

УДК 550.385.37:550.388

В. А. Алексеенко, К. П. Гармаш, Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Флюктуации геомагнитного поля накануне и в течение сильнейшей магнитной бури 1 октября 2002 года

Виконано спостереження найсильнішої магнітної бурі 2002 р., описано ефекти сонячного спалаху, що передував їй. За допомогою методу, оснований на вейвлет-перетворенні, оброблено сигнали на виході унікального високочутливого магнітометра-флюксметра Радіофізичної обсерваторії Харківського національного університету. Встановлено, що амплітуда сигналів під час бурі збільшилася у 30 раз, а вейвлет-коефіцієнти — на 1-2 порядки. Спостерігалось помітне збагачення вейвлет-спектра.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение причин возникновения, протекания и влияния магнитных бурь на околоземное пространство и Землю остается актуальной задачей. С развитием технологий, особенно радиоэлектронных систем и средств, вырастает прикладная значимость данных задач. Известно, что резкие и сильные флюктуации магнитного поля могут привести к сбоям в работе и выходу из строя искусственных спутников Земли и космических аппаратов, систем телекоммуникаций и навигации, к авариям на мощных линиях электропередач и т. д. Для эффективного мониторинга используется целый арсенал космических и наземных средств, к которым относятся и магнитометры — относительно недорогие и долговечные в эксплуатации приборы, позволяющие измерять короткопериодические ($T = 1 \dots 1000$ с) флюктуации геомагнитного поля. Для детального изучения магнитометрических сигналов используются различные методы обработки, среди которых важное место занимает фурье-анализ. Однако он малоэффективен для анализа нестационарных сигналов и сигналов с локальными особенностями. Поэтому в данной работе был использован новый и перспективный метод обработки, основанный на вейвлет-преобразовании.

Целью настоящей работы является изложение

результатов вейвлет-анализа флюктуаций геомагнитного поля, зарегистрированных с 27 сентября по 6 октября 2002 г.

Для наблюдения использовался уникальный магнитометр-флюксметр с высоким разрешением во времени (0.5 с), способный регистрировать минимальную амплитуду флюктуаций около 0.5, 5 и 50 пТл при $T = 1, 10$ и 100 с соответственно. Магнитометр-флюксметр, входящий в состав автономно функционирующего программно-аппаратного комплекса, расположен в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (49°38' N, 36°20' E) [2].

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ПРИ ПОМОЩИ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Для обнаружения периодов преобладающих колебаний флюктуаций H - и D -составляющих магнитного поля Земли применялся метод анализа на основе вейвлет-преобразования. Обработка осуществлялась в системе компьютерной математики MATLAB 6.5 с использованием пакета расширений «Wavelet Toolbox 2.2».

В настоящей работе метод обработки временных рядов был построен на непрерывном прямом вейвлет-преобразовании (One-Dimensional Continuous

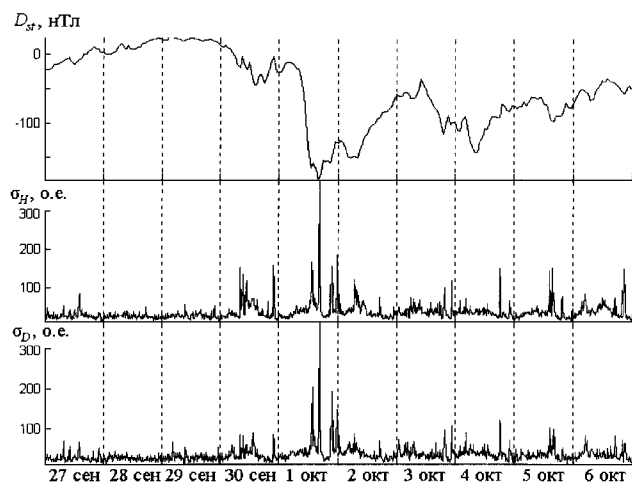


Рис. 1. Временные зависимости значений D_{st} -индекса и средних квадратичных отклонений для H - и D -компонентов

Wavelet Analysis Tool), осуществляемого с помощью гауссового вейвлета 1-го порядка (gaus1), который задается следующим математическим выражением:

$$\psi(t) = -\sqrt{\pi}te^{-t^2}.$$

Этот вейвлет относится к грубым и не предназначен для обратных вейвлет-преобразований. Он удобен для обнаружения периодов преобладающих колебаний. При анализе бури было получено около 200 вейвлет-спектров, у которых по оси абсцисс отложены сдвиги b , прямо пропорциональные времени, а по оси ординат отложены масштабы a , которые связаны с периодом T анализируемых колебаний для указанного вейвлета выражением $T = 5a\Delta t$. Здесь Δt — интервал дискретизации сигнала. В нашем случае $\Delta t = 0.5$ с, и $T = 2.5a$.

Вейвлет-коэффициенты на спектрограмме обозначались с помощью черно-белой цветовой схемы, причем большему модулю вейвлет-коэффициента соответствует более темный участок на спектрограмме.

Непрерывное вейвлет-преобразование имеет большую избыточность вычислений из-за перекрытия компактных носителей вейвлетов. Получаемые при этом вейвлет-спектры более наглядны и просты для анализа, а избыточность вычислений компенсируется мощностью современных компьютеров.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Сильнейшая магнитная буря и сопутствовавшие ей процессы были вызваны геоэффективным выбросом

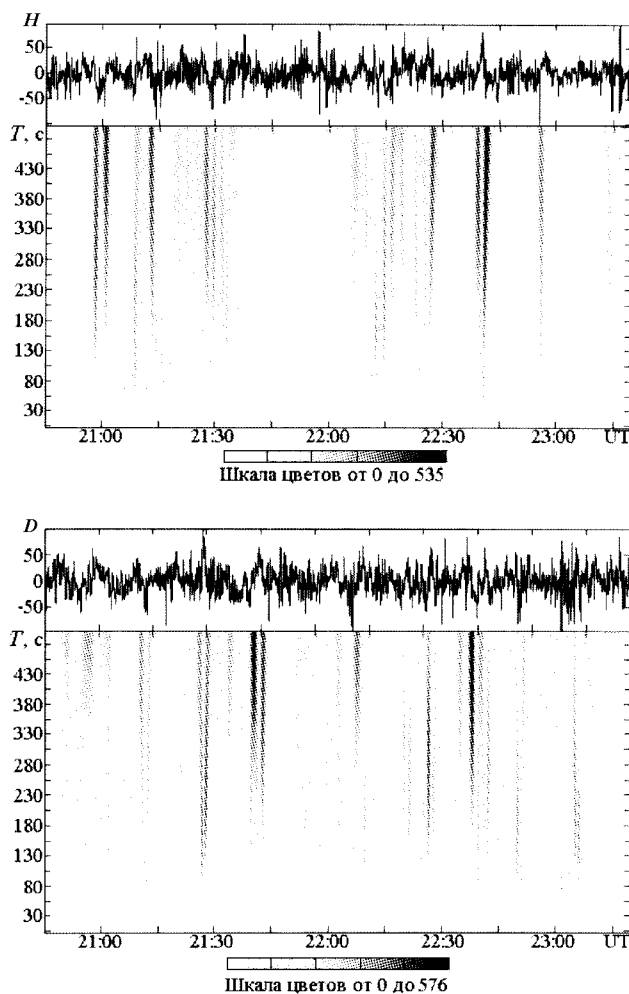


Рис. 2. Временные зависимости и вейвлет-спектрограммы флюктуаций геомагнитного поля для магнитоспокойного дня 29 сентября 2002 г. для H - и D -компонентов (здесь и далее в о. е.)

солнечного вещества во время вспышки класса M1.8/Sf в 13:12 UT 27 сентября 2002 г.

На рис. 1 приведены значения D_{st} -индекса и средние квадратичные отклонения $\sigma_{H,D}$ для H - и D -компонентов. Последние вычислялись на 12-минутных интервалах. Видно, что всплески амплитуды сигнала соответствуют сильным изменениям поведения кривой D_{st} -индекса. Можно выделить три фазы геомагнитной бури: внезапное начало (в конце суток 30 сентября), главную фазу (во второй половине суток 1 октября) и фазу релаксации (с 1 октября по полдень 3 октября).

Для анализа возмущений магнитометрического сигнала целесообразно сравнивать вейвлет-спектрограммы этих возмущений со спектрограммами

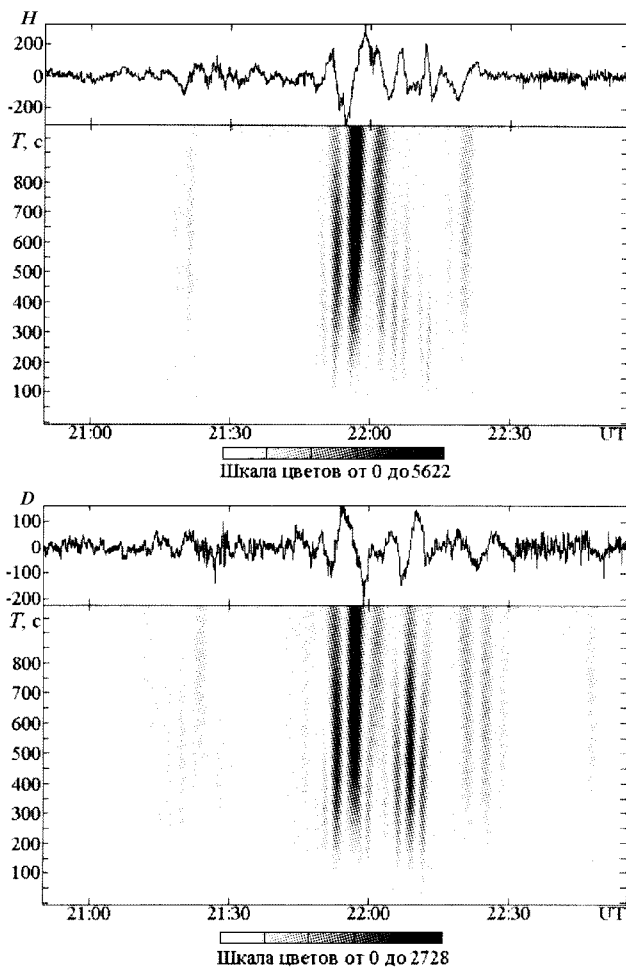


Рис. 3. Временные зависимости и вейвлет-спектрограммы флуктуаций геомагнитного поля, соответствующие внезапному началу для H - и D -компонентов

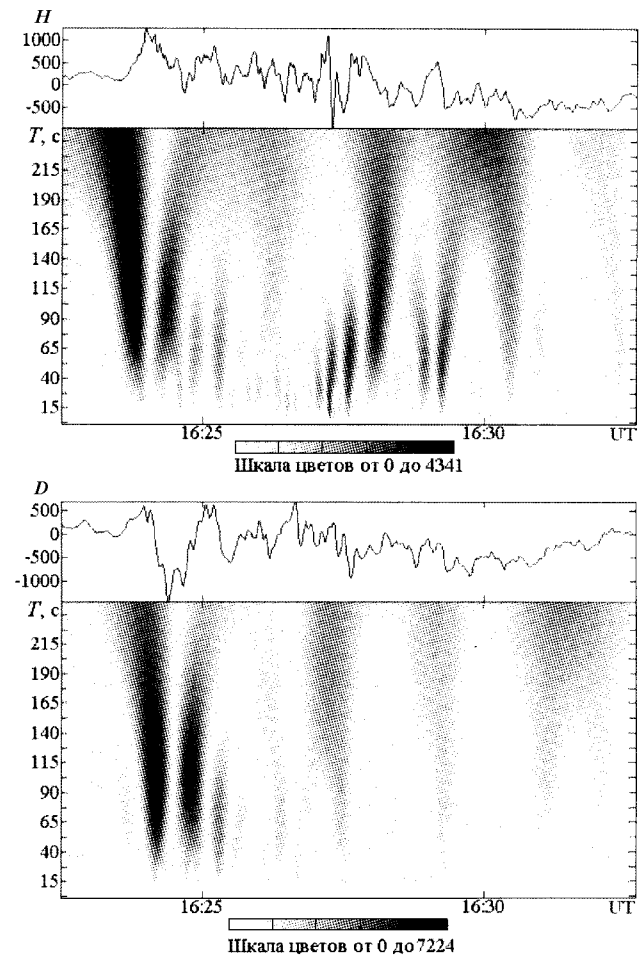


Рис. 4. Временные зависимости и вейвлет-спектрограммы флуктуаций геомагнитного поля во время главной фазы бури для H - и D -компонентов

невозмущенного сигнала. Для этого рассмотрим отрезок времени, когда геомагнитное поле не было возмущено, и амплитуды флуктуаций H - и D -компонентов сильно и резко не изменялись. Пример такого сигнала, полученного 29 сентября, с вейвлет-спектрограммой приведен на рис. 2. Видно, что преобладают колебания с периодом 200–400 с и более, лишь изредка появляются маловыразительные цуги колебаний с периодами 40–100 с, но они довольно скоротечны (не более 2 периодов) и амплитуда их мала. Можно утверждать, что в магнитоспокойный день 29 сентября преобладали колебания с периодами в сотни секунд.

Внезапное начало бури (рис. 3) наблюдалось с 19:00 до 23:00 30 сентября, спустя трое суток после вспышки. Оно характеризовалось внезапным уве-

личением значения D_{st} -индекса на 40 нТл, амплитуды флуктуаций геомагнитного поля в 7–8 раз и их вейвлет-коэффициентов в 30–40 раз по сравнению с невозмущенным днем. С 23:48:30 30 сентября для H -компонента регистрировался аперiodический процесс с медленно увеличивающимся периодом от 300 с до 500 с и продолжительностью 16 мин. Далее его сменил процесс с периодами 250–290 с, который продолжался до 22:15:18, пока амплитуда сигнала не достигла фонового значения. Для D -компонента в 21:48:00 наблюдался колебательный процесс с нарастающим периодом с 200 до 540 с и продолжительностью около 14 мин. В 22:01:50 произошло изменение фазы колебания и регистрировался квазипериодический процесс с периодом 380 с и продолжительностью 14 мин 18 с.

В 22:16:08 снова произошло изменение фазы колебаний и возник затухающий квазипериодический процесс с периодом около 500 с и продолжительностью около 15 мин.

Главная фаза магнитной бури (рис. 4) наблюдалась около 16:23 1 октября, спустя примерно 18 ч после внезапного начала. При этом D_{st} -индекс достиг своего минимума, который составил -183 нТл, значение K_p -индекса равнялось 7, амплитуда флюктуаций возросла до 30 раз, а вейвлет-коэффициенты увеличились на два порядка. Такая буря относится к сильнейшим, ее энергия составила $8 \cdot 10^{15}$ Дж. Сжатие геомагнитных силовых линий под действием ударного фронта солнечного ветра длилось около 8 ч, поэтому мощность данной бури равнялась $3 \cdot 10^{11}$ Вт. С 16:23:25 по H - и D -компонентам наблюдался мощный широкополосный процесс, достигший своего максимума примерно за 20 с, с периодами 80—500 с и 40—700 с для H - и D -компонента соответственно. Этот процесс протекал на фоне длиннопериодических колебаний с периодами 850—1000 с и 700—1000 с для каждой из составляющих соответственно. Также отмечалось заметное обогащение спектра колебаниями с периодами 10—75 с, причем наиболее интенсивными были колебания с периодами 50—70 с. Общая продолжительность возмущений во время главной фазы составила около 9 мин.

После главной фазы началась релаксация возмущений магнитного поля (фаза восстановления). Она продолжалась по крайней мере до 10:00 3 октября, т. е. примерно вдвое суток, и характеризовалась возникновением пульсаций с периодами 15—20 с и 50—55 с и продолжительностью 1–2 мин. При этом амплитуда флюктуаций возросла до 10 раз, а вейвлет-коэффициенты увеличились до 30 раз.

Вариации геомагнитного поля в рассматриваемый промежуток времени представляли собой наложение большого числа суббурь. Это привело к маскировке внезапного начала, возникновению нескольких минимумов во время главной фазы и немонотонности временной зависимости D_{st} -индекса во время фазы восстановления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом проанализированные эффекты подобны описанным нами в работе [2], которая посвящена сильнейшей геомагнитной буре 1999 г.

Примененный для анализа результатов измерений на уникальном несерийном магнитометре-флюксметре вейвлет-анализ на основе гауссового вейвлета 1-го порядка показал высокую эффективность и одновременное высокое частотно-временное разрешение.

При помощи вейвлет-анализа обнаружена и описана реакция на сильнейшую геомагнитную бурю 2002 г. и выявлены процессы, протекавшие в магнитосфере Земли с 27 сентября по 6 октября.

Установлено, что во время бури спектр геомагнитных пульсаций значительно обогащался, амплитуда флюктуаций увеличивалась до 30 раз, а значения вейвлет-коэффициентов возрастали на 1–2 порядка.

Работа выполнена при частичной поддержке Научно-технологического центра Украины, проектное соглашение №1772.

1. Гармаш К. П., Лазоренко С. В., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Флюктуации магнитного поля Земли во время самой большой геокосмической бури 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия.—2003—8, № 2.—С. 252—263.
2. Гармаш К. П., Леус С. Г., Пазюра С. А. и др. Статистические характеристики флюктуаций электромагнитного поля Земли // Радиофизика и радиоастрономия.—2003—8, № 2.—С. 163—180.

FLUCTUATIONS OF THE GEOMAGNETIC FIELD ON THE EVE AND DURING THE STRONGEST MAGNETIC STORM OF 1 OCTOBER 2002

V. A. Alexeenko, K. P. Garmash, L. F. Chernogor

Observations of the 2002 strongest magnetic storm were performed. The solar flare preceding the storm is described. The magnetometer data derived at the Kharkiv V. Karazin National University Radiophysical Observatory were wavelet-transformed. The signal amplitude is revealed to increase by a factor of 30 during the storm, but the wavelet coefficients increased by one to two orders of magnitude. A significant spreading of the wavelet-spectrum was observed.