

АВТОМАТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

О.В. Мандрикова^{1,2}, Е.А. Жижкина^{1,2}

¹ Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (ИКИР ДВО РАН),
² ФГБОУ ВПО «Камчатский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ»)

Аннотация

Представлен способ оценки состояния геомагнитного поля, основанный на совмещении вейвлет-преобразования с радиальными нейронными сетями. Способ включает декомпозицию регистрируемых вариаций геомагнитного поля на разномасштабные составляющие, оценку степени их возмущённости и формирование заключения о состоянии поля. Для апробации способа использовались геомагнитные данные станции «Паратунка» (с. Паратунка, Камчатский край, регистрацию данных выполняет ИКИР ДВО РАН).

Выполнен анализ спектрально-временных характеристик вариаций геомагнитного поля в периоды умеренных и сильных магнитных бурь. Накануне бурь в геомагнитном поле зафиксированы слабые возмущения. Результаты исследования подтвердили эффективность предлагаемого способа.

Ключевые слова: нейронные сети, вейвлет-преобразование, геомагнитные данные, магнитное поле Земли.

Цитирование: Мандрикова, О.В. Автоматический способ оценки состояния геомагнитного поля / О.В. Мандрикова, Е.А. Жижкина // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 3. – С. 420-428.

Введение

Работа направлена на создание теоретических и программных средств анализа параметров геомагнитного поля и выделения возмущений в период повышенной активности Солнца. Известно, что изучение вариаций магнитного поля Земли является основой оценки свойств и состояния электромагнитных полей в околоземном космическом пространстве [1]. В результате воздействия солнечной активности на околоземное космическое пространство происходят магнитосферные возмущения различного масштаба и длительности, которые негативно воздействуют на современные технологические системы [1, 2]. В магнитном поле также могут проявляться катастрофические природные события или процессы на стадии их подготовки [2].

Наблюдения за магнитным полем осуществляются более чем в 70 странах. Для этого традиционно используются наземные магнитометры. Особенно важны наблюдения в высокоширотных областях, а прогноз космической погоды необходим для надёжной работы технической инфраструктуры Арктического региона. Регистрируемые вариации геомагнитного поля имеют сложную нестационарную структуру. На рис. 1 в качестве примера показаны горизонтальные компоненты геомагнитного поля в спокойный период и во время магнитной бури. В ночное время геомагнитная активность возрастает, а во время магнитных бурь могут наблюдаться резкие выбросы и колебания [1, 3, 4]. Помимо суточного хода, геомагнитные данные имеют сезонный, вековой ход и подвержены влиянию 11-летнего цикла солнечной активности [1].

Сложная структура вариаций геомагнитного поля существенно усложняет процесс их изучения и делает малоэффективными для решения поставленной задачи классические методы анализа данных [1, 4–6], которые не позволяют выявлять некоторые закономерности и приводят к потере важной информации. Не-

достатком используемых классических методов и подходов также является недостаточная степень их автоматизации, что весьма важно в задачах оперативной обработки данных околоземного пространства и прогноза космической погоды.

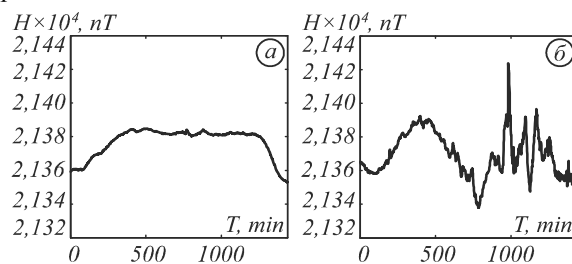


Рис. 1. H-компоненты магнитного поля Земли:

а) спокойная суточная вариация;
 б) возмущённая суточная вариация

Как показывают последние исследования [4, 7–17], естественным и наиболее эффективным способом описания таких данных являются нелинейные адаптивные аппроксимирующие схемы. Основанные на этом подходе методы декомпозиции на эмпирические моды (ДЭМ) [16, 17] и адаптивные вейвлет-разложения [4, 8–15] получают в настоящее время интенсивное развитие в обработке и анализе сложных структур данных [4, 8–15]. Оба этих метода учитывают особенности структуры сигнала и позволяют описывать процессы со сложной структурой [18, 19]. Достоинством вейвлет-анализа является большое число ортогональных базисов с компактными носителями и наличие быстрых вычислительных алгоритмов [19]. Основной сложностью при его использовании является неочевидность выбора базиса для решения конкретной задачи [19–21]. В то же время для задач аппроксимации функции предложены критерии выбора вейвлет-базиса и построены вычислительные алгоритмы, позволяющие адаптивно подобрать базис и минимизировать погрешность получаемой аппрокси-

мации [19, 21]. В отличие от вейвлет-преобразования в методе ДЭМ функции базиса определяются непосредственно из данных и построенный базис апостериорен [20, 22]. Поэтому в большинстве случаев извлекаемые аппроксимирующие компоненты могут эффективно применяться только для обработки того сигнала, из которого они были извлечены. Такой базис является эмпирическим и для аппроксимации вариаций геомагнитного поля с непрерывно изменяющейся структурой не является достаточно эффективным. Недостатком ДЭМ также является не полностью разработанная теоретическая база [18, 20]. В частности, линейная независимость аппроксимирующих компонентов не доказана математически, и свойство ортогональности выделенных эмпирических мод может быть проверено только апостериорно [23]. В свою очередь, вейвлет-анализ имеет хорошо разработанный математический аппарат и получает широкое распространение в области геофизики. На основе вейвлет-преобразования предложены способы анализа особенностей, возникающих в геомагнитном поле в периоды мощных солнечных вспышек [24, 25], разработаны алгоритмы автоматического определения периодов начальной фазы бури [26], созданы алгоритмы удаления шума и исключения периодической компоненты, вызванной вращением Земли [27, 28]. В данной работе вейвлет-анализ применялся совместно с нейронными сетями. Аппарат нейронных сетей широко применяется в задачах распознавания образов и анализа данных [29–31]. Нейронные сети также показали свою эффективность и в области геофизики [14, 32, 33]. Этот аппарат позволяет воспроизводить сложные нелинейные зависимости данных [32–34], выявлять скрытые закономерности в данных и легко реализуем в автоматическом режиме [35, 36].

В основе разработанного авторами способа лежат кратномасштабное вейвлет-разложение (КМА) [19] и радиальные нейронные сети [36]. На основе КМА в работе выполняется декомпозиция вариаций геомагнитного поля на разномасштабные компоненты, характеризующие возмущённость поля, и подавляется шум. Выделенные компоненты поступают в радиальные нейронные сети, выполняющие оценку степени их возмущённости. Детальное изучение структуры геомагнитных данных (на примере горизонтальной компоненты магнитного поля Земли (Н-компоненты)), выполненное на основе КМА, позволило выделить признаки возмущённости поля и на их основе сформировать образы классов для радиальных слоёв нейронных сетей. Это повысило качество решения задачи на основе нейронных сетей и, в отличие от традиционной архитектуры, позволило существенно уменьшить количество используемых примеров в их радиальном слое.

Для решения задачи в данной работе сформированы шесть радиальных нейронных сетей, объединённых в коллектив электронных экспертов. Формирование заключения о состоянии геомагнитного поля вы-

полняется на основе решающего правила, использующего комбинации решений экспертов коллектива.

Для апробации способа использовались геомагнитные данные станции «Паратунка» (с. Паратунка, Камчатский край, регистрацию выполняет ИКИР ДВО РАН) за период 2002–2008 гг. Выполненный анализ данных в периоды повышенной геомагнитной активности показал перспективность применения разработанного способа и возможность его использования в задачах прогноза космической погоды и предсказания сильных магнитных бурь.

Описание способа

Декомпозиция вариаций геомагнитного поля на разномасштабные компоненты

В качестве базового пространства регистрируемых дискретных данных $f_0(t)$ рассматривается замкнутое пространство с разрешением $j = 0$:

$$V_0 = \text{clos}_{L^2(R)}(2^0 \phi(2^0 t - k)) : k \in Z,$$

порождённое скэйлинг-функцией $\phi \in L^2(R)$ [19]. На основе кратномасштабного вейвлет-разложения до уровня m можно получить представление данных в виде суммы аппроксимирующей и детализирующих компонент:

$$f_0(t) = \sum_{j=-1}^{-m} g[2^j t] + f[2^{-m} t], \tag{1}$$

где $g[2^j t] \in W_j$, W_j – пространство с разрешением j , порождённое вейвлет-базисом $\Psi_{j,n}(t) = 2^{j/2} \Psi(2^j t - n)$, разномасштабные *детализирующие компоненты* $g[2^j t] = \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t)$, $d_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle$, j – масштаб; *аппроксимирующая компонента*

$$f[2^{-m} t] = \sum_k c_{-m,k} \phi_{-m,k}(t), \quad c_{-m,k} = \langle f, \phi_{-m,k} \rangle.$$

В данной работе использовались вейвлеты $\Psi_{j,n}(t)$ и скэйлинг-функция $\phi_{-m,k}(t)$ Добеши порядка 3.

Схема представления данных на основе отображения (1) показана на рис. 2.

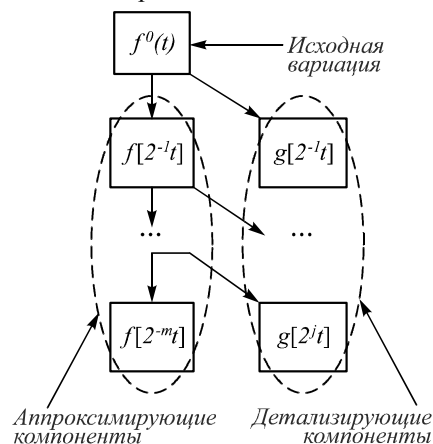


Рис. 2. Схема разложения данных до уровня m

Введение классов состояний геомагнитного поля и определение их признаков

Характеристикой состояния геомагнитного поля является индекс геомагнитной активности K [1]. В работе рассматривались три возможных состояния геомагнитного поля, и было принято:

- 1) «спокойное» состояние (1-й класс), если суммарный за сутки индекс геомагнитной активности $\sum K \leq 10$;
- 2) «слабовозмущённое» состояние (2-й класс), если $10 < \sum K \leq 18$;
- 3) «возмущённое» состояние (3-й класс), если $\sum K > 18$.

Детальное изучение структуры геомагнитных данных показало [4, 14, 15, 37, 38], что коэффициенты $d_{j,n}$ детализирующих компонент $g[2^j t]$ масштабов $j = -1, -2, \dots, -6$ характеризуют возмущённость поля и в периоды повышения геомагнитной активности существенно возрастают их абсолютные значения. На рис. 3 в качестве примера, показаны детализирующие компоненты вариаций геомагнитного поля масштаба $j = -4$ в периоды «спокойного» и «возмущённого» состояний поля. Следуя данным результатам, абсолютные значения коэффициентов компонент $|d_{j,n}|$ примем за меру их геомагнитной возмущённости. За меру геомагнитной возмущённости компоненты $g[2^j t]$ примем максимум абсолютных значений её коэффициентов: $V_{g_j} = \max_n |d_{j,n}|$.

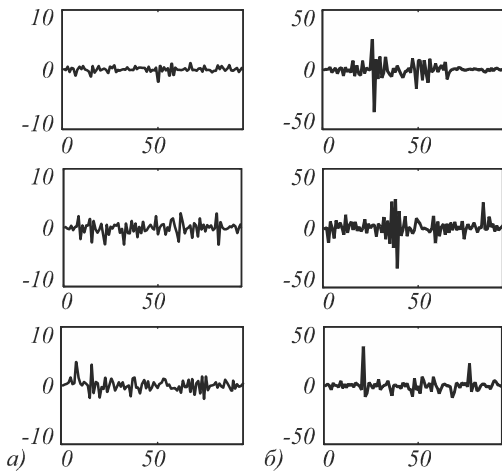


Рис. 3. Детализирующие компоненты вариаций геомагнитного поля масштаба $j = -4$, полученные с помощью вейвлета Добеши 3-го порядка: а) периоды «спокойного» состояния поля, б) периоды «возмущённого» состояния поля

В соответствии с рассматриваемыми состояниями поля будем считать, что компонента $g[2^j t]$ может иметь одно из трёх возможных состояний – «спокойное», «слабовозмущённое» или «возмущённое». Выше показано, что состояние компонент $g[2^j t]$, $j = -1, -2, \dots, -6$ определяет состояние геомагнитного поля. Для оценки его состояния введём следующее решающее правило:

- 1) если все компоненты имеют «спокойное» состояние либо только одна из компонент имеет «слабовозмущённое» состояние, то геомагнитное поле имеет «спокойное» состояние (1-й класс);
- 2) если хотя бы одна из компонент имеет «возмущённое» состояние, то геомагнитное поле имеет «возмущённое» состояние (3-й класс);
- 3) в остальных случаях считается, что поле имеет «слабовозмущённое» состояние (2-й класс).

Оценку состояния каждой из 6 выделенных компонент будем выполнять на основе радиальных нейронных сетей, способ формирования которых описан ниже.

Формирование радиального слоя нейронной сети

Радиальные нейронные сети традиционно имеют три слоя [36]: входной слой; скрытый слой примеров (радиальный слой), содержащий признаки классов; выходной линейный слой, определяющий принадлежность входного образа к классу.

В радиальном слое выполняется следующее преобразование входных данных [36]:

1. Оценка состояния нейронов на основе функции взвешивания $r = \|p - w\|b$, где p – вектор входа, w – вектор примера, b – смещение.
2. Используя пороговую функцию активации, оценка меры близости входного вектора и примера.

Когда расстояние r между вектором примера w и входным вектором p уменьшается, выход функции активации приближается к значению «1», в противном случае — к значению «0».

В соответствии с постановкой задачи входным вектором нейронной сети является компонента $g[2^j t]$. Задачей нейронной сети является определение её состояния. Мерой геомагнитной возмущённости компоненты $g[2^j t]$ является введённая выше величина $V_{g_j} = \max_n |d_{j,n}|$. Представленные на рис. 4 значения величин $V_{g_{-2}}$ и $V_{g_{-6}}$, определённые для компонент в периоды «спокойного», «слабовозмущённого» и «возмущённого» состояний поля, показывают, что диапазоны их значений имеют существенное наложение. Это обусловлено сложным характером процесса и отсутствием чётких границ между рассматриваемыми классами. Учитывая данные особенности процесса, введём следующие подклассы состояний компонент:

- 1) для «спокойного» состояния – подкласс « α -спокойных» (κ_1): $\max_n |d_{j,n}| \leq T_j^{\alpha_1}$ и « β -спокойных» (κ_2): $T_j^{\alpha_1} < \max_n |d_{j,n}| \leq T_j^{\beta_1}$;
- 2) для «слабовозмущённого» состояния – подкласс « α -слабовозмущённых» (κ_3): $T_j^{\beta_1} < \max_n |d_{j,n}| \leq T_j^{\alpha_2}$ и « β -слабовозмущённых» (κ_4): $T_j^{\alpha_2} < \max_n |d_{j,n}| \leq T_j^{\beta_2}$;
- 3) для «возмущённого» состояния – подкласс « α -возмущённых» (κ_5): $T_j^{\beta_2} < \max_n |d_{j,n}| \leq T_j^{\alpha_3}$ и « β -возмущённых» (κ_6): $\max_n |d_{j,n}| > T_j^{\alpha_3}$.

При обучении нейронной сети пороги $T_j^{\alpha_1}, T_j^{\beta_1}, T_j^{\alpha_2}, T_j^{\beta_2}, T_j^{\alpha_3}$, определяющие принадлежность входного признака подклассу, могут быть оценены путём минимизации ошибки сети на множестве обучающих векторов.

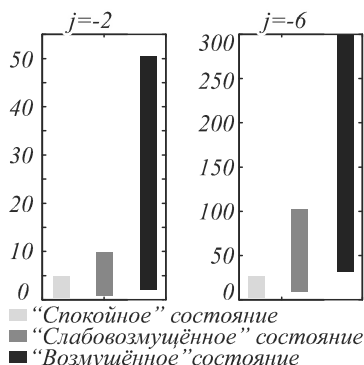


Рис. 4. Значения величин V_{g-2} и V_{g-6} , определённые для компонент в периоды «спокойного», «слабовозмущённого» и «возмущённого» состояний поля (в оценках использовалось 100 «спокойных» вариаций поля, 190 «слабовозмущённых» вариаций поля и 86 «возмущённых» вариаций поля)

Введённые выше меры геомагнитной возмущённости определяют признаки рассматриваемых подклассов. Используя меру возмущённости коэффициента – его абсолютное значение $|d_{j,n}|$, для каждого введённого подкласса k_i в радиальном слое нейронной сети создадим один пример P_{j,k_i} по правилу:

$$P_{j,k_i} = \left(\sum_{u_i=1}^{u_i} D_{j,u_i} \right) / U_i, \quad (2)$$

где $D_{j,u_i} = (|d_{j,1}^{u_i}|, |d_{j,2}^{u_i}|, \dots, |d_{j,N_j}^{u_i}|)$, u_i – номер компоненты подкласса k_i , N_j – длина компоненты масштаба j , U_i – количество компонент подкласса k_i .

Применение правила (2) при формировании радиального слоя нейронной сети, в отличие от традиционного подхода [36], позволяет существенно уменьшить количество используемых примеров и оптимизирует работу сети. Полученные по правилу (2) примеры подклассов $P_{j,i}$ для масштаба $j=-6$ показаны на рис. 5. Анализ рис. 5 показывает, что разделение образов лучше происходит в ночное время, что обусловлено характером геомагнитного процесса и возрастанием возмущений в периоды бурь в ночное время.

На рис. 6 показана полученная архитектура нейронной сети.

Разработанная структура коллектива нейронных сетей, выполняющая оценку состояния геомагнитного поля, представлена на рис. 7. Коллектив состоит из шести радиальных нейронных сетей, каждая из которых выполняет оценку состояния определённой детализирующей компоненты вариации геомагнитного поля. Формирование заключения о состоянии геомаг-

нитного поля основано на решениях нейронных сетей коллектива и выполняется с помощью введённого выше решающего правила.

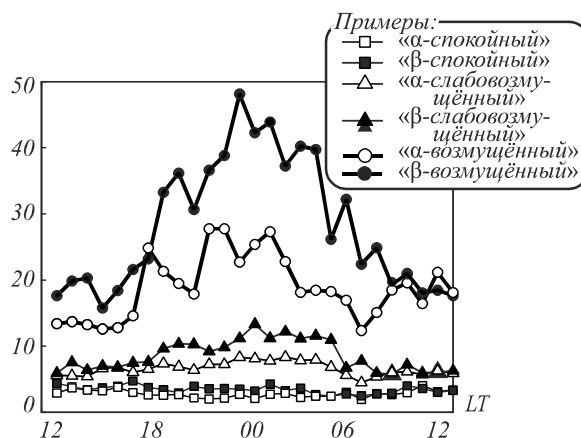


Рис. 5. Примеры подклассов радиального слоя нейронной сети для масштаба $j = -6$

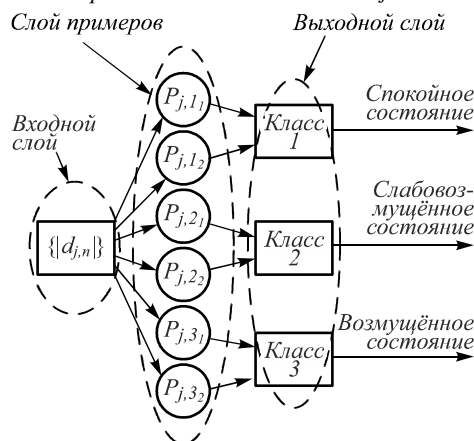


Рис. 6. Архитектура нейронной сети

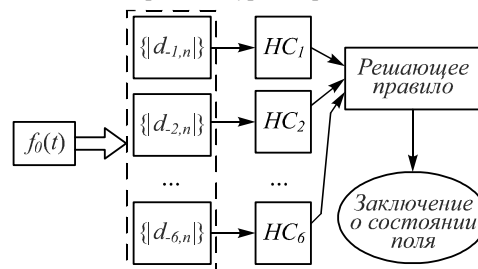


Рис. 7. Структура коллектива нейронных сетей

Оценка эффективности способа

С помощью построенного коллектива нейронных сетей выполнена оценка состояния вариаций геомагнитного поля, полученных на станции «Паратунка» (Камчатский край) за период 2002–2008 гг. Результаты работы коллектива представлены в табл. 1. Для оценки эффективности предлагаемого способа выполнено сравнение полученных результатов с результатами работы традиционной радиальной нейронной сети, на вход которой подавались исходные вариации геомагнитного поля (без применения вейвлет-преобразования). Примеры-образы радиального слоя такой сети, в соответствии с процедурой (2), создавались следующим образом:

$$P_{\kappa_i} = \left(\sum_{u_i=1}^{U_i} f_{0,u_i} \right) / U_i,$$

где f_{0,u_i} – исходная вариация подкласса κ_i , u_i – номер вариации подкласса κ_i , U_i – количество вариаций подкласса κ_i .

Результаты работы традиционной нейронной сети, представленные в табл. 1 (правый столбец), подтверждают эффективность предлагаемого способа и возможность его использования для автоматического определения степени возмущённости регистрируемых вариаций геомагнитного поля.

Табл. 1. Погрешность работы нейронных сетей

Анализируемый период	Погрешность коллектива сетей, %	Погрешность традиционной сети, %
2002 г.	18,58	48,82
2003 г.	11,96	71,4
2004 г.	19,89	51,16
2005 г.	18,39	54,52
2006 г.	18,57	55,7
2007 г.	23,01	60
2008 г.	18,85	54,37

Анализ работы разработанного коллектива нейронных сетей в периоды повышенной геомагнитной активности показал, что более чем в 70 % случаев накануне сильных и умеренных магнитных бурь фиксируются слабые возмущения геомагнитного поля (было проанализировано 97 событий). На рис. 8, 9 в качестве примера показаны результаты работы коллектива в периоды двух событий – магнитной бури с резким началом 02 октября 2013 г. и магнитной бури с постепенным началом 20 апреля 2005 г. За двое суток до момента начала первой магнитной бури, 29 сентября, на Солнце произошла протонная вспышка класса C1.2 продолжительностью 200 мин., максимум которой наблюдался в 23:39 UT. Скорость солнечного ветра 1 октября плавно выросла с 250 до 400 км/с, в высоких широтах было зарегистрировано постепенное начало бури в 07.48 UT [39]. В верхней части рис. 8 показаны значения индексов геомагнитной активности K (K-индексы), ниже изображены вариации геомагнитного поля (H-компоненты). В нижней части рис. 8 показаны результаты оценки состояния вариаций геомагнитного поля с помощью построенного коллектива. Видно, что накануне магнитной бури, 1 октября, коллективом нейронных сетей зафиксированы слабые возмущения. На анализируемых средних широтах внезапное начало магнитной бури было зарегистрировано 2 октября примерно в 01:52 UT [39].

Постепенное начало второй анализируемой магнитной бури было зарегистрировано на средних широтах 20 апреля примерно в 03:00 UT. Скорость солнечного ветра с начала суток возросла с 380 до 540 м/с. Как показывает анализ рис. 9, за двое суток до события коллективом нейронных сетей зафиксированы слабые возмущения геомагнитного поля.

Полученные результаты согласуются с результатами работ [13, 14] и важны для прогноза состояния

околоземного космического пространства и предсказания сильных магнитных бурь.

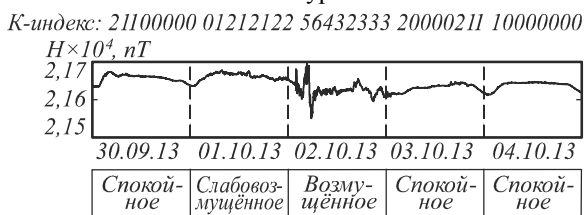


Рис. 8. Результаты оценки состояния вариаций геомагнитного поля за период 30.09.2013–04.10.2013

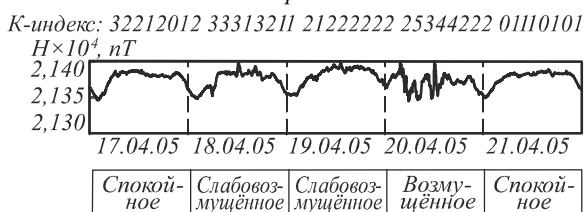


Рис. 9. Результаты оценки состояния вариаций геомагнитного поля за период 17.04.2005–21.04.2005 гг.

Детальный анализ спектрально-временных характеристик вариаций поля в периоды магнитных бурь показал, что в большинстве случаев геомагнитные возмущения попадают в различные детализирующие компоненты. На рис. 10, 12 показаны деревья вейвлет-разложения вариаций геомагнитного поля для рассматриваемых магнитных бурь, серым цветом отмечены компоненты, которые были определены нейронными сетями как «возмущённые». Видно, что в первом случае геомагнитные возмущения зафиксированы во всех компонентах, что говорит о сложном спектре вариаций и многомасштабном характере процесса. Во втором случае отклонения зафиксированы в детализирующих компонентах 3–6-го масштабов. Также на рис. 10, 12 показаны исходные вариации геомагнитного поля и их возмущённые составляющие, полученные путём восстановления «возмущённых» детализирующих компонент. Построенные вейвлет-спектры возмущённых составляющих вариаций поля, показанные на рис. 11 и 13, подтверждают сложный многомасштабный характер анализируемых процессов.

Заключение

В работе описан автоматический способ оценки состояния геомагнитного поля, основанный на совмещении вейвлет-преобразования с радиальными нейронными сетями. Анализ работы построенного коллектива нейронных сетей подтвердил эффективность предлагаемого способа. Исследование спектрально-временных характеристик магнитных бурь (проанализировано 86 событий) показало, что возникающие в геомагнитном поле возмущения в своём большинстве имеют сложную спектральную структуру и проявляются в различных компонентах вариаций поля. Замечено, что накануне бурь предлагаемым способом фиксируются слабые возмущения геомагнитного поля, что важно для прогноза состояния око-

лоземного космического пространства и предсказания сильных магнитных бурь.

В экспериментах использовались вариации геомагнитного поля, полученные на станции «Паратунка»,

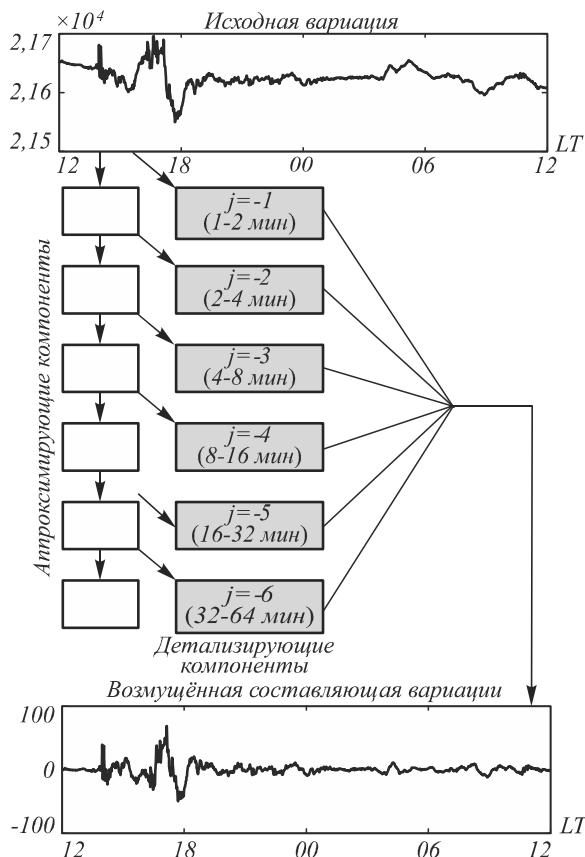


Рис. 10. Вариации геомагнитного поля в период магнитной бури 02 октября 2013 г. и её возмущённая составляющая

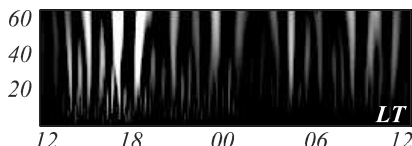


Рис. 11. Вейвлет-спектр возмущённой составляющей вариации геомагнитного поля в период магнитной бури 02 октября 2013 г.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 14-11-00194, а также Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (программа «УМНИК») договор № 4024ГУ1/2014 и частичной поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора № 02.G25.31.0058 от 12.02.2013.

Литература

1. Космическая среда вокруг нас / Н.И. Будько, А.Н. Зайцев, А.Т. Карпачев, А.Н. Козлов, Б.П. Филиппов; под ред. А.Н. Зайцева. – Троицк: ТРОВАНТ, 2006. – 232 с.
2. **Белинская, А.Ю.** Возможности магнитно-ионосферных наблюдений в задачах прогноза и диагностики природных и техногенных экстремальных событий /

Камчатский край (регистрацию данных выполняет ИКИР ДВО РАН).

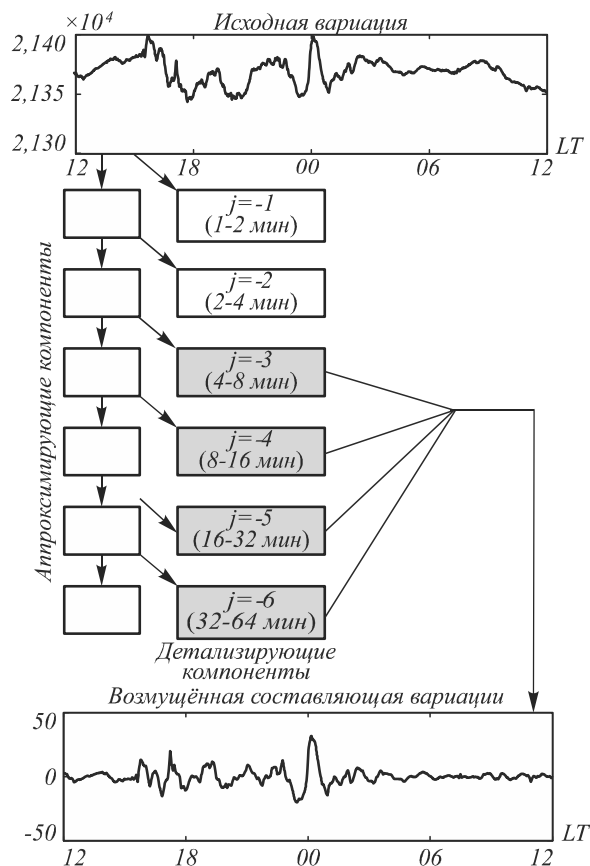


Рис. 12. Вариации геомагнитного поля в период магнитной бури 20 апреля 2005 г. и её возмущённая составляющая

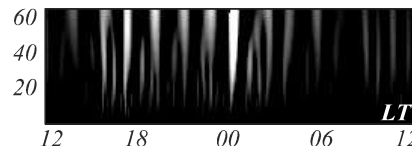


Рис. 13. Вейвлет-спектр возмущённой составляющей вариации геомагнитного поля в период магнитной бури 20 апреля 2005 г.

3. **Gvishiani, A.** Survey of geomagnetic observations made in the northern sector of Russia and new methods for analysing them / A. Gvishiani, R. Lukianova, A. Soloviev, A. Khokhlov // Surveys in Geophysics. – 2014. – Vol. 35(5). – P. 1123-1154.
4. **Mandrikova, O.V.** Analysis of the Earth's magnetic field variations on the basis of a wavelet-based approach / O.V. Mandrikova, I.S. Solovyev, V.V. Geppener, D.M. Klionsky, R.T. Al-Kasabeh // Digital Signal Processing. – 2013. – Vol. 23. – P. 329-339.
5. **Wagner, C.-U.** Large scale electric fields and currents and related geomagnetic variations in the quiet plasmasphere / C.U. Wagner, D. Mohlmann, K. Schafer, V.M. Mishin, M.I. Matveev // Space Science Reviews. – 1980. – Vol. 26. – P. 391-446.
6. **Яновский, Б.М.** Земной магнетизм: учеб. пособие / Б.М. Яновский; под ред. В.В. Металловой. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. – 592 с.

7. **Одинцов, В.И.** Спектральный анализ аномального магнитного поля Земли для разновысотных съёмок / В.И. Одинцов, Н.М. Ротанова, Ю.П. Цветков, А. Ченчанг // Геомагнетизм и аэрономия. – 2000. – Т. 40, № 2. – С. 59-66. – ISSN 0016-7940.
8. **Kato, H.** Development of automatic scaling software of ionospheric parameters / H. Kato, Y. Takiguchi, D. Fukayama, Y. Shimizu, T. Maruyama, M. Ishii // Journal of the National Institute of Information and Communications Technology. – 2009. – Vol. 56. – P. 465-474.
9. **Hamoudi, M.** Wavelet analysis of ionospheric disturbances / M. Hamoudi, N. Zaourar, R. Mebarki, L. Briquieu, M. Parrot // Geophysical Research Abstracts. EGU General Assembly. – 2009. – Vol. 11. – EGU2009-8523.
10. **Akyilmaz, O.** Fuzzy-wavelet based prediction of Earth rotation parameters / O. Akyilmaz, H. Kutterer, C.K. Shum, T. Ayar // Applied Soft Computing. – 2011. – Vol. 11(1). – P. 837-841.
11. **Zaourar, N.** Wavelet-based multiscale analysis of geomagnetic disturbance / N. Zaourar, M. Hamoudi, M. Manda, G. Balasis, M. Holschneider // Earth, Planets and Space. – 2013. – Vol. 65. – P. 1525-1540.
12. **Ghamry, E.** Effect of SC on frequency content of geomagnetic data using DWT application: SC automatic detection / E. Ghamry, A. Hafez, K. Yumoto, H. Yayama // Earth, Planets and Space. – 2013. – Vol. 65. – P. 1007-1015.
13. **Мандрикова, О.В.** Вейвлет-анализ данных магнитного поля Земли / О.В. Мандрикова, В.В. Богданов, И.С. Соловьев // Геомагнетизм и аэрономия. – 2013. – Т. 53, № 2. – С. 282-288. – ISSN 0016-7940.
14. **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. – P. 148.
15. **Мандрикова, О.В.** Оценка состояния геомагнитного поля на основе совмещения вейвлет-преобразования с радиальными нейронными сетями / О.В. Мандрикова, Е.А. Жижкина // Машинное обучение и анализ данных. – 2014. – Т. 1, № 10. – С. 1335-1344. – ISSN 2223-3792.
16. **Yu, Z.G.** Modeling and simulation of the horizontal component of the geomagnetic field by fractional stochastic differential equations in conjunction with empirical mode decomposition / Z.G. Yu, V. Anh, Y. Wang, D. Mao, J. Wanliss // Journal of Geophysical Research. – 2010. – Vol. 115(A10). – DOI: 10.1029/2009JA015206
17. **Rilling, G.** On empirical mode decomposition and its algorithms / G. Rilling, P. Flandrin, P. Goncalves // IEEE-URASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing. – 2003. – P. 112-114.
18. **Павлов, А.Н.** Метод эмпирических мод и вейвлет-фильтрация: применение в задачах геофизики / А.Н. Павлов, А.Е. Филатова // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2011. – Т. 19, № 1. – С. 3-13.
19. **Малла, С.** Вэйвлеты в обработке сигналов / С. Малла; пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
20. **Клионский, Д.М.** Новый подход к автоматизированному выявлению шаблонов в телеметрических сигналах на основе декомпозиции на эмпирические моды / Д.М. Клионский, Н.И. Орешко, В.В. Геппенер // Научные ведомости Белгородского государственного университета. – 2009. – Т. 12, № 15-1. – С. 118-129.
21. **Мандрикова, О.В.** Критерии выбора вейвлет-функции в задачах аппроксимации природных временных рядов сложной структуры / О.В. Мандрикова, Ю.А. Полозов // Информационные технологии. – 2012. – № 1. – С. 31-36. – ISSN 1684-6400.
22. **Huang, N.E.** Hilbert-Huang transform and its applications / N.E. Huang, S.S. Shen. – Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2005. – 311 p.
23. **Huang, N.E.** The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis / N.E. Huang, Z. Shen, S.R. Long, M.C. Wu, H.H. Shih, Q. Zheng, N-C. Yen, C.C. Tung, H.H. Liu // Proceedings of the Royal Society of London A. – 1998. – Vol. 454. – P. 903-995.
24. **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.
25. **Ротанова, Н.М.** Вейвлет-анализ вековых геомагнитных вариаций / Н.М. Ротанова, Т.Н. Бондарь, В.В. Иванов // Геомагнетизм и аэрономия. – 2004. – Т. 44, № 2. – С. 276-282. – ISSN 0016-7940.
26. **Hafez, A.G.** Systematic examination of the geomagnetic storm sudden commencement using multi resolution analysis / A.G. Hafez, E. Ghamry, H. Yayama, K. Yumoto // Advances in Space Research. – 2013. – Vol. 51. – P. 39-49.
27. **Xu, Z.** An assessment study of the wavelet-based index of magnetic storm activity (WISA) and its comparison to the Dst index / Z. Xu, L. Zhu, J. Sojka, A. Jach // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. – 2008. – Vol. 70. – P. 1579-1588.
28. **Jach, A.** Wavelet-based index of magnetic storm activity / A. Jach, P. Kokozska, J. Sojka, L. Zhu // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2006. – Vol. 111(A09215). – P. 1-11. – A09215 – DOI: 10.1029/2006JA011635.
29. **Сирота, А.А.** Двухэтапный алгоритм обнаружения и оценивания границы объектов на изображениях в условиях аддитивных помех и деформирующих искажений / А.А. Сирота, А.И. Соломагин, Е.В. Воронова // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 1. – С. 109-117. – ISSN 0134-2452.
30. **Савченко, А.В.** Распознавание изображений на основе вероятностной нейронной сети с проверкой однородности / А.В. Савченко // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 2. – С. 254-262. – ISSN 0134-2452.
31. **Солдатова, О.П.** Применение свёрточной нейронной сети для распознавания рукописных цифр / О.П. Солдатова, А.А. Гаршин // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 2. – С. 252-259. – ISSN 0134-2452.
32. **Бархатова, О.М.** Нелинейная связь авроральных (AU, AL) и среднеширотных (SYM-H, ASY-H) индексов геомагнитной активности на главной фазе геомагнитной бури / О.М. Бархатова // Солнечно-земная физика. – 2013. – № 23. – С. 100-108. – ISSN 0135-3748.
33. **Uwamahoro, J.** Estimating the geoeffectiveness of halo CMEs from associated solar and IP parameters using neural networks / J. Uwamahoro, L.A. McKinnell, J.B. Habarulema // Annales Geophysicae. – 2012. – Vol. 30. – P. 963-972.
34. **Бархатов, Н.А.** Влияние магнитного поля солнечного ветра на турбулентность переходной области за отошедшей ударной волной / Н.А. Бархатов, Н.С. Беллостин, Ж.Л. Бужере, С.Ю. Сахаров, Ю.В. Токарев // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2001. – Т. 44, № 12. – С. 993-1002. – ISSN 0021-3462.
35. **Нейроматематика: уч. пособие для вузов / А.Д. Агеев, А.Н. Балухто, А.В. Бычков – М.: ИЖПР, 2002. – 448 с.**
36. **Хайкин, С.** Нейронные сети: полный курс. / С. Хайкин; пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
37. **Мандрикова, О.В.** Анализ геомагнитных данных на основе совмещения вейвлет-преобразования с радиаль-

- ными нейронными сетями / О.В. Мандрикова, Е.А. Жижикина // Цифровая обработка сигналов и ее применение: доклады 16 Международной конференции. – 2014. – С. 573-578.
38. **Мандрикова, О.В.** Оценка степени возмущённости геомагнитного поля на основе совмещения вейвлет-преобразования с радиальными нейронными сетями / О.В. Мандрикова, Е.А. Жижикина // 17 Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям: сборник докладов. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2014. – Т.2. – С. 223-226.
39. ФГБУ «ИПП» [Электронный ресурс]. – URL:<http://ipg.geospace.ru/> (дата обращения 10.04.2015).

References

- [1] Bud'ko NI, Zaitsev AN, Karpachev AT, Kozlov AN, Filippov BP. Space Around Us [In Russian]. Ed by Zaitsev AN. Troitsk: TROVANT; 2006.
- [2] Belinskaya AYU, Khomutov SY. The possible of magnetic-ionospheric observations in problems of prediction and diagnosis of nature and anthropogenic extremal events [In Russian]. Interexpo Geo Siberia 2012; 3: 37-45.
- [3] Gvishiani A, Lukianova R, Soloviev A, Khokhlov A. Survey of geomagnetic observations made in the northern sector of Russia and new methods for analysing them. Surveys in Geophysics 2014; 35(5): 1123-54.
- [4] Mandrikova OV, Solovyev IS, Geppener VV, Klionsky DM, Al-Kasabeh RT. Analysis of the Earth's magnetic field variations on the basis of a wavelet-based approach. Digital Signal Processing 2013; 23: 329-39.
- [5] Wagner C-U, Mohlmann D, Schafer K, Mishin VM, Matveev MI. Large scale electric fields and currents and related geomagnetic variations in the quiet plasmasphere, Space Sci. Rev. 1980; 26: 391-446.
- [6] Yanovskiy BM. Terrestrial magnetism [In Russian]. Leningrad: Leningrad University Press; 1978.
- [7] Odintsov VI, Rotanova NM, Tsvetkov YuP, Chenchang A. Spectrum analysis of the anomalous geomagnetic field for different-altitude surveys. Geomagnetism and Aeronomy 2000; 40(2): 190-7.
- [8] Kato H, Takiguchi Y, Fukayama D, Shimizu Y, Maruyama T, Ishii M. Development of automatic scaling software of ionospheric parameters. Journal of the National Institute of Information and Communications Technology 2009; 56: 465-74.
- [9] Hamoudi M, Zaourar N, Mebarki R, Briquieu L, Parrot M. Wavelet analysis of ionospheric disturbances. Geophysical Research Abstracts. EGU General Assembly 2009; 11: EGU2009-8523.
- [10] Akyilmaz O, Kutterer H, Shum CK, Ayan T. Fuzzy-wavelet based prediction of Earth rotation parameters. Applied Soft Computing 2011; 11(1): 837-41.
- [11] Zaourar N, Hamoudi M, Mandea M, Balasis G, Holschneider M. Wavelet-based multiscale analysis of geomagnetic disturbance. Earth, Planets and Space 2013; 65: 1525-40.
- [12] Ghamry E, Hafez A, Yumoto K, Yayama H. Effect of SC on frequency content of geomagnetic data using DWT application: SC automatic detection. Earth, Planets and Space 2013; 65: 1007-15.
- [13] Mandrikova OV, Bogdanov VV, Solov'ev IS. Wavelet analysis of geomagnetic field data. Geomagnetism and Aeronomy 2013; 53(2): 268-73.
- [14] Mandrikova OV, Solovev IS, Zalyaev TL. Methods of analysis of geomagnetic field variations and cosmic ray data. Earth, Planets and Space 2014; 66: 148.
- [15] Mandrikova OV, Zhizhikina EA. Estimation of degree of the geomagnetic field disturbance based on the combined use of wavelet transform with radial neural networks [In Russian]. Machine Learning and Data Analysis 2014; 1(10): 1335-44.
- [16] Yu ZG, Anh V, Wang Y, Mao D, Wanliss J. Modeling and simulation of the horizontal component of the geomagnetic field by fractional stochastic differential equations in conjunction with empirical mode decomposition. Journal of Geophysical Research 2010; 115(A10): DOI: 10.1029/2009JA015206.
- [17] Rilling G, Flandrin P, Goncalves P. On empirical mode decomposition and its algorithms. IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing 2003: 112-114.
- [18] Pavlov AN, Filatova AE. Method of empirical modes and wavelet-filtering: application in geophysical problems [In Russian]. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics 2011; 19(1): 3-13.
- [19] Mallat S. A wavelet tour of signal processing. London: Academic Press; 1999.
- [20] Klionskiy DM, Oreshko NI, Geppener VV. New approach to automatic pattern extraction in telemetric signals on the basis of the empirical mode decomposition [In Russian]. Belgorod State University Scientific Bulletin 2009; 12(15-1): 118-29.
- [21] Mandrikova OV, Polozov YuA. Criteria of a choice wavelet-function in problems of approximation of natural time numbers difficult structure [In Russian]. Information Technologies 2012; 1: 31-6.
- [22] Huang NE, Shen SS. Hilbert-Huang transform and its applications. Singapore: World Scientific Press Co. Pte. Ltd; 2005.
- [23] Huang NE, Shen Z, Long SR, Wu MC, Shih HH, Zheng Q, Yen N-C, Tung CC, Liu HH. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proc. R. Soc. London, Ser. A 1998; 454: 903-95.
- [24] Nayar SRP, Radhika VN, Seena PT. Investigation of substorms during geomagnetic storms using wavelet techniques. Proceedings of the ILWS Workshop Goa, India; 2006.
- [25] Rotanova NM, Bondar TN, Ivanov VV. Wavelet-analysis of secular geomagnetic variations. Geomagnetism and Aeronomy 2004; 44(2): 252-8.
- [26] Hafez AG, Ghamry E, Yayama H, Yumoto K. Systematic examination of the geomagnetic storm sudden commencement using multi resolution analysis. Advances in Space Research 2013; 51: 39-49.
- [27] Xu Z, Zhu L, Sojka J, Jach A. An assessment study of the wavelet-based index of magnetic storm activity (WISA) and its comparison to the Dst index. J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2008; 70: 1579-88.
- [28] Jach A, Kokoszka P, Sojka J, Zhu L. Wavelet-based index of magnetic storm activity. J. Geophys. Res. 2006; 111(A09215): doi: 10.1029/2006JA011635.
- [29] Sirota AA, Solomatin AI, Voronova EV. Two-staged algorithm for detecting and rating the object cutouts on the images in case of additive noise and deformed distortions [In Russian]. Computer Optics 2010; 34(1): 109-17.
- [30] Savchenko AV. Image recognition on the basis of probabilistic neural network with homogeneity testing [In Russian]. Computer Optics 2013; 37(2): 254-62.
- [31] Soldatova OP, Garshin AA. Convolutional neural network applied to handwritten digits recognition [In Russian]. Computer Optics 2010; 34(2): 252-9.
- [32] Barkhatova OM. Nonlinear connection between the auroral (AU, AL) and mid-latitude (SYM-H, ASY-H) geomagnetic activity indices at the main phase of geomagnetic storm [In Russian]. Solar-Terrestrial Physics 2013; 23: 100-8.
- [33] Uwamahoro J, McKinnell LA, Habarulema JB. Estimating the geoeffectiveness of halo CMEs from associated solar

- and IP parameters using neural networks. *Annales Geophysicae* 2012; 30: 963-72.
- [34] Barkhatov NA, Belliustin NS, Bougeret JL, Sakharov SYu, Tokarev YuV. Influence of the solar-wind magnetic field on the magnetosheath turbulence behind the bow shock. *Radio-physics and Quantum Electronics* 2001; 44(12): 915-23.
- [35] *Neuromathematic* [In Russian]. Ed by Galushkin AI. Moscow: IZHPR; 2002.
- [36] Haykin S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. New Jersey: Prentice Hall; 1999.
- [37] Mandrikova OV, Zhizhikina EA. Geomagnetic data analysis based on the combination of wavelet transform with radial basis neural networks [In Russian]. *Digital Signal Processing and Its Applications. Proceedings of the 16-th International Conference 2014*; 573-8.
- [38] Mandrikova OV, Zhizhikina EA. Estimation of degree of the geomagnetic field disturbance based on the combined use of wavelet transform with radial neural networks [In Russian]. *17th International Conference on Soft Computing and Measurements. Proceedings of Conference 2014*; 2: 223-6.
- [39] Federal State Budgetary Institution "Fedorov Institute of Applied Geophysics". Source: (<http://ipg.geospace.ru/>).

AN AUTOMATIC METHOD FOR ESTIMATING THE GEOMAGNETIC FIELD

O.V. Mandrikova^{1,2}, E.A. Zhizhikina^{1,2}

¹ *Institute of Cosmophysical Research and Radio-Wave Propagation of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IKIR FEB RAS),*

² *Kamchatka State Technical University*

Abstract

We introduce a new method for estimating the geomagnetic field. The method is based on a combination of a wavelet transform with radial basis neural networks. In the method, the recorded geomagnetic field variations are decomposed into different-scale components and the degree of disturbance of each component is estimated, enabling the conclusion about the field state. For the verification of the method, we used geomagnetic data from the "Paratunka" station (Paratunka, Kamchatka region, data registration is carried out by IKIR FEB RAS).

Analysis of the spectral-temporal characteristics of geomagnetic field variations during periods of moderate and strong magnetic storms was performed. Weak perturbations were detected in the geomagnetic field before the storms. The obtained results have confirmed the effectiveness of the proposed method.

Keywords: neural networks, wavelet transform, geomagnetic data, Earth's magnetic field.

Citation: Mandrikova OV, Zhizhikina EA. An automatic method for estimating the geomagnetic field. *Computer Optics* 2015; 39(3): 420-8.

Сведения об авторах

Мандрикова Оксана Викторовна, 1972 года рождения, в 1995 г. окончила Киевский национальный университет, механико-математический факультет. Доктор технических наук, доцент, в настоящее время работает заведующей лабораторией системного анализа Института космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН и профессором кафедры Систем управления Камчатского государственного технического университета (г. Петропавловск-Камчатский). Область научных интересов: методы распознавания образов, методы интеллектуального анализа данных, моделирование и анализ геофизических данных.

E-mail: oksanam1@mail.ru.

Viktorovna Mandrikova Oksana (b. 1972) graduated from Taras Shevchenko National University of Kyiv, Mechanics and Mathematics department in 1995. She received her DrSc degree in Technical Sciences (2009). At present she is a head of the System Analysis lab at the Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences and professor of Control Systems subdepartment at Kamchatka State Technical University. Her research interests are currently focused on methods of pattern recognition, data mining, modeling and analysis of geophysical data.

Жижкина Екатерина Андреевна, 1988 года рождения, в 2006 году окончила Камчатский государственный технический университет, факультет информационных технологий, работает младшим научным сотрудником в Институте Космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН. Область научных интересов: распознавание образов, нейронные сети, цифровая обработка сигналов.

E-mail: ekaterinazh1@mail.ru.

Andreevna Zhizhikina Ekaterina (b. 1988) graduated with honours from Kamchatka State Technical University, Information Technology department in 2006. She works as the junior researcher at the Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences. Her research interests are pattern recognition, digital signal processing, modeling and analysis of geophysical data.

*Поступила в редакцию 8 мая 2015 г.
Окончательный вариант – 3 июня 2015 г.*