и изучение процессов в магнитосфере позволяет получить ценную информацию о состоянии электромагнитных полей в околоземном космическом пространстве в периоды повышенной солнечной активности [1]. Сложность процесса обработки и анализа геомагнитных данных связана с их сложной нерегулярной структурой и наличием разномасштабных локальных особенностей различной амплитуды и длительности. Эти особенности содержат важную информацию о протекающих процессах в магнитосфере. Применение традиционных методов и подходов не позволяет детально исследовать быстроизменяющую структуру вариаций геомагнитного поля и приводит к потере значимой информации. Одним из наиболее эффективных современных методов анализа данных сложной структуры является вейвлет-преобразование [2-5]. Данный математический аппарат лежит в основе метода исследования.

В настоящее время вейвлет-преобразование широко применяется в задачах анализа магнитных данных [4-9]. Применение данного математического аппарата позволяет, в отличие от традиционных методов и подходов, изучать короткопериодные колебания геомагнитного поля, нестационарные изменения параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля [6,10]. На основе вейвлет-преобразования решаются такие задачи, как удаление шума [4,5,11], исключение периодической компоненты вариаций геомагнитного поля, вызванной вращением Земли [4,5], разработан алгоритм автоматического определения периодов начальной фазы магнитной бури [12]. На основе анализа вейвлет-спектра вариаций геомагнитного поля в работе [13] предложен метод прогноза сильных геоэффективных солнечных вспышек. Авторами

данной работы вейвлет-преобразование активно используется: на основе вейвлет-пакетов построена модель вариаций геомагнитного поля [10-12], с использованием дискретных и непрерывных вейвлет-разложений разработаны автоматизированные методы выделения возмущений геомагнитного поля [8-10,14,15]. Данный подход позволил впервые в автоматическом режиме воспроизвести процедуру расчета индекса геомагнитной активности К (К-индекса) по методике Дж. Бартельса [9]. В настоящей работе продолжено исследование в этом направлении. В статье представлены результаты обработки и анализа данных сети магнитных станций России («Якутск» YAK, «Паратунка» PET, <http://www.intermagnet.org>), экваториальной станции (Гуам «GUA», США, <http://www.intermagnet.org>) и станций авроральной зоны («Йеллоунайф» YKS, Канада и «Абиско» ABK, Швеция, <http://www.intermagnet.org>). На основе разработанного подхода выполнен совместный анализ вариаций геомагнитного поля и параметров межпланетной среды (анализируется Vz-компонента межпланетного магнитного поля, использовался ресурс <http://spidr.ionosonde.net/spidr/home.do>). Результаты работы позволили выделить аномальные короткопериодные возмущения геомагнитного поля, предшествующие и сопутствующие магнитным бурям. Детально рассмотрена динамика вариации геомагнитного поля в авроральной зоне. Показана связь выделенных возмущений с параметрами межпланетного магнитного поля и AE-индексом.

## 2. Описание метода

Временной ряд геомагнитных данных  $f(t)$  может быть представлен в виде комбинации функций [7,8]:

$$f(t) = f_{тренд}(t) + f_{возмущ}(t) + e(t) = \sum_n c_{m,n} \varphi_{m,n}(t) + \sum_{j \in I} g_j(t) + e(t), \quad (1)$$

где компонента  $f_{тренд}(t) = \sum_n c_{m,n} \varphi_{m,n}(t)$  описывает вариации геомагнитного поля в спокойные периоды;  $\varphi_m = \{\varphi_{m,n}\}_{n \in \mathbb{Z}}$  – базис сглаживающей скэйлинг-функции;  $f_{возмущ}(t) = \sum_{j \in I} g_j(t) = \sum_{j \in I} \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t)$  описывает геомагнитные возмущения, возникающие в периоды возрастания геомагнитной активности; коэффициенты  $c_{m,n} = \langle f, \varphi_{m,n} \rangle$  и  $d_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle$ ;  $m$  – масштабный уровень вейвлет-разложения;  $\Psi_j = \{\Psi_{j,n}\}_{n \in \mathbb{Z}}$  – вейвлет-базис;  $I$  – набор индексов;  $j$  – параметр масштаба; компонента  $e(t)$  является шумом.

Способ идентификации рекуррентной компоненты модели  $f_{тренд}$  описан в работах [7,8]. Путем минимизации погрешности аппроксимации в классе ортонормированных функций определен вейвлет-базис Добеши порядка 3 [8]. Результаты оценки модели (1) на примере данных станции «Паратунка» (Камчатский край) приведены в работах [8-10,15,16]. В данной работе компонента  $f_{тренд}$  не используется.

В качестве меры магнитной возмущенности составляющих  $g_j(t)$  предложена величина [9]:

$$A_j = \max_n (|d_{j,n}|) \quad (2)$$

Тогда геомагнитные возмущения (определяют набор коэффициентов  $\{d_{j,n}\}_{j \in I}$  в (1) могут быть выделены на основе применения пороговых функций  $F_1$  и  $F_2$  [12]:

$$f(t) = f_{тренд}(t) + \sum_{j_{возмущ}, n} F_1(d_{j_{возмущ}, n}) \Psi_{j_{возмущ}, n}(t) + \sum_{j_{возмущ}, n} F_2(d_{j_{возмущ}, n}) \Psi_{j_{возмущ}, n}(t) + e(t). \quad (3)$$

$$F_1(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } |x| \leq T_{j_{возмущ}, 1} \text{ или } |x| > T_{j_{возмущ}, 2} \\ x, & \text{если } T_{j_{возмущ}, 1} < |x| \leq T_{j_{возмущ}, 2} \end{cases} \quad (4)$$

$$F_2(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } |x| \leq T_{j_{\text{возмущ}},2} \\ x, & \text{если } |x| > T_{j_{\text{возмущ}},2} \end{cases} \quad (5)$$

Порог  $T_{j_{\text{возмущ}},1}$  определяет слабые геомагнитные возмущения, а порог  $T_{j_{\text{возмущ}},2}$  – сильные геомагнитные возмущения. Процедура оценки порогов  $T_{j_{\text{возмущ}},1}$  и  $T_{j_{\text{возмущ}},2}$  основана на минимизации апостериорного риска и подробно описана в работе [10].

Учитывая эквивалентность дискретных и непрерывных вейвлет-разложений [17,18], для получения более детальной информации о свойствах анализируемой функции  $f$  может быть применено непрерывное вейвлет-преобразование:

$$(W_\psi f)(b,a) := |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \Psi - \text{вейвлет}, f \in L^2(\mathbb{R}), a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0. \quad (6)$$

Так как вейвлет-функция  $\Psi$  имеет нулевое среднее значение, при стремлении масштаба  $a$  к нулю вейвлет-коэффициенты  $(W_\psi f)(b,a)$  характеризуют локальные свойства функции  $f$  в окрестности момента времени  $t = b$  [17,18].

Следуя соотношению (2) в качестве меры интенсивности геомагнитных возмущений в момент времени  $t = b$  логично определить амплитуду вейвлет-коэффициентов:

$$v_{b,a}(t) = |(W_\psi f)(b,a)|. \quad (7)$$

Тогда интенсивность положительных и отрицательных возмущений поля в момент времени  $t = b$  можно оценить на основе величины:

$$V_b^\pm(t) = \sum_a (W_\psi f)(b,a)^\pm. \quad (8)$$

Следуя соотношению (3) и учитывая нестационарную структуру геомагнитных данных, для выделения возмущений использовались адаптивные пороги, впервые предложенные в работе [10]:

$$P_{T_a} [(W_\psi f)(b,a)] = \begin{cases} (W_\psi f)(b,a), & \text{если } (W_\psi f)(b,a) \geq T_a \\ 0, & \text{если } |(W_\psi f)(b,a)| < T_a \\ -(W_\psi f)(b,a), & \text{если } (W_\psi f)(b,a) < -T_a \end{cases}, \quad (9)$$

где  $T_a = U \times St_a$  является пороговой функцией,  $St_a^l = \sqrt{\frac{1}{l-1} \sum_{k=1}^l ((W_\psi f)(b,a) - \overline{(W_\psi f)(b,a)})^2}$   
 $\overline{(W_\psi f)(b,a)}$  – среднее значение, вычисляемое в скользящем временном окне длины  $l$ ,  $U$  – пороговый коэффициент.

Оценка интенсивности возмущений в момент времени  $t = b$  выполнялась на основе величины:

$$E_b(t) = \sum_a P_{T_a} [(W_\psi f)(b,a)]. \quad (10)$$

Тогда интенсивность положительных и отрицательных возмущений в момент времени  $t = b$  могут быть оценены, как:

$$E_b^\pm = \sum_a P_{T_a} [(W_\psi f)(b,a)^\pm]. \quad (11)$$

На рисунках 1, 2, в качестве примера, показаны результаты применения операций 9, 11 в периоды, содержащие помехи в данных геомагнитного поля. Проблемы влияния помех на результаты измерений и последующие результаты обработки данных известны [19]. Решение задачи распознавания и компенсации помех выходит за пределы данного исследования, но является важным и решается большим числом исследовательских групп [19,20], в том числе авторским коллективом [20]. В анализируемый период 06.07.2018 г. (рисунок 1) на Камчатке произошло землетрясение, которое отразилось в геомагнитных данных в виде локального пика

(момент землетрясения отмечен на рисунке 1 стрелкой). Сопоставление результатов обработки исходных и преобработанных данных показывает их идентичность. Помеха (эффект землетрясения) не отразилась в результатах обработки данных вследствие ее кратковременного влияния и небольшой амплитуды. В первую половину суток 06.07.2018 г. в периоды незначительного повышения геомагнитной активности (К-индекс равен 2, рисунок 1h) наблюдаются локальные возрастания амплитуд вейвлет-коэффициентов (рисунок 1d,e) и незначительные возрастания интенсивности геомагнитных возмущений (рисунок 1f,g), что подтверждает высокую чувствительность и эффективность предлагаемого метода.

На рисунке 2 представлены результаты обработки геомагнитных данных в период длительного воздействия помех (около 6 часов), связанных с проведением ремонтных работ в магнитном павильоне. Анализ результатов обработки данных (рисунок 2d-g) показывает погрешность метода в окрестности, содержащей помехи. Вследствие компактности носителя вейвлета [17,18], обеспечивающей получение локальной информации о свойствах функции, влияние помех четко ограничивается пределами содержащего их временного интервала (интервал выделен на рисунке 2 пунктирной линией). В периоды незначительного повышения геомагнитной активности (значения К-индекса показаны на рисунке 2h), аналогично примеру выше, выделены и оценены локальные возрастания амплитуд вейвлет-коэффициентов (рисунок 2d,e,f,g), что также подтверждает эффективность предлагаемого метода.

### 3. Результаты экспериментов и обсуждения

На основе предложенного метода выполнена обработка геомагнитных данных минутного разрешения станций «Якутск» YAK, «Паратунка» PET, экваториальной станции «Гуам» GUA, США, и станций авроральной зоны «Йеллоунайф» YKC, Канада и «Абиско» ABK, Швеция (таблица 1 и рисунок 3). Использовались преобработанные геомагнитные данные.

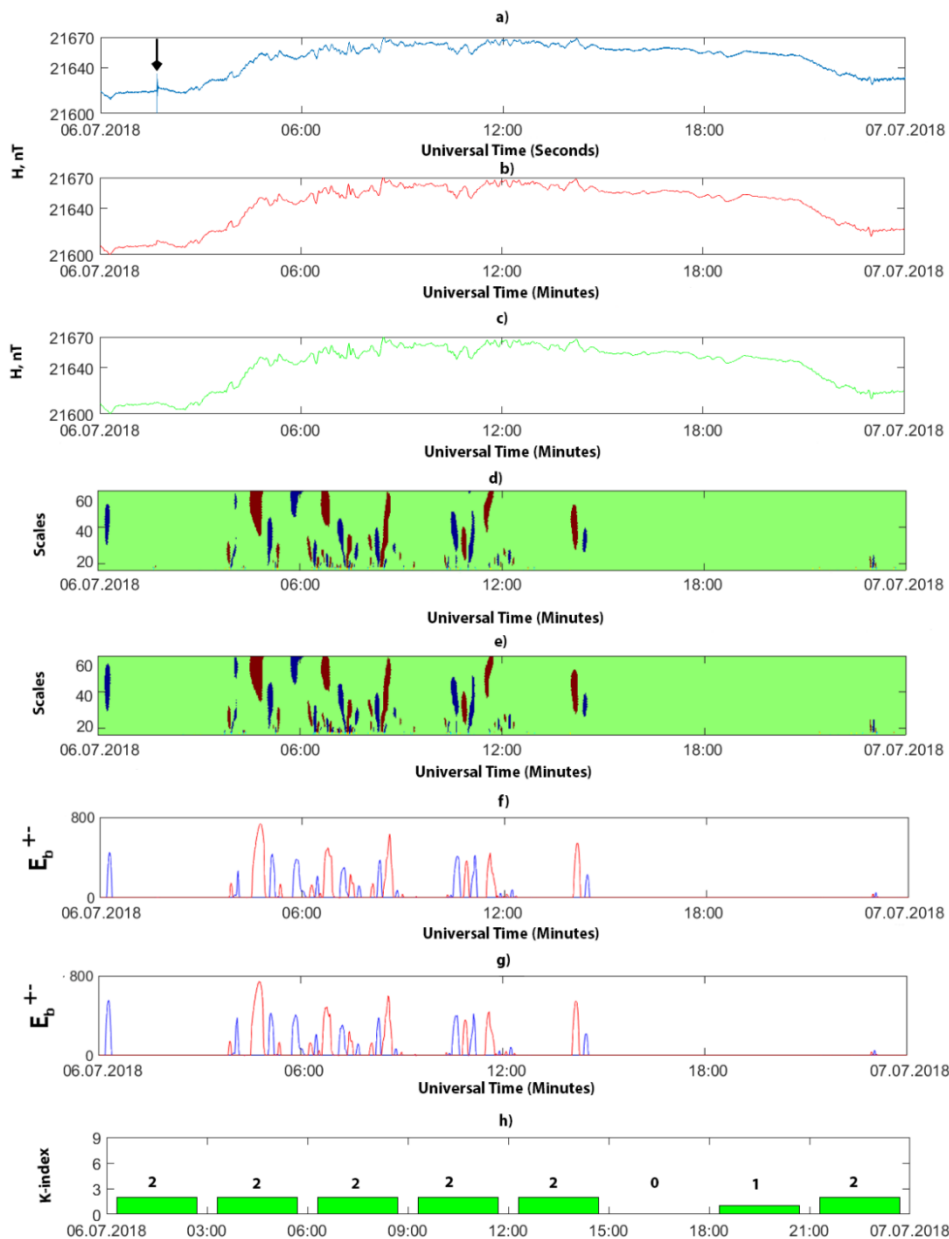
**Таблица 1.** Станции, данные которых были использованы.

Станция	IAGA код	Географическая широта	Географическая долгота	Геомагнитная широта	Геомагнитная долгота	Местное время (LT)
Паратунка	PET	52°58.3'N	158°15.0'E	46°10.2'N	137°16.2'E	UTC+12
Якутск	YAK	61°57.6'N	129°39.4'E	52°43.8'N	162°42.6'E	UTC+09
Гуам	GUA	13°35.4'N	144°52.5'E	05°48.6'N	143°22.8'E	UTC+10
Йеллоунайф	YKC	62°28.8'N	114°28.8'W	74°07.8'N	64°34.8'W	UTC-6
Абиско	ABK	68°21.7'N	18°43.4'E	66°04.2'N	113°57.0'E	UTC+2

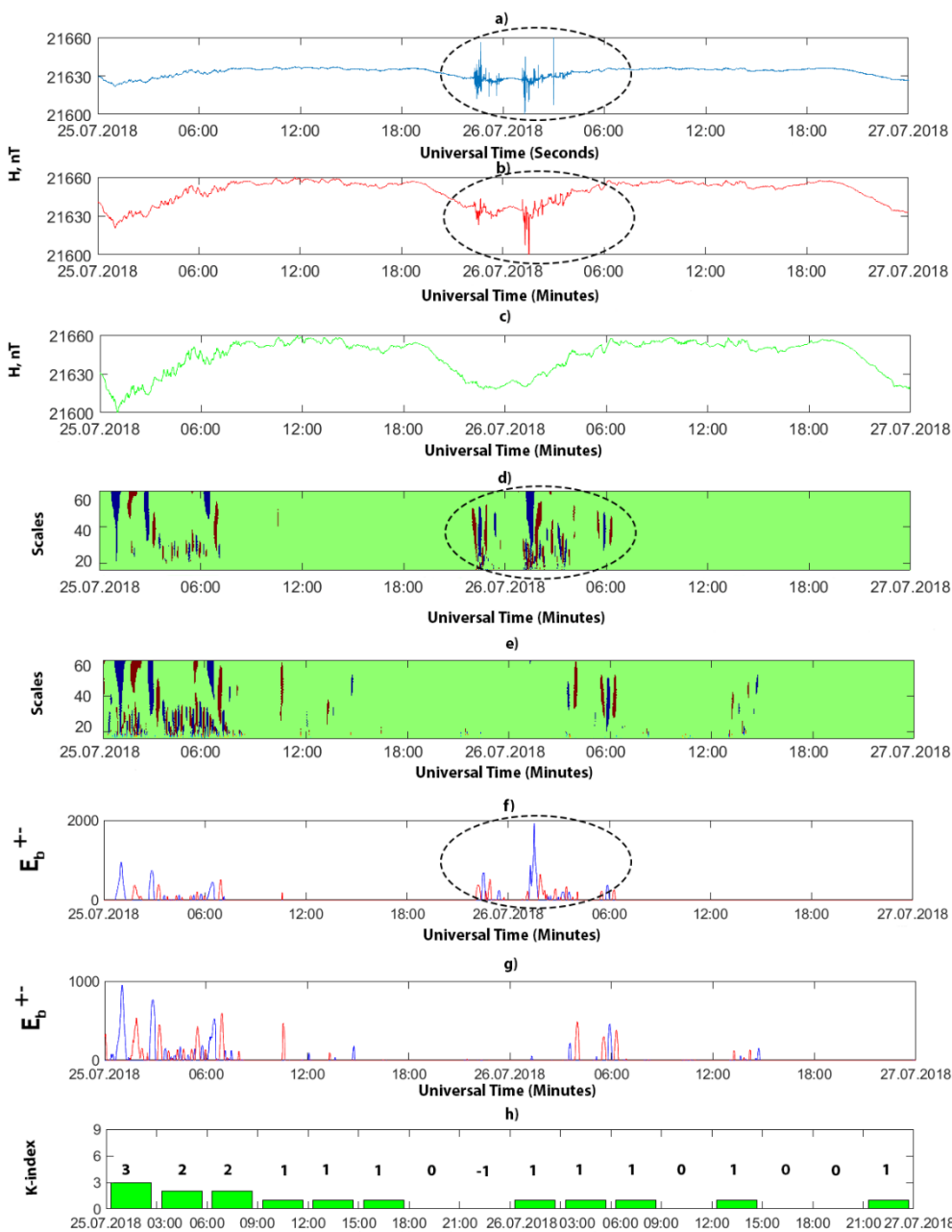
Для анализа возмущений в авроральной зоне использовались индексы геомагнитной активности AE, AU, AO и AL (<http://isgi.unistra.fr>) [21]. Значения AU и AL-индексов характеризуют интенсивность восточного (послеполуденный сектор) и западного (утренний сектор) токов полярного электроджета в авроральной области [21,22]. Мерой полной максимальной амплитуды токов электроджета в восточном и западном направлениях является AE-индекс [21,22]. Индекс AO определяет смещение средней точки AU и AL от спокойного уровня в определенное время и является приблизительной мерой, эквивалентной зональному току, независимо от того, существует ли ток в ионосфере или в магнитосфере [21]. Анализ экваториальной токовой системы основывался на часовых значениях Dst-индекса (<http://isgi.unistra.fr>) [23]. Результаты обработки сравнивались с данными межпланетного магнитного поля (ММП) (<http://spidr.ionosonde.net/spidr/home.do>). Ниже детально представлены результаты обработки данных в период магнитной бури 05 июня 2016 г.

Анализируемое событие 05 июня 2016 г. вызвано выбросом корональной массы (рисунки 4 -7). Накануне магнитной бури скорость солнечного ветра составляла 322,2 км/с, Vz-компонента ММП менялась в пределах +/-0,9нТл (<http://spaceweather.com>). Анализ результатов на рисунке 4 показывает, что накануне события 04 июня, в периоды поворота Vz-компоненты ММП на юг на анализируемых станциях наблюдались слабые короткопериодные возмущения геомагнитного поля (рисунок 4h,i), что позволяет предположить связь выделенных возмущений с

нестационарными изменениями в параметрах межпланетной среды. Незначительные повышения АЕ-индекса происходили с небольшой задержкой – с 08:30 по 10:00 UT и с 15:50 по 19:50 UT 04июня.



**Рисунок 1.** Результаты обработки данных станции PET за 06.07.2018: а)секундные данные Н-компоненты геомагнитного поля (измерения компонентного вариационного феррозондового магнитометра FGE-DTU); б)минутные данные Н-компоненты геомагнитного поля (средневзвешенные значения на интервале от -45 до +45 сек с центром на начале минуты, использовались весовые коэффициенты из источника [INTERMAGNET Manual]); в)минутные предобработанные данные Н-компоненты геомагнитного поля; д)положительные (красным) и отрицательные (синим) возмущения, полученные по исходным данным (операция (9));е)положительные (красным) и отрицательные (синим) возмущения, полученные по предобработанным данным(операция (9));ф)интенсивность положительных (красным) и отрицательных (синим) возмущений, оцененная по исходным данным (операция (11));г)интенсивность положительных (красным) и отрицательных (синим) возмущений, оцененная по предобработанным данным (операция (11));h) К-индекс. Стрелкой отмечен момент возникновения землетрясения на Камчатке.



**Рисунок 2.** Результаты обработки данных станции РЕТ за период с 25.07.2018 – 26.07.2018гг.:

а) секундные данные Н-компоненты геомагнитного поля (измерения компонентного вариационного феррозондового магнитометра FGE-DTU); б) минутные данные Н-компоненты геомагнитного поля (средневзвешенные значения на интервале от -45 до +45 сек с центром на начале минуты, использовались весовые коэффициенты из источника INTERMAGNET Manual); в) минутные предобработанные данные Н-компоненты геомагнитного поля; д) положительные (красным) и отрицательные (синим) возмущения, полученные по исходным данным (операция (9)); е) положительные (красным) и отрицательные (синим) возмущения, полученные по предобработанным данным (операция (9)); ф) интенсивность положительных (красным) и отрицательных (синим) возмущений, оцененная по исходным данным (операция (11)); г) интенсивность положительных (красным) и отрицательных (синим) возмущений, оцененная по предобработанным данным (операция (11)); h) К-индекс. Значения К-индекса, равные -1, соответствуют отсутствию данных.



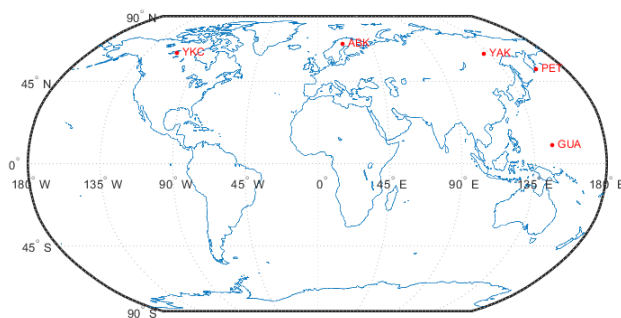


Рисунок 3. Географическое положение станций.

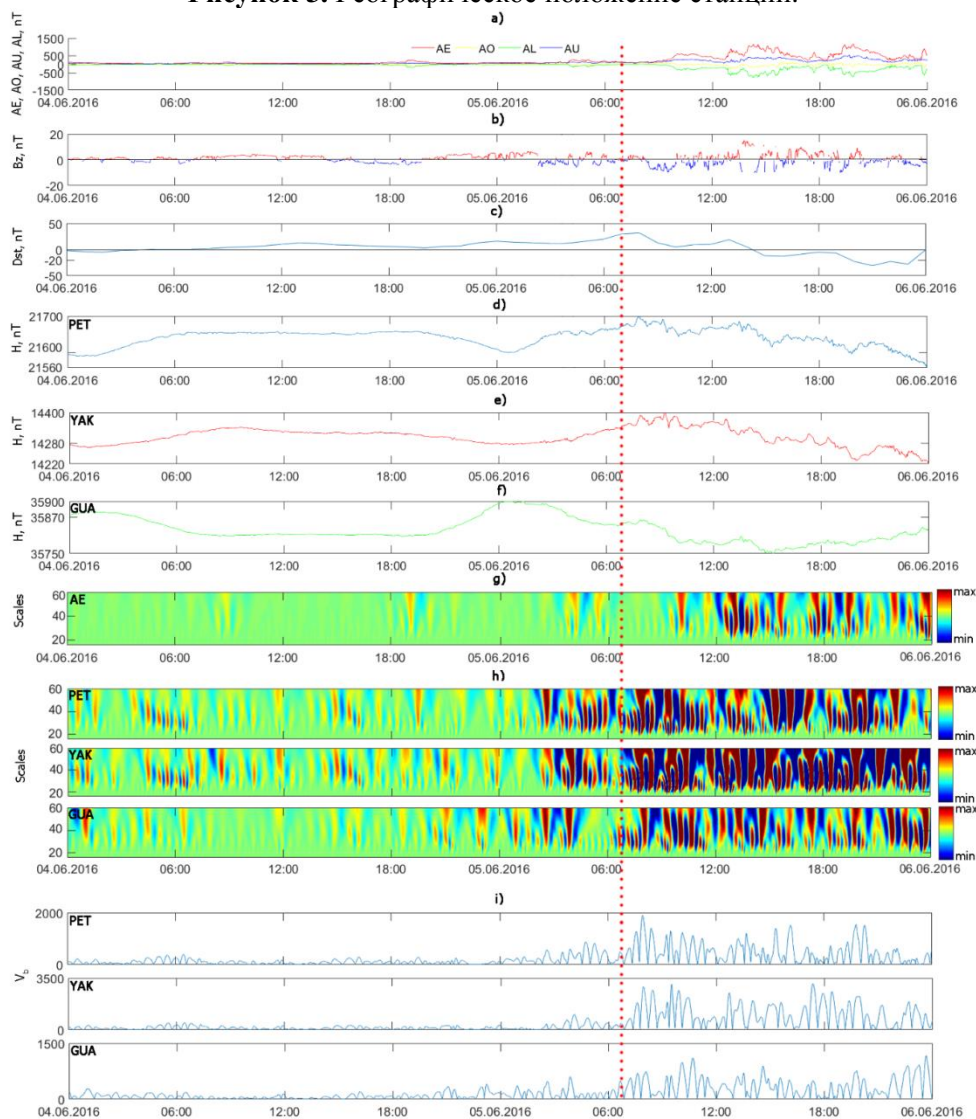
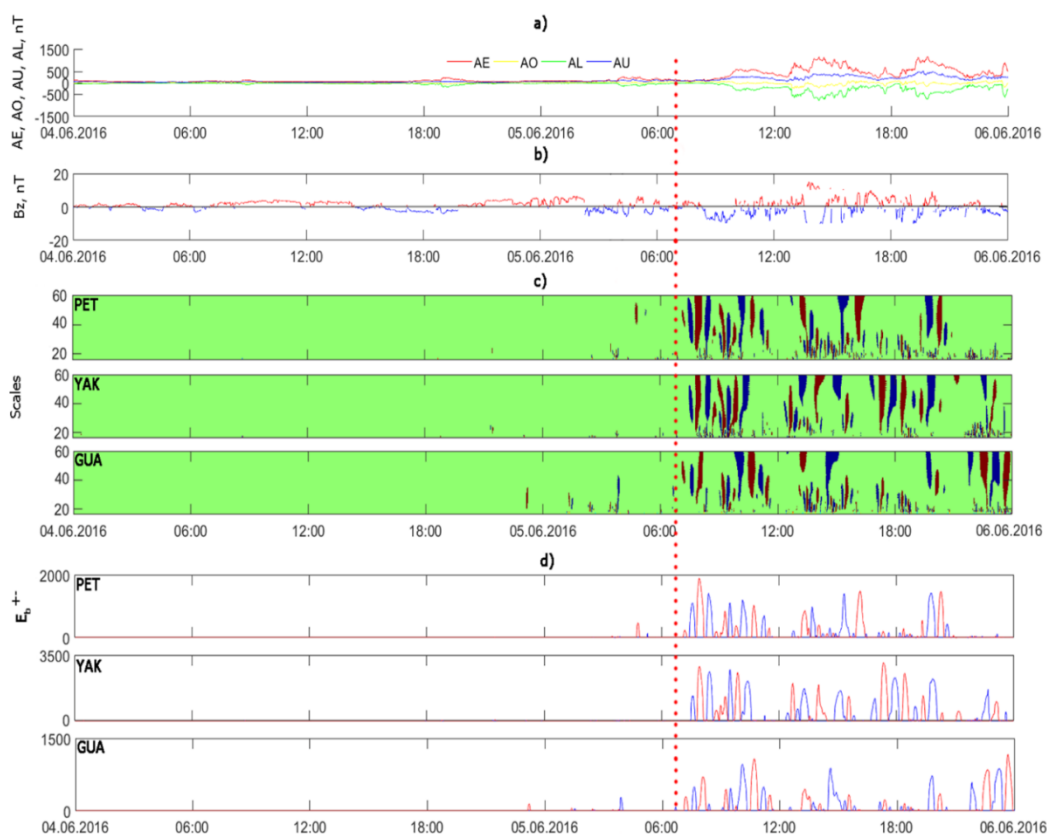


Рисунок 4. Результаты обработки данных за период с 04.06.2016 по 06.06.2016: а) авроральные индексы AE, AO, AL и AU; б) Bz-компонента ММП, красным цветом показаны положительные значения, синим – отрицательные; в) Dst-индекс; д)–ф) H-компоненты геомагнитного поля; г) вейвлет-спектр интенсивности AE-индекса (операция (8)); г) вейвлет-спектры интенсивности геомагнитных возмущений в районах станций PET, YAK и GUA (операция (8)); и) абсолютные значения интенсивности возмущений в районах станций PET, YAK и GUA (операция (8)). Вертикальная пунктирная линия указывает на начало магнитной бури.



**Рисунок 5.** Результаты обработки данных за период с 04.06.2016 по 06.06.2016: а) авроральные индексы AE, AO, AL и AU; б)  $B_z$ -компонента ММП, красным цветом показаны положительные значение, синим – отрицательные; в) положительные (красным) и отрицательные (синим) возмущения на станциях PET, YAK и GUA(операция (9)); д) интенсивность положительных (красным) и отрицательных (синим) возмущений на станциях PET, YAK и GUA (операция (11)). Вертикальная пунктирная линия указывает на начало магнитной бури.

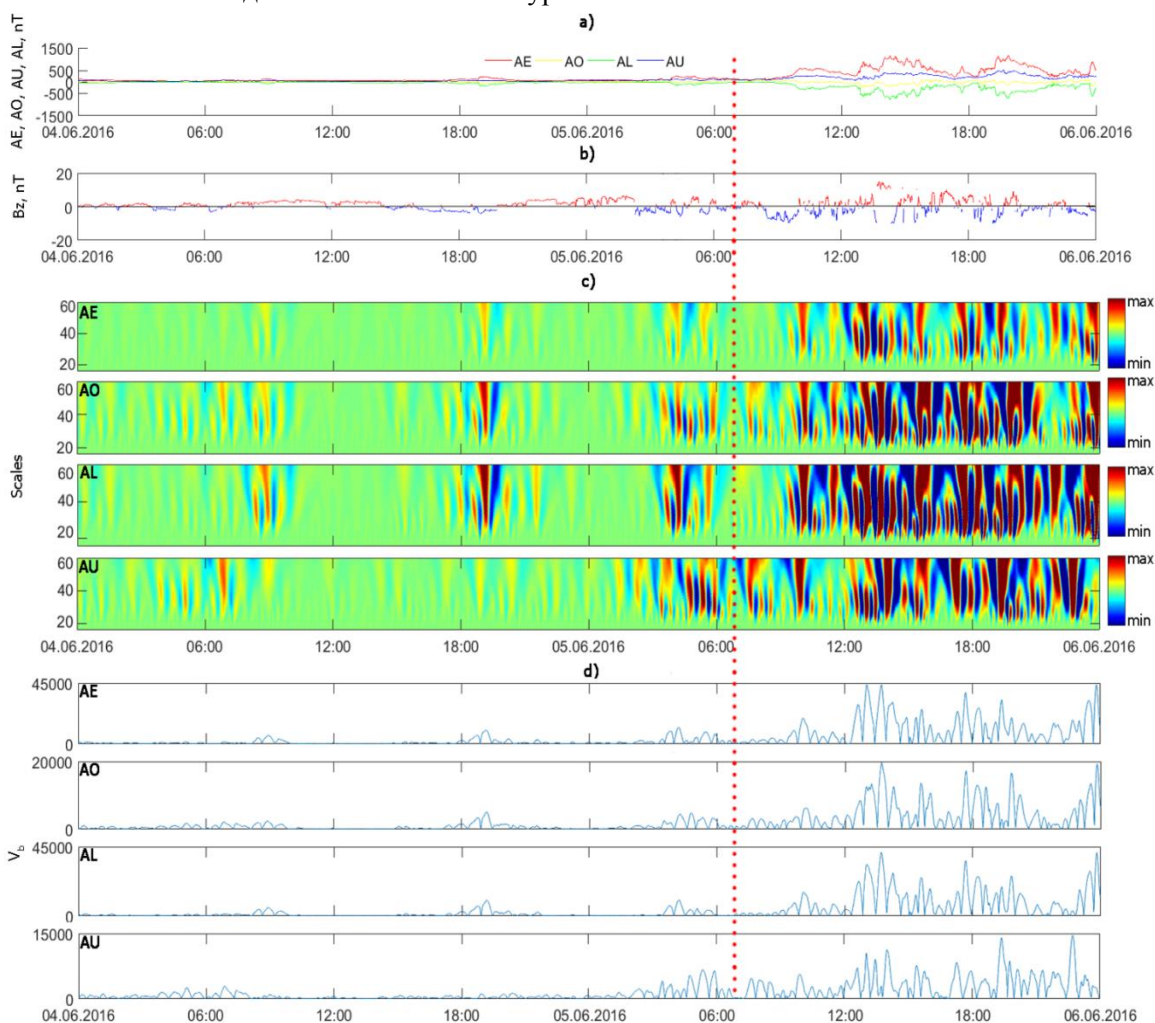
Интересным моментом является плавное возрастание геомагнитной активности на экваториальной станции GUA в конце суток 04 июня при северном направлении  $B_z$ -компоненты ММП. Аналогичные результаты отмечены ранее в работе [24], в которой показано, что увеличение параметров солнечного ветра может наблюдаться до резких поворотов ММП на юг, приводящих затем к магнитным бурям [25].

В начале суток 05 июня  $B_z$ -компонента резко перевернулась к югу, и одновременно наблюдается возрастание короткопериодных возмущений геомагнитного поля на всех анализируемых станциях (рисунок 4h,i). Интенсивность геомагнитных возмущений плавно возрастала на станциях до момента начала магнитной бури. Начальная фаза бури сопровождалась повышением геомагнитной активности на станциях средних и высоких широт (YAK, PET), и одновременным возрастанием авроральной активности (рисунок 4g). В период главной фазы бури 05 июня с 22:00 UT на станциях возмущения имели наибольшую интенсивность (рисунок 4h,i). Можно отметить, что возмущения на каждой станции имели разный характер, что объясняется сложной динамикой токовых систем в периоды магнитных бурь. На экваториальной станции GUA короткопериодные возмущения отчетливо выделяются в период основной фазы магнитной бури, а на станциях средних и высоких широт (YAK, PET) – на протяжении всех фаз бури.

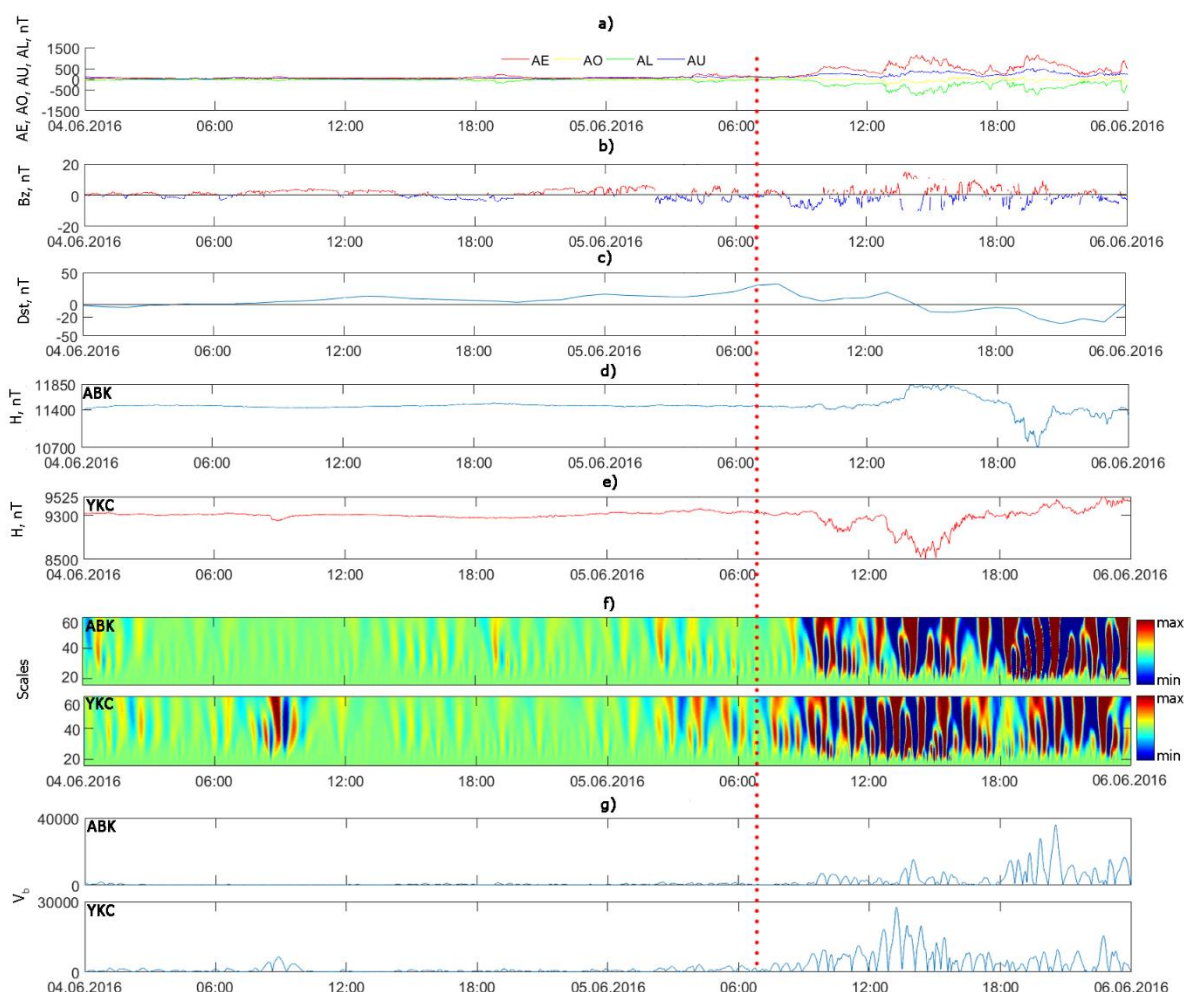
Результаты применения адаптивных порогов, представленные на рисунке 5c,d, подтверждают возрастание короткопериодных геомагнитных возмущений накануне магнитной бури и



показывают высокую чувствительность предлагаемого метода, позволяющего выделить тонкие существенно нестационарные изменения в параметрах вариаций геомагнитного поля. Детальный анализ процессов в авроральной зоне (рисунок 6с,d) показывает плавное возрастание индексов АО и AU 04 июня в периоды поворота Vz-компоненты ММП на юг (рисунок 6b), которое коррелирует как по времени, так и по интенсивности с возрастаниями геомагнитной активности на станциях средних и высоких широт (YAK, PET) (рисунок 4h,i). Сопоставление результатов обработки AU и AL индекса (рисунок 6с,d) с результатами обработки данных авроральных станций YKC и ABK (рисунок 7f,g) позволяет с высокой точностью установить положение максимумов электроструй по долготе, и показывает картину их взаимодействия (разрыв Харанга), что представляет научно-практический интерес в задачах солнечно-земной физики [26], ключевыми аспектами которых являются исследования в Арктической и Субарктической зонах РФ [27]. Четко прослеживается корреляция периодов возрастания AU индекса с возрастаниями возмущений на станции YKC в начале суток 04 июня и за несколько часов до начала магнитной бури 05 июня.



**Рисунок 6.** Результаты обработки индексов авроральной активности за период с 04.06.2016 по 06.06.2016: а) авроральные индексы AE, AO, AL и AU; б) Vz-компонента ММП, красным цветом показаны положительные значение, синим – отрицательные; в) вейвлет-спектры интенсивности возмущений авроральных индексов AE, AO, AL и AU(операция (8)); д) абсолютные значения интенсивности возмущений авроральных индексов AE, AO, AL и AU(операция (8)). Вертикальная пунктирная линия указывает на начало магнитной бури.



**Рисунок 7.** Результаты обработки данных за период с 04.06.2016 по 06.06.2016:  
 а) Авроральные индексы AE, AO, AL и AU; б) Vz-компонента ММП, красным цветом показаны положительные значение, синим – отрицательные; в) Dst-индекс; д),е) H-компоненты геомагнитного поля станций АВК и YKS, соответственно; ф) вейвлет-спектры интенсивности геомагнитного возмущений в районах станций АВК и YKS(операция (8)); г) абсолютные значения интенсивности возмущений в районах станций АВК и YKS(операция (8)). Вертикальная пунктирная линия указывает на начало магнитной бури.

#### 4. Выводы

На основе предложенного метода проведен детальный пространственно-временной анализ динамики геомагнитных возмущений в период магнитной бури 05 июня 2016 г. Динамический спектр интенсивности геомагнитного возмущения показал структуру события и позволил проанализировать распространение геомагнитных возмущений в анализируемых районах. До начала события наблюдалось синхронное плавное возрастание геомагнитных возмущений на меридионально расположенных станциях от высоких широт (станция YAK) до экватора (станция GUA). Возможность возникновения предбуревых аномальных повышений в вариациях геомагнитного поля отмечена в ряде работ [10,13,16 и др]. Результаты данной работы подтверждают возможность предбуревого эффекта, а также показывают высокую чувствительность и эффективность предлагаемого в статье метода.

Детальный анализ процессов в авроральной зоне показал связь выделенных геомагнитных возмущений с параметрами межпланетного магнитного поля и индексами авроральной активности (AU и AL). Экспериментально показана эффективность метода для задач изучения пространственно-временной структуры поля геомагнитных возмущений в высоких широтах.

Авторы планируют продолжить исследование в данном направлении с расширением статистического материала и с последующим уточнением параметров алгоритмов и повышением их эффективности.

## 5. Литература

- [1] Будько, Н.И. Космическая среда вокруг нас / Н.И. Будько, А.Н. Зайцев, А.Т. Карпачев, А.Н. Козлов, Б.П. Филиппов. – Троицк: ТРОВАНТ, 2006. – 232 с.
- [2] Воробьев, А.В. Геоинформационная система для амплитудно-частотного анализа данных наблюдения геомагнитных вариаций и космической погоды / А.В. Воробьев, Г.Р. Воробьева // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 963-972.
- [3] Hafez, A.G. Wavelet Spectral Analysis Technique for Automatic Detection of Geomagnetic Sudden Commencements / A.G. Hafez, E. Ghamry, H. Yayama, K. Yumoto // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2012. – Vol. 50(11). – P. 4503-4512. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2192279.
- [4] Jach, A. Wavelet-based index of magnetic storm activity / A. Jach, P. Kokoszka, J. Sojka, L. Zhu // Journal of geophysical research. – 2006. – Vol. 111(A09215). – P. 1-11. DOI: 10.1029/2006JA011635.
- [5] Xu, A. An Assessment Study of the Wavelet-Based Index of Magnetic Storm Activity (WISA) and its Comparison to the Dst Index / A. Xu, L. Zhu, J. Sojka, P. Kokoszka, A. Jach // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2008. – Vol.70(11/12). – P. 1579-1588. DOI: 10.1016/j.jastp.2008.05.007.
- [6] Nayar, S.R.P. Investigation of substorms during geomagnetic storms using wavelet techniques / S.R.P. Nayar, V.N. Radhika, P.T. Seena // Proceedings of the ILWS Workshop Goa, India. – 2006. – P. 19-24.
- [7] Rotanova, N. Wavelet Analysis of Secular Geomagnetic Variations / N. Rotanova, T. Bondar, V. Ivanov // Geomagnetism and Aeronomy. – 2004. – Vol. 44. – P. 252-258.
- [8] Mandrikova, O. Analysis of the Earth's magnetic field variations on the basis of a wavelet-based approach / O. Mandrikova, I. Solovjev, V. Geppener, R. Taha Al-Kasasbeh, D. Klionskiy // Digital Signal Processing. – 2013. – Vol. 23(1). – P. 329-339.
- [9] Mandrikova, O.V. Methods of analysis of geomagnetic field variations and cosmic ray data / O.V. Mandrikova, I.S. Solovev, T.L. Zalyaev // Earth, Planets and Space. – 2014. – Vol. 66(1). DOI: 10.1186/s40623-014-0148-0.
- [10] Mandrikova, O.V. Multiscale variation model and activity level estimation algorithm of the Earth's magnetic field based on wavelet packets / O.V. Mandrikova, I.S. Solovev, S.Yu. Khomutov, V.V. Geppener, D.M. Klionskiy, M.I. Bogachev // Ann. Geophys. – 2018. – Vol. 36. – P. 1207-1225. DOI: 10.5194/angeo-36-1207-2018.
- [11] Kumar, P. Wavelet analysis for geophysical application / P. Kumar, E. Foufoula-Georgiou // Reviews of Geophysics. – 1991. – Vol. 35(4). – P. 385-412. DOI: 10.1029 / 97RG00427.
- [12] Hafez, A.G. Clear P-wave arrival of weak events and automatic onset determination using wavelet filter banks / A.G. Hafez, T.A. Khan, T. Kohda // Digital Signal Processing. – 2010. – Vol. 20(3). – P. 715-723. DOI: 10.1016/j.dsp.2009.10.002.
- [13] Смирнова, А.С. Ультрафиолетовое излучение солнца как возможная причина предвспышечных долгопериодных колебаний горизонтальной компоненты геомагнитного поля / А.С. Смирнова, С.Д. Снегирев, О.А. Шейнер // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2013. – Vol. 6(1). – P. 88-93.
- [14] Mandrikova, O.V. An automatic method for estimating the geomagnetic field / O.V. Mandrikova, E.A. Zhizhikina // Computer Optics. – 2015. – Vol. 39(3). – P. 420-428. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-3-420-428.
- [15] Mandrikova, O. Method of analysis of geomagnetic data based on wavelet transform and threshold functions / O. Mandrikova, I. Solovev, S. Khomutov, K. Arora, L. Manjula, P. Chandrasekhar // Proceedings of the International conference Information Technology and Nanotechnology, Session Image Processing, Geoinformation Technology and Information Security. – 2017. – Vol. 1901. – P. 180-186.

- [16] Mandrikova, O.V. Method for determining the geomagnetic activity index based on wavelet packets / O.V. Mandrikova, S.E Smirnov, I.S. Solov'ev // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2012. – Vol. 52(11). – P. 111-120.
- [17] Chui, C.K. An introduction to wavelets / C.K. Chui. – Academic Press, New York, 1992. – 264 p.
- [18] Daubechies, I. Ten Lectures on Wavelets / I. Daubechies. – CBMS-NSF Lecture Notes, 1992. – 377 p.
- [19] Khomutov, S.Y. Noise in raw data from magnetic observatories / S.Y. Khomutov, O.V. Mandrikova, E.A. Budilova, A. Kusumita, L. Manjula // *Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems*. – 2017. – Vol. 6(2). – P. 329-343. DOI: 10.5194/gi-6-329-2017.
- [20] Soloviev, A. Automated recognition of spikes in 1 Hz data recorded at the Easter Island magnetic observatory / A. Soloviev, A. Chulliat, S. Bogoutdinov, A. Gvishiani, S. Agayan, A. Peltier, B. Heumez // *Earth Planets Space*. – 2012. – Vol. 64(9). – P. 743-752. DOI: 10.5047/eps.2012.03.004.
- [21] Davis, T. Auroral Electro jet Activity Index AE and Its Universal Time Variations / T. Davis, M. Sugiura // *Journal of Geophysical Research*. – 1966. – Vol. 71(3). – P. 785-801. DOI: 10.1029/JZ071i003p00785.
- [22] Заболотная, Н.А. Индексы геомагнитной активности / Н.А. Заболотная. – М.: Изд-во ЛКИ. – 2007. – 88 с.
- [23] Sugiura, M. Hourly values of equatorial Dst for the IGY/ M. Sugiura // *Ann. Int. Geophys.* – 1964. – Vol. 35. – P. 7-45.
- [24] Zhang, X.Y. Probabilistic forecasting analysis of geomagnetic indices for southward IMF events / X.Y. Zhang, M.B. Moldwin // *Space Weather*. – 2015. – Vol. 13. – P. 130-140. DOI: 10.1002/2014SW001113.
- [25] Lockwood, M. On the origins and timescales of geoeffective IMF / M. Lockwood, M.J. Owens, L.A. Barnard, S. Bentley, C.J. Scott, C.E. Watt // *Space Weather*. – 2016. – Vol. 14. – P. 406-432. DOI: 10.1002/2016SW001375.
- [26] Зайцев, А.Н. Планетарные особенности развития авроральных электроструй по МЛТ-УТ диаграммам АЕ-индекса / А.Н. Зайцев, В.О. Папиташвили, В.А. Попов // *Геомагнетизм и аэрномия*. – 1986. – Т. 26, № 1. – С. 156-158.
- [27] Салихов, З.С. Система контроля космической погоды для оценки технологических рисков на территории полуострова Ямал / З.С. Салихов, А.К. Арабский, В.Д. Кузнецов, А.Н. Зайцев, В.Г. Петров, В.В. Фомичев, О.А. Трошичев, А.С. Янжура // *Наука и техника в газовой промышленности*. – 2010. – № 4. – С. 39-47.

### **Благодарности**

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ №14-11-00194. Авторы благодарят институты, поддерживающие станции регистрации данных, которые были использованы в исследовании и благодарят разработчиков ресурсов INTERMAGNET ([www.intermagnet.org](http://www.intermagnet.org)) и SPIDR за предоставленные данные о параметрах межпланетной среды (<http://spidr.ionosonde.net/spidr/home.do>).

## Analysis of geomagnetic field data during periods of high solar activity and magnetic storms

O.V. Mandrikova<sup>1,2</sup>, A.I. Rodomanskay<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Mirnaya str. 7, Paratunka, Kamchatka region, Russia, 684034

<sup>2</sup>Kamchatka State Technical University, Klyuchevskaya str. 35, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683980

**Abstract.** We present and describe an automated method for analysis of magnetic data and the detection of geomagnetic disturbances based on wavelet transformation. The parameters of the computational algorithms allow us to estimate the characteristics of non-uniformly scaled peculiar properties in the variations of the geomagnetic field that arise during periods of increasing geomagnetic activity. The analysis of geomagnetic data on the eve and during periods of magnetic storms was carried out on the basis of the method according to the network of ground stations. Periods of increasing geomagnetic activity are highlighted which precede and accompany magnetic storms. The dynamic of variation of the geomagnetic field in the auroral zone is considered in detail. The relationship between the selected perturbations and the parameters of the interplanetary magnetic field and the AE-index is shown.