

УДК 550.385.37: 550.388

Л. Ф. Черногор, М. А. Шамота

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ ВБЛИЗИ г. ХАРЬКОВА, СОПУТСТВОВАВШИЕ ПРОХОЖДЕНИЮ СОЛНЕЧНОГО ТЕРМИНАТОРА. 2. РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Проведено статистичний аналіз квазіперіодичних збурень, викликаних рухом сонячного термінатора та оцінено їхні основні параметри. Встановлено, що ранковий сонячний термінатор супроводжували збурення з запізненнями $\Delta t_1 \approx 30-40$ хв і $\Delta t_2 \approx 80-87$ хв. Це були цуги тривалістю 45–50 хв і з періодами 9...11 хв. Для вечірнього термінатора запізнення складало $\Delta t \approx 60-80$ хв, періоди — біля 9–11 хв і тривалості — 50–60 хв. Проведено аналогічну обробку для контрольних інтервалів часу, яка підтвердила наявність збурень, пов'язаних з проходженням термінатора. Запропоновано теоретичну модель генерації геомагнітних пульсацій під дією сонячного термінатора.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [9] мы привели результаты экспериментальных исследований квазипериодических вариаций геомагнитного поля, сопутствовавших прохождению солнечного терминатора (СТ) в утреннее и вечернее время. При помощи спектрального анализа были оценены основные параметры волновых возмущений (ВВ). Было установлено, что параметры генерируемых терминатором ВВ принципиально мало чем отличались от ВВ другой природы. Поэтому анализ отдельных реализаций не дает полной уверенности, что изучаемые возмущения вызваны движением терминатора. Такой уверенности добавляет статистический анализ большого массива данных.

Целью настоящей работы является изложение результатов статистического анализа параметров ВВ геомагнитного поля, генерируемых прохождением солнечного терминатора в утренние и вечерние часы. Для анализа использовались результаты наблюдений флуктуаций геомагнитного поля в диапазоне периодов 1–1000 с, проведенных в 2002–2008 гг. при помощи высокочувствительного магнитометрического комплекса вблизи г. Харькова.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Статистическому анализу подлежали основные параметры возможной реакции геомагнитного поля (времена запаздываний, продолжительности и периоды) на прохождение солнечного терминатора относительно высоты 200 км для утреннего СТ и на уровне Земли для вечернего СТ.

Гистограммы времен запаздывания реакции геомагнитного поля на утренний и вечерний СТ приведены на рис. 1, а и рис. 2, а соответственно. Видно, что утреннему СТ сопутствовали возмущения с запаздываниями 30–40 и 80–87 мин относительно момента восхода Солнца на высоте 200 км. Для вечернего СТ наблюдались волновые возмущения с запаздываниями 60...80 мин относительно момента захода Солнца на уровне Земли. Для сравнения на рис. 1, б и рис. 2, б приведены аналогичные гистограммы для контрольных интервалов времени. Выделение подобных эффектов проводилось относительно полдня и полночи (по местному времени) соответствующих суток. Обработка выполнена для 2002–2008 гг. Число выборок показано на соответствующих гистограммах.

Анализируя рисунки, можно сделать вывод, что экспериментальный закон распределения величин времен запаздываний появления ВВ в переходные часы существенно отличается от

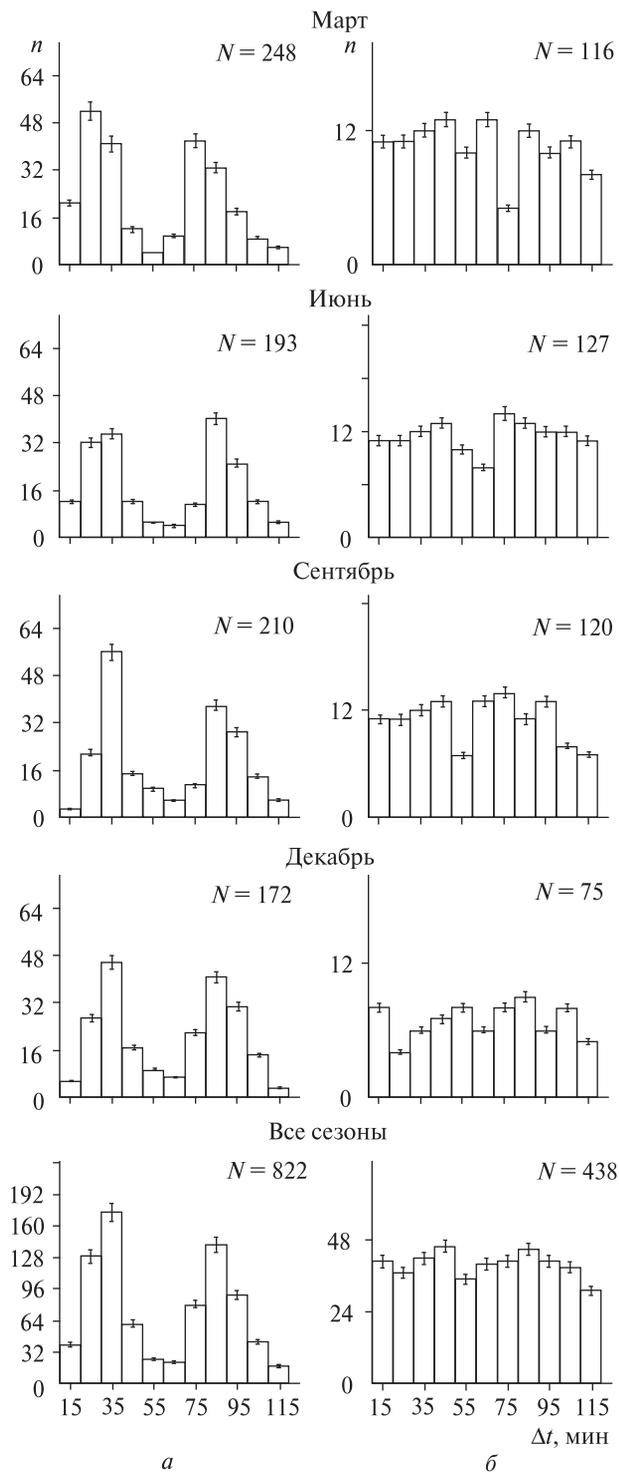


Рис. 1. Гистограммы времен запаздывания ВВ (Δt) по отношению к моменту времени прохождения утреннего солнечного терминатора на высоте 200 км (а) и для контрольных интервалов времени (б)

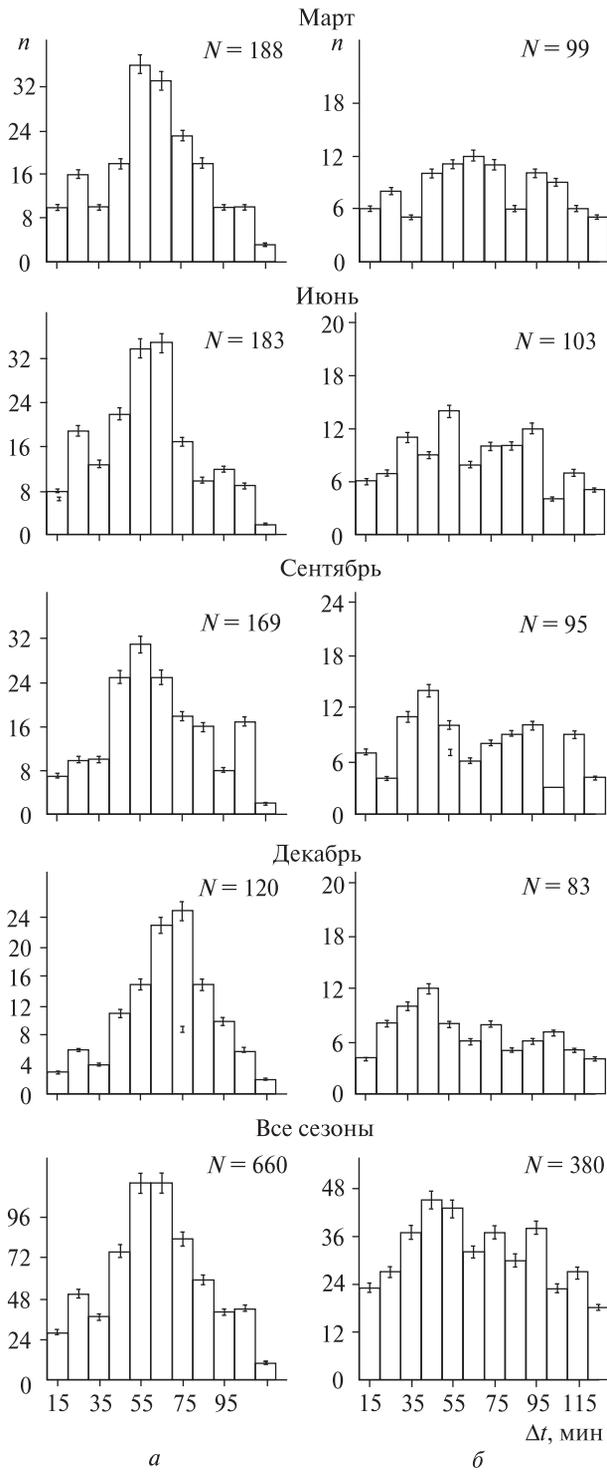


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, по отношению к моменту времени прохождения вечернего солнечного терминатора на уровне Земли

аналогичного закона для контрольных интервалов времени.

Для количественной характеристики этих отличий применялся критерий Пирсона, основанный на статистике [4]

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

где μ_i и p_i — частоты попадания значения запаздывания в i -й интервал, m — количество рас-

Таблица 1. Значения статистики χ^2 для гипотез 1 и 2

Сезон	Гипотеза 1		Гипотеза 2	
	N	$\chi^2_{\text{экс}}$	N	$\chi^2_{\text{экс}}$
Утренний солнечный терминатор ($\chi^2_{0.95} = 9.5, \chi^2_{0.99} = 13.3$)				
Декабрь	78	66.1	31	1.4
Март	160	42.6	61	0.6
Июнь	100	44.9	57	2.0
Сентябрь	128	62.2	58	2.7
Все сезоны	465	230.8	208	3.1
Вечерний солнечный терминатор ($\chi^2_{0.95} = 18.3, \chi^2_{0.99} = 23.9$)				
Декабрь	124	83.8	83	16.2
Март	161	73.6	99	17.9
Июнь	202	189.3	103	19.9
Сентябрь	181	117.7	95	20.5
Все сезоны	668	311.0	380	35.0

Таблица 2. Статистические характеристики основных параметров возмущений, сопутствовавших солнечному терминатору

Сезон	Запаздывания, мин		Продолжительности, мин	Периоды, мин
Утренний солнечный терминатор				
Март	32.0 ± 2.6	83.6 ± 2.1	45.0 ± 3.9	10.3 ± 0.6
Июнь	32.5 ± 1.7	87.5 ± 1.4	46.0 ± 2.1	10.2 ± 0.2
Сентябрь	38.6 ± 3.3	87.1 ± 1.8	49.5 ± 2.4	10.9 ± 0.3
Декабрь	36.9 ± 1.8	87.0 ± 1.8	52.5 ± 2.5	12.2 ± 0.7
Все сезоны	34.8 ± 9.5	85.1 ± 3.5	47.7 ± 8.1	10.6 ± 1.0
Вечерний солнечный терминатор				
Март	62.5 ± 1.6		58.1 ± 2.3	9.0 ± 0.7
Июнь	59.6 ± 1.7		49.0 ± 2.2	10.0 ± 0.2
Сентябрь	63.0 ± 1.3		61.0 ± 2.6	10.6 ± 0.4
Декабрь	68.4 ± 1.4		54.0 ± 2.1	10.2 ± 0.3
Все сезоны	62.4 ± 5.8		53.6 ± 4.6	10.0 ± 0.9

сматриваемых интервалов, N_n — общее число событий проверяемого закона. Рассматривались две гипотезы: согласно гипотезе 1 законы распределения времен запаздывания в возмущенные и фоновые интервалы времени идентичны (в качестве эталонного выбирался закон для фоновых интервалов времени), согласно гипотезе 2 в фоновые интервалы времени имеет место равномерный закон распределения. Расчеты показали (табл. 1), что для всех сезонов значения χ^2 были достаточно большими, чтоб с необходимой степенью вероятности (95 %) утверждать, что имеет место существенное отличие экспериментальных законов распределения для утренне-вечерних часов и фоновых интервалов времени. Для подтверждения предположения о справедливости равномерного закона распределения в фоновые часы проверялась гипотеза о соответствии экспериментального закона распределения в контрольные интервалы времени равномерному закону распределения. Как видно из табл. 1, значения χ^2 попадают в интервал $\chi^2 < \chi^2_{0.95}$. Следовательно, гипотеза о равномерном распределении в фоновые интервалы времени для утреннего и вечернего СТ во все сезоны принимается.

Результаты статистической обработки массивов значений запаздываний, продолжительностей и периодов колебаний для различных сезонов, а также оценка средних квадратичных отклонений параметров возмущений приведены в табл. 2. Видно, что средние продолжительности эффектов составляли 45—52 мин для утреннего СТ и 50—58 мин для вечернего СТ. Периоды возмущений равнялись 9—11 мин.

ОБСУЖДЕНИЕ

В 60—80 % случаев прохождения солнечного терминатора имели место заметные или значительные изменения спектрального состава ВВ геомагнитного поля. В большинстве случаев наблюдалось увеличение амплитуды, но в ряде случаев (около 7—10 %) отмечалось подавление сигнала, свидетельствующее, вероятнее всего, о противофазном сложении волновых процессов. Почти всегда вариации характера сигнала сопровождалась изменением периодов квазипериодических процессов.

Из статистического анализа следует, что восходу Солнца на высоте $z \approx 200$ км систематически сопутствовали возмущения с запаздываниями $\Delta t_1 \approx 30\text{--}40$ мин и $\Delta t_2 \approx 80\text{--}87$ мин. Они представляли собой цуги колебаний длительностью 45—50 мин, с периодами 9—11 мин. Запаздываниям 30...40 мин соответствуют высоты прохождения солнечного терминатора 100—150 км. Как известно, на этих высотах находится максимум токовой струи. Возмущения с запаздыванием Δt_1 возникают раньше, чем возмущения с запаздыванием Δt_2 на величину $\Delta t_{21} = \Delta t_2 - \Delta t_1 \approx 47\text{--}50$ мин. Появление возмущения с двумя группами запаздываний можно объяснить тем, что СТ генерирует квазипериодический процесс с периодом $T = 10\text{--}15$ мин промодулированный периодическим процессом с $T_1 = \Delta t_{21}$. Период ВВ около 47—50 мин характерен для атмосферы Земли. Он близок к периоду внутренних гравитационных волн, свойственных нейтральной атмосфере [3].

Добавим, что возмущения наблюдались в 65—80 % случаев, в остальных случаях принятие решения о наличии возмущения от утреннего СТ было затруднено.

Для вечернего СТ были характерны ВВ с запаздыванием $\Delta t \approx 60\text{--}80$ мин относительно момента захода Солнца на уровне поверхности Земли. Возмущения наблюдались в 60—70 % случаев. Они представляли собой квазипериодические процессы с преобладающими периодами 9—11 мин и длительностями 50—60 мин. Найденному значению Δt соответствует высота прохождения СТ равная 100—120 км. Как уже отмечалось, на этих высотах находится максимум токовой струи, и следовательно, область эффективной генерации геомагнитных пульсаций.

Амплитуды возмущений как в утреннее, так и в вечернее время составляли 2—3 нТл.

Механизм генерации ВВ в геомагнитном поле принимается следующим [5]. Акустико-гравитационные волны модулируют с периодом T параметры атмосферы (концентрацию нейтралов N_n , их температуру T_n) и ионосферы (концентрации электронов и ионов N , их температуры $T_{e,i}$, частоты соударений электронов с нейтралами v_{en} и ионов с нейтралами v_{in} и др.). В итоге

оказываются промодулированными компонентами тензора проводимости σ ионосферной плазмы. При наличии внешнего (ионосферно-магнитосферного происхождения) электрического поля \mathbf{E}_0 модуляция σ приводит к модуляции плотности ионосферных токов с амплитудой

$$\Delta \mathbf{j} = \Delta \sigma \mathbf{E}.$$

С другой стороны, движение нейтральных частиц со скоростью \mathbf{v}_n в АГВ благодаря соударениям приводит к движению ионов и электронов со скоростями $\mathbf{v}_{i,e}$. Возникает сторонний ток с плотностью $\mathbf{j}_1 = eN(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_e)$, где e — заряд электрона. Появление токов с плотностями $\Delta \mathbf{j}$ и \mathbf{j}_1 обуславливает генерацию электромагнитного поля с индукцией \mathbf{B} , которая вычисляется из следующего уравнения Максвелла:

$$\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0(\Delta \mathbf{j} + \mathbf{j}_1), \quad (1)$$

где μ_0 — магнитная постоянная. В уравнении (1) не учитывается ток смещения, который заведомо не существен для периодов волн $T \sim 1\text{--}10$ мин.

Направляя \mathbf{B} вдоль оси OZ , ось OX ориентируем из места наблюдения на место генерации АГВ, ось OY при этом образует правую тройку. При этом из выражения (1) следует, что

$$\begin{aligned} -\frac{\partial B_y}{\partial z} &= \mu_0(\Delta j_x + j_{1x}), \\ \frac{\partial B_x}{\partial z} &= \mu_0(\Delta j_y + j_{1y}). \end{aligned} \quad (2)$$

В выражениях (2) учтено, что $|\partial/\partial z| \gg |\partial/\partial x|$, $|\partial/\partial y|$. Для первой производной характерен масштаб порядка нескольких десятков километров, близкий к толщине динамо-области, занимающей диапазон высот 100...150 км, для остальных производных — порядка длины волны $\lambda = v_{ph}T \approx 300\text{--}1000$ км. Здесь v_{ph} — фазовая скорость волны, которая близка к скорости звука c_s в атмосфере ($c_s \approx 0.3\text{--}0.8$ км/с) [3].

В динамо-области ионосферы проводимость плазмы определяется педерсеновской σ_p и холловской σ_H проводимостями.

Малым изменениям концентрации электронов ($\Delta N \ll N$), температуры ионов ($\Delta T_i \ll T_i$) и концентрации нейтралов ($\Delta N_n \ll N_n$) соответствуют малые изменения $\Delta \sigma_p$ и $\Delta \sigma_H$:

$$\Delta\sigma_p = \sigma_p \delta_{\sigma_p} = \sigma_p \left(\delta_N - \frac{1+\gamma}{2} \delta_{N_n} \right), \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_H = \sigma_H \delta_{\sigma_H} = \sigma_H \delta_N,$$

где δ_{σ_p} , δ_{σ_H} — относительные изменения педерсеновской и холловской проводимостей, $\delta_N = \Delta N/N$, $\delta_{N_n} = \Delta N_n/N_n$, γ — отношение удельных теплоемкостей. В выражениях (3) учтено, что $v_{in} \propto N_n v_n \propto N_n T_n^{1/2}$, $\Delta T_n/T_n = (\gamma-1)\delta_{N_n}$.

Значение δ_N можно оценить по формуле [1, 5]

$$\delta_N = \frac{k_z v_z}{(\omega_N^2 + \omega^2)^{1/2}},$$

где $\omega_N = t_n^{-1} = 2\alpha_r N$, t_n — время становления концентрации N за счет рекомбинации, α_r — коэффициент рекомбинации электронов с молекулярными ионами, ω — круговая частота АГВ, k_z — вертикальная составляющая волнового числа k АГВ, v_z — вертикальная составляющая скорости частиц в волне.

Таким образом, для расчета величины возмущения компонентов тензора проводимости необходимо знать значения δ_N или k_z и v_z .

Для оценки δ_N , как и в [5], положим, что $k_z = 3k$, $v = 0.1v$, $v = c_s \gamma \delta_{N_n}$. На высоте $z = 150$ км $\alpha_r \approx 3.5 \cdot 10^{-13}$ м³/с, $c_s \approx 500$ м/с, $\delta_{N_n} = 0.05$. Тогда $v = 35$ м/с, $v_z = 3.5$ м/с, $k \approx 1.3 \cdot 10^{-5}$ м⁻¹, $k_z \approx 1.3 \cdot 10^{-4}$ м⁻¹ для $T = 1000$ с, $\omega_N = 0.05$ с⁻¹ для утренне-вечернего времени. Видно, что вблизи высоты 150 км $\omega^2 \ll \omega_N^2$. Тогда $\delta_N \approx k_z v_z / \omega_N \approx 0.01$. При этом $\delta_{\sigma_p} = 0.05$ и $\delta_{\sigma_H} = 0.01$.

При $j_1 = 0$ амплитудные значения возмущений компонентов геомагнитного поля

$$\Delta B_y \approx \mu_0 \int \Delta j_x dz \approx \mu_0 \Delta j_x \Delta z_x, \quad (4)$$

$$\Delta B_x \approx \mu_0 \int \Delta j_y dz \approx \mu_0 \Delta j_y \Delta z_y.$$

Здесь учтено, что вклад в ΔB_y дает вся динамо-область, где $\Delta z_x \approx 50$ км, а в ΔB_x — лишь область высот вблизи верхней границы динамо-области ($z \approx 150$ км), где $\Delta z_y \approx 25$ км.

В первом случае Δj_x представляет собой изменение педерсеновского тока:

$$\Delta j_x \approx \delta_{\sigma_p} j_c, \quad (5)$$

во втором случае Δj_y — изменение холловского тока:

$$\Delta j_y \approx \delta_{\sigma_H} j_{0y} \approx -\frac{1}{2} \delta_{\sigma_H} j_c. \quad (6)$$

Подставляя выражения (5) и (6) в (4), получим

$$\Delta B_y \approx \mu_0 \delta_{\sigma_p} j_c \Delta z_x, \quad (7)$$

$$\Delta B_x \approx -\frac{1}{2} \mu_0 \delta_{\sigma_H} j_c \Delta z_y.$$

Характерная плотность тока в ионосферной динамо-области $j_c = eNv_n$, где v_n определяется скоростью нейтрального ветра.

Составляющие плотности стороннего тока также описываются соотношениями, подобными (5) и (6), где скорость нейтралов v_n определяется скоростью частиц в волне. Для амплитуд ВВ геомагнитного поля имеем [5]:

$$\Delta B_{yv} \approx \mu_0 eNv \Delta z_x,$$

$$\Delta B_{xv} \approx -\frac{1}{2} \mu_0 eNv \Omega_i \Delta z_y.$$

Здесь $\Omega_i = \omega_{Bi} / v_{in} = 2 \cdot 10^{-2} - 2$.

Результаты оценок геомагнитного эффекта по формулам (7) приведены в табл. 3.

Результаты оценок геомагнитного эффекта для двух механизмов возмущения магнитного поля, $\Omega_i = 2$ ($z \approx 150$ км), $v = 35$ м/с ($\delta_{N_n} = 0.05$) также приведены в табл. 3. При $v = 5$ м/с, что ближе к реальности, значения ΔB_{xv} и ΔB_{yv} составляют около 1.5 и 3 нТл соответственно. Примерно такие же значения амплитуд ВВ наблюдались в экспериментах. Это свидетельствует об адекватности предложенного механизма генерации ВВ.

Механизмы генерации возмущений геомагнитного поля солнечным терминатором и стартующими ракетами скорее всего аналогичны [2, 5–8].

Таблица 3. Параметры среды при $z \approx 150$ км и геомагнитный эффект, обусловленный модуляцией ионосферного тока ($\Delta B_{x,y}$) и увлечением волной заряженных частиц ($\Delta B_{xv,yv}$)

N , м ⁻³	$6 \cdot 10^{10}$	Δz_x , км	50
j_c , А/м ²	$9.6 \cdot 10^{-7}$	Δz_y , км	25
δ_{N_n}	$5 \cdot 10^{-2}$	ΔB_x , нТл	-0.15
δ_N	10^{-2}	ΔB_y , нТл	2
δ_{σ_p}	$5 \cdot 10^{-2}$	ΔB_{xv} , нТл	-10.6
δ_{σ_H}	10^{-2}	ΔB_{yv} , нТл	21.2

ВЫВОДЫ

1. Статистический анализ показал, что восходу Солнца на высоте 200 км систематически сопутствовали возмущения с запаздываниями $\Delta t_1 \approx 30$ —40 мин и $\Delta t_2 \approx 80$ —87 мин. Они представляли собой цуги колебаний длительностью 45—50 мин, с периодами 9—11 мин. Для вечернего СТ были характерны ВВ с запаздыванием относительно захода Солнца на уровне Земли $\Delta t \approx 60$ —80 мин, преобладающими периодами 9—11 мин и длительностями 50—60 мин.

2. Наблюдаемым запаздываниям соответствуют высоты прохождения солнечного терминатора 100—150 км, где расположен максимум токовой струи, а значит и область эффективной генерации геомагнитных пульсаций.

3. Аналогичная обработка для контрольных интервалов времени показала, что с вероятностью 95 % экспериментальный закон распределения времен запаздываний в контрольные интервалы соответствует равномерному закону распределения, т. е. отсутствует какая-либо закономерность во временах запаздывания ВВ в контрольные интервалы времени.

4. Установлено, что для всех сезонов значения χ^2 были достаточно большими, чтобы с вероятностью 95 % утверждать, что имеет место существенное отличие экспериментальных законов распределения для утренне-вечерних часов и фоновых интервалов времени.

5. Предложен механизм генерации геомагнитных пульсаций. Он заключается в следующем: внутренние гравитационные волны модулируют параметры нейтрального и ионизированного компонентов, а также приводят к возникновению стороннего тока в динамо-области ионосферы, что имеет отклик в геомагнитном поле из-за изменения проводимости среды.

6. Результаты теоретических оценок в целом соответствуют результатом наблюдений. Амплитуды ВВ, определенные из данных наблюдений и расчетов, составляли несколько единиц нанотесла.

1. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных

условиях. 2. Анализ результатов наблюдений и моделирование // Геомагнетизм и аэрономия. — 2006. — 46, № 2. — С. 209—218.

2. Гармаш К. П., Леус С. Г., Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Вариации геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам и полетам космических аппаратов // Космічна наука і технологія. — 2007. — 13, № 6. — С. 87—98.
3. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. — М.: Наука, 1974. — 256 с.
4. Худсон Д. Статистика для физиков. — М.: Мир, 1970. — 297 с.
5. Черногор Л. Ф. Флуктуации геомагнитного поля вблизи г. Харькова, сопровождавшие старты ракет с космодрома Байконур // Геомагнетизм и аэрономия. — 2009. — 49, № 3. — С. 403—415.
6. Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Волновые возмущения геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Плесецк // Космічна наука і технологія. — 2008. — 14, № 3. — С. 29—38.
7. Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с космодромов КНР // Космічна наука і технологія. — 2008. — 14, № 4. — С. 92—99.
8. Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с космодромов Мыс Канаверал и Куру // Космічна наука і технологія. — 2008. — 14, № 6. — С. 89—98.
9. Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Геомагнитные пульсации вблизи г. Харькова, сопутствовавшие прохождению солнечного терминатора. 1. Результаты спектрального анализа // Космічна наука і технологія. — 2009. — 15, № 5. — С. 43—51.

Надійшла до редакції 31.08.09

L. F. Chernogor, M. A. Shamota

GEOMAGNETIC PULSATIONS ASSOCIATED WITH SOLAR TERMINATORS NEAR KHARKIV CITY. 2. STATISTICAL ANALYSIS

The statistical analysis of quasi-periodic perturbations produced by solar terminator passage was performed and the main perturbation features were established. The dawn terminators are determined to be associated with perturbations showing delays of $\Delta t_1 \approx 30$ —40 min and of $\Delta t_2 \approx 80$ —87 min. The perturbations are wave trains with a duration of 45—50 min and a period of 9—11 min. The dusk terminators are determined to be associated with perturbations showing delays of $\Delta t \approx 60$ —80 min, periods equal to approximately 9—11 min, and durations of 50—60 min. The reference data acquired during quiet time were subjected to the same analysis, which confirmed that the perturbations are associated with the terminators.