

УДК 550.388

МЕТОД ДИНАМИЧЕСКИХ ЭНЕРГОГРАММ НЕПРЕРЫВНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОФИЗИКИ**С. В. Лазоренко***Международный Славянский университет. Харьков, 61086, г. Харьков, ул. Отакара Яроша, 9А, Украина*
Поступила в редакцию 15 апреля 2010 г.

Предложено развитие и усовершенствование методов время-частотного анализа сигналов в случае применения непрерывного вейвлет-преобразования. Новый метод состоит в проведении совместного анализа вейвлет-спектра и динамических энергограмм непрерывного вейвлет-преобразования. Продемонстрирована эффективность метода динамических энергограмм на примере анализа реальных нестационарных, нелинейных и сверхширокополосных сигналов и процессов в задачах космической радиофизики, в частности, при анализе эффектов, вызываемых действием мощных нестационарных источников возмущений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вейвлет-анализ, непрерывное вейвлет-преобразование, динамическая энергограмма, космическая радиофизика, мощные нестационарные источники возмущений.

Запропоновано розвиток і вдосконалення методів часо-частотного аналізу сигналів у випадку застосування неперервного вейвлет-перетворення. Новий метод полягає в проведенні сумісного аналізу вейвлет-спектрів і динамічних енергограм неперервного вейвлет-перетворення. Продемонстровано ефективність методу динамічних енергограм на прикладі аналізу реальних нестационарних, нелінійних і надширокополосних сигналів і процесів у задачах космічної радіофізики, зокрема, під час аналізу ефектів, що викликані дією потужних нестационарних джерел збурень.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: вейвлет-аналіз, неперервне вейвлет-перетворення, динамічна енергограма, космічна радіофізика, потужні нестационарні джерела збурень.

Development and improvement of methods of time-frequency analysis of signals with continuous wavelet transform usage were proposed. The new method consists in the simultaneous analysis of wavelet spectrum and dynamic energograms of the continuous wavelet transform. Using the example of analysis of real non-stationary, non-linear and ultra wideband signals and processes in space radio physics problems, in particular, using the analysis of effects, caused by the powerful, non-stationary action, the dynamic energogram method effectiveness was shown.

KEY WORDS: wavelet-analysis, continuous wavelet transform, dynamic energogram, space radio physics, powerful non-stationary disturbance sources.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С начала 90-х годов XX века аппарат вейвлет-анализа как новый эффективный метод исследования успешно применяется для изучения и обработки сигналов и процессов различной природы (см., например, [1 – 5]). В частности, в задачах космической радиофизики он успешно используется при исследовании нестационарных [6], нелинейных [7] и сверхширокополосных [8, 9] сигналов, сигналов с особенностями [10, 11] и т. п., дает уникальные возможности по анализу фрактальной структуры сигналов и процессов (см., например, [12]), позволяет на качественно новом уровне решать задачу обнаружения таких сигналов на фоне аддитивной слабокоррелированной помехи [5, 6, 8]. Тем не менее, существует необходимость повышения его эффективности и информативности при анализе таких сигналов. Этим объясняется актуальность данной работы.

Цель работы – расширить возможности непрерывного вейвлет-преобразования при анализе время-частотной структуры нестационарных сигналов и процессов.

НЕПРЕРЫВНОЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

В настоящее время понятие «вейвлет-анализ» объединяет целый ряд методов: непрерывное (НВП), дискретное, аналитическое и стационарное вейвлет-преобразования, вейвлетные ряды, вейвлет-пакеты, вейвлет-фреймы и т. д. [1 – 5].

Основная идея вейвлет-преобразования, в частности, одномерного сигнала состоит в его разложении по базису, сконструированному из обладающей определенными свойствами локализованной функции (вейвлета) посредством масштабных изменений и переносов. Каждая из функций этого базиса характеризует как определенную пространственную (или временную) частотную составляющую сигнала, так и локализацию этой составляющей в физическом пространстве (или времени). В отличие от традиционного одномерного преобразования Фурье вейвлет-преобразование дает двумерную развертку исследуемого одномерного сигнала. Появляется возможность анализировать свойства сигнала

одновременно в физическом (время, координата) и в частотном пространствах, т. е. осуществлять время-частотный анализ сигнала. Важно, что вейвлет-анализ уравнивает «шансы» разных частотных составляющих с существенно отличающимися амплитудами [1 – 5]. В данной работе основное внимание уделяется НВП.

Как известно [1 – 5], прямое НВП одномерного сигнала $s(t)$ задается соотношением:

$$Wf(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (1)$$

где a – параметр масштабирования, b – параметр сдвига, а функцию $Wf(a, b)$ обычно называют вейвлет-спектром НВП сигнала $s(t)$.

Под *скелетоном* поверхности в пространстве понимают картину линий (хребтов), соединяющих локальные экстремумы (отдельно минимумы и максимумы) этой поверхности [1, 3, 4]. Обычно используют скелетоны $Wf(a, b)$, $|Wf(a, b)|$ и вейвлет-спектрограммы $P_W f(a, b) = |Wf(a, b)|^2$. Разумеется, в двух последних случаях линии локальных максимумов и локальных минимумов оказываются неразличимыми. Скелетон позволяет четко выявить структуру анализируемого процесса.

Под *энергограммой* сигнала понимается глобальный спектр энергии коэффициентов вейвлет-преобразования [5]:

$$E_W f(a) = \int |Wf(a, b)|^2 db = \int P_W f(a, b) db. \quad (2)$$

Энергограмма представляет собой распределение полной энергии сигнала E . Последняя связана с энергограммой следующим соотношением

$$E = \int_0^{\infty} E_W f(a) \frac{da}{a^2},$$

где интегрирование производится по всем масштабам a . Положение максимумов на $E_W f(a)$ можно интерпретировать как средний период элементарных событий, вносящих основной вклад в энергию анализируемого процесса [3].

МЕТОД ДИНАМИЧЕСКИХ ЭНЕРГОГРАММ

На практике при проведении НВП чаще всего исследуется $Wf(a, b)$, $|Wf(a, b)|$ либо $P_W f(a, b)$.

Традиционное для математики представление этих функций двух переменных в виде поверхности в трехмерном пространстве в подавляющем большинстве случаев для исследователя оказывается неудобным. Поэтому гораздо более популярным является их представление в виде двумерного цветного (или тонального) графика, где значения функции отображаются с помощью определенной цветовой гаммы (или градаций серого цвета). Существенно дополнить и расширить сведения, получаемые об анализируемом сигнале или процессе именно таким образом, позволяет новый метод, далее именуемый *методом динамических энергограмм*. Его суть состоит в следующем.

Во-первых, поскольку в большинстве практических случаев вейвлет-спектр (или вейвлет-спектрограмма) оказывается почти везде достаточно гладкой функцией, то и цветовая гамма на ее изображении от пикселя к пикселю меняется достаточно медленно. А потому визуально определить область время-частотной локализации исследуемого сигнала оказывается, в известной мере, затруднительно. Для преодоления этой трудности предлагается совместное изучение указанного выше представления вейвлет-спектра (или вейвлет-спектрограммы) и его представления в виде *изолиний*. Как известно, под изолиниями понимают линии, соединяющие соседние точки графика, в которых функция двух переменных имеет одинаковые значения.

Во-вторых, если исследуемый сигнал или процесс является нестационарным, а тем более, когда его изучение проводится на фоне помех, а он сам оказывается еще и сложным (т. е. в его состав входит несколько более простых процессов с разными масштабами и энергиями), то определять характерные периоды его наиболее важных составляющих по вейвлет-спектру (или вейвлет-спектрограмме) становится затруднительным, а по обычной энергограмме – практически невозможным. Поэтому предлагается наряду с обычной энергограммой, задаваемой соотношением (2), строить еще и динамические энергограммы:

$$E_{W_i} f(a) = \int_{b_{i-1}}^{b_i} |Wf(a, b)|^2 db = \int_{b_{i-1}}^{b_i} P_W f(a, b) db, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

где N – количество интервалов, на которые разбивается вейвлет-спектр вдоль переменной b . Каждая такая динамическая энергограмма $E_{W_i}f(a)$ представляет собой распределение полной энергии сигнала E на ограниченном временном интервале. В силу свойства аддитивности определенного интеграла легко показать, что

$$E_W f(a) = \sum_{i=1}^N E_{W_i} f(a),$$

$$E = \int_0^{\infty} \sum_{i=1}^N E_{W_i} f(a) \frac{da}{a^2} = \sum_{i=1}^N \int_0^{\infty} E_{W_i} f(a) \frac{da}{a^2}.$$

Количество и временные масштабы интервалов, для которых строятся динамические энергограммы, зависят от изучаемого процесса и определяются самим исследователем в результате анализа описанных выше двух представлений вейвлет-спектров (или вейвлет-спектрограмм). Возможности нового метода продемонстрируем ниже.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКИХ ЭНЕРГОГРАММ

В настоящее время одним из самых главных направлений современной космической радиофизики является предсказание космической погоды. Вариации ее состояния вызываются в основном источниками солнечного происхождения, которые возмущают межпланетную среду и обуславливают геокосмические бури [13].

Ниже рассматриваются результаты применения вейвлет-анализа для исследования регистраций мощных солнечных вспышек (СВ) и следующих за ними магнитных бурь (МБ).

Известно, что СВ сопровождаются усилением электромагнитного излучения, потока солнечных космических лучей и выбросов корональной массы. В результате СВ в геокосмосе развиваются процессы с характерными временами запаздывания около 8 мин, 10 – 200 мин и 30 – 40 ч. Они вызваны усилением интенсивности электромагнитного излучения, потоков корпускул и солнечного ветра соответственно. Возникают значительные возмущения геомагнитного поля, параметров ионосферы и атмосферы, которые именуются магнитной, ионосферной, атмосферной и электрической бурями соответственно. Они представляют собой проявление единого процесса – геокосмической бури. Каждая такая буря является сложным и многогранным комплексом физико-химических эффектов. В частности, она сопровождается генерацией в различных областях геокосмоса волновых возмущений с периодами, изменяющимися в широких пределах [13].

Исследование каждой геокосмической бури имеет большую научную и прикладную значимость. Хотя изучению бурь посвящено значительное число научных работ, их исследование, моделирование и прогнозирование далеки от завершающей стадии (см., например, [14, 15]). Большинство исследователей с этой целью применяют методы анализа, основанные на традиционном преобразовании Фурье, которое хорошо зарекомендовало себя при описании узкополосных сигналов и процессов. В то же время, большинство возникающих процессов имеют сверхширокий спектр (см., например, [5]), поэтому для их описания полезен аппарат НВП, позволяющий выявлять тонкую структуру исследуемого процесса [16].

Анализ солнечной вспышки 23 сентября 1998 г.

Рассмотрим подробнее СВ класса М6/3В, наблюдавшуюся 23 сентября 1998 г. Она началась в 09.44, достигла максимальной интенсивности в 10.06 и закончилась в 13.09 (здесь и далее время киевское). Измерения проведены в районе г. Харькова (49,6° N, 36,3° E) с помощью радара НР [17]. НР сигнал принимался с высот 97 – 500 км с шагом 10 км.

Для проведения НВП использовались фрактальный вейвлет Добеши четвертого порядка (db4) и нефрактальный дискретный вейвлет Мейера (dmev) и вейвлет Морле (morl) [1 – 3].

Результаты вейвлет-анализа приведены на рис. 1 – 3. На рис. 1 также показаны аналогичные характеристики, полученные с помощью традиционного динамического (оконного) преобразования Фурье (ДПФ). Сигнал $s(t)$ представляет собой результат усреднения по диапазону высот 204–408 км флуктуаций мощности $\delta P_s = \bar{P}_s - \langle \bar{P}_s \rangle$, где \bar{P}_s и $\langle \bar{P}_s \rangle$ – скользящие средние на интервале 7,5 и 120 мин, шаг скольжения – 1,5 мин. Здесь и далее на рисунках по горизонтальной оси отложено безразмерное время t , а по вертикальной – безразмерный период возмущений T . На рис. 1 – 3 единичному отрезку по обеим осям соответствует 144 мин. Важно учесть, что на них начало регистрации соответствует 16.00 по киевскому времени, а ее окончание – 16.00 следующих суток. На рис. 2 – 4 приведены результаты применения метода динамических энергограмм НВП.

В результате проведенного анализа установлено следующее.

СВ сопровождалась усилением волновых возмущений (ВВ) в ионосфере. Изучение высотной зависимости вариаций показало, что особенно четко они наблюдались на высотах 190 – 250 км, где

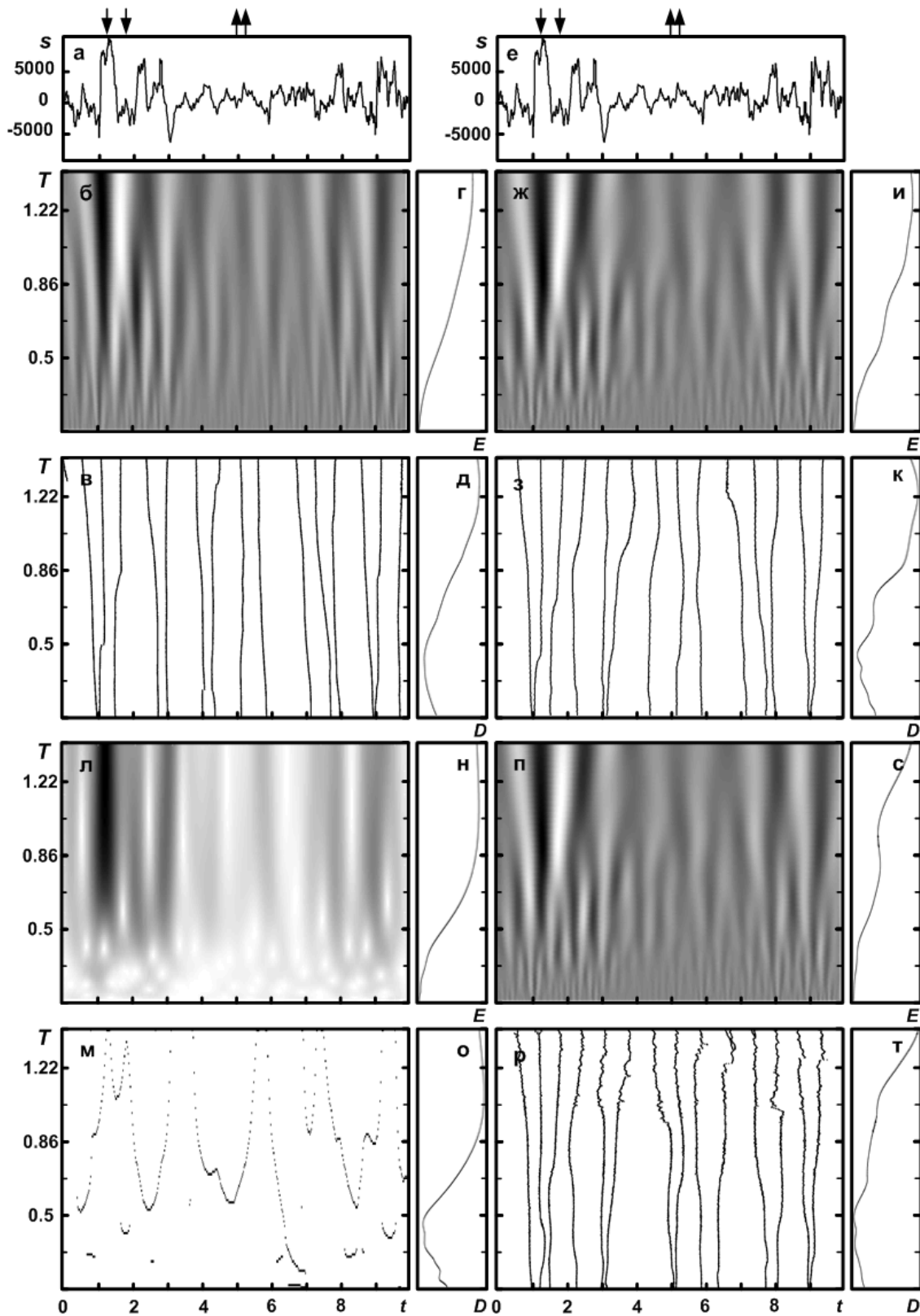


Рис. 1. Вейвлет- и фурье-анализы сигнала 22–23 сентября 1998 г.: а и е – сигнал во временной области; б – вейвлет-спектр НВП (db4); в – скелетон НВП (db4); г – энергограмма НВП (db4); д – дисперсия модуля коэффициентов НВП (db4); ж – вейвлет-спектр НВП (dmeu); з – скелетон НВП (dmeu); и – энергограмма НВП (dmeu); к – дисперсия модуля коэффициентов НВП (dmeu); л – модуль спектральной функции ДПФ; м – скелетон ДПФ; н – энергограмма ДПФ; о – дисперсия модуля коэффициентов ДПФ; п – вейвлет-спектр НВП (morl); р – скелетон НВП (morl); с – энергограмма НВП (morl); т – дисперсия модуля коэффициентов НВП (morl). Стрелками здесь и далее обозначены моменты захода и восхода Солнца у поверхности Земли в магнитосопряженной области и в месте измерений соответственно.

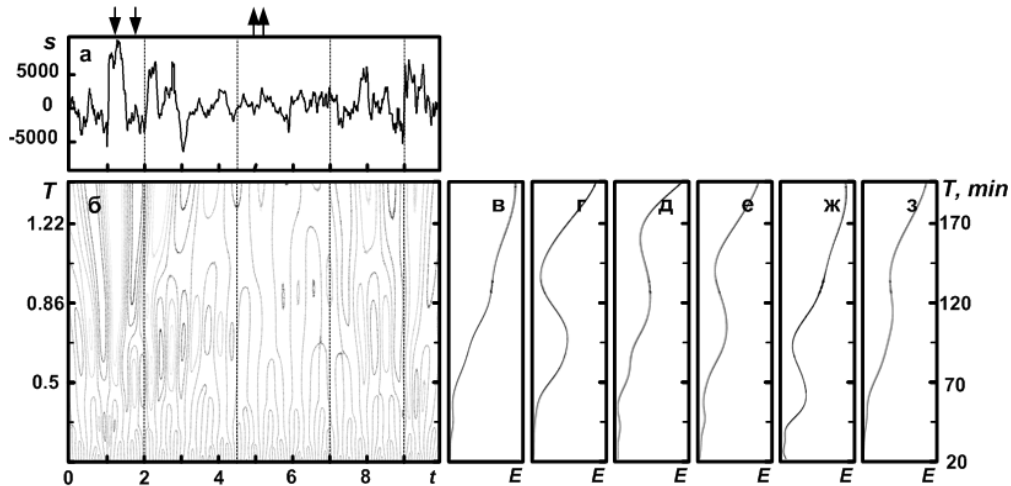


Рис. 2. Вейвлет-анализ сигнала 22–23 сентября 1998 г. на основе вейвлета morl : а – сигнал во временной области; б – вейвлет-спектр НВП; в – энергограмма НВП для $t = 0 - 2$; г – энергограмма НВП для $t = 2 - 4,5$; д – энергограмма НВП для $t = 4,5 - 7$; е – энергограмма НВП для $t = 7 - 9$; ж – энергограмма НВП для $t = 9 - 10$; з – энергограмма НВП для $t = 0 - 10$.

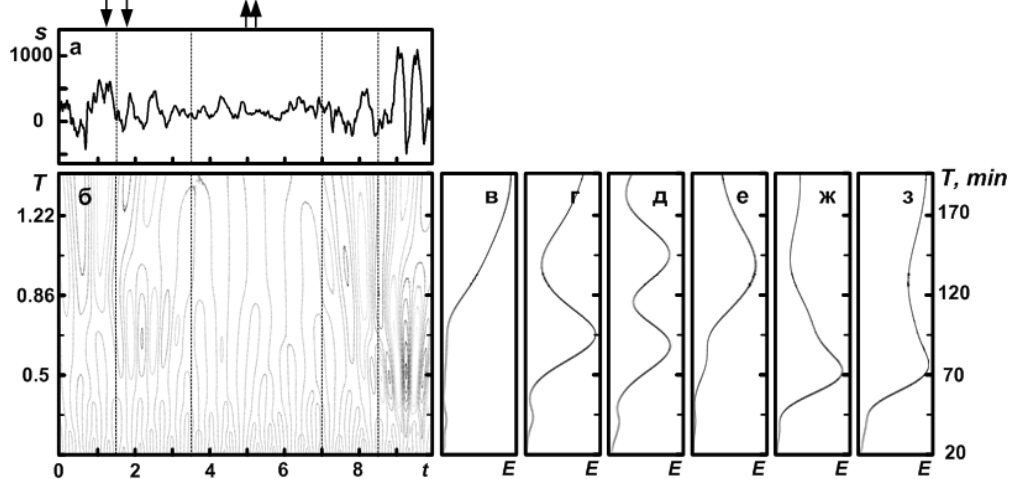


Рис. 3. Вейвлет-анализ сигнала 24–25 сентября 1998 г. на основе вейвлета morl : а – сигнал во временной области; б – вейвлет-спектр НВП; в – энергограмма НВП для $t = 0 - 2$; г – энергограмма НВП для $t = 2 - 4,5$; д – энергограмма НВП для $t = 4,5 - 7$; е – энергограмма НВП для $t = 7 - 9$; ж – энергограмма НВП для $t = 9 - 10$; з – энергограмма НВП для $t = 0 - 10$.

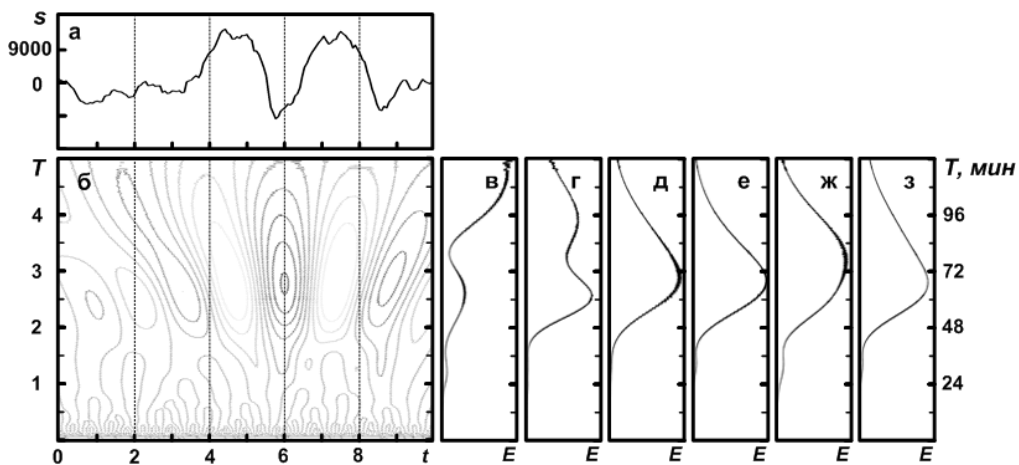


Рис. 4. Вейвлет-анализ сигнала 25 сентября 1998 г. на основе вейвлета morl : а – сигнал во временной области; б – вейвлет-спектр НВП; в – энергограмма НВП для $t = 0 - 2$; г – энергограмма НВП для $t = 2 - 4$; д – энергограмма НВП для $t = 4 - 6$; е – энергограмма НВП для $t = 6 - 8$; ж – энергограмма НВП для $t = 8 - 10$; з – энергограмма НВП для $t = 0 - 10$.

отношение сигнал/шум $q = 2 - 3$. Величина периодов преобладающих колебаний составляла около 25 – 100 мин, время запаздывания ВВ по отношению к началу СВ – около 60 мин, продолжительность – не менее 5 ч и относительная амплитуда – около 10 %.

Как и следовало ожидать, фурье-анализ дает лишь усредненную картину, так как интервал спектрального оценивания был достаточно большим (192 мин). Такая величина интервала необходима для выявления гармоник с большими ($\sim 100 - 150$ мин) периодами. В то же время для вейвлет-анализа минимальное разрешение по времени оставляло около 8 мин.

Анализ сильнейшей магнитной бури 25 сентября 1998 г.

Рассмотрим МБ, начавшуюся около 02.00 25 сентября 1998 г. Данная буря относится к сильнейшим, ее энергия – около 10^{16} Дж, а мощность основной фазы – 10^{12} Вт.

Основная фаза МБ наблюдалась с 05.00 до 13.00 25 сентября. Ей соответствовали индексы $K_p \text{max} = 9$, $D_{st \text{min}} \approx -207$ нТл. Методика обработки такая же, как при исследовании СВ 23 сентября 1998 г. Результаты анализа приведены на рис. 3. Видно, что МБ сопровождалась существенными вариациями мощности сигнала, а также генерацией волновых возмущений (ВВ) в ионосфере.

Проведенный анализ показал, что МБ 24 – 25 сентября 1998 г. привела к генерации ВВ с относительной амплитудой $\delta = \Delta N / N$ около 2 и 25 % в интервалах времени 11.00–14.00 и 13.00–15.00 25 сентября 1998 г. Им соответствуют периоды 10 – 13 и 24 – 120 мин. Первое ВВ, очевидно, связано с модуляцией глобальной конвекции, второе ВВ – с генерацией внутренних гравитационных волн (ВГВ) в приполюсной области. Важно, что профиль второго ВВ был пилообразным, а волна – нелинейной.

Более детальный анализ этой пилообразной волны приведены на рис. 4. На нем единичному отрезку по обеим осям соответствует 24 мин. Начало регистрации соответствует 12.00 по киевскому времени, а ее окончание – 16.00. На энергограмме (рис. 4, д, е, з) пилообразной волне соответствует максимум с периодом $T \approx 70$ мин. Показатель широкополосности этой нелинейной волны составляет примерно $\mu \approx 0,7$. Разумеется, такая волна относится к нелинейным СШП процессам [10].

Заметим, что максимумы с $T \approx 100 - 150$ мин на энергограммах, показанных на рис. 4, в, г, скорее всего, к этой волне отношения не имеют. Это подтверждают результаты анализа, приведенные на рис. 3, б, е. Из них следует, что возмущение с такими параметрами действительно имело место несколько раньше по времени, и НВП, по-видимому, обнаружило остатки его заднего фронта.

ВЫВОДЫ

1. НВП является эффективным методом анализа нестационарных, нелинейных и сверхширокополосных сигналов и процессов, сигналов с особенностями и т. п.
2. Метод динамических энергограмм позволяет расширить возможности анализа вейвлет-спектров и вейвлет-спектрограмм НВП.
3. Продемонстрирована эффективность метода динамических энергограмм НВП при проведении вейвлет-анализа в задачах космической радиофизики на примере анализа солнечной вспышки и сильнейшей магнитной бури 25 сентября 1998 г.

Автор искренне благодарен профессору кафедры космической радиофизики Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина, д.ф.-м.н. Черногору Л. Ф. за руководство проведенными исследованиями и профессору кафедры физики Харьковского национального университета радиоэлектроники, д.ф.-м.н. Лазоренко О. В. за обсуждение полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
2. The transforms and applications handbook / Editor-in-chief, Alexander Poularikas. – Boca Raton: CRC Press LLC, 2000. – 1335 p.
3. Астафьева Н. М. Вейвлет анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1115 – 1180.
4. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории – к практике. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 448 с.
5. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Сверхширокополосные сигналы и процессы. Монография. – Харьков: Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, 2009. – 576 с.
6. Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Применение вейвлет-анализа к задаче обнаружения кратковременных знакопеременных и сверхширокополосных процессов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2004. – Т. 9, № 9 – 10. – С. 31 – 62.

7. Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Вейвлет-анализ нелинейных волновых процессов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 10. – С. 3 – 21.
8. Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Применение вейвлет-анализа к задаче обнаружения сверхширокополосных сигналов на фоне помех // Радиофизика и радиоастрономия. – 2002. – Т. 7. – № 1. – С. 46-63.
9. Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Вейвлет-анализ модельных сверхширокополосных сигналов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2006. – № 8. – С. 47 – 61.
10. Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Вейвлет-анализ модельных сигналов с особенностями. 1. Непрерывное вейвлет-преобразование // Радиофизика и радиоастрономия. – 2007. – Т. 12, № 2. – С. 182 – 204.
11. Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Вейвлет-анализ модельных сигналов с особенностями. 2. Аналитическое и дискретное вейвлет-преобразования // Радиофизика и радиоастрономия. – 2007. – Т. 12, № 3. – С. 278 – 294.
12. Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Вейвлет-анализ в задачах физики геокосмоса // Космічна наука і технологія. – 2005. – Т. 11, № 5/6. – С. 22 – 29.
13. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке: Монография. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008. – 528 с.
14. Tsurutani V. T., Gonzalez W. D., Kamide Y., Arballo J. K. Magnetic Storms. Geophysical Monograph 98. – Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1998.
15. Bounsanto M. J. Ionospheric Storm. A Review // Space Science Reviews. – 1999. – V. 88. – Pp. 563 – 601.
16. Григоренко Е. И., Лазоренко С. В., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопровождавшие вспышку на Солнце и сильнейшую магнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2003. – Т. 43, № 6. – С. 770 – 787.
17. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрономия. – 2001. – Т. 41, № 5. – С. 659 – 666.