

Н.А. БАРХАТОВ, доктор физико-математических наук, профессор, НГПУ им. К.Минина (Мининский университет), Нижний Новгород, e-mail: nbarkhatov@inbox.ru

С.Е. РЕВУНОВ, кандидат физико-математических наук, доцент, НГПУ им. К.Минина (Мининский университет), Нижний Новгород, , e-mail: revunov@inbox.ru

А.Б. ВИНОГРАДОВ, аспирант, НГПУ им. К.Минина (Мининский университет), Нижний Новгород, e-mail: al.winogradov@gmail.com

АЛГОРИТМ КЛАССИФИКАЦИИ МГД ВЕЙВЛЕТ-СКЕЛЕТОННЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КАРТИН ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ¹

N.A. Barkhatov, S.E. Revunov, A.B. Vinogradov

CLASSIFICATION ALGORITHM FOR MHD WAVELET-SKELETON SPECTRAL IMAGES OF GEOEFFECTIVE PLASMA FLOWS IN THE SOLAR WIND

В работе демонстрируется новый способ идентификации плазменных потоков в солнечном ветре самообучающейся классификационной нейронной сетью по их спектральным особенностям в диапазоне магнитной гидродинамики. Для этого вычисляются вейвлет-скелетонные спектры параметров солнечного ветра межпланетного магнитного поля, регистрируемых на орбите Земли патрульными космическими аппаратами. Предлагается алгоритм классификации вейвлет-скелетонных спектральных картин плазменных потоков в солнечном ветре на орбите Земли, основанный на нейросетевой обработке сжатой информации об основных магнитных и динамических параметрах потоков. Классификация выполняется нейронной сетью типа слоя Кохонена с дифференциацией по частотным диапазонам. Конкретно анализируются и устанавливаются спектральные особенности солнечных плазменных потоков в форме магнитных облаков (MC), областей взаимодействия потоков (CIR), ударных волн (Shocks) и высокоскоростных потоков от корональных дыр (HSS).

Ключевые слова: магнитогидродинамические возмущения, спектральный анализ, вейвлет-анализ, солнечная активность, плазменный солнечный поток, геомагнитная буря, магнитосфера, ионосфера, классификация, прогноз

The paper presents a new method for the identification of plasma flows in the solar wind by self-learning classification neural network using their spectral features in the range of magnetic hydrodynamics. To do this, the wavelet skeleton spectra of solar wind parameters of the interplanetary magnetic field recorded in Earth orbit by patrol spacecraft was calculated. Algorithm for classification of wavelet skeleton spectral images for plasma flows in the solar wind on the Earth's orbit, based on neural network processing of compressed data on the main magnetic and dynamic parameters of the flow is proposed. The classification by a neural network type Kohonen layer differentiated by frequency ranges is performed. Specifically, the spectral features of solar plasma flows in the form of magnetic clouds (MC), corotating interaction regions (CIR), shock waves (Shocks) and high-speed streams from coronal holes (HSS) analyzed and established.

Keywords: magnetohydrodynamic disturbance, spectral analysis, wavelet analysis, solar activity, solar plasma flow, geomagnetic storm, magnetosphere, ionosphere, classification, forecast

¹ Работа поддержана грантом РФФИ 12-05-00425 и Госзаданием Министерства образования и науки, 2014-2016 гг.»

1. Введение

Одной из задач современной гелиогеофизики является проблема отождествления геоэффективных структур в околоземном космическом пространстве, в потоке солнечного ветра. В свою очередь, такая идентификация потоков невозможна без их предварительной классификации. Необходим универсальный алгоритм, определяющий признаки как скоротечных (например, ударные волны), так и продолжительных (например, магнитные облака) процессов. В работе предложен такой алгоритм, основанный на сжатии спектральной информации об основных магнитогидродинамических параметрах плазменных потоков и представлении их в виде вейвлет-скелетонных спектральных картин.

Ранее неоднократно отмечалось, что спектральный состав возмущений с периодами от 10 до 90 минут, связанных с солнечными плазменными потоками, обусловлен их типом [1-3 и ссылки в них]. Однако большинство исследований в данном направлении ориентированы на изучение природы турбулентности солнечных потоков без учета их принадлежности к определенному типу. Таким образом, представляется актуальной задача дифференциации типов потоков по характерным признакам, полученным корреляционно-спектральным методом. В предлагаемом исследовании сделан акцент на уточнение типа плазменного потока солнечного ветра по характерным спектральным вейвлет-признакам вариаций скорости, плотности, температуры, величины магнитного поля. Мы предполагаем, что каждый тип геоэффективного потока характеризуется не просто определенным набором возмущенных параметров (скорость, плотность, давление, температура, величина поля), а характерными фундаментальными связями между ними [4]. Эти связи проявляются в синхронизации ассоциированных с возмущенными параметрами волновых пакетов. Предлагаемый подход позволяет количественно оценивать уровень синхронизации возмущений параметров регистрируемого плазменного образования, представленных в форме сжатых вейвлет-картин (скелетонов) [5]. По результатам такой оценки с помощью классификационной нейросети делается вывод о принадлежности потока к тому или иному типу. Классификационным признаком в данном случае выступает степень согласованности колебательных процессов в параметрах потока солнечного ветра в конкретном диапазоне частот.

2. Корреляционно-спектральный метод обработки данных

Работа предлагаемого алгоритма идентификации плазменных потоков в солнечном ветре нейросетевым классификационным подходом выполнена на 24 событиях регистрации указанных типов плазменных потоков на КА ACE и Wind в период с 2000 по 2007 гг. по данным каталогов NASA (<http://cdaw.gsfc.nasa.gov>) и NOAA (<http://ngdc.noaa.gov>). В рамках каждого события получены вейвлет-спектры минутных данных плотности N , скорости V , температуры T , давления P , модуля и компонент межпланетного магнитного поля $|B|$, B_x , B_y , B_z . Каждый анализируемый тип потока представлен шестью событиями (по каталогам): MC (28.07.2000, 29.12.2000, 12.04.2001, 28.05.2001, 09.08.2001, 17.04.2002), CIR (27.07.2003, 05.04.2005, 07.05.2007, 20.09.2007, 27.09.2007, 25.10.2007), Shocks (19.12.2002, 27.02.2003, 14.07.2003, 17.07.2003, 12.04.2004, 22.07.2004), HSS (01.03.2000, 26.07.2003, 20.11.2004, 04.07.2006, 29.07.2007, 17.12.2007).

Использование методов вейвлет-анализа позволяет получать спектры в строго определенном частотном диапазоне. Это, как правило, дает возможность ограничить область поиска особенностей исходного сигнала [6]. В настоящем исследовании в качестве базового вейвлета в численных экспериментах выбрана функция Добеши (Daubechies) четвертого порядка. Масштабные коэффициенты вейвлет-преобразования рассматривались в двух МГД диапазонах периодов: 2-30 мин. (8.3-0.6 мГц) и 31-60 мин. (0.6-0.3 мГц). Дальнейшая конкретизация информации (постпроцессинг) может быть обеспечена путем вычисления вейвлет-скелетонных спектров, отражающих внутреннюю динамику процессов разных типов и масштабов. Пример постпроцессинга результатов вейвлет-преобразования с получением

скелетонов, характеризующих процесс смены режима колебаний на конкретной частоте в конкретный момент времени (в окне постоянном по времени и растущем с периодом), приведен на рисунке 1.

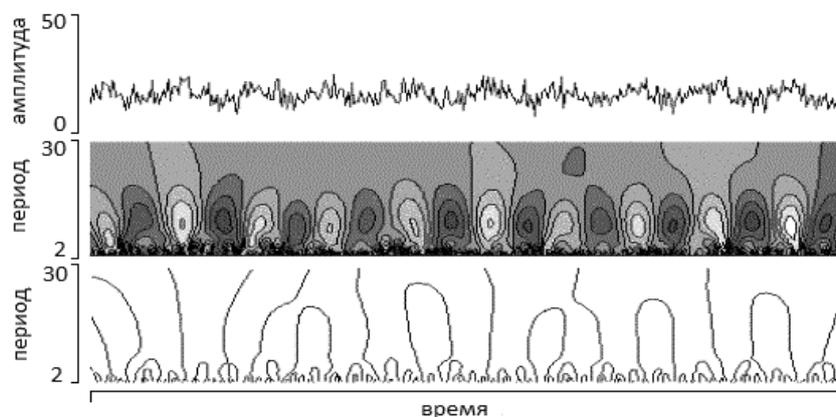


Рисунок 1 – Пример исходных данных, вейвлет-спектра и соответствующего ему графика локальных максимумов или «вейвлет-скелета» спектра (результат постпроцессинга)

Получаемые в результате картины вейвлет-скелетонов минутных данных плотности, скорости, температуры, давления, модуля и компонентов межпланетного магнитного поля использовались для количественной оценки согласованности получаемых спектров. Для этого полученные скелетонные картины группируются по заранее известным типам плазменных потоков (MC, CIR, Shocks, HSS) с целью получения материала для обучения и тестирования классификационной нейросети. В рамках каждой группы выполняется поиск моментов совпадения скелетонов (синхронизации моментов смены режимов колебаний) по наборам параметров потоков. Наличие и/или отсутствие моментов синхронизации в течение времени регистрации потока выбирается как отличительный признак потока данного типа. Вычитание матриц скелетонных спектров друг из друга с записью значений разности по модулю позволяет получить маркированную матрицу, где моменты времени 100% синхронизации соответствуют нулевой разности.

Полученная картина с маркерами обрабатывается гауссовым фильтром обеспечивающим размытие. При этом единичные, не сгруппированные маркеры будут отсеяны (засвечены), а имеющиеся группы маркеров будут заметны (рисунок 2). Затем вычисляется гистограмма распределения вероятного появления моментов синхронизации колебаний параметров в данном потоке по шкале от 0 (белый цвет, менее вероятно) до 1 (черный цвет, наиболее вероятно). Для получения классификационных признаков каждого типа потока индивидуальные гистограммы распределения вероятного появления моментов синхронизации колебаний параметров в этом потоке суммируются в рамках данного диапазона периодов. Таким образом, классифицироваться нейросетью будут суммарные гистограммы, содержащие в себе сжатую информацию о данном потоке.

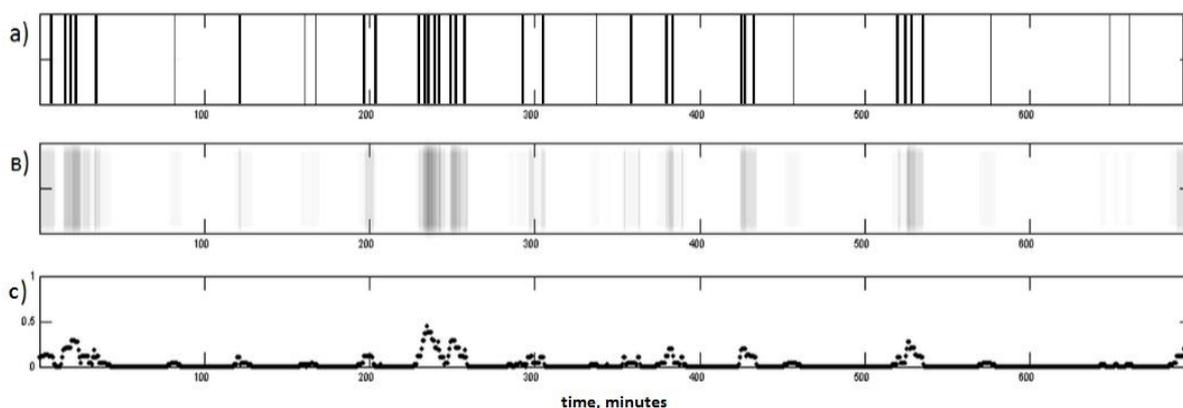


Рисунок 2 – Пример получения гистограммы распределения вероятности появления моментов синхронизации колебаний параметров потока: (а) по маркерам; (б) обработанных гауссовым фильтром; (в) в шкале от 0 (менее вероятно) до 1 (наиболее вероятно)

3. Классификационная искусственная нейронная сеть и результаты классификации

Классификация полученных суммарных гистограмм выполнена самообучающейся нейронной сетью типа слоя Кохонена (рисунок 3). Это самообучаемая система, настраиваемая путем самоорганизации по предъявляемым на вход данным. При этом нейросеть выполняет обобщение-сжатие предъявляемой информации. Количество узлов k нейронной сети (количество предполагаемых классов или нейронов в конкурирующем слое) задается заранее. В нашем случае количество классов равно четырем (MC, CIR, Shocks, HSS). Число входов n каждого нейрона в классификационном слое определяется размером входного образа. В нашем случае это 1400 (размер суммарной гистограммы каждого события).

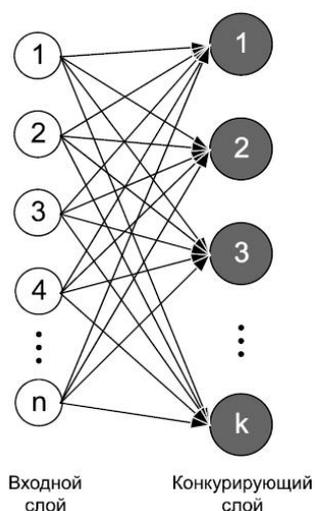


Рисунок 3 – Архитектура классификационной искусственной нейронной сети Кохонена

Обучение нейронных сетей выполнялось на суммарных гистограммах, полученных для пяти событий. Шестое событие всегда резервировалось и использовалось для тестирования обученной сети. При работе классификационная самообучающаяся нейросеть последовательно получает на вход числовые ряды (суммарные гистограммы для обучающих событий №1-5 по каждому типу потока). В этой информации в сжатой форме содержатся сведения о степени согласованности колебательных процессов в параметрах солнечного ветра в конкретном диапазоне частот. Затем для проверки обученной нейросети

используется гистограмма тестового события №6. Результаты тестирования нейросетей, обученных для двух диапазонов периодов, представлены в итоговой таблице. Числа в ячейках указывают количество успешных исходов классификации при последовательном переборе тестируемых событий.

Диапазон периодов 2-30 мин			
MC	HSS	Shocks	CIR
3 (50%)	3 (50%)	4 (66%)	5 (83%)
Диапазон периодов 30-61 мин			
MC	HSS	Shocks	CIR
6 (100%)	4 (66%)	2 (33%)	3 (50%)

Заключение

Выполненная нейросетевая классификация спектральных особенностей потоков с дифференциацией по частотным диапазонам показала разделение скелетонных картин возмущений по всем анализируемым параметрам (N, V, T, P, |B|, Vx, Vy, Vz). Это подтверждает существование внутренних связей между составляющими волновой динамики у разных плазменных потоков. Показано, что в диапазоне периодов 2-30 мин. нейросетью выполняется надежное (в более 50% случаев) отождествление потоков типа CIR (83%) и Shocks (66%). В диапазоне периодов 31-60 мин. – надежное отождествление потоков типа MC (100%) и HSS (66%). Предлагаемая методика может быть применена в онлайн режиме мониторинга околоземного космического пространства для обнаружения геоэффективных структур в потоке солнечного ветра и прогнозирования глобальных геомагнитных возмущений. Дальнейшее развитие методики классификации связано с усовершенствованием техники суммирования гистограмм, при которой для каждого типа потока будет использован наиболее согласованный набор параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Steed, K. Investigating the observational sig-natures of magnetic cloud substructure / C.J. Owen, P. Démoulin, S. Dasso // *J. Geophys. Res.* – 2011. – V.116. – A01106.
2. Tessein, J.A. Turbulence associated with corotating interaction regions at 1 AU: Inertial and dissipation range magnetic field spectra / C.W. Smith, B.J. Vasquez, R.M. Skoug // *J. Geophys. Res.* – 2011. – V.116. – A10104.
3. Wawrzaszek, A. Observation of the multifractal spectrum in solar wind turbulence by Ulysses at high latitudes / W.M. Macek // *J. Geophys. Res.* – 2010. – V.115. – A07104.
4. Бархатов, Н.А. Уточнение типов солнечных плазменных потоков по анализу вне- и внутримангнитосферных низкочастотных колебаний в периоды магнитных бурь / Ревунов С.Е., Шадруков Д.В. // *Приволжский научный журнал. –ННГАСУ.* – 2013. – №1. – С. 106-112
5. Ревунов, С.Е. Анализ пространственно-временной динамики низкочастотных (2-8 мГц) магнитных возмущений в периоды магнитных бурь / Шадруков Д.В., Серебрякова Р.И. // *Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского.* – 2013. – №5(1). – С.83-91
6. Добеши, И. Десять лекций по вейвлетам: монография / И. Добеши. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.
7. Ревунов, С.Е. Отражение динамики солнечных плазменных потоков в вейвлет-скелетонных картинах параметров околоземного космического пространства / С.Е.Ревунов,

Д.В. Шадруков, Н.В. Косолапова // «Physics of Auroral Phenomena», Abst. 36 Annual Seminar, Apatity, 2013, P.41-42

8. Barkhatov N.A., Revunov S.E. Classification of abrupt changes of the interplanetary medium parameters by a method of artificial neural networks // Proceedings of 29 Annual Seminar «Physics of auroral phenomena», Apatity, 2007, PGI KSC RAS, P.175

9. Бархатов, Н.А. Нейросетевая классификация разрывов параметров космической плазмы / Н.А. Бархатов, С.Е. Ревунов // Научное издание: Солнечно-земная физика. – 2010. – №14(127). – С.42–51

10. Revunov S.E., Barkhatov N.A. Software-computer complex for Space Weather predicting // Abstracts of 33 Annual Seminar «Physics of auroral phenomena», Apatity, 2-5 March 2010, PGI KSC RAS, 2010. P.22-23

11. S.E. Revunov, D.V. Shadrucov, N.V. Kosolapova Reflection of the dynamics of solar plasma flows in the wavelet skeleton patterns for near space parameters // «Physics of Auroral Phenomena», Proc. 36 Annual Seminar, Apatity, 2013. P.126-129

12. Шадруков, Д.В. Обнаружение солнечных плазменных потоков с помощью вейвлет-скелетонной обработки вне и внутримангнитосферных низкочастотных колебаний в периоды магнитных бурь / Д.В. Шадруков, С.Е. Ревунов // Сборник тезисов 8-ой конференция «Физика плазмы в солнечной системе» 4–8 февраля 2013 г., ИКИ РАН – 2013. – С. 119-120

13. Шадруков, Д.В. Вейвлет-скелетонный инструмент для решения гелиогеофизических задач / Д.В. Шадруков, С.Е. Ревунов // Сборник тезисов 8-ой конференция «Физика плазмы в солнечной системе» 4–8 февраля 2013 г., ИКИ РАН – 2013. – С. 115-116

14. Ревунов, С.Е. Низкочастотные возмущения параметров плазменных потоков солнечного ветра как причина внутримангнитосферных колебаний во время геомагнитных бурь: монография / С.Е. Ревунов // Труды (Шестнадцатой) Научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения А.Н. Бархатова, Нижний Новгород, ННГУ, 11-18 мая 2012 г. – Изд. «Нижегородский университет». – 2012. – С.82-83

15. Barkhatov N.A., Revunov S.E., Shadrucov D.V. Wavelet component manifestation of Solar Wind parameter disturbances which corresponding to the plasma flows at the dynamics of magnetic disturbance spectrums along the geomagnetic meridian. «Physics of Auroral Phenomena», Proc. XXXV Annual Seminar, Apatity, 2012. P. 37-40

16. Barkhatov N.A., Revunov S.E., Shadrucov D.V. Wavelet component manifestation of Solar Wind parameter disturbances which corresponding to the plasma flows at the dynamics of magnetic disturbance spectrums along the geomagnetic meridian // Abstracts of 35 Annual Seminar «Physics of auroral phenomena», Apatity. 28 February – 2 March 2012. PGI KSC RAS, 2012. P. 25

17. Бархатов, Н.А. Нейросетевая интернет-система анализа и обработки данных в режиме реального времени / Н.А. Бархатов, С.Е. Ревунов // Труды научной конференции «Базы данных, инструменты и информационные основы полярных геофизических исследований» (POLAR 2011), 24-26 мая 2011 года, Троицк, ИЗМИРАН – 2011. – С. 15-16

18. Бархатов, Н.А. Идентификация плазменных потоков в солнечном ветре нейросетевым классификационным подходом / Н.А. Бархатов, С.Е.Ревунов, А.Б. Виноградов // «Physics of Auroral Phenomena», Abst. 37 Annual Seminar, Apatity – 2014. – P.21-22

19. Barkhatov N.A., Revunov S.E., Shadrucov D.V. Post-processing of wavelet transforms for magnetograms received along the northern part of the geomagnetic meridian as a new tool for classification and prediction of magnetospheric storms // «Physics of Auroral Phenomena», Abstr. XXXIV Annual Seminar, 1-4 march 2011, Apatity, 2011. P. 21-22

20. N.A. Barkhatov, S.E. Revunov Software-computer complex for space weather predicting // «Physics of Auroral Phenomena», Proc. XXXIII Annual Seminar, 2-5 march 2010, Apatity, 2011. P. 17-20

© Бархатов Н.А., Ревунов С.Е., Виноградов А.Б., 2014