

УДК 550.388

ВИГНЕР-АНАЛИЗ В ЗАДАЧАХ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОФИЗИКИ

О. В. Вишнинецкий, О. В. Лазоренко

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, 61166, г. Харьков, пр. Ленина, 14, Украина
Поступила в редакцию 15 апреля 2010 г.

Нелинейное интегральное преобразование Вигнера, относящееся к классу квадратичных преобразований Коэна, применяется к анализу реальных сигналов и процессов в методах дистанционного радиозондирования геокосмоса. На примерах анализа воздействия на геокосмос взрыва вулкана Сент-Хелленс 18 мая 1980 г. и очень сильной рентгеновской солнечной вспышки 5 декабря 2006 г. продемонстрирована эффективность преобразования Вигнера при изучении нестационарных, нелинейных и сверхширокополосных сигналов и процессов в задачах космической радиофизики, в частности, при исследовании процессов, сопровождающих действие мощных нестационарных источников возмущений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: преобразование Вигнера, класс преобразований Коэна, космическая радиофизика, анализ сигналов, мощные нестационарные источники возмущений, взрыв вулкана, солнечная вспышка.

Нелінійне інтегральне перетворення Вігнера, що належить до класу квадратичних перетворень Коена, застосовується для аналізу реальних сигналів і процесів в методах дистанційного радіозондування геокосмосу. На прикладах аналізу впливу на геокосмос вибуху вулкана Сент-Хелленс 18 травня 1980 р. і дуже сильного рентгенівського сонячного спалаху 5 грудня 2006 р. продемонстровано ефективність перетворення Вігнера під час дослідження нестационарних, нелінійних і над широкосмугових сигналів процесів у задачах космічної радіофізики, зокрема, під час дослідження процесів, які супроводжують дію потужних нестационарних джерел збурень.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: перетворення Вігнера, клас перетворень Коена, космічна радіофізика, аналіз сигналів, потужні нестационарні джерела збурень, вибух вулкана, сонячний спалах.

Being a member of Cohen's class of integral transforms, non-linear integral Wigner transform for analysis of the real signals and processes in geospace radar methods is applied. At samples of the May 18, 1980, explosion of Mount St. Helens and the December 5, 2006, very strong X-ray solar eruption, the effectiveness of Wigner transform application to the processing of non-stationary, non-linear, fractal and ultrawideband signals and processes in problems of space radio physics, in particular, to the investigations of processes, accompanying the effects of powerful non-stationary disturbance sources was shown.

KEY WORDS: Wigner transform, Cohen's transform class, space radio physics, signal processing, powerful non-stationary disturbance sources, volcano explosion, solar eruption.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Практически до конца XX века основным инструментарием, успешно использовавшимся при анализе сигналов и процессов в различных областях науки и техники, являлись методы, основанные на традиционном преобразовании Фурье и его модификациях [1]. Такие методы хорошо зарекомендовали себя при изучении узкополосных сигналов и процессов [2]. Вместе с тем, в ряде задач космической радиофизики, связанных с исследованием процессов в геокосмосе, сопровождающих действие мощных нестационарных источников возмущений, таких как, например, землетрясения, взрывы вулканов, падения крупных космических тел, старты и полеты ракет, ядерные и химические взрывы, солнечные вспышки, прохождение солнечного терминатора и т. п., генерируются и регистрируются сигналы, которые существенно отличаются от узкополосных [2, 3]. К ним относятся нестационарные, нелинейные, фрактальные и сверхширокополосные сигналы, а также сигналы с особенностями. Для их успешного анализа и обработки в последние годы было предложено использовать ряд современных методов время-частотного анализа, в частности, вейвлет-анализ, нелинейные преобразования класса Коэна, системный спектральный анализ [2]. Их применение позволяет существенно расширить объем получаемой информации об объекте исследования, чем и объясняется актуальность данной работы.

Целью работы является демонстрация эффективности методов вигнер-анализа при изучении процессов в космической радиофизике, сопровождающих действие мощных нестационарных источников возмущений.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВИГНЕРА

Преобразование Вигнера (ПВ) сигнала $s(t)$ задается соотношением (см., например, [1, 2, 4 – 10]):

$$P_V f(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s\left(\tau + \frac{t}{2}\right) s^*\left(\tau - \frac{t}{2}\right) \exp(-i\omega t) dt, \quad (1)$$

где $P_V f(\tau, \omega)$ – функция спектральной плотности (ФСП) ПВ, а знак «*» обозначает операцию комплексного сопряжения. ПВ, относящееся к классу нелинейных интегральных квадратичных преобразований Коэна, было введено Е. Вигнером в 1932 г. в квантовой термодинамике [4]. В 1948 г. Дж. Вилль предложил использовать его для анализа сигналов [5]. Поэтому в литературе ПВ иногда называют преобразованием (или распределением) Вигнера-Вилля (см., например, [11, 12]).

Основные достоинства и недостатки ПВ, которые отражают перспективность и целесообразность его использования для анализа нестационарных, нелинейных, фрактальных и сверхширокополосных сигналов, а также сигналов с особенностями, заключаются в следующем.

Наиболее ценным достоинством ПВ является его хорошее время-частотное разрешение, существенно превосходящее то, которое обеспечивается традиционным динамическим (оконым) преобразованием Фурье (ДПФ). Это происходит из-за того, что вещественная ФСП ПВ для сигналов, локализованных во временной или частотной областях, не дает уширения вдоль соответствующей оси в отличие от ФСП ДПФ. Как известно, время-частотное разрешение последней определяется параметрами используемой спектральной оконной функции (см., например, [1, 6, 8]). И если для узкополосных сигналов это в большинстве случаев некритично, то для нестационарных, нелинейных, фрактальных и сверхширокополосных сигналов и процессов, а также для сигналов с особенностями плохое время-частотное разрешение ведет к неизбежным потерям информации об объекте исследования, что почти всегда является крайне нежелательным.

Другим важным достоинством ПВ является возможность осуществления эффективного обнаружения сигналов на фоне аддитивной помехи, имеющей негауссовский закон распределения. Именно в изначальной нелинейности преобразования проявляется преимущество ПВ над линейными интегральными преобразованиями, которые традиционно хорошо позволяют решать данную задачу в случае гауссовского закона распределения помехи. Важно отметить, что в большинстве практических ситуаций наблюдается значительное отклонение реального закона распределения от гауссовского.

Основным недостатком ПВ является возникновение на ФСП интерференционных время-частотных структур для многокомпонентных сигналов. Наличие таких структур, не имеющих никакого физического смысла, может привести к «обнаружению» исследователем несуществующих эффектов. Интерференционные структуры обычно имеют осциллирующий характер и располагаются всегда на время-частотной плоскости в окрестности средней точки между каждой парой локализованных структур, соответствующих реально существующим сигналам или процессам.

Вторым существенным недостатком ПВ является то, что в отдельных случаях ФСП ПВ может принимать отрицательные значения. Поэтому функцию $P_V f(\tau, \omega)$ можно считать функцией спектральной плотности лишь с определенными оговорками, поскольку, как известно, любая ФСП не должна принимать значений, меньших нуля. И если в целом ФСП ПВ трактуется как время-частотная плотность распределения энергии сигнала $s(t)$, то ее возможные отрицательные значения физического смысла не имеют [1, 6].

Тем не менее, в целом достоинства ПВ с избытком компенсируют имеющиеся недостатки. Этим, в первую очередь, и определяется повышенный интерес исследователей к использованию ПВ в различных областях науки и техники, наблюдающийся в последние годы (см., например, [13 – 15]).

Кроме ПВ, задаваемого соотношением (1), существует ряд его модификаций, в частности, L-преобразование Вигнера [16, 17]:

$$LP_V f(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s^L\left(\tau + \frac{t}{2}\right) s^{*L}\left(\tau - \frac{t}{2}\right) \exp(-i\omega t) dt, \quad (2)$$

где $L \in \mathbb{N}$. Разумеется, что при $L = 1$ выражение (2) сводится к (1). L-преобразование Вигнера является «более нелинейным», чем обычное ПВ, а потому влияние интерференционных структур в нем проявляется еще более сильно. Тем не менее, как утверждается в работах [16, 17], на его основе построены модифицированные преобразования, обладающие хорошим время-частотным разрешением и приемлемым уровнем интерференционных структур.

Одним из возможных способов борьбы с возникновением интерференционных время-частотных структур является использование в ПВ спектральных оконных функций. Его воплощением являются псевдо-преобразование Вигнера (ППВ) и сглаженное псевдо-преобразование Вигнера (СППВ), задаваемые соответственно соотношениями [18]:

$$P_{PV}f(\tau, \omega; h) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) s\left(\tau + \frac{t}{2}\right) s^*\left(\tau - \frac{t}{2}\right) \exp(-i\omega t) dt,$$

$$P_{SPV}f(\tau, \omega; h, g) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \int_{-\infty}^{+\infty} g(\xi - \tau) s\left(\xi + \frac{t}{2}\right) s^*\left(\xi - \frac{t}{2}\right) d\xi \exp(-i\omega t) dt,$$

где $h(t)$ и $g(t)$ – сглаживающие оконные функции.

Легко убедиться, что при $g(t) = \delta(t)$ СППВ переходит в ППВ, а само ППВ при $h(t) = 1$ – в ПВ. Интересно также отметить, что если обе оконные функции окажутся гауссовскими, то СППВ превращается в классическую спектрограмму Фурье (СФ).

ППВ и СППВ за счет некоторого ухудшения время-частотного разрешения позволяют существенно уменьшить интенсивность интерференционных структур. Использование в качестве $h(t)$ и $g(t)$ атомарных функций и построенных на их основе спектральных оконных функций Кравченко-Рвачева привело к созданию нового класса нелинейных преобразований Кравченко-Вигнера [19].

Кроме изучения самой ФСП ПВ заданного сигнала $s(t)$, целесообразно также исследование скелетона ПВ, энергограммы ПВ, а также среднеквадратичного отклонения ФСП ПВ.

Под скелетом ПВ понимается двумерная картина линий, соединяющих экстремумы (отдельно максимумы, отдельно минимумы) ФСП ПВ. Некоторые специалисты считают, что в скелетоне любой ФСП заключена вся информация об исследуемом сигнале [20]. Мы не придерживаемся столь категоричной точки зрения и предлагаем совместный анализ ФСП ПВ с другими характеристиками, в том числе и скелетом ПВ, подобно тому, как это делается в системном спектральном анализе [2].

Под энергограммой ПВ понимается функция вида [2]:

$$E_V f(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_V f(\tau, \omega) d\tau,$$

представляющая собой плотность распределения энергии сигнала E по различным частотам ω . Очевидно, что

$$E = \frac{1}{2\pi} \int_0^{+\infty} E_V f(\omega) d\omega.$$

Среднеквадратичное отклонение ФСП ПВ задается соотношением [2]:

$$\sigma_V(\omega) = \left[\frac{1}{\tau_{\max} - \tau_{\min}} \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} [P_V f(\tau, \omega) - \langle P_V f(\tau, \omega) \rangle]^2 d\tau \right]^{1/2},$$

где

$$\langle P_V f(\tau, \omega) \rangle = \frac{1}{\tau_{\max} - \tau_{\min} \omega_{\max} - \omega_{\min}} \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} P_V f(\tau, \omega) d\tau d\omega,$$

τ_{\max} , τ_{\min} , ω_{\max} и ω_{\min} – максимальные и минимальные значения параметров τ и ω , при использовании которых вычисляется ФСП ПВ.

Результаты анализа представленных выше числовых характеристик хорошо дополняются изучением аналогичных характеристик классической СФ. В частности, СФ (ФСП ДПФ) во многих случаях позволяет на время-частотной плоскости отличать реально наблюдаемые эффекты от интерференционных структур.

Для представления результатов вигнер-анализа разработан специальный формат представления данных, который приводится ниже и может быть рекомендован исследователям.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВИГНЕР-АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Известно, что воздействие на геокосмос мощных нестационарных источников возмущений сопровождается возникновением целого комплекса процессов, многие из которых могут быть отнесены к нестационарному, нелинейному, фрактальному и сверхширокополосному [3].

Продемонстрируем возможности вигнер-анализа по изучению высокоэнергетичных процессов в ионосфере Земли на примерах, связанных с воздействием на геокосмос взрыва вулкана и сильнейшей рентгеновской солнечной вспышки.

Анализ процессов, связанных с вулканизмом

Изучаемый процесс представляет собой временные вариации полного электронного содержания в ионосфере, зарегистрированные на исследовательской станции в г. Голдстоун (США) во время взрыва вулкана Сент-Хелленс, произошедшего 18 мая 1980 г. в 15.32 UT [21]. Длительность регистрации во временной области $T_p = 420$ мин, размах процесса по величине полного электронного содержания

$$\Delta \approx 1,2 \cdot 10^{17} \text{ м}^2, \text{ количество отсчетов дискретного вектора данных } N_p = 861.$$

Результаты вигнер-анализа этого уникального процесса приведены на рис. 1. Отсчет времени ведется от момента взрыва. Установлено, что данный процесс является сверхширокополосным процессом. Более того, он оказывается сложным и, по-видимому, содержит возмущения с тремя характерными масштабами $T \sim 38$ мин, $T \sim 75$ мин и $T \sim 115$ мин (последний можно заметить рис. 1, в), которые имеют длительности $\Delta t \sim 120$ мин, $\Delta t \sim 100$ мин и $\Delta t \sim 200$ мин соответственно.

Последние значения указаны весьма приблизительно, поскольку время-частотная структура процесса является достаточно сложной как для ПВ, так и для СФ.

Более того, по-видимому, имеет смысл вообще говорить о трех различных СШП процессах с $\mu \approx 1,2$, $\mu \approx 0,7$ и $\mu \rightarrow 2$.

Анализ процессов, связанных с солнечными вспышками

Перейдем к рассмотрению результатов вигнер-анализа вариаций индукции геомагнитного поля (Н-компонента) во время очень сильной рентгеновской солнечной вспышки 5 декабря 2006 г. (рис. 2). Длительность регистрации во временной области составляет $T_p = 240$ мин, максимальный размах процесса по величине индукции магнитного поля $\Delta B \approx 8$ нТл, количество отсчетов дискретного вектора данных $N_p = 2400$.

Установлено, что данный процесс является СШП процессом и содержит возмущения с тремя разными характерными масштабами $T \sim 15$ мин, $T \sim 10$ мин и $T \sim 5$ мин, длительности которых составляют соответственно $\Delta t \sim 70$ мин, $\Delta t \sim 50$ мин и $\Delta t \sim 25$ мин. Интересно отметить, что все эти три вида возмущений появляются практически одновременно. Это хорошо видно на время-частотных плоскостях обоих преобразований. Показатель широкополосности данного СШП процесса оказался равным $\mu \approx 0,7$.

ВЫВОДЫ

1. Вигнер-анализ позволяет эффективно проводить изучение время-частотной структуры нестационарных, нелинейных, фрактальных и сверхширокополосных сигналов, а также сигналов с особенностями, поскольку обладает хорошим время-частотным разрешением, превосходящим возможности традиционных методов анализа, основанных на преобразовании Фурье и его модификациях.

2. Основным недостатком вигнер-анализа является возникновение в ФСП ПВ интерференционных время-частотных структур для многокомпонентных сигналов. Одним из возможных путей снижения их негативного влияния является использование ППВ и СППВ.

3. Рекомендуется совместный анализ ФСП ПВ, его скелетона, энергограммы и среднеквадратичного отклонения ФСП с аналогичными характеристиками ДПФ. Эти два преобразования хорошо дополняют друг друга, позволяя, в частности, производить обнаруживать на время-частотной плоскости положение интерференционных структур и снижать их влияние на результат анализа исследуемого сигнала.

4. Продемонстрирована эффективность вигнер-анализа при решении задач космической радиофизики на примере исследования процессов, сопровождающих взрыв вулкана и очень сильную рентгеновскую вспышку. Показано, что возникающие процессы являются сверхширокополосными. Изучена их тонкая время-частотная структура, оценены соответствующие параметры возмущений во временной и частотной областях.

Авторы искренне благодарны профессору кафедры космической радиофизики Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина, д.ф.-м.н. Черногору Л. Ф. за содействие и поддержку в проведении исследований и помощи в истолковании их результатов.

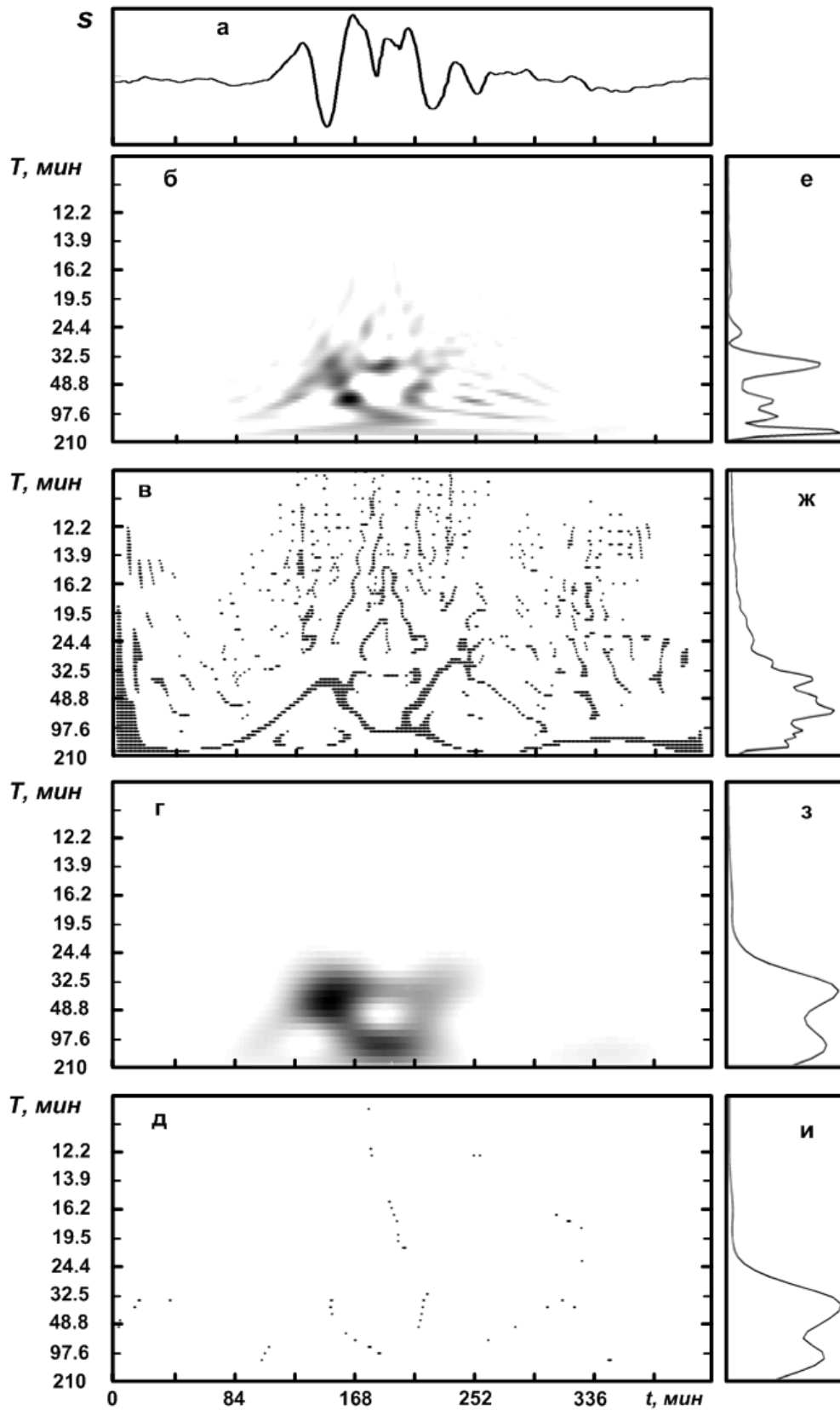


Рис. 1. Результаты анализа временных вариаций полного электронного содержания в ионосфере при взрыве вулкана Сент-Хелленс: а – сигнал во временной области, б – модуль ФСП ППВ, в – скелетон ФСП ППВ, г – модуль ФСП ДПФ, д – скелетон ФСП ДПФ, е – энергограмма ППВ, ж – среднее квадратичное отклонение модуля ФСП ППВ, з – энергограмма СФ, и – среднее квадратичное отклонение модуля ФСП ДПФ.

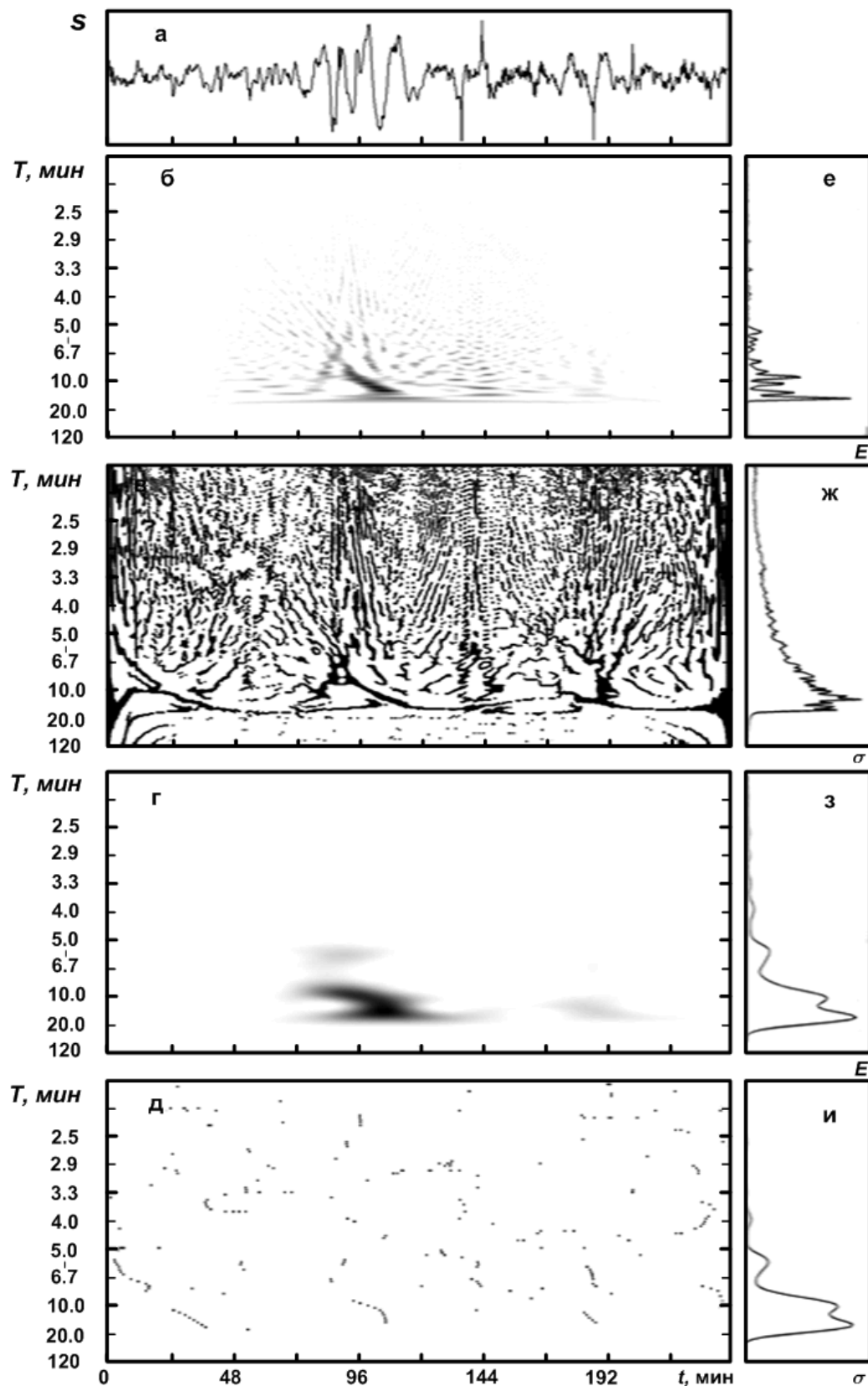


Рис. 2. Результаты анализа вариаций индукции геомагнитного поля (H-компонента) во время сильнейшей рентгеновской солнечной вспышки 5 декабря 2006 г.: а – сигнал во временной области, б – модуль ФСП ППВ, в – скелетон ФСП ППВ, г – модуль ФСП ДПФ, д – скелетон ФСП ДПФ, е – энергограмма ППВ, ж – среднее квадратическое отклонение модуля ФСП ППВ, з – энергограмма СФ, и – среднее квадратическое отклонение модуля ФСП ДПФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
2. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Сверхширокополосные сигналы и процессы. Монография. – Х.: Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, 2009. – 576 с.
3. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке: Монография. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008. – 528 с.
4. Wigner E. P. On the quantum correction for thermodynamic equilibrium // *Phys. Rev.* – 1932. – V. 40. – P. 749 – 759.
5. Ville J. Theorie et applications de la notion de signal analytique // *Cables et Transmission.* – 1948. – V. 2A. – P. 61 – 74.
6. Коэн Л. Время-частотные распределения: Обзор // *ТИИЭР.* – 1989. – Т. 77, № 16. – С. 72 – 120.
7. Gaunard G. C. Signal Analysis by Means of time-Frequency (Wigner-Type) Distributions—Applications to Sonar and Radar Echoes // *Proc. of the IEEE.* – 1996. – V. 84, No. 9. – P. 1231 – 1248.
8. The transforms and applications handbook / Editor-in-chief, Alexander Poularikas. – Boca Raton: CRC Press LLC, 2000. – 1335 p.
9. Вишнинецкий О. В., Кравченко В. Ф., Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Преобразование Вигнера и атомарные функции в цифровой обработке сигналов // *Электромагнитные волны и электронные системы.* – 2006. – Т. 11, № 6. – С. 26 – 38.
10. Кравченко В. Ф., Лазоренко О. В., Пустовойт В. И., Черногор Л. Ф. Преобразование Вигнера в обработке сигналов // *ДАН РАН.* – 2006. – Т. 410, № 1. – С. 38 – 41. English version: Kravchenko V. F., Lazorenko O. V., Pustovoyt V. I., and Chernogor L. F. Wigner transformation in digital processing of signals // *Doklady Physics.* – 2006. – V. 51, No. 9. – P. 461 – 464.
11. Woashash B., Whitehouse H. J. Seismic application of the Wigner-Ville distribution // *In Proc. IEEE Int. Conf. Systems and Circuits.* – 1986. – P. 34 – 37.
12. Imberger J., Woashash B. Application of the Wigner-Ville distribution to temperature gradient microstructure: a new technique to study small-scale variations // *J. Phys. Oceanog.* – 1986. – V. 16. – P. 1997 – 2012.
13. Кравченко В. Ф., Рвачев В. Л. Алгебра логики, атомарные функции и вейвлеты в физических приложениях. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 416 с.
14. Вишнинецкий О. В., Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Анализ нелинейных волновых процессов при помощи преобразования Вигнера // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2007. – Т. 12, № 3. – С. 295 – 310.
15. Вишнинецкий О. В., Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Вигнер-анализ модельных сигналов с особенностями // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2008. – Т. 13, № 2. – С. 195 – 209.
16. Stankovich L. A method for improved concentration in the time-frequency analysis of multicomponent signals using the L-Wigner distribution // *IEEE Transactions on signal processing.* – 1995. – V. 43, No. 5. – P. 1262 – 1268.
17. Zetic R. Dual version of L-Wigner distribution // *In Proc. of the 4th International conference “DSP 99”.* – Slovakia. – 1999. – P. 66 – 69.
18. Auger F., Flandrin P., Goncalves P., Lemoine O. Time-Frequency Toolbox Reference Guide. – Hewston: Rice University, 2005. – 180 p.
19. Кравченко В. Ф., Лазоренко О. В., Пустовойт В. И. Преобразование Кравченко-Вигнера в нелинейной цифровой обработке сигналов // *ДАН РАН.* – 2007. – Т. 416, № 6. – С. 754 – 758. English version: Kravchenko V. F., Lazorenko O. V., and Pustovoyt V. I. Kravchenko-Wigner Transformation in Nonlinear Digital Signal Processing // *Doklady Physics.* – 2007. – V. 52, No.10. – P. 544 – 548.
20. Астафьева Н. М. Вейвлет анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физических наук.* – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1115 – 1180.
21. Roberts D. H., Klobuchar J. A., Fougere P. F. A Large-Amplitude Traveling Ionospheric Disturbance Produced by the May 18, 1980, Explosion of Mount St. Hellens // *Journal of Geophysical Research.* – 1982. – V. 87, No. A8. – P. 6291 – 6301.