

УДК 550.385.37: 550.388 Л. Ф. ЧЕРНОГОР

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ, СОПУТСТВОВАВШИЕ ДВИЖЕНИЮ СОЛНЕЧНОГО ТЕРМИНАТОРА ЧЕРЕЗ МАГНИТОСОПРЯЖЕННУЮ ОБЛАСТЬ

Проанализированы результаты наблюдений за квазипериодическими вариациями геомагнитного поля вблизи г. Харькова в диапазоне периодов $1 \div 1000$ с, которые сопровождали прохождение магнитосопряженного солнечного терминатора в 2002–2011 гг. Наблюдения проводились для летнего и зимнего сезонов. Обнаружены квазипериодические возмущения геомагнитного поля, которые опережали на $80 \div 100$ мин момент прохождения солнечного терминатора над Харьковом на высоте 100 км. Период этих возмущений составлял $10 \div 12$ мин, длительность – $50 \div 60$ мин и амплитуда – $1 \div 2$ нТл. Обосновано, что возмущения переносятся из магнитосопряженной области при помощи медленных магнитозвуковых волн.

Ключевые слова: солнечный терминатор, магнитосопряженная область, геомагнитные пульсации, статистический анализ, магнитозвуковые волны

1. Введение

В настоящее время существование эффекта генерации солнечным терминатором (СТ) квазипериодических возмущений в атмосфере и ионосфере не вызывает сомнений [1–9].

В работах [10, 11] изучены квазипериодические возмущения геомагнитного поля, сопровождавшие движение СТ. При этом нередко наблюдались квазипериодические возмущения геомагнитного поля, опережавшие прохождение СТ. Основные параметры этих возмущений были близки к параметрам геомагнитных эффектов СТ, описанных в [10, 11]. Было сделано предположение, что эти эффекты могут быть вызваны прохождением СТ через магнитосопряженную область (МСО).

Заметим, что аperiodические эффекты, связанные с МСО, исследуются с 1960-х гг. При этом детально рассматривались потоки заряженных частиц и тепла, переносимые вдоль магнитных силовых линий. Квазипериодические эффекты, имеющие место в магнитной силовой трубке, также изучены достаточно хорошо (см., например, [12]). Значительно хуже изучены квазипериодические процессы в месте наблюдения, вызванные движением магнитосопряженного солнечного терминатора (МСТ).

В работах [13, 14] на основе данных, полученных при помощи глобальной сети GPS, обнаружены перемещающиеся в ионосфере волновые па-

кеты, длительностью $1 \div 2$ ч, проявляющиеся в форме узкополосных колебаний полного электронного содержания. Для серии измерений в летние сезоны были зарегистрированы эффекты, появляющиеся за $1.5 \div 2$ ч до появления СТ над точкой регистрации. Периоды возмущений составляли $10 \div 30$ мин. Авторы объясняют эти возмущения движением МСТ. Они предположили, что возмущения полного электронного содержания переносятся из МСО к месту наблюдения при помощи МГД-волн. Используемый в настоящей работе магнитометрический метод более предпочтителен (как метод, который в ряде случаев непосредственно регистрирует проявления МГД-волн) для регистрации эффектов МГД-волн, чем метод регистрации волновых возмущений полного электронного содержания. Последний метод является косвенным и интегральным и не позволяет прямо изучать МГД-волны. Конечно, регистрируемые на поверхности земли колебания геомагнитного поля не всегда связаны с распространением МГД-волн. Но если эти колебания связаны с МГД-волной, их амплитуда пропорциональна амплитуде волны.

В любом случае магнитометрические измерения эффектов МСТ имеют самостоятельную ценность и могут существенно дополнять ионосферные эффекты МСТ.

Целью настоящей работы является выявление и анализ квазипериодических возмущений, генерируемых прохождением СТ через магнитосоп-

раженную область, по результатам наблюдений флуктуаций геомагнитного поля в диапазоне периодов $1 \div 1000$ с вблизи г. Харькова в характерные геофизические сезоны.

2. Средства и методы

Несерийный высокочувствительный магнитометр-флюксметр, включенный в состав программно-аппаратного комплекса, размещен в обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (с. Граково, Чугуевский район, Харьковская обл.) [15]. Его географические координаты: $49^{\circ}40'$ с. ш., $36^{\circ}50'$ в. д.; геомагнитные координаты: $+53.6^{\circ}$, 127° . Географические координаты МСО: 36.5° ю. ш., 52.2° в. д.; геомагнитные координаты: -43.6° , 128.3° .

Магнитометр-флюксметр измеряет уровень флуктуаций геомагнитного поля. Его чувствительность определяется уровнем шумов, которые составляют $0.5 \div 500$ пТл в диапазоне периодов $T \approx 1 \div 1000$ с. Хорошо известно, что при увеличении T от единиц до 1000 с амплитуда геомагнитных пульсаций увеличивается на несколько порядков.

Амплитудно-частотная характеристика магнитометра-флюксметра имеет вид, показанный на рис. 1. При $T \geq 300$ с она убывает пропорционально T^{-1} . При восстановлении входного сигнала в рабочем диапазоне периодов с учетом амплитудно-частотной характеристики основной вклад в уровень флуктуаций геомагнитного поля дают колебания с $T \approx 300 \div 1000$ с (рис. 2).

Добавим, что, в диапазоне периодов $100 \div 1000$ с отклик магнитометра-флюксметра на геомагнит-

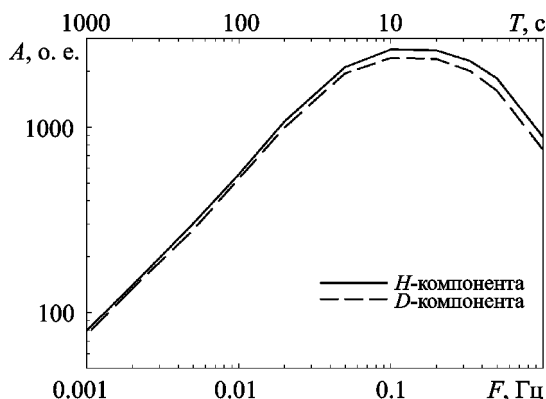


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика магнитометра-флюксметра (отклик прибора на монохроматическое магнитное колебание амплитудой 5 нТл)

ное возмущение примерно в $2 \div 20$ раз слабее, чем на аналогичное возмущение в диапазоне $T \approx 10$ с. Тем не менее этот отклик более чем на порядок превышает шум квантования использованного аналого-цифрового преобразователя и тем более внутренние шумы активных датчиков магнитометра. Детальное описание прибора здесь не приводится во избежание повторений. Ограничимся ссылкой на работы, в которых такое описание уже имеется, [15, 16].

Методики анализа временных вариаций уровня геомагнитных колебаний аналогичны описанным авторами в работах [10, 11].

Для исследований возмущений, вызванных движением МСТ, целесообразно выбрать два характерных сезона: вблизи зимнего и летнего солнцестояний. Анализировались результаты наблюдений в 2002–2011 гг. Для каждого сезона число реализаций достигало 90. Именно в эти сезоны целесообразно наблюдать предполагаемые эффекты, так как момент прохождения МСТ опережает момент прохождения утреннего (зимой) и вечернего (летом) СТ над Харьковом на $4 \div 5$ ч и реакции от МСТ и СТ не накладываются. Определению подлежали времена опережения ожидаемой реакции геомагнитного поля на прохождение МСТ на высоте 100 км, ее продолжительность и спектральный состав возникающих возмущений.

Как показало изучение реакции геомагнитных пульсаций на движение СТ в месте наблюдения, с существенным временным запаздыванием происходило изменение характера магнитометрических сигналов (спектрального состава, амплитуды, квазипериода и начальной фазы колебаний) [11, 12]. Подобные эффекты ожидалось при движении МСТ. При визуальном анализе колебаний геомагнитного поля изменение характера сигнала считалось существенным, если амплитуда или период колебания изменялись не менее чем на $15 \div 20$ %. Вопрос о критериях обнаружения требует дополнительного комментария. В геофизике в отличие от радиолокации, где параметры излучаемого сигнала априори известны, чаще всего приходится выявлять сигнал визуально. Дело в том, что “портрет” ожидаемого сигнала известен лишь приближенно. Его параметры существенно изменяются от события к событию. Применительно к реакции геомагнитного поля на движение МСТ это выглядит так. Из предва-

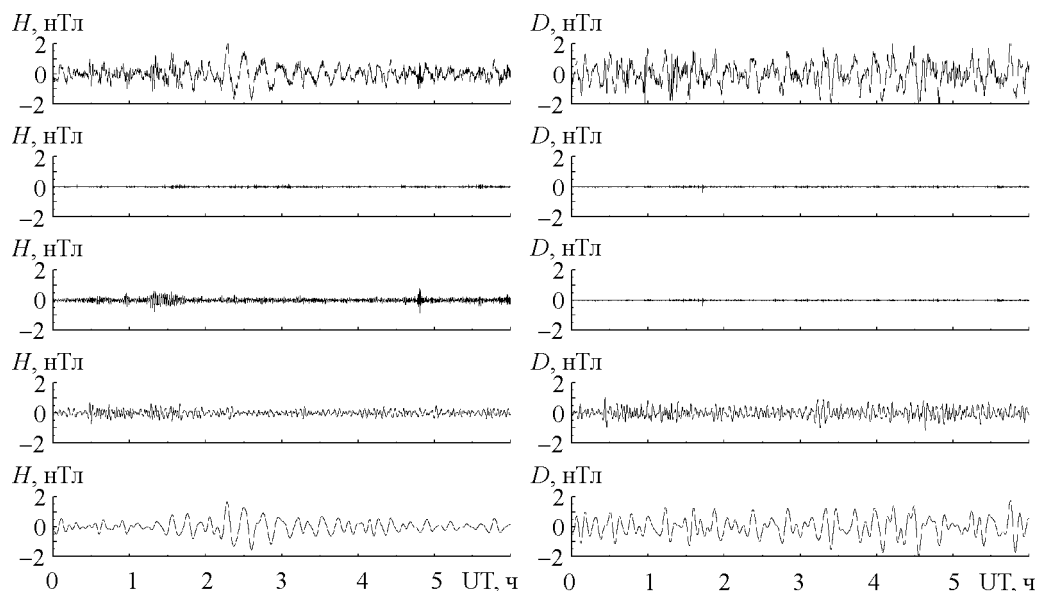


Рис. 2. Пример временных вариаций H - и D -компоненты геомагнитного поля 14 августа 2011 г. в различных диапазонах периодов (панели сверху вниз): $1 \div 1000$ с, $1 \div 20$ с, $20 \div 100$ с, $100 \div 300$ с и $300 \div 1000$ с

рительного анализа достаточно большого массива данных ориентировочно было установлено время появления цуга колебаний с периодом $10 \div 12$ мин длительностью около $50 \div 60$ мин и амплитудой $1 \div 2$ нТл. Выявлению этих ориентировочных параметров отклика и посвящена настоящая работа. Разумеется, что после анализа значительно большего массива данных можно будет уточнить “портрет” отклика и построить его обнаружитель на формальной основе.

Естественно, автор не ограничивался только визуальным анализом. Применялись также спектральный и статистический анализы. О правоте и адекватности визуального анализа (как и его критериев) в конечном итоге свидетельствуют результаты статистического анализа.

При поиске реакции геомагнитных пульсаций на движение МСТ возникает вопрос, от какого момента времени отсчитывать ожидаемую реакцию.

При движении вечернего СТ в месте наблюдения время запаздывания удобно отсчитывать от момента захода Солнца на уровне земли [10, 11]. При движении утреннего СТ в месте наблюдения отсчет от момента восхода Солнца на том же уровне нецелесообразен хотя бы потому, что реакция наступает раньше, чем восход Солнца на уровне земли. Геомагнитные пульсации в диапазоне периодов $300 \div 1000$ с, сопровождающие движение СТ, вызваны модуляцией токовой струи

[10, 12]. Последняя концентрируется на высоте $z \approx 100$ км. Тогда при определении времени запаздывания реакции геомагнитного поля на движение утреннего терминатора целесообразно отсчет времени вести от “симметричной” по отношению к $z \approx 100$ км высоты, равной 200 км.

Исходя из высказанных соображений отсчет времени наступления реакции геомагнитных пульсаций от движения МСТ удобно вести от момента появления реакции геомагнитных пульсаций в месте наблюдения, совпадающего с моментом прохождения СТ через максимум токовой струи. Считалось, что ее центр расположен на высоте 100 км.

Периоды квазипериодических процессов определялись при помощи системного спектрального анализа, включающего в себя оконное преобразование Фурье (ОПФ), адаптивное преобразование Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразование (ВП) на основе вейвлета Морле, детально описанного в работах [9, 17, 18]. Кроме динамических спектров, вычислялись энергограммы, представляющие собой распределение средней энергии колебаний по периодам.

Все три преобразования, как это и должно быть, дают примерно одну и ту же информацию о спектральном составе геомагнитных пульсаций. Однако, как продемонстрировано в [9, 17, 18], ОПФ обладает лучшей разрешающей способностью по

времени, ОПФ – по периодам, ВП позволяет наглядно выявлять волновые пакеты и проследить динамику преобразования колебаний с одними периодами в колебания с другими периодами.

В целом, ОПФ, АПФ и ВП дополняют друг друга.

3. Результаты наблюдений

Для примера рассмотрим два случая прохождения МСТ, в зимний и летний сезоны. Время опережения реакции геомагнитного поля отсчитывается от момента восхода (захода) Солнца на высоте 100 км над уровнем земли в месте расположения обсерватории.

Для примера на рис. 3. приведены временные вариации уровней горизонтальных компонент геомагнитного поля и их спектров, наблюдавшиеся 9 декабря 2006 г. Восход Солнца имел место вблизи г. Харькова на высоте 100 км в 04:07 (здесь и далее используется время UT). Изменения характера сигнала в D -компоненте имели время опережения восхода Солнца на высоте 100 км, примерно равное 90 мин, и продолжительность

50 мин. Как видно из результатов спектрального анализа, преобладающие периоды составляли около 7 и 15 мин. Возмущения в H -компоненте, менее заметные по сравнению с возмущениями в D -компоненте, имели время опережения 80 мин и продолжительность около 45 мин. Периоды составляли 10–13 мин. Эти возмущения проявлялись как изменение периода существовавших до этого момента волновых процессов в геомагнитном поле и увеличение амплитуды в 1.5–2 раза в обеих компонентах сигнала. В этот день для D -компоненты эффекты выражены более ярко.

Временные вариации уровней горизонтальных компонент геомагнитного поля и их спектров, сопровождавшие движение вечернего СТ в летнее время, приведены на рис. 4. Заход Солнца на высоте 100 км над уровнем земли 20 июля 2008 г. наблюдался в 18:58. Эффекты, выраженные в изменении амплитуды и периода продолжительностью около 60 мин, наблюдались со временем опережения 85 мин в D -компоненте. В H -компоненте имело место возмущение со временем опережения 90 мин и продолительно-

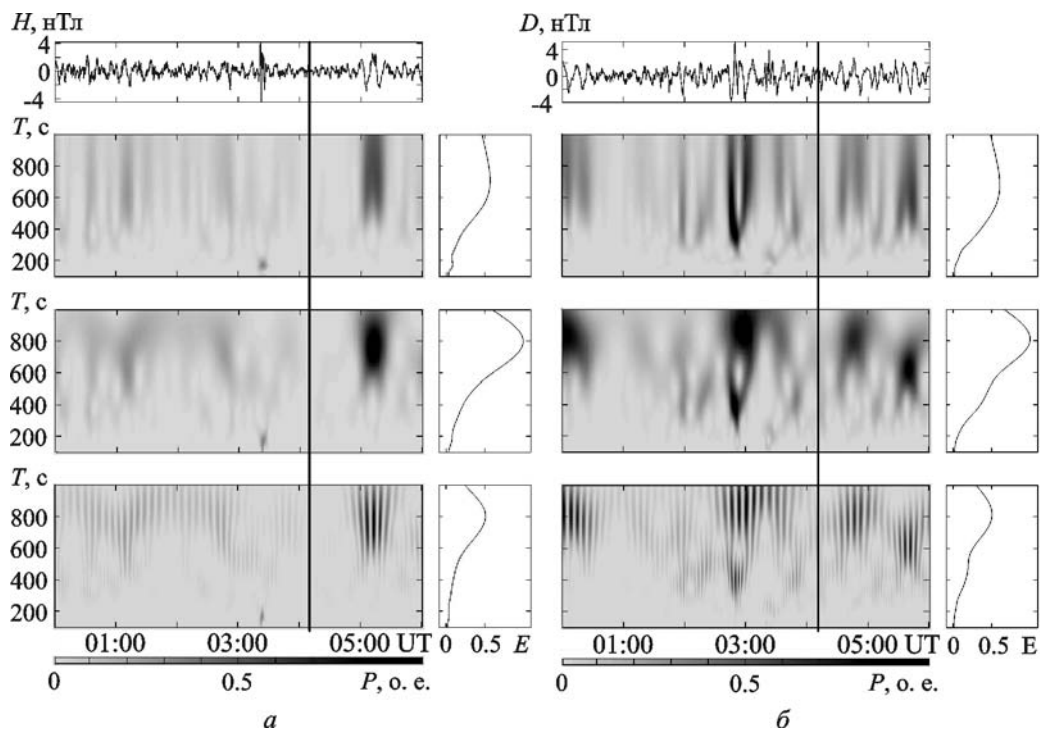


Рис. 3. Временные вариации H - и D -компоненты (панели a и b соответственно) геомагнитного поля, результаты ОПФ, АПФ, ВП и энергограммы (справа) в диапазоне периодов 100–1000 с, сопровождавшие прохождение солнечного терминатора через магнитосопреженную область 9 декабря 2006 г. Сплошной вертикальной линией показан момент восхода Солнца на высоте 100 км вблизи г. Харькова

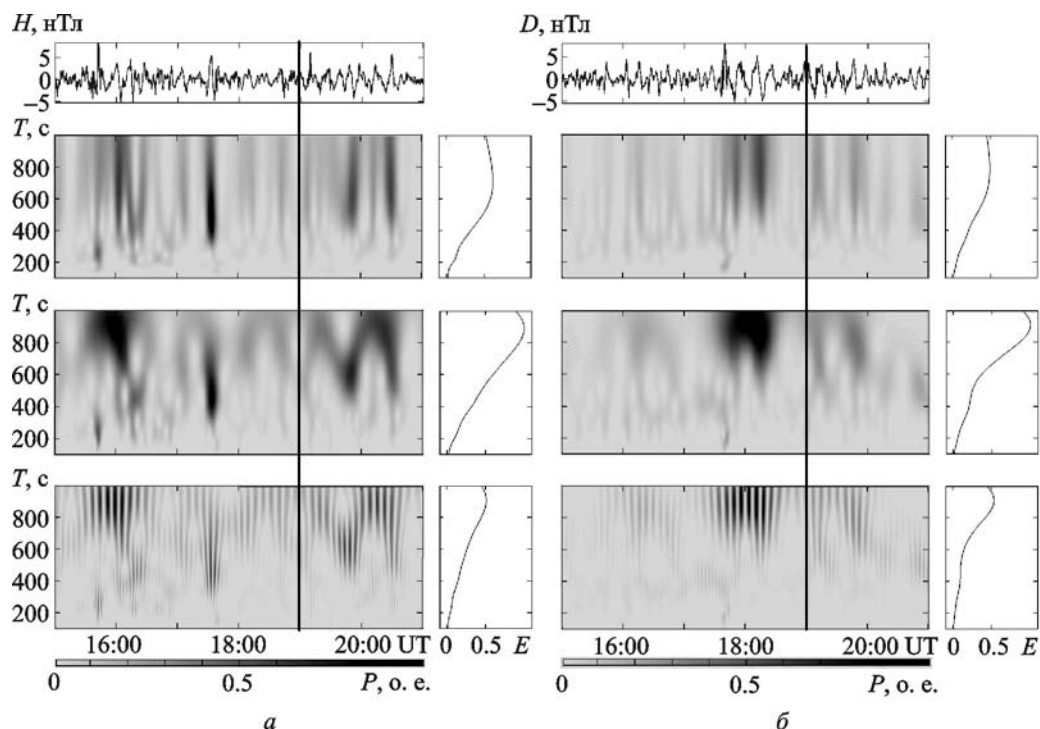


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, для 20 июля 2008 г. Сплошной вертикальной линией показан момент захода Солнца на высоте 100 км вблизи г. Харькова

стью 40 мин. Преобладающие периоды составляли $7 \div 9$ и $13 \div 15$ мин для H - и D -компоненты сигнала соответственно. Более четко возмущения регистрировались в D -компоненте.

Визуальный анализ изменения характера вариаций геомагнитного поля для отдельных суток не дает полной уверенности в том, что эти вариации вызваны движением МСТ. Большую уверенность дает статистический анализ.

4. Результаты статистического анализа

Для статистического анализа выбирались сутки, отстоящие от дней солнцестояний не более чем на ± 15 суток.

Статистическому анализу подлежали основные параметры ожидаемой реакции геомагнитного поля (времена опережения, продолжительности и периоды) на прохождение солнечного терминатора на высоте 100 км для летнего и зимнего сезонов.

Ненормированные гистограммы (далее, для краткости, гистограммы) времен опережения реакции геомагнитного поля на прохождения утреннего и вечернего СТ приведены на рис. 5, а. Из рисунка видно, что в летний сезон СТ сопут-

ствовали возмущения с временами опережения $80 \div 100$ мин относительно момента захода Солнца на высоте 100 км. В зимний сезон времена опережения составляли $70 \div 100$ мин относительно момента восхода Солнца на высоте 100 км. Для сравнения на рис. 5, б приведены аналогичные гистограммы для контрольных интервалов времени. Выделение подобных эффектов проводилось относительно полдня и полночи (по местному времени) соответствующих суток. Обработка также выполнена для 2002–2011 гг. Число выборок показано на гистограммах.

Анализируя рисунки, можно сделать вывод, что экспериментальный закон распределения значений времен опережения появления геомагнитных пульсаций в рассматриваемые интервалы времени существенно отличается от равномерного закона распределения. Для количественной характеристики этих отличий применялся критерий Пирсона χ^2 , имеющий вид (см., например, [19]):

$$\chi^2 = N_n \sum_{i=0}^m \frac{(\mu_i - p)^2}{p},$$

где μ_i – частота попадания значения времен опережения в i -й интервал в “возмущенные” и контроль-

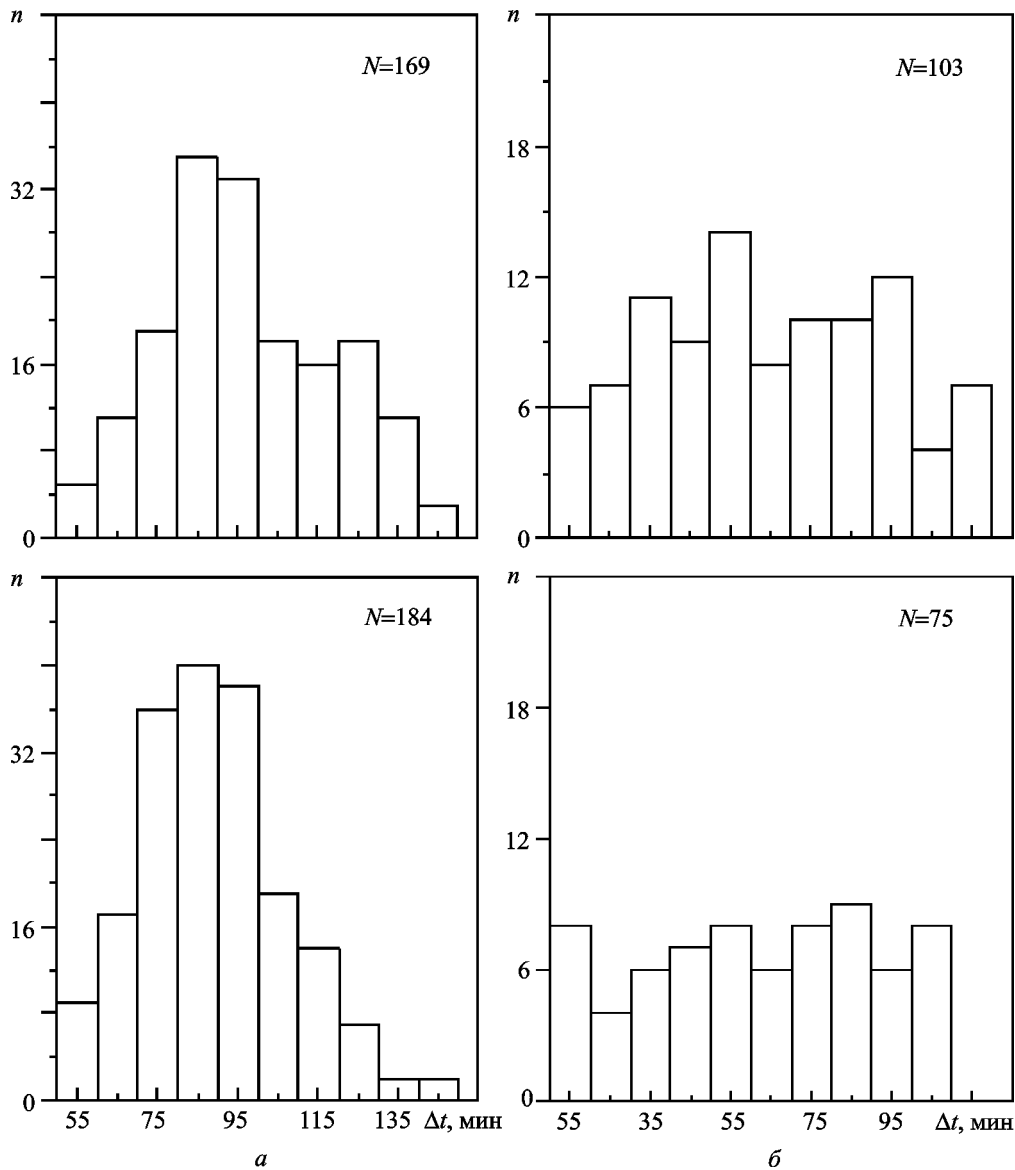


Рис. 5. Гистограммы времен опережения (Δt) появления волновых возмущений по отношению к моменту времени прохождения СТ на высоте 100 км (а) и для контрольных интервалов времени (б)

ные интервалы времени, m – количество рассматриваемых интервалов, N_n – общее число событий проверяемого закона, $p = 1/(\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min})$ – плотность вероятности для равномерного закона, Δt_{\min} и Δt_{\max} – соответственно минимальное и максимальное значения анализируемых времен опережения.

Расчеты показали, что для обоих сезонов значения χ^2 были достаточно большими, чтобы с необходимой степенью вероятности (95 %) утверждать, что имеет место существенное отличие экспериментальных законов распределения для интервалов времени, предшествующих про-

хождению СТ, от равномерного закона распределения (табл. 1).

Для подтверждения предположения о справедливости равномерного закона распределения в контрольные интервалы времени проверялась гипотеза о соответствии экспериментального закона распределения в эти интервалы времени равномерному закону распределения. Как видно из табл. 1, значения χ^2 попадают в интервал $\chi^2 < \chi_{0.95}^2$. Следовательно, гипотеза о равномерном распределении в контрольные интервалы времени для зимнего и летнего СТ принимается. Это значит, что отсутствует какая-либо законо-

Таблица 1. Результаты расчетов критерия χ^2 для гипотезы 1 (законы распределения времен опережения в “возмущенные” интервалы времени не отличаются от равномерного закона распределения) и гипотезы 2 (в контрольные интервалы времени имеет место равномерный закон распределения)

Гипотеза 1					Гипотеза 2				
Сезон	<i>N</i>	$\chi^2_{\text{экс}}$	$\chi^2_{0.95}$	$\chi^2_{0.99}$	Сезон	<i>N</i>	$\chi^2_{\text{экс}}$	$\chi^2_{0.95}$	$\chi^2_{0.99}$
Зима	184	105.9	16.9	21.7	Зима	75	2.9	16.9	21.7
Лето	169	59.1	16.9	21.7	Лето	103	9.3	18.3	23.2

мерность во временах опережения волновых возмущений в контрольные интервалы времени.

Результаты статистической обработки массивов значений времен опережения, продолжительностей и периодов колебаний для различных сезонов, а также оценка среднеквадратических отклонений параметров возмущений приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что средние продолжительности эффектов составляли около 55 мин. Периоды возмущений изменялись в пределах от 10 до 12 мин. Средние времена опережения равнялись (89 ± 2) мин и (97 ± 2) мин для зимнего и летнего сезонов соответственно. Им соответствовали времена запаздывания реакции по отношению к прохождению МСТ, равные $140 \div 170$ мин и $200 \div 220$ мин для зимнего и летнего сезонов соответственно. При этом учитывалось опережение момента прохождения МСТ относительно момента прохождения СТ.

Добавим, что амплитуды возмущений как в летний, так и в зимний сезоны составляли $1 \div 2$ нТл.

5. Обсуждение

Проведены наблюдения за вариациями уровня геомагнитного поля, сопровождавшие прохождение СТ через магнитосопряженную область в характерные сезоны. Замечено, что в большинстве случаев (80 %) визуально наблюдались заметные изменения характера сигналов, которые обычно регистрировались как изменение периода вре-

менных вариаций горизонтальных компонент геомагнитного поля и увеличение (в ряде случаев подавление) уровня существующих волновых процессов в $1.5 \div 2$ раза. В остальных 20 % случаев визуальный анализ не позволял говорить ни о наличии реакции геомагнитного поля на движение МСТ, ни о ее отсутствии.

Для оценки основных параметров волновых возмущений применялся системный спектральный анализ. Оценены такие статистические характеристики, как времена опережения, продолжительность и преобладающие периоды реакции геомагнитного поля на прохождение СТ в магнитосопряженной области. Реакция представляла собой квазипериодический волновой процесс с преобладающими периодами примерно $10 \div 12$ мин, длительностью около $50 \div 60$ мин и амплитудой $1 \div 2$ нТл.

Для подтверждения наличия эффектов МСТ и получения статистических оценок основных параметров волновых процессов был проведен статистический анализ полученного массива данных. Была проведена также аналогичная обработка для контрольных интервалов времени (“невозмущенных” МСТ). Оказалось, что экспериментальный закон распределения значений времен опережения появления волновых возмущений в анализируемые интервалы времени существенно отличается от аналогичного закона для контрольных интервалов времени. Последний близок к равномерному закону распределения.

Наблюдаемые эффекты имели время запаздывания $200 \div 220$ мин по отношению к моменту прохождения СТ через МСО в летнее время и $140 \div 170$ мин в зимнее.

Далее оценим характерную скорость переноса возмущений. Длина магнитной силовой трубки *S* для Харькова оценивается в 22000 км. Зная длину этой трубки и время запаздывания возмущений Δt в месте наблюдения по отношению

Таблица 2. Статистические характеристики основных параметров возмущений, сопутствовавших СТ

Сезон	Время опережения, мин	Продолжительность, мин	Период, мин
Зима	88.9 ± 2.0	57.7 ± 3.6	11.3 ± 0.4
Лето	97.2 ± 1.8	55.2 ± 2.3	10.4 ± 0.2

к моменту прохождения МСТ на высоте 100 км, можно оценить среднюю скорость v переноса возмущений из МСО. Для летнего времени средняя скорость переноса возмущений $v = 1.7 \div 1.8$ км/с, для зимнего $v = 2.2 \div 2.6$ км/с.

Возникает вопрос, каким образом возмущения переносятся из МСО. Скорее всего, они переносятся вдоль магнитной силовой линии при помощи волн с периодом $7 \div 15$ мин. Такой период и близкую к вычисленной скорость ($1.7 \div 2.6$ км/с) имеют медленные магнитозвуковые волны в не-изотермической плазме. Их скорость дается хорошо известным соотношением (см., например, [20]):

$$v_s = \sqrt{\frac{k(T_e + T_i)}{M_i}},$$

где T_e и T_i – температуры электронов и ионов, M_i – масса иона, k – постоянная Больцмана. На уровне нижней границы ионосферы ($z \approx 100$ км), где $T_e \approx T_i \approx 300$ К и $M_i \approx 4.9 \cdot 10^{-26}$ кг, скорость $v_s \approx 0.4$ км/с. При увеличении T_e и T_i , а также при уменьшении M_i скорость v_s постепенно увеличивается и достигает наибольшего значения в вершине силовой трубки, которая находится на высоте около 6 тыс. км над поверхностью земли. Здесь $T_e \approx 6000 \div 7000$ К, $T_i \approx 4000 \div 5000$ К, $M_i \approx 1.7 \cdot 10^{-27}$ кг, а $v_{s, \max} \approx 9.1 \div 9.9$ км/с. Поэтому среднее арифметическое вдоль силовой трубки значение \bar{v}_s составляет около 5 км/с. Заметим, что оцененная в работе [21] скорость составляла около 6 км/с.

Необходимо иметь в виду, что при $T_e/T_i \approx 1.5$ медленные магнитозвуковые волны заметно затухают.

Если момент запаздывания возмущений отсчитывать не от момента прохождения МСТ на высоте 100 км, а от момента его прохождения на высоте 400 км (где, как известно, становятся определяющими процессы переноса вдоль магнитной силовой линии), времена запаздывания для вечернего терминатора уменьшаются примерно на 60 мин, а для утреннего терминатора увеличиваются на столько же. При этом времена запаздывания составят $140 \div 160$ мин и $200 \div 230$ мин для вечернего и утреннего терминаторов соответственно. Тогда средние скорости переноса возмущений при $S \approx 22000$ км составят $2.3 \div 2.6$ и $1.6 \div 1.8$ км/с. Эти оценки скорости также близки к полученным выше.

Оцененная автором из экспериментов скорость v оказалась несколько ниже \bar{v}_s . Это может быть связано с тем, что для генерации медленной магнитозвуковой волны требуется определенное время развития. Кроме того, среднее арифметическое значение скорости не лучшим образом описывает время запаздывания цуга волн.

При помощи магнитометра лучше всего наблюдались колебания с периодами $10 \div 12$ мин. Колебания с $T \approx 5 \div 7$ мин регистрировались менее уверенно. Укажем, что примерно такие же периоды наблюдались и авторами [13]. В этой работе относительная амплитуда возмущений концентрации электронов $\delta N/N_0$ (точнее, полного электронного содержания) составляла около 10^{-3} . Учитывая, что в МГД-волне

$$\delta B/B_0 \approx \delta N/N_0,$$

следовало ожидать, что относительные возмущения геомагнитного поля на высотах ионосферы в волне будут порядка 10^{-3} . При значении индукции геомагнитного поля B_0 в средних широтах на ионосферных высотах, равном $3 \cdot 10^{-5}$ Тл, получим на тех же высотах $\delta B \approx 30$ нТл. За счет трансформации медленной магнитозвуковой волны на границе плазмы при наземных наблюдениях амплитуда колебаний геомагнитного поля в диапазоне периодов $7 \div 15$ мин уменьшается на $1 \div 1.5$ порядка [22]. По этой причине в экспериментах амплитуда этих колебаний не превышала $1 \div 2$ нТл.

Добавим, что, кроме медленной магнитозвуковой волны, из МСО могли приходить еще две волны – альвеновская и быстрая магнитозвуковая. Их скорости даются соответственно следующими соотношениями (см., например, [20]):

$$v_a = v_A \cos \alpha, \quad v_A = \frac{B_0}{\sqrt{\mu_0 M_i N}},$$

где B_0 – индукция геомагнитного поля, μ_0 – магнитная постоянная, N – концентрация электронов и ионов, α – угол между направлением распространения волны и вектором \vec{B}_0 . При $\alpha = 0$ обе волны распространяются с альвеновской скоростью, которая близка к 1000 км/с. Такой скорости соответствует время распространения волны вдоль магнитной силовой трубки $\Delta T \approx S/v_A \approx 22$ с. Естественно, что такие геомагнитные пульсации также наблюдались при помощи описанного выше магнитометра. Поскольку амплитуда этих пуль-

саций на $1 \div 2$ порядка меньше, чем амплитуда колебаний с $T \approx 10$ мин, в настоящей работе быстрая (со скоростью v_A) реакция на движение МСТ не рассматривается.

Таким образом, в настоящей работе при помощи магнитометрических измерений впервые обнаружены проявления волн, сопутствовавших прохождению СТ через магнитосопреженную область. Скорее всего, такой волной является медленный магнитный звук. Магнитометрические измерения соответствуют результатам ионосферных наблюдений [13, 14].

6. Выводы

1. Проведены исследования реакции геомагнитного поля в диапазоне периодов $5 \div 15$ мин на прохождение МСТ в летнее и зимнее время года. Установлено, что в большинстве случаев (80 %) визуально наблюдалось изменение характера магнитометрических сигналов (генерация квазипериодических возмущений), сопутствовавшее прохождению терминатора через МСО.

2. Оказалось, что квазипериодические возмущения от МСТ в летние и зимние сезоны в целом подобны.

3. Проведенный системный спектральный анализ при помощи ОПФ, АПФ и ВП позволил оценить основные параметры характерных квазипериодических процессов. Периоды преобладающих колебаний обычно составляли $10 \div 12$ мин, их продолжительности – $50 \div 60$ мин и времена опережения – $80 \div 100$ мин. Таким временам опережения соответствовали времена запаздывания реакции геомагнитного поля на прохождение МСТ, равные $30 \div 60$ мин и $100 \div 120$ мин для зимнего и летнего сезонов соответственно. Сопровождавшие прохождение МСТ геомагнитные пульсации имели амплитуды $1 \div 2$ нТл.

4. Продемонстрировано, что вблизи момента прохождения МСТ для обоих сезонов значения критерия Пирсона χ^2 были достаточно большими, чтобы с необходимой степенью вероятности (95 %) утверждать, что имеет место существенное отличие экспериментального распределения времен опережений появления волновых возмущений от равномерного законов распределения.

5. Проведенная аналогичная обработка для контрольных интервалов времени показала, что с вероятностью 95 % экспериментальный закон распределения времен опережений появления

геомагнитных пульсаций относительно местного полдня и полночи в контрольные интервалы соответствует равномерному закону распределения.

6. Относительно момента прохождения МСТ наблюдаемые квазипериодические возмущения геомагнитного поля над Харьковом имели времена запаздывания $140 \div 160$ мин для летнего времени и $200 \div 230$ мин для зимнего времени. Им соответствует характерная скорость переноса волновых возмущений, равная $2.2 \div 2.6$ км/с и $1.7 \div 1.8$ км/с для зимнего и летнего сезонов соответственно, т. е. для утреннего и вечернего терминаторов. Скорее всего, геомагнитные возмущения переносились при помощи медленных магнитозвуковых волн.

Автор благодарен К. П. Гармашу и С. Г. Леусу за проведение систематических магнитометрических измерений, С. В. Панасенко и М. А. Шамоте – за помощь в обработке данных наблюдений и оформлении рукописи, а рецензенту – за доброжелательную критику, способствующую улучшению рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сомских В. М., Троицкий Б. В. Генерация возмущений в атмосфере при прохождении через нее солнечного терминатора // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1975. – Т. 15, № 5. – С. 856–860.
2. Сомских В. М. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. – Алма-Ата: Наука, 1983. – 192 с.
3. Антонова В. П., Гусейнов Ш. Ш., Дробжев В. И., Зусманович А. Г., Каримов К. А., Козин И. Д., Курмангалиев Д. А., Лосовский Б. Я., Ляджин В. А. Комплексное экспериментальное исследование волн в атмосфере, генерируемых солнечным терминатором // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1988. – Т. 24, № 2. – С. 134–143.
4. Сомских В. М. Волны в атмосфере, обусловленные солнечным терминатором // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1991. – Т. 31, № 1. – С. 1–12.
5. Сомских В. М. О генерации турбулентности атмосферы солнечным терминатором // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1992. – Т. 32, № 3. – С. 55–59.
6. Гоков А. М., Гритчин А. И. Влияние солнечного терминатора на среднеширотную D-область ионосферы и характеристики частично отраженных КВ-сигналов и радиозумов // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1994. – Т. 34, № 2. – С. 169–172.
7. Бурмака В. П., Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики сигналов доплеровского ВЧ радара при зондировании средней ионосферы, возмущенной стартами ракет и солнечным терминатором // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 2. – С. 143–162.

8. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов // Геомагнетизм и аэрномия. – 2004 – Т. 44, № 4. – С. 518–534.
9. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэрномия – 2008. – Т. 48, № 5. – С. 681–702.
10. Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Геомагнитные пульсации вблизи г. Харькова, сопровождавшие прохождение солнечного терминатора. Результаты спектрального анализа // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т. 15, № 5. – С. 43–51.
11. Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Геомагнитные пульсации вблизи г. Харькова, сопровождавшие прохождение солнечного терминатора. Результаты статистического анализа // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т. 15, № 6. – С. 14–19.
12. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. – М.: Мир, 1980. – 304 с.
13. Afraimovich E. L. First GPS-TEC evidence for the wave structure excited by the solar terminator // Earth Planets Space. – 2008. – Vol. 60. – P. 895–900.
14. Afraimovich E. L., Edemsky I. K., Voeykov S. V., Yasukevich Yu. V., and Zhivetiev I. V. MHD Nature of Ionospheric Wave Packets Generated by the Solar Terminator // Geomagnetism and Aeronomy. – 2010. – Vol. 50, No. 1. – P. 79–95.
15. Гармаш К. П., Леус С. Г., Пазюра С. А., Похилько С. Н., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики флуктуаций электромагнитного поля Земли // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 2. – С. 163–180.
16. Гармаш К. П., Леус С. Г., Поднос В. А., Похилько С. Н., Тырнов О. Ф., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Модернизированный измерительный пункт Радиофизической обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина // Вісник Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. – 2010. – Т. 942, вып. 17. – С. 101–108.
17. Лазоренко О. В., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Адаптивное преобразование Фурье // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2005. – Т. 10, № 10. – С. 39–49.
18. Бурмака В. П., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических процессов в геокосмосе // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 11. – С. 3–24.
19. Худсон Д. Статистика для физиков. – М.: Мир, 1970. – 297 с.
20. Гершин Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. А. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. – М.: Наука, 1984. – 392 с.
21. Huba J. D., Joyce G., and Fedder J. A. Ion Sound Wave in the Topside Low Latitude Ionosphere // Geophys. Res. Lett. – 2000. – Vol. 27, No. 19. – P. 3181–3184.
22. Погорельцев А. И., Бидлингмайер Е. Р. Численное моделирование структуры электромагнитных возмущений, обусловленных акустико-гравитационными волнами // Геомагнетизм и аэрномия. – 1992. – Т. 32, № 3. – С. 131–141.

Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна,
пл. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

ГЕОМАГНІТНІ ПУЛЬСАЦІЇ, ЩО СУПРОВОДЖУВАЛИ РУХ СОНЯЧНОГО ТЕРМІНАТОРА ЧЕРЕЗ МАГНІ- ТОСПРЯЖЕНУ ОБЛАСТЬ

Проаналізовано результати спостережень за квазіперіодичними варіаціями геомагнітного поля поблизу м. Харкова в діапазоні періодів $1 \div 1000$ с, які супроводжували проходження магнітоспряженого сонячного термінатора у 2002–2011 рр. Спостереження виконувались для літнього та зимового сезонів. Виявлено квазіперіодичні збурення геомагнітного поля, що випереджували на $80 \div 100$ хв момент проходження сонячного термінатора над Харковом на висоті 100 км. Період цих збурень складав $10 \div 12$ хв, тривалість – $50 \div 60$ хв і амплітуда – $1 \div 2$ нТл. Обґрунтовано, що збурення переносяться із магнітоспряженої області за допомогою повільних магнітозвукових хвиль.

L. F. Chernogor

V. Karazin National University of Kharkiv,
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

GEOMAGNETIC PULSATIONS ACCOMPANIED THE SOLAR TERMINATOR MOVING THROUGH MAGNETOCONJUGATE REGION

This paper analyzes quasi-periodic geomagnetic field variations in $1 \div 1000$ s period range which are connected with the magnetoconjugate solar terminator action in 2002–2011. The measurements have been made near Kharkiv city. The processing was made separately for summer and winter seasons. Magnetoconjugate solar terminator causes the perturbations relatively to the solar terminator moving at the height of 100 km with the lead time $80 \div 100$ min. Dominant periods were $10 \div 12$ min and the duration was $50 \div 60$ min. Their amplitudes attain a value of $1 \div 2$ nT. These variations are transferred from magnetoconjugate region by slow magnetoacoustic waves.

Статья поступила в редакцию 16.09. 2011