

Флуктуации магнитного поля Земли во время самой большой геокосмической бури 1999 г.

К. П. Гармаш, С. В. Лазоренко, С. А. Пазюра, Л. Ф. Черногор

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина,
Украина, 61077, г. Харьков, пл. Свободы, 4
E-mail: Leonid F. Chernogor @ univer. kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 6 сентября 2002 г.

При помощи высокочувствительного магнитометра-флюксметра с высоким временным разрешением, расположенного в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета (вблизи г. Харькова), выполнены наблюдения за уникальной магнитной бурей и эффектами предшествовавшей ей солнечной вспышки. Во время бури магнитометрические сигналы увеличились по амплитуде в 50÷60 раз, наблюдалось значительное обогащение их спектров. Для обработки данных наблюдений использовались статистический, спектральный и вейвлет-анализы. Описаны детали наблюдаемых флуктуаций геомагнитного поля.

За допомогою високочутливого магнітометра-флюксметра з високою часовою роздільною здатністю, розташованого в Радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету (неподалік від м. Харків), виконані спостереження за унікальною магнітною бурєю та ефектами сонячного спалаху, що їй передував. Під час бурі магнітометричні сигнали збільшилися за амплітудою у 50÷60 раз, спостерігалось значне збагачення їх спектрів. Для обробки даних спостережень використовувалися статистичний, спектральний і вейвлет-аналізи. Описано деталі флуктуацій геомагнітного поля, що спостерігалися.

Введение

В настоящее время главным направлением солнечно-земной физики является исследование, моделирование и предсказание всего комплекса процессов в системе Солнце – межпланетная среда – Земля. Важное место в нем занимает проблема космической погоды. Вариации ее состояния вызываются в основном источниками солнечного происхождения, которые возмущают межпланетную среду и обуславливают геокосмические бури. Последние проявляются во всех внешних оболочках Земли и представляют собой сочетание геомагнитных, ионосферных и атмосферных бурь.

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, [1-3]). В последние годы исследование геокосмических бурь и сопутствующих им процессов проводят в рамках комплексных международных проектов (например, CEDAR, NSWП и др.) [3]. Особый интерес представляют сильнейшие бури. Их количество составляет около 4 % от общего числа [4]. Магнитная буря (МБ), наблюдавшаяся 22 октября 1999 г., относится к уникальным. Сопутствовавшие ей процессы автор работы [5] назвал “выдающимся событием солнечно-земной физики”.

Целью настоящей работы является изложение результатов магнитометрических наблю-

дений самой большой МБ 1999 г., выполненных вблизи г. Харькова в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина (РФО ХНУ).

Общие сведения

Исходные данные о процессах на Солнце и в межпланетной среде, необходимые для настоящей работы, получены при помощи сети Интернет.

18 – 19 октября 1999 г. имел место захват гелиосферного токового слоя (HCS) корональной дырой [5]. Такое событие относится к очень редким, их доля всего 1 ÷ 2 % [6]. Солнечный источник, представляющий собой комбинацию HCS, активного волокна и корональной дыры, был особо геоэффективным [5]. HCS выступил в качестве поршня, вызвавшего очень сильную деформацию сектора межпланетного магнитного поля (ММП), примыкавшего к HCS с запада. По данным наблюдения на спутнике “ACE” (США) возникло возмущение этого поля с индукцией $B_z \approx -31$ нТл, которое и привело к наблюдаемой МБ. Причиной столь сильных вариаций значений B_z и модуля B в целом могло быть или магнитное облако, выброшенное Солнцем, или поле специфического по конфигурации гелиосферного электроджета [5].

Временные вариации основных параметров возмущенного солнечного ветра, полученных ИСЗ “ACE”, находившимся на расстоянии 1.5 млн км от Земли, показаны на рис. 1. Они сопровождались вариациями ММП, которые зарегистрированы на этом же ИСЗ (рис. 2).

Первый контакт ударного фронта солнечного ветра с ИСЗ “ACE” имел место 21 октября в 04:38 (здесь и далее время киевское). Магнитная буря началась 21 октября примерно в 05:25 (см. рис. 1, 2; детали ее начала показаны на рис. 4). Начальная фаза продолжалась около 20 часов. В интервале времени 04:00 – 10:00 22 октября наблюдалось стремительное падение D_{st} -индекса (основная фаза), его минимальное значение составило $D_{st\ min} \approx -220$ нТл. Как известно, этот индекс описывает степень возмущения геомагнитного поля, и тем самым интенсивность магнит-

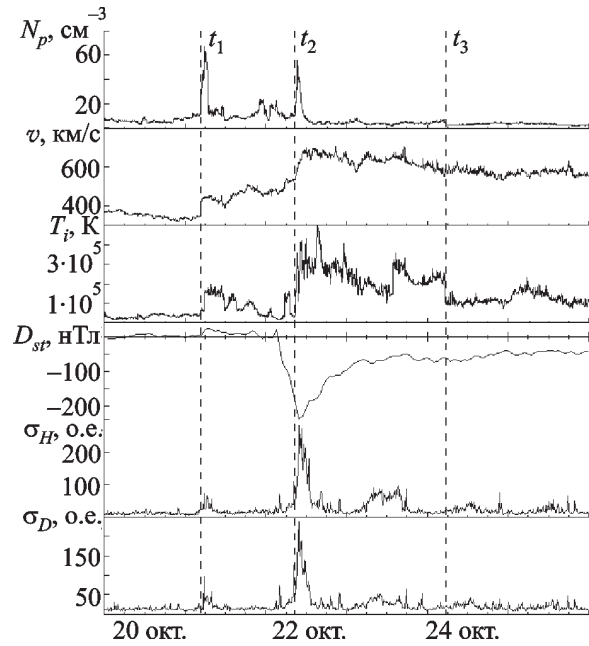


Рис. 1. Временные вариации концентрации N_p , скорости v , температуры ионов T_i солнечного ветра (по измерениям на ИСЗ “ACE”) и D_{st} -индекса, а также средних квадратических отклонений σ_H и σ_D горизонтальных H- и D-компоненты геомагнитного поля на поверхности Земли (по измерениям в РФО ХНУ). Здесь t_1 , t_2 и t_3 – моменты появления головной ударной волны, лобовой токовой поверхности и обратной ударной волны соответственно

ных бурь. Фаза восстановления продолжалась по крайней мере до 25 октября. Индексы магнитной активности A_p , $a_{p\ max}$ и $K_{p\ max}$ составляли соответственно 91, 207 нТл и 8. По одной из классификаций такая МБ относится к большому (severe, или S-буря), по другой классификации – к сверхсильным¹. Энергия E_m и мощность P_m таких МБ составляют $\sim 10^{16}$ Дж и $\sim 10^{12}$ Вт. Величину E_m удобно оценивать по минимальному значению D_{st} -вариации [1]:

$$E_m = \frac{3}{2} E_M \frac{D_{st}^*}{B_0},$$

где $E_M \approx 8 \cdot 10^{17}$ Дж – энергия дипольного геомагнитного поля у поверхности Земли,

¹Л. Ф. Черногор. Радиофизика и радиоастрономия. 2003, 8, №1, с. 59-106.

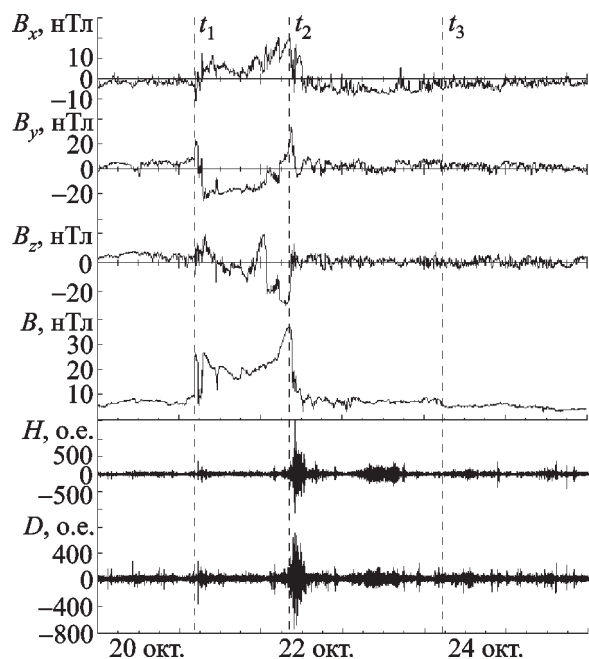


Рис. 2. Временные вариации модуля вектора индукции и его трех проекций ММП по измерениям на ИСЗ “ACE”, а также горизонтальных H - и D -компоненты геомагнитного поля на поверхности Земли по измерениям в РФО ХНУ. Обозначения те же, что и на рис. 1

$B_0 = 3 \cdot 10^{-5}$ Тл – значение индукции геомагнитного поля на экваторе,

$$D_{st}^* = D_{st} - bp^{1/2} + c.$$

Здесь $b = 0.2$ нТл(эВ·см⁻³)^{-1/2}; $c = 20$ нТл; $p = N_p m_p v^2$ – давление плазмы солнечного ветра, N_p и m_p – концентрация и масса протонов в солнечном ветре, v – его скорость. Полагая (см. рис. 1), что при $D_{st} = D_{st \min}$ (22 октября вблизи 10:00) $N_{p \max} = 5.5 \cdot 10^7$ м⁻³, $v_{\max} \approx 650$ км/с, получим $p^{1/2} = 500$ (эВ·см⁻³)^{1/2} и $D_{st}^* \approx -300$ нТл. Тогда $E_m \approx 1.2 \cdot 10^{16}$ Дж. При $\Delta t \approx 6$ ч имеем $P_m \approx 5.6 \cdot 10^{11}$ Вт.

Измерительный комплекс

Непрерывные наблюдения за геомагнитной активностью осуществлялись в РФО ХНУ (географические координаты 49°40' с. ш.,

36°50' в. д.). Измерения амплитуд магнитометрических сигналов, пропорциональных амплитудам горизонтальных компонент H и D геомагнитного поля, выполнены при помощи программно-аппаратного комплекса ХНУ, параметры которого описаны в [7]. Регистрация и обработка магнитометрического сигнала производилась в цифровом виде, частота отсчетов уровня его флуктуаций составляла 2 Гц. Диапазон периодов регистрируемых колебаний $T = 1 \div 1000$ с. Чувствительность магнитометра-флюксметра – не хуже 0.5, 5 и 50 пТл при $T = 1, 10$ и 100 с соответственно. Точность привязки по времени не хуже 1 с в месяц.

Переход от относительных единиц осуществлялся при помощи калибровки в заданной полосе частот или в заданном интервале периодов колебаний (табл. 1).

Таблица 1. Цена относительной единицы в зависимости от периода колебаний

T, c	$\Delta H(\Delta D), пТл$	T, c	$\Delta H(\Delta D), пТл$
1	25	50	17
2	20	60	20
3	15	70	23
5	10	80	27
10	8	90	31
20	10	100	35
30	12	150	67
40	15		

Методика обработки данных наблюдений

Поскольку регистрируемый сигнал $H(t)$ и $D(t)$ на интервалах времени, превышающих 10 мин, оказался шумоподобным, применялась статистическая обработка [7]. Оцениванию подлежали распределения амплитуд $p(H)$ и $p(D)$, а также выборочные средние квадратические отклонения σ_H, σ_D на интервале времени 12 мин (720 с). Для нахождения периодов преобладающих колебаний проводилось спектральное оценивание на интервале времени 8192 с на основе алгоритма быстро-

го преобразования Фурье (БПФ). Применялся также современный метод анализа, использующий вейвлет-преобразование [8-10]. В этих исследованиях в качестве базисной был выбран DOG-вейвлет, который получил, пожалуй, наибольшее распространение:

$$\psi(\tilde{t}) = \exp\left(-\frac{|\tilde{t}|^2}{2}\right) - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{|\tilde{t}|^2}{8}\right).$$

Вейвлет-преобразование сигнала $s(t)$ дает вейвлет-спектр:

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(\tilde{t}) \psi\left(\frac{\tilde{t}-b}{a}\right) d\tilde{t},$$

где $\tilde{t} = t/\Delta t$, Δt – интервал дискретизации сигнала (в нашем случае $\Delta t = 0.5$ с); a – параметр масштабирования; b – параметр сдвига. Для указанной базисной функции периоды T анализируемых колебаний связаны с параметром a следующим образом:

$$T = \pi \sqrt{\frac{3}{\ln 2}} a \Delta t.$$

Результаты анализа

Солнечная вспышка. Магнитной буре предшествовало усиление солнечной активности. В частности, 20 октября имела место вспышка класса M1/1F. Рентгеновская вспышка началась в 09:47, достигла максимальной интенсивности в 09:53 и закончилась в 10:47. Опишем кратко эффекты вспышки в магнитном поле.

Первое заметное изменение характера сигнала имело место при $t_1 \approx 09:55$ и $09:56$ для D - и H -компоненты соответственно и продолжалось 1÷2 мин (рис. 3). Сигнал стал как бы более регулярным (амплитуда флуктуаций несколько увеличилась, возрос и интервал корреляции уровня флуктуаций). Преобладали коле-

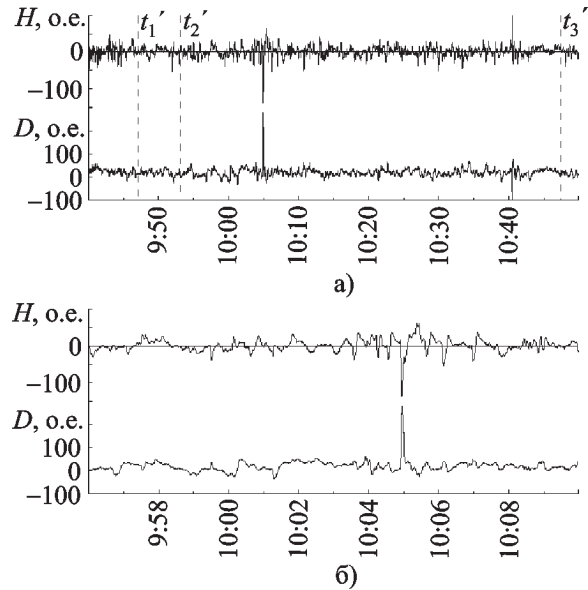


Рис. 3. Временные вариации магнитометрических сигналов горизонтальных H - и D -компоненты геомагнитного поля, сопутствовавших солнечной вспышке 20 октября 1999 г.:

a – общий вид; b – детализация вариаций на меньшем интервале времени. Здесь t'_1 , t'_2 и t'_3 – моменты начала, максимальной интенсивности и окончания солнечной вспышки соответственно

бания с периодами $20 \div 40$ с. Продолжалось это примерно 12 мин. В 10:05 амплитуда H -компоненты уменьшилась до -150 о. е., а амплитуда D -компоненты увеличилась до $+300$ о. е. Характер флуктуаций магнитометрического сигнала возвращался к первоначальному в течение периода $10:44 \div 10:49$.

Внезапное начало бури. Исходные зависимости $H(t)$ и $D(t)$ показаны на рис. 4. Видно, что внезапное начало бури (SSC) имело место в 05:20 21 октября. Фоновое значение сигнала до начала SSC обычно не превышало $10 \div 20$ о. е. Лишь за две минуты до SSC наблюдался квазипериодический ($T \approx 25$ с) процесс с амплитудой около 25 о. е. В момент времени 05:25:35 H и D увеличились до 350 и 250 о. е. (т. е. в $20 \div 30$ раз). Продолжительность положительного всплеска сигнала составила около 1 мин. За ним последовал отрицательный всплеск с амплитудой около 150 и 350 о. е. для H - и D -компоненты соответствен-

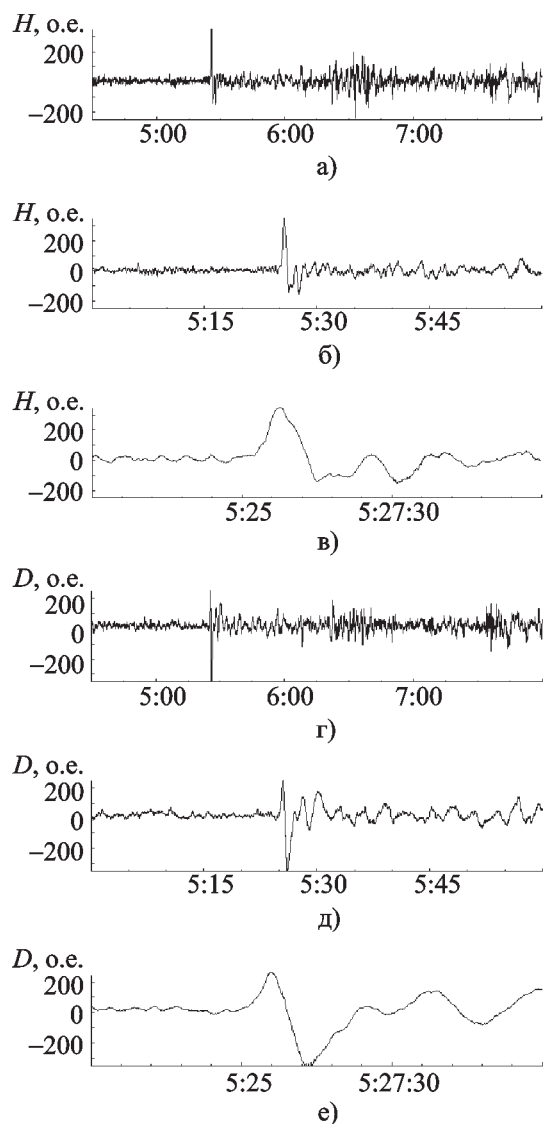


Рис. 4. Временные вариации магнитометрических сигналов горизонтальных H - и D -компоненты геомагнитного поля, сопутствовавших внезапному началу магнитной бури 21 октября 1999 г.: a и $г$ – общий вид; $б$, $в$, $д$ и $е$ – детализация вариаций на меньших интервалах времени

но. Далее примерно в течение 1 ч фиксировался квазипериодический процесс с преобладающими периодами $70 \div 80$ с и $140 \div 160$ с для H - и D -компоненты.

В интервале времени $06:20 \div 06:40$ наблюдалось усиление (до двух раз) флуктуаций сигнала. В спектре преобладали колебания с $T \approx 130 \div 150$ с. Следующий период повышенных значений уровня флуктуаций начался в

$\sim 07:00$ и продолжался до $08:00$. Далее в течение почти 19 часов амплитуда флуктуаций в основном не превышала 20 о. е.

Основная фаза. Если судить по D_{st} -вариации (рис. 1), эта фаза продолжалась примерно с 6:00 до 10:00 22 октября 1999 г. Затем началась восстановительная фаза бури.

Предвестником основной фазы послужил значительный всплеск уровней магнитометрических сигналов в интервале времени $02:40 \div 03:00$ (рис. 2, табл. 2). До него фоновое значение амплитуд флуктуаций составляло около 10 о. е. В указанном промежутке времени оно возросло до $50 \div 100$ о. е.

Таблица 2. Флуктуации геомагнитного поля 22 октября 1999 г.

Интервал времени	ΔH , о. е.	ΔD , о. е.	T , с
$02:40 \div 03:00$	$50 \div 100$	$50 \div 100$	$20 \div 200$
$03:38 \div 04:30$	200	200	$30 \div 420$
$06:35 \div 06:55$	$100 \div 150$	$100 \div 150$	$60 \div 420$
$08:00 \div 13:30$	$300 \div 600$	$300 \div 600$	$20 \div 420$
$15:50 \div 16:35$	$50 \div 100$	$50 \div 100$	$30 \div 420$
$18:50 \div 19:20$	100	100	$60 \div 420$
$21:34 \div 22:00$	$100 \div 200$	$100 \div 200$	$60 \div 420$

За упомянутым всплеском уровня флуктуаций последовали еще два более интенсивных всплеска (до 200 о. е.).

Наибольший уровень флуктуаций магнитометрических сигналов (в среднем до 600 о. е.) наблюдался в интервале времени $08:00 \div 13:30$. Это событие естественно рассматривать как пик магнитной бури. Максимальные значения сигналов $H(t)$ и $D(t)$ составили 1500 и 750 о. е. Продолжительность всплесков не превышала 1 мин. Почти в это же время наблюдались геомагнитные пульсации с периодами $T \approx 1$ мин и амплитудами около 10 нТл. Пульсации с близкими параметрами регистрировались с $09:10$ до $12:40$.

Восстановительная фаза. Эта фаза началась около 10:00 22 октября и продолжалась

по крайней мере до середины суток 25 октября. Далее 27 и 28 октября в дневное время индекс K_p достигал $4 \div 5$, а амплитуды магнитометрических сигналов приближались к $100 \div 150$ о. е. (эпизодически до 200 о. е.).

Как уже отмечено, пик МБ продолжался до 13:30, т. е. захватил начало восстановительной фазы. Как видно из табл. 2, 22 октября наблюдались еще три периода магнитной активности – около 16:00, 19:00 и 22:00. Уровень магнитометрических сигналов в среднем достигал значений $50 \div 200$ о. е. Продолжительность каждого события – около 30 мин. Возможно, наблюдалось проявление одного и того же процесса с периодом около 3 часов.

Интересным является длительное увеличение уровней магнитометрических сигналов, которое наблюдалось примерно с 6:00 до 18:00 23 октября. Эти уровни были в среднем в $2 \div 3$ раза меньше уровней в пике МБ и в $10 \div 20$ раз превышали невозмущенный уровень (см. рис. 2).

Спектральный состав флуктуаций. БПФ осуществлялось на интервале времени 8192 с, вычислялись амплитуды гармоник с периодами от 13.6 до 8192 с (номера гармоник $600 \div 1$ соответственно). Результаты спектрального анализа показаны на рис. 5. Из рисунка видно, что солнечная и магнитная активности существенно влияют на спектральный состав флуктуаций уровня сигнала. Отчетливо наблюдается отклик геомагнитного поля на солнечную вспышку 20 октября, хорошо просматривается внезапное начало магнитной бури, ее основная и восстановительные фазы. Во время МБ в спектре флуктуаций уровня сигналов $H(t)$, $D(t)$ возрастают амплитуды целого ряда гармоник, которые до МБ были на уровне шумов. При этом обогащается спектр флуктуаций. В интервале времени 09:00 \div 13:00 периоды преобладающих колебаний составили $\sim 40 \div 160$ с. В окрестности этой фазы (около 10:00) наибольшую амплитуду имели колебания с $T \geq 250$ с. БПФ позволило также выявить периоды $40 \div 50$ мин, которые наблюдаются на зависимостях $\sigma_H(t)$ и $\sigma_D(t)$ (см. рис. 1).

В отличие от спектрального анализа вейвлет-анализ обладает высокой разрешающей

способностью и по времени, и по частоте. Результаты анализа приведены на рис. 6. Видна четкая реакция сигнала на солнечную вспышку, на начало магнитной бури и ее другие фазы. Например, солнечной вспышке соответствовал рост в $4 \div 6$ раз уровня флуктуаций с периодами $120 \div 420$ с, продолжавшийся с 10:10 до 10:20, и в $1.5 \div 2$ раза – с периодами $20 \div 80$ с, продолжавшийся около 50 мин. Внезапное начало МБ имело место с 05:25 до 05:30, при этом значительно возрос уровень флуктуаций в диапазоне периодов $70 \div 320$ с. Пик МБ наблюдался в интервале времени 09:40 \div 09:50, наибольшую амплитуду имели флуктуации с периодами не менее 340 с. Восстановительная фаза бури также сопровождалась кратковременными ($\sim 10 \div 15$ мин) и эпизодически появляющимися мощными всплесками флуктуаций геомагнитного поля как в диапазонах периодов $20 \div 80$ с так и $100 \div 400$ с (см. рис. 6).

Обсуждение

При помощи высокочувствительного магнитометра-флюксметра с высоким разрешением по времени выполнены наблюдения за самой сильной магнитной бурей 1999 года и предшествовавшими ей событиями.

Солнечная вспышка. Рентгеновская и оптическая вспышка класса M1/1F вызвала увеличение (в $5 \div 6$ раз, а в среднем в 1.5 раза) амплитуд магнитометрических сигналов $H(t)$ и $D(t)$ общей продолжительностью около 50 мин. Длительность наибольших по амплитуде всплесков составляла примерно 10 с. Характерные периоды преобладающих колебаний – $20 \div 40$ с. Эти периоды близки к периодам собственных колебаний силовых линий для оболочки с параметром $L \approx 2$ [11]. Усиление колебаний именно с такими периодами свойственно и другим солнечным вспышкам (см., например, [12]).

Солнечные вспышки, сопровождаемые ростом интенсивности ультрафиолетового и рентгеновского излучений, приводят к значительным возмущениям ΔN концентрации электронов N в ионосфере, заметному нагреву ат-

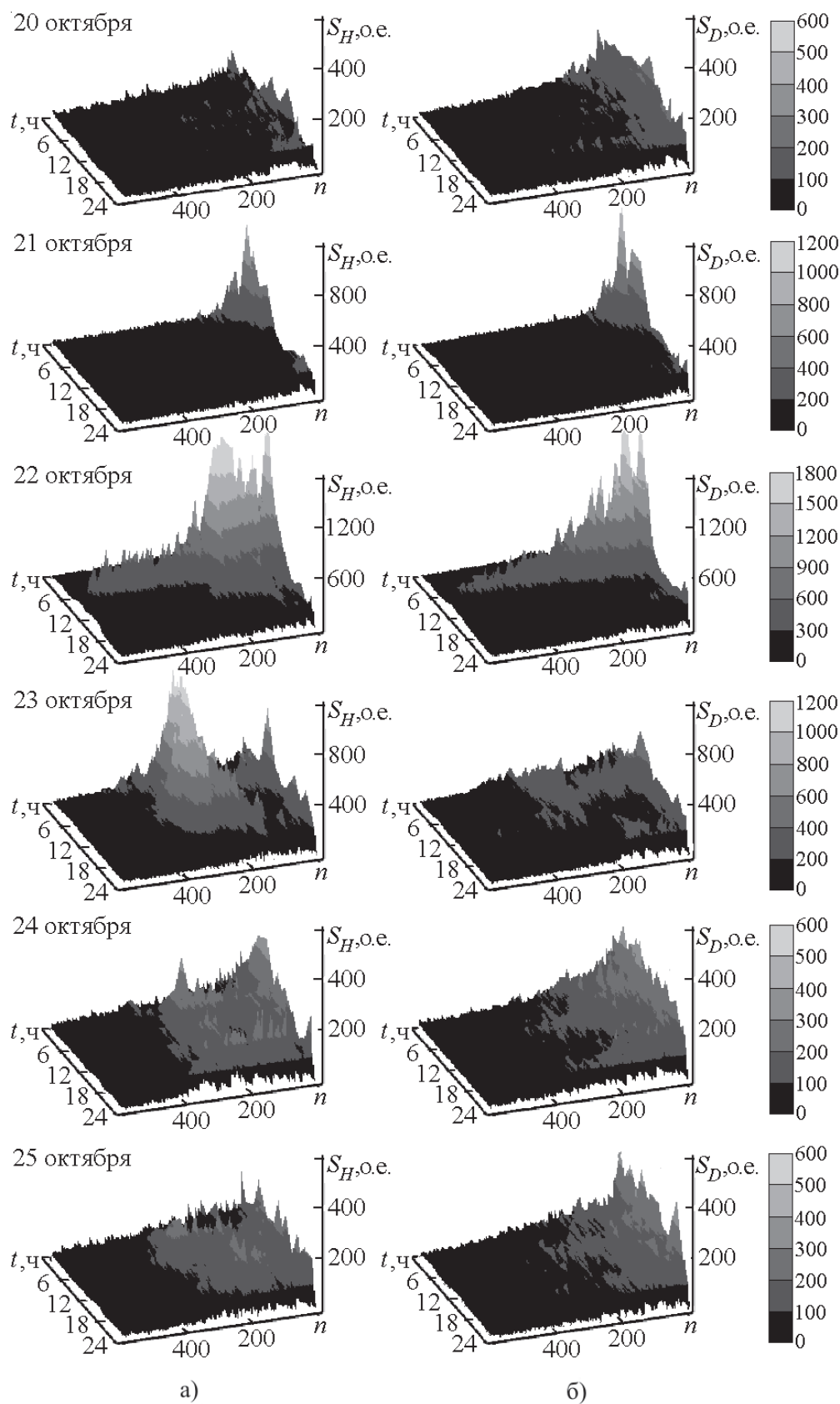


Рис. 5. Спектры S_H и S_D магнитометрических сигналов $H(t)$ (а) и $D(t)$ (б). Здесь n – номер гармоники

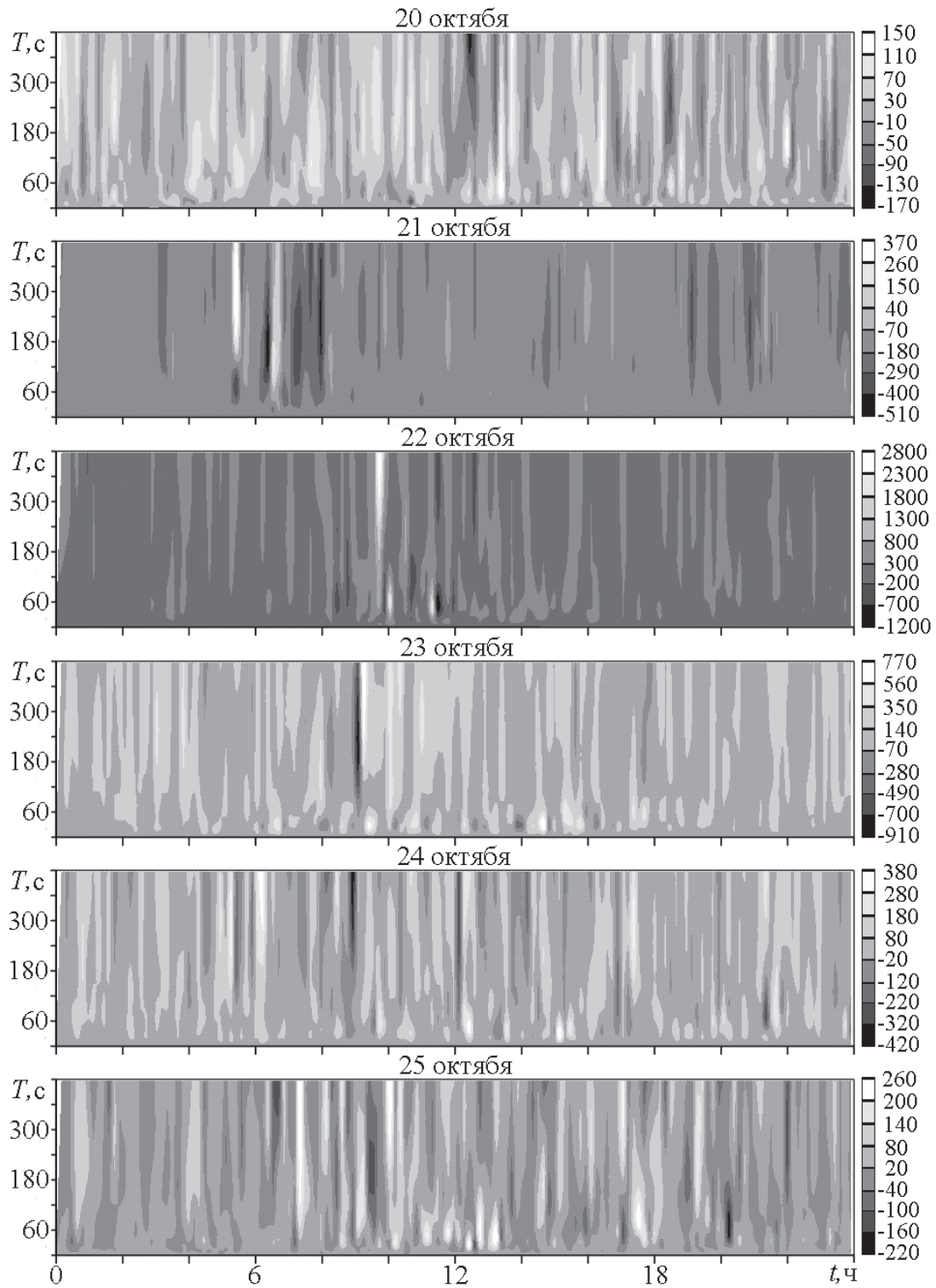


Рис. 6. Периоды флуктуаций компоненты геомагнитного поля $H(t)$, полученные с помощью вейвлет-анализа

мосферного газа. Эти возмущения неоднородны по высоте, что обуславливает движение газа, а вместе с ним и плазмы. Как показано ниже, рентгеновская вспышка с плотностью потока мощности $\Pi \approx 1.7 \cdot 10^{-5}$ Вт/м² приводит к увеличению N примерно на $1 \div 10$ % в E -области ионосферы. В результате этого в слое толщиной L_N на высотах динамо-области генерируются возмущения магнитного поля с амплитудой

$$\delta B \approx \frac{\Delta N}{N} \mu_0 j L_N,$$

где μ_0 – магнитная постоянная, j – плотность ионосферного тока в динамо-области. В дневное время в среднеширотной E -области ионосферы при $N \approx 3 \cdot 10^{10}$ м⁻³ и скорости ветра 100 м/с имеем $j \approx 4.8 \cdot 10^{-7}$ А/м².

Выполним оценки $\Delta N/N$ и δB . Для этого учтем, что основная часть энергии вспышки содержится в излучении с длиной волны $\lambda = 1 \div 10$ нм [13-15].

Максимальное изменение скорости ионизации рентгеновским и ультрафиолетовым излучениями в узком интервале длин волн λ при не слишком больших зенитных углах χ ($< 75 \div 80^\circ$), имеющее место на высоте z_0 , можно оценить по формуле

$$\Delta q(z_0) = \frac{\Pi e^{-1}}{E_{ph}} N_n(z_0) \sigma_i = \frac{\Pi e^{-1}}{E_{ph} H_a} \cos \chi,$$

где σ_i – сечение ионизации, N_n – концентрация нейтралов, E_{ph} – энергия фотона, $H_a \approx 10$ км – приведенная высота нейтральной атмосферы, Π – изменение плотности потока мощности излучения Солнца при вспышке, e – основание натурального логарифма.

Зная Δq , можно вычислить

$$\frac{\Delta N}{N} = \sqrt{1 + \frac{\Delta q}{q}} - 1,$$

где $q = \alpha N^2$ – скорость ионизации в невозмущенных условиях, $\alpha = 2 \cdot 10^{-13}$ м³·с⁻¹ – коэф-

Таблица 3. Параметры ионизирующего излучения и ионизации

λ , нм	0.1 ÷ 0.8	0.8 ÷ 2	2 ÷ 10
E_{ph} , Дж	$5 \cdot 10^{-16}$	$2 \cdot 10^{-16}$	$7 \cdot 10^{-17}$
Π , Вт/м ²	$1.7 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
σ_i , м ²	$7 \cdot 10^{-24}$	$7 \cdot 10^{-23}$	10^{-22}
$N_n(z_0)$, м ⁻³	10^{19}	10^{18}	10^{17}
z_0 , км	100	115	120
Δq , м ⁻³ ·с ⁻¹	10^6	$8 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^7$
q , м ⁻³ ·с ⁻¹	$5 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^8$
N , м ⁻³	$5 \cdot 10^{10}$	$4 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{10}$
$\Delta N/N$, %	0.1	1.3	16

фициент рекомбинации электронов с молекулярными ионами.

Результаты оценок $\Delta N/N$ для различных диапазонов λ приведены в табл. 3. (Считалось, что $\chi = 45^\circ$.) Из нее видно, что на высотах динамо-области $\Delta N/N \approx 1 \div 16$ %. Добавим, что на высоте z_0 , где $\sigma N_n(z_0) H_a / \cos \chi = 1$, плотность потока мощности возмущенного вспышкой солнечного излучения уменьшается в e раз, и поэтому ниже высоты z_0 возмущение ΔN существенно меньше. При средней по высоте величине $\Delta N/N \approx 8$ %, $L_N \approx 10$ км имеем $\delta B \approx 0.5$ нТл. Наблюдаемые значения амплитуд составляли $\Delta H \approx \Delta D \approx 0.3$ нТл при $T \approx 20 \div 40$ с. При этом, вариации горизонтальной компоненты вектора \vec{B} примерно равны 0.4 нТл, что близко к оцененному значению. Наибольшим кратковременным всплескам магнитометрических сигналов длительностью около 10 с соответствовали значения $\Delta H \approx 1.5$ нТл и $\Delta D \approx 3$ нТл. Они, по-видимому, связаны с прохождением МГД-волн, а также с флуктуациями интенсивности солнечного излучения.

Таким образом, оцененные выше и наблюдаемые средние значения амплитуд магнитометрических сигналов неплохо согласуются между собой.

На высотах динамо-области время нарастания N составляет примерно несколько минут. Учитывая, что электромагнитное излу-

чение Солнца распространяется к Земле около 8 минут, первой реакции на вспышку следует ожидать не раньше, чем через 9 ÷ 11 мин, т. е. в 09:56 ÷ 09:58. Практически в этом же интервале времени изменился характер магнитометрических сигналов.

Наибольшие вариации сигналов имели место в 10:05, т. е. через 12 мин после момента наблюдения максимальной интенсивности вспышки. После вычета из этого запаздывания времени распространения излучения вспышки получим задержку около 4 мин. По-видимому, ей соответствует время становления t_N электронной концентрации на высоте E-области. Действительно, при $\alpha \sim 10^{-13} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ и $N = 4 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ имеем $t_N = (\alpha N)^{-1} \approx 250 \text{ с} \approx 4 \text{ мин}$.

Полученные результаты в целом соответствуют данным работ [16-18].

Внезапное начало бури. Эта фаза магнитной бури наблюдалась через 47 мин после прихода ударного фронта возмущенного солнечного ветра к ИСЗ "АСЕ". С учетом расстояния между этим спутником и Землей, равным 1.5 млн км, скорость распространения возмущения к магнитосфере составила около 530 км/с. Измеренная на спутнике скорость солнечного ветра была равна приблизительно 430 км/с. Эти значения достаточно близки.

Благодаря магнитометру с высоким временным разрешением удалось проследить тонкую структуру начала бури. Реакция началась с внезапно возникших затухающих колебаний с 2 ÷ 3 периодами. Их амплитуды составили $\Delta H \approx \Delta D \approx 6 \div 12 \text{ нТл}$, а квазипериод – около 100 с. Такие колебания генерируются при ударном возбуждении системы с малой добротностью. Сигналы подобного рода относятся к сверхширокополосным (см., например, [10]). Коэффициент широкополосности составляет 1 ÷ 1.3 (максимально возможное значение – 2). По-видимому, указанные затухающие колебания имели магнитосферное происхождение. Им на смену пришел квазипериодический слабо затухающий процесс, который длился око-

ло 1 ч. Пульсации такого рода, скорее всего, генерируются в солнечном ветре.

Следующие две группы сильных флуктуаций магнитометрического сигнала наблюдались в интервалах времени 06:20 ÷ 06:40 и 07:35 ÷ 08:00. После этого начальная фаза бури продолжалась еще 19 часов.

Основная и восстановительная фазы. В период этих фаз D_{st} -индекс сначала быстро (в течение 6 ч) уменьшался, затем медленно увеличивался. Эти изменения были близки к монотонным. В отличие от них флуктуации геомагнитного поля в диапазоне периодов 1 ÷ 1000 с усиливались в определенных интервалах времени (см. табл. 2). Обычно это наблюдалось при резких изменениях индекса D_{st} , т. е. при увеличении или уменьшении притока энергии в магнитосферу.

Пик магнитной бури имел место в интервале времени 08:00 ÷ 13:30. При этом $D_{st} \leq -160 \text{ нТл}$. Самый большой уровень флуктуаций магнитометрических сигналов $H(t)$ и $D(t)$ достиг 1500 и 750 о. е. Он наблюдался примерно в 10:00, т. е. практически совпал по времени с регистрацией минимального значения D_{st} -индекса.

В течение МБ в целом сигналы $H(t)$ и $D(t)$ были близки к случайным со спектром периодов от 20 ÷ 40 с до 7 ÷ 15 мин (см. рис. 2). В течение 22 октября эпизодически возникали цуги колебаний. Их квазипериод появления был около 1 ч. Четко наблюдались отдельные пульсации с периодами 45 ÷ 55 с и средней продолжительностью около 5 ÷ 7 мин. Их амплитуда достигала 10 нТл (типичная амплитуда пульсаций – около 1 нТл [11, 19]).

Из рис. 1 и 2 видно, что наблюдался уверенный отклик флуктуаций магнитометрических сигналов на процессы, зарегистрированные на ИСЗ в моменты времени t_1 , t_2 и t_3 . Этого нельзя сказать об эффекте увеличения уровня флуктуаций сигналов (и особенно $H(t)$), который наблюдался 23 октября. Он имел другое, явно земное, происхождение, так как приборы на ИСЗ никаких заметных вариаций не зафиксировали. Природу этого эффекта предстоит еще выяснить.

Выводы

Выполнены магнитометрические наблюдения самой большой геомагнитной бури 1999 г. и предшествующей ей солнечной вспышки.

1. Обнаружен отклик геомагнитного поля на солнечную вспышку класса M1/1F. Запаздывание и общая продолжительность отклика составили около 9 и 45 мин соответственно. Амплитуды магнитометрических сигналов $H(t)$ и $D(t)$ при этом заметно увеличились (в среднем в 1.5 раза) и достигли пиковых значений $1.5 \div 3$ нТл.

2. Обнаружено внезапное начало магнитной бури, которое имело место 21 октября в 05:25. Наблюдалась группа, состоящая из трех всплесков, общей продолжительностью около 2 часов. Амплитуды всплесков превышали фоновое значение в среднем в 10 раз и достигали $6 \div 12$ нТл.

3. 22 октября с 02:40 до 22:00 эпизодически наблюдалось значительное (в $5 \div 60$ раз) увеличение уровней магнитометрических сигналов. Основная фаза магнитной бури имела место 22 октября в интервале времени 04:00 \div 10:00. Амплитуды магнитометрических сигналов при этом выросли от 10 до 300 \div 600 о. е. Возмущения меньшей интенсивности отмечались, по крайней мере, до 25 октября.

4. Спектральное оценивание позволило выявить факт существенного обогащения спектра магнитометрических сигналов во время магнитной бури. Определены периоды преобладающих колебаний.

5. При помощи вейвлет-анализа с высокой частотно-временной локализацией выявлены процессы, связанные с изменениями состояния космической погоды (солнечной вспышкой, началом и развитием магнитной бури и т. п.).

Авторы благодарны С. Г. Леусу и С. Н. Похилько за помощь в проведении наблюдений, О. В. Лазоренко за помощь при выполнении вейвлет-анализа данных.

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

Литература

1. W. D. Gonzalez, J. A. Joselyn, Y. Kamide, H. W. Kroehl, G. Rostoker, B. T. Tsurutani, V. M. Vasylunas. *J. Geophys. Res.* 1994, **99**, No. A4, pp. 5771-5792.
2. B. T. Tsurutani, W. D. Gonzalez, Y. Kamide, J. K. Arballo (eds.). *Magnetic Storms. Geophysical Monograph 98. American Geophysical Union. Washington, D. G., 1997.*
3. M. J. Bounsanito. *Ionospheric Storm. A Review. Space Science Reviews.* 1999, **88**, pp. 563-601.
4. C. A. Loewe, G. W. Prolle. *J. Geophys. Res.* 1997, **102**, No. A7, pp. 14209-14221.
5. К. Г. Иванов. *Геомагнетизм и аэрономия.* 2001, **41**, №4, с. 435-443.
6. V. N. Obridko, B. D. Shelting. *Solar Phys.* 1989, **124**, No. 1, pp. 73-81.
7. К. П. Гармаш, С. Г. Леус, С. А. Пазюра, С. Н. Похилько, Л. Ф. Черногор. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2003, **8**, №2, с. 163-180.
8. *The Transforms and Applications Handbook. Editor-in-Chief A. Poularikas. USA, CRC Press, 1996, 1103 p.*
9. Н. М. Астафьева. *УФН.* 1996, **166**, №11, с. 1145-1170.
10. О. В. Лазоренко, С. В. Лазоренко, Л. Ф. Черногор. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2002, **7**, №1, с. 46-63.
11. А. Нишида. *Геомагнитный диагноз магнитосферы. Москва, Мир, 1980, 304 с.*
12. X. Перес, Б. Лазо, Н. Г. Клейменова, О. В. Козырева. *Геомагнетизм и аэрономия.* 1989, **29**, №1, с. 133-135.
13. А. Митра. *Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. Москва, Мир, 1977, 372 с.*
14. С. И. Акасофу, С. Чепмен. *Солнечно-земная физика. Москва, Мир, 1975, т. 2, 512 с.*
15. Е. В. Метелкин, В. М. Сорокин, Г. В. Федорович. *Геомагнетизм и аэрономия.* 1982, **22**, №5, с. 803-808.
16. В. И. Луковникова, В. А. Пархомов. *Геомагнетизм и аэрономия.* 1983, **23**, №6, с. 992-996.
17. Ю. В. Гутоп, В. М. Сорокин, А. К. Ященко. *Геомагнетизм и аэрономия.* 1993, **33**, №4, с. 79-85.

18. Б. В. Довбня, В. А. Пархомов, Р. А. Рахматулин. Геомагнетизм и аэрономия. 1995, **35**, №3, с. 146-150.
19. Я. И. Лихтер, А. В. Гульельми, Л. М. Ерухимов, Г. А. Михайлова. Волновая диагностика приземной плазмы. Москва, Наука, 1988, 216 с.

Earth's Magnetic Field Fluctuations During the Severe 1999 Geospace Storm

**K. P. Garmash, O. V. Lazorenko,
S. A. Pazura, L. F. Chernogor**

Using the high-sensitivity fluxmeter magnetometer located in Kharkiv V. Karazin National University Radiophysical Observatory the unique magnetic storm and the preceding solar flare effects were observed with high temporal resolution. During the storm, the magnetometer signals were increased by a factor of up to 50÷60 times, and a significant enrichment in their spectra was observed. The data processing was performed by applying statistical, spectral, and wavelet analyses. The specifics of the geomagnetic field fluctuations are described.