

УДК 550.385.37: 550.388

К. П. Гармаш, С. Г. Леус, Л. Ф. Черногор, М. А. Шамота

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

## ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ, СОПУТСТВОВАВШИЕ СТАРТАМ РАКЕТ С РАЗЛИЧНЫХ КОСМОДРОМОВ МИРА

*Проаналізовано результати спостережень варіацій геомагнітного поля в діапазоні періодів 1–1000 с, які супроводжували старту ракет різних типів з різних космодромів світу у 2002–2008 рр. (всього 149 подій). Вимірювання виконано поблизу м. Харкова (віддалення від космодромів складає 1500–9500 км). Статистичний аналіз виявив три групи збурень. Час запізнення та тривалості збурень збільшувались зі збільшенням відстані від космодромів. Періоди склали від 6 до 14 хв, а амплітуди становили 3–5 нТл.*

### ВВЕДЕНИЕ

Обнаружением и исследованием возмущений в атмосфере и геокосмосе, сопутствующих стартам ракет (СР), занимаются уже более 40 лет. Этому вопросу посвящен ряд работ [1–11, 14–18, 23–27]. Большинство исследований проводится на близких расстояниях от места воздействия (вдоль траектории полета космического аппарата) [1, 16, 17]. Особый интерес представляет изучение эффектов на больших удалениях от места старта. Этому вопросу также посвящены наши работы [2–10, 23–27].

Как правило, изучаются ионосферные эффекты СР [1–10, 26, 27].

К настоящему времени известна только одна работа, посвященная исследованию эффектов СР в геомагнитном поле вблизи космодрома [18]. В этой работе показана возможность генерации геомагнитных возмущений с периодами около 140 мин, амплитудами 10 нТл. Возмущение появлялось через 10–15 мин после СР. В работе [18] предположено, что повторяющийся характер возмущений геомагнитного поля в области периодов 2–3 мин с амплитудой 5–20 нТл через 2–4 мин после старта свидетельствует о том, что запуск ракеты приводит к возмущению также короткопериодических воз-

мущений. Данные были получены на базе геомагнитной обсерватории «Алма-Ата» для 23 запусков ракет в 1999–2001 гг. [18].

В работе [11] нами исследовалась реакция достаточно высокочастотных (0.001–1 Гц) флуктуаций геомагнитного поля на старты 43 мощных ракет с космодрома Байконур ( $R \approx 2100$  км). Статистический анализ выявил три группы возмущений, также были определены их основные параметры — запаздывания, продолжительности и периоды. Запаздывания оказались равными 6–7, 35–45 и 90–130 мин, продолжительности — 17–27, 45–80 и 40–70 мин, периоды — 5–8, 9–11 и 9–11 мин соответственно. Трех группам возмущений соответствовали скорости 9 км/с, 800–1100 м/с и 300–400 м/с.

По аналогичной методике нами были выполнены исследования реакции магнитного поля Земли, сопутствовавших стартам ракет как с близких к месту регистрации космодромов ( $R \approx 1500$  км), так и значительно удаленных ( $R \approx 9500$  км) [23–25]. Для анализа выбирались активно функционирующие космодромы, с которых стартуют достаточно мощные ракеты. Таковыми космодромами являются космодромы Плесецк, Сичан, Цеюань, Тайюань, Мыс Канаверал и Куру. Регистрация временных вариаций геомагнитного поля осуществлялась вблизи г. Харькова (удаления составляли от 1500 до 9500 км). Практически всем рассмотренным стартам ра-

кет сопутствовали заметные изменения характера колебаний горизонтальных компонентов геомагнитного поля в диапазоне геомагнитных пульсаций.

Для всех космодромов выявлены три группы возмущений. Для космодрома Плесецк им соответствовали скорости 4.9–6.1 км/с, 880–910 м/с и 325–400 м/с [23]; для космодромов Китая: 2.0–3.7 км/с, 800–970 м/с и 500–600 м/с [24]; для космодрома Мыс Канаверал: 4.4–5.5 км/с, 980–1070 м/с и 540–590 м/с [25]; для европейских ракет, стартовавших с космодрома Куру, значения скоростей 2.5–3.1 км/с, 680–740 м/с и 480–540 м/с [25].

Существует целый ряд вопросов, на которые необходимо ответить. Какие тенденции изменения параметров возмущений с увеличением расстояния до космодрома; насколько далеко могут распространяться волны, генерируемые стартами ракет; какова величина возмущений?

Целью настоящей работы является изучение и анализ зависимостей запаздываний, продолжительностей и периодов возмущений, сопутствовавших стартам ракет с различных космодромов мира (удаления 1500–9500 км), от расстояния до космодромов по результатам наблюдений достаточно высокочастотных (0.001–1 Гц) флуктуаций геомагнитного поля вблизи г. Харькова.

## СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

*Магнитометр-флюксметр.* Несерийный высокочувствительный магнитометр, включенный в состав программно-аппаратного комплекса, размещен в обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (с. Граково, Чугуевский район, Харьковская обл.) [11]. Его геофизические координаты: 49°40' с. ш., 36°50' в. д., геомагнитные координаты: + 45°20' геомагнитной широты, 119°20' в. д.

Магнитометр-флюксметр измеряет уровень флуктуаций. Его чувствительность составляет 0.5–500 пТл в диапазоне периодов 1–1000 с соответственно.

*Методы анализа.* Вначале магнитометрические сигналы, соответствующие  $H$ - и  $D$ -компонентам геомагнитного поля с учетом амплитудно-частотной характеристики магнитометра-

флюксметра преобразовывались в сигналы  $H(t)$  и  $D(t)$  флуктуаций геомагнитного поля. Первые измеряются в относительных единицах, а последние — в абсолютных (в нТл).

Затем сигналы  $H(t)$  и  $D(t)$  подвергались дальнейшей обработке: цифровой фильтрации с полосами фильтров, соответствующих, например, периодам 1–20, 20–100, 100–300 и 300–1000 с и вейвлет-преобразованию [18].

Вейвлет-преобразование, как известно, имеет вид [18]:

$$\tilde{W}[s(t)] \equiv Ws(a, b) = \frac{1}{a^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt,$$

где  $s(t)$  — сигнал ( $H(t)$  или  $D(t)$ ),  $a$  и  $b$  — параметры масштабирования и сдвига,  $\psi$  — базис вейвлета, звездочка означает комплексное сопряжение,  $t$  — безразмерное время. В качестве  $\psi(t)$  использовался вейвлет Морле [18]:

$$\psi(t) = \exp(-t^2/2) \cos \omega t,$$

который представляет собой волновой пакет безразмерной частотой  $\omega$  (обычно выбирают  $\omega = 5$ ). Именно такой базис удобен для обнаружения и последующего анализа цугов волн (геомагнитных пульсаций типа  $Pc$ ).

Определению подлежали времена запаздывания возможной реакции геомагнитного поля на СР, ее продолжительность и спектральный состав возникающих возмущений. Далее путем усреднения вычислялись статистические характеристики этих возмущений для разных космодромов и строились зависимости запаздываний, продолжительностей и периодов от расстояния до космодрома.

## СВЕДЕНИЯ О РАКЕТАХ И КОСМОДРОМАХ

В работе изучалась реакция геомагнитного поля на старты 21 ракеты с космодрома Плесецк, 69 ракет с космодрома Байконур, 33 ракет с космодромов КНР, 11 ракет с космодрома Мыс Канаверал и 15 ракет с космодрома Куру. Все СР имели место в 2002–2008 гг.

Характеристики и основные параметры ракет приведены в табл. 1. Исследованию подвергалась реакция геомагнитного поля на запуски ракет различной массы: от 107 до 2100 т. Им (сог-

ласно классификации [15]) соответствуют ракеты средней тяжести («Рокот», «Космос-3М», «Long March-2С», «Long March-2D», «Long March-3А»), тяжелые («Днепр», «Молния», «Союз», «Зенит», «Протон», «Long March-2F», «Long March-3В», «Long March-4В», «Ariane5») и сверхтяжелые («Space Shuttle»). Всего в настоящей работе проанализировано 149 СР.

Краткие сведения о космодромах приведены в табл. 2.

### РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Для общего контроля уровня магнитной возмущенности использовались индексы  $A_p$  и  $K_p$  накануне и в день СР, взятые из интернет. Запуски

ракет осуществлялись как в магнитоспокойные, так и магнитовозмущенные дни.

Для примера рассмотрим пять стартов ракет с различных космодромов мира.

На рис. 1 представлены вариации  $H(t)$  и  $D(t)$ , сопутствовавшие СР средней тяжести «Рокот» 30 июня 2003 г. в 14:15 (здесь и далее используется время UT) с космодрома Плесецк. В эти сутки  $\Sigma K_p = 22$ .

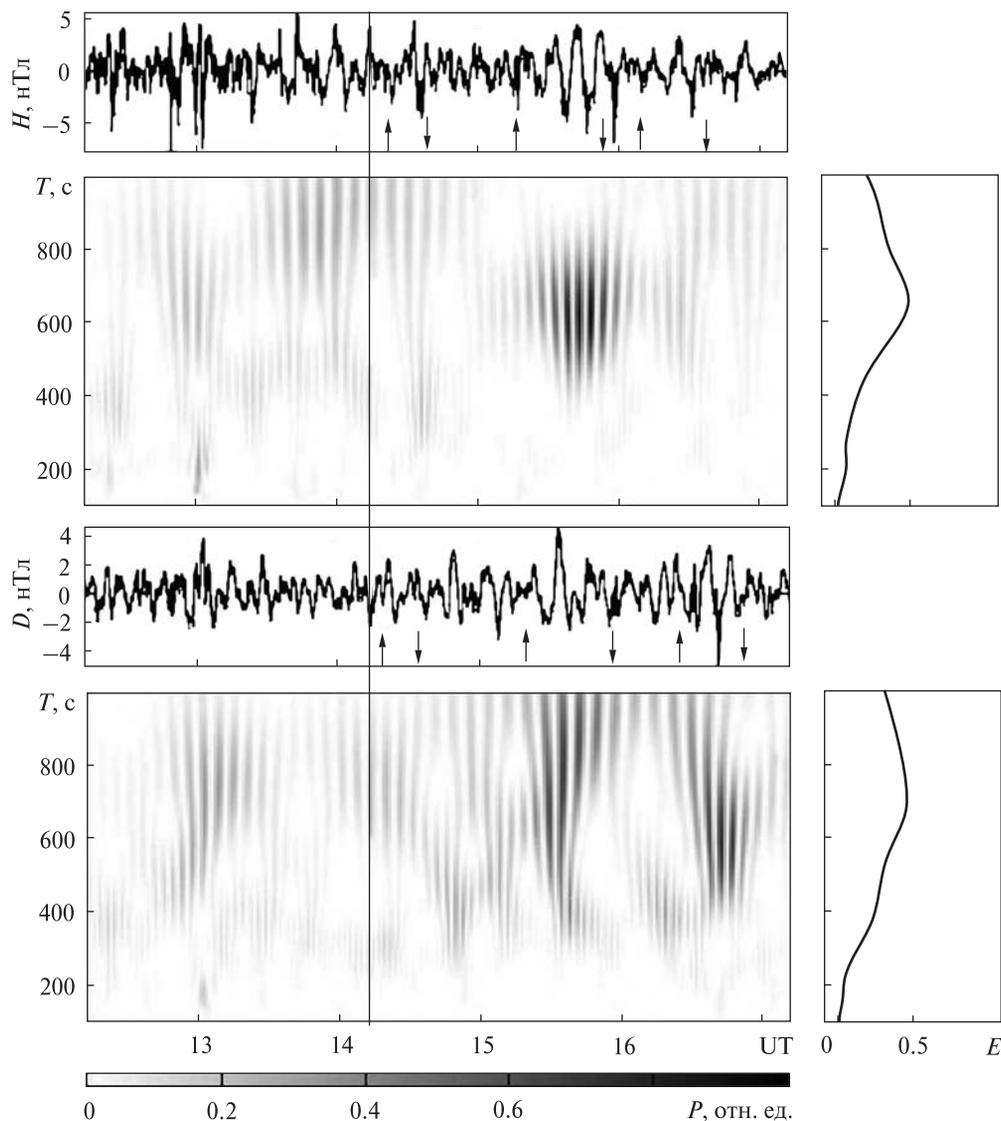
Примерно через 6—7 мин после СР наблюдалось заметное изменение характера колебаний длительностью 8—10 мин и периодом 4 мин. Следующее по времени возмущение регистрировалось через 61—64 мин. Оно имело длительность 36—48 мин и периоды 8—10 мин для  $H$ - и

Таблица 1. Краткие сведения о ракетах (в скобках приведены данные для модификации «Ariane 5G»)

Тип ракеты	Число запусков	Количество ступеней	Длина, м	Масса, т	Начальная тяга, МН	Масса нагрузки, т (на высоте 200 км)	Страна
«Молния»	1	4	40.0	305.5	4.19	1.8	Россия
«Космос-3М»	7	2	32.4	109	1.48	1.5	Россия
«Рокот»	5	3	29.0	107.5	1.60	1.9	Россия
«Союз»	37	3	46.1	305	4.14	6.9	Россия
«Днепр»	6	3	29.0	268.3	—	5.5	Россия
«Зенит»	1	3	49.5	460	—	5.4	Россия
«Протон»	28	4	59.0	711	8.84	19.8	Россия
«Long March-2С»	7	2	35.2	192	2.79	2.4	КНР
«Long March-2D»	4	2	33.7	232	2.96	3.1	КНР
«Long March-2F»	4	2	58.3	480	5.92	8.4	КНР
«Long March-3А»	9	3	52.4	241	2.96	8.5	КНР
«Long March-3В»	1	3	54.8	425.5	5.92	12.0	КНР
«Long March-4В»	8	3	44.1	254	2.97	4.2	КНР
«Space Shuttle»	11	—	56.2	2045	28.6	29.5	США
«Ariane 5 (5G)»	15	3	59.0	777(710)	6.47 (6.36)	21(16)	ЕС

Таблица 2. Краткие сведения о космодромах

Название	Координаты		Расстояние от космодрома до обсерватории, км	Количество запусков	Страна
	Широта	Долгота			
Плесецк	63.0° с. ш.	41.0° в. д.	1500	21	Россия
Байконур	46.0° с. ш.	63.3° в. д.	2100	69	Россия
Цзюянь	41.1° с. ш.	100.3° в. д.	4800	10	КНР
Тайюань	38.8° с. ш.	111.5° в. д.	5600	12	КНР
Сичан	28.1° с. ш.	102.3° в. д.	5900	11	КНР
Мыс Канаверал	28.5° с. ш.	80.5° з. д.	9300	11	США
Куру	5.15° с. ш.	52.63° з. д.	9500	15	Гвиана (фр.)



**Рис. 1.** Временные вариации  $H$ - и  $D$ -компонентов геомагнитного поля, соответствующие им вейвлет-спектры и энергограммы (распределение средней энергии колебаний по периодам) в диапазоне периодов 100–1000 с, сопровождавшие старт ракеты «Рокот» с космодрома Плесецк 30 июня 2003 г. Здесь и далее сплошной вертикальной линией показан момент старта ракеты (14:15 UT)

$D$ -компонентов соответственно и сопровождалось увеличением периода и амплитуды. Третье возмущение продолжительностью 37 мин возникло через 118–126 мин после СР. В волновом процессе преобладали периоды 8–11 мин.

Старт тяжелой российской ракеты «Протон» с космодрома Байконур имел место 9 апреля 2007 г. в 22:54 (рис. 2). Сутки с СР были слабо

магнитовозмущенными:  $\Sigma K_p = 14$ . Первое возмущение (значительное уменьшение периода от 9–10 до 3–4 мин), отчетливо фиксируемое в двух компонентах, имело запаздывание 4–5 мин и продолжалось 34 и 42 мин для  $H$ - и  $D$ -компонентов соответственно. Следующее возмущение, наблюдавшееся через 60–64 мин, продолжалось 34–42 мин и имело периоды 9 и 13 мин

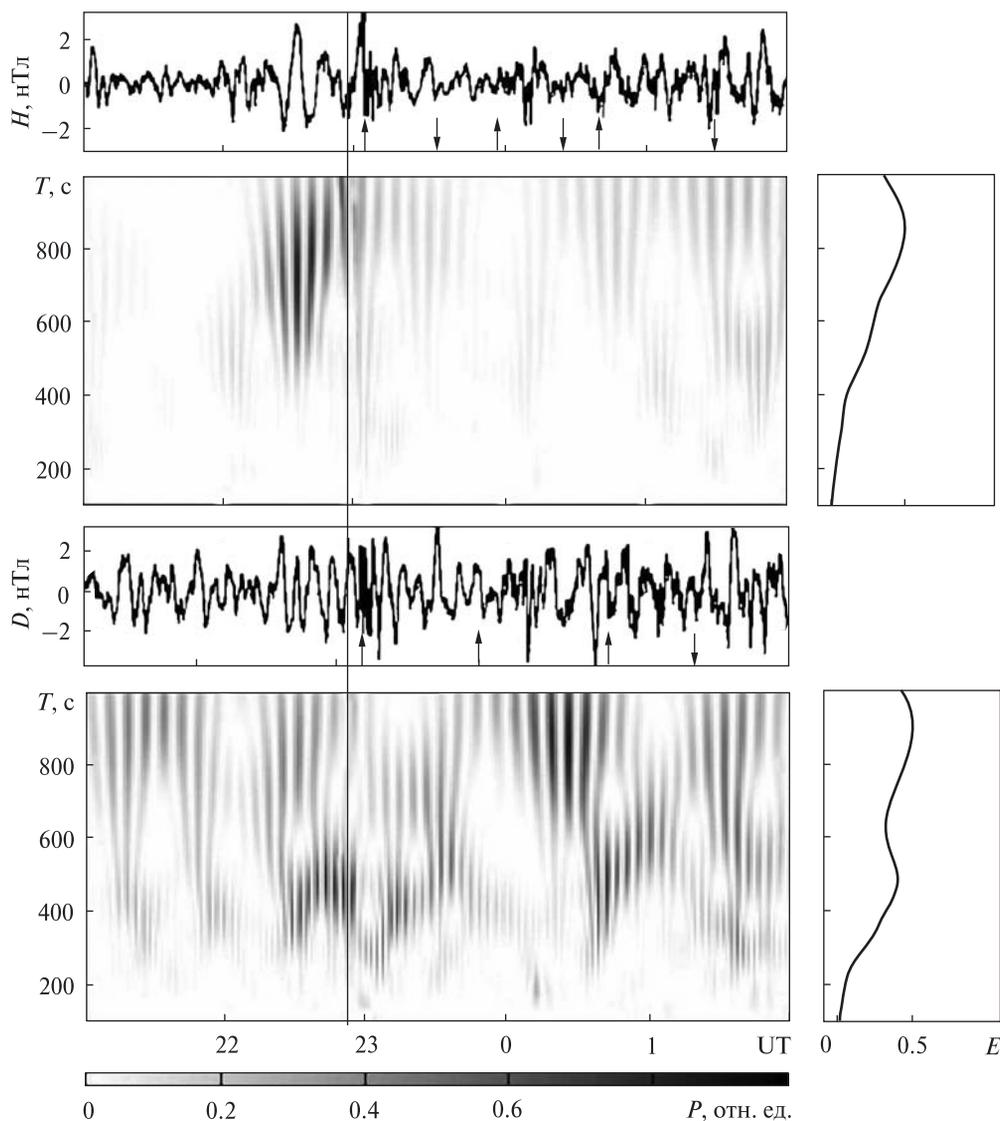
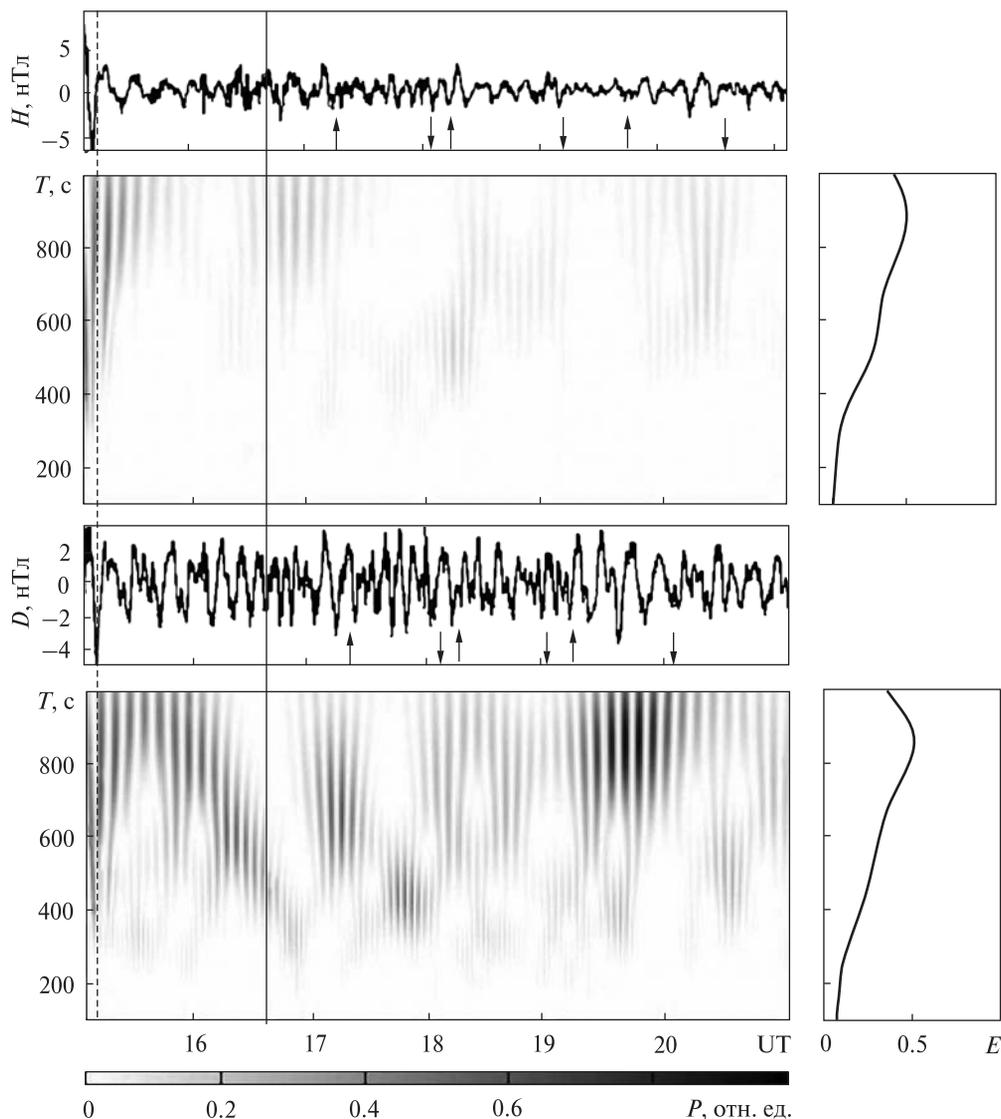


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для старта ракеты «Протон» с космодрома Байконур 9 апреля 2007 г. (22:54 UT)

для  $H$ - и  $D$ -компонентов соответственно. Третье изменение характера волнового процесса имело запаздывания 108 и 112 мин, продолжительность 38 мин и периоды 11–12 мин для  $H$ - и  $D$ -компонентов соответственно.

Запуск тяжелой китайской ракеты модификации «2F» имел место 29 декабря 2002 г. в 16:40 с космодрома Цюань (рис. 3). Сутки со СР были несколько магнитовозмущенными ( $\Sigma K_p = 23$ ). Первое изменения характера колебаний наблю-

далось через 35 и 46 мин для  $H$ - и  $D$ -компонентов соответственно. В  $H$ -компоненте имело место подавление волнового процесса и уменьшение периода в 2 раза (от 14 до 7 мин). В  $D$ -компоненте — уменьшение периода. Продолжался этот процесс 54 мин и имел периоды 7 мин для обоих компонентов сигнала. Следующее возмущение продолжительностью 49–60 мин имело задержки 99–107 мин. Периоды составляли 8 и 13 мин для  $H$ - и  $D$ -компонентов

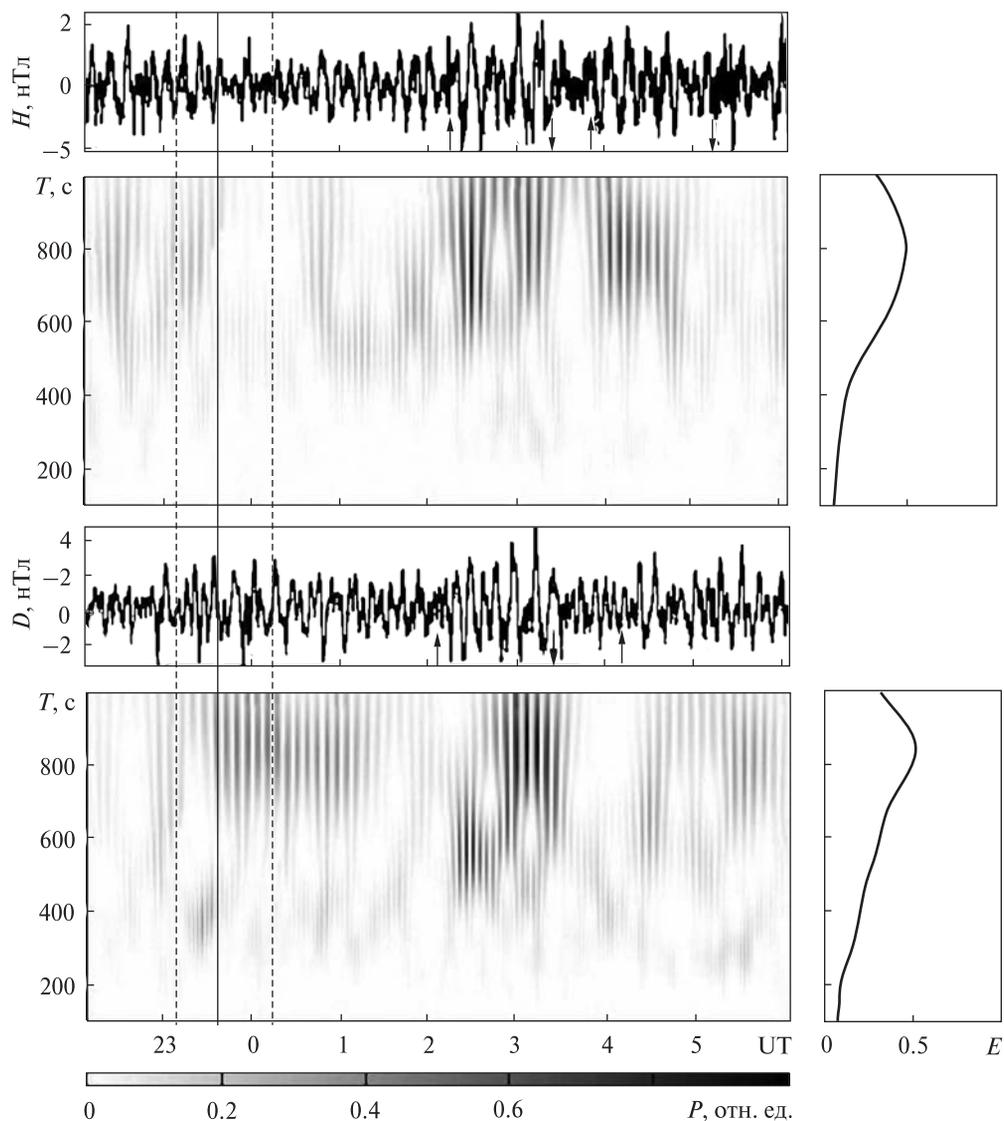


**Рис. 3.** То же, что и на рис. 1, для старта ракеты «2F» с космодрома Цзюань 29 декабря 2002 г. (16:40 UT). Пунктирной линией показан момент захода Солнца на высоте 200 км вблизи г. Харькова

соответственно. Третий процесс проявлялся как увеличение периода преобладающих колебаний в  $H$ -компоненте до 13 мин,  $D$ -компоненте до 15 мин. Он имел запаздывания 166—191 мин и продолжительность 51—57 мин для  $H$ - и  $D$ -компонентов сигнала.

На рис. 4 представлены вариации горизонтальных компонентов геомагнитного поля, сопутствовавшие старту космического челнока

«Atlantis» 8 июня 2007 г. в 23:38. В эти сутки  $\Sigma K_p = 16$ . Запуск челнока совпал с прохождением солнечного терминатора вблизи места расположения обсерватории, поэтому выделение первого типа возмущения для этого старта затруднено. Изменение характера колебаний, сопровождаемое увеличением амплитуды в два раза, имело место в интервале времени с 02:10 до 03:25. Следующий тип возмущений наблю-

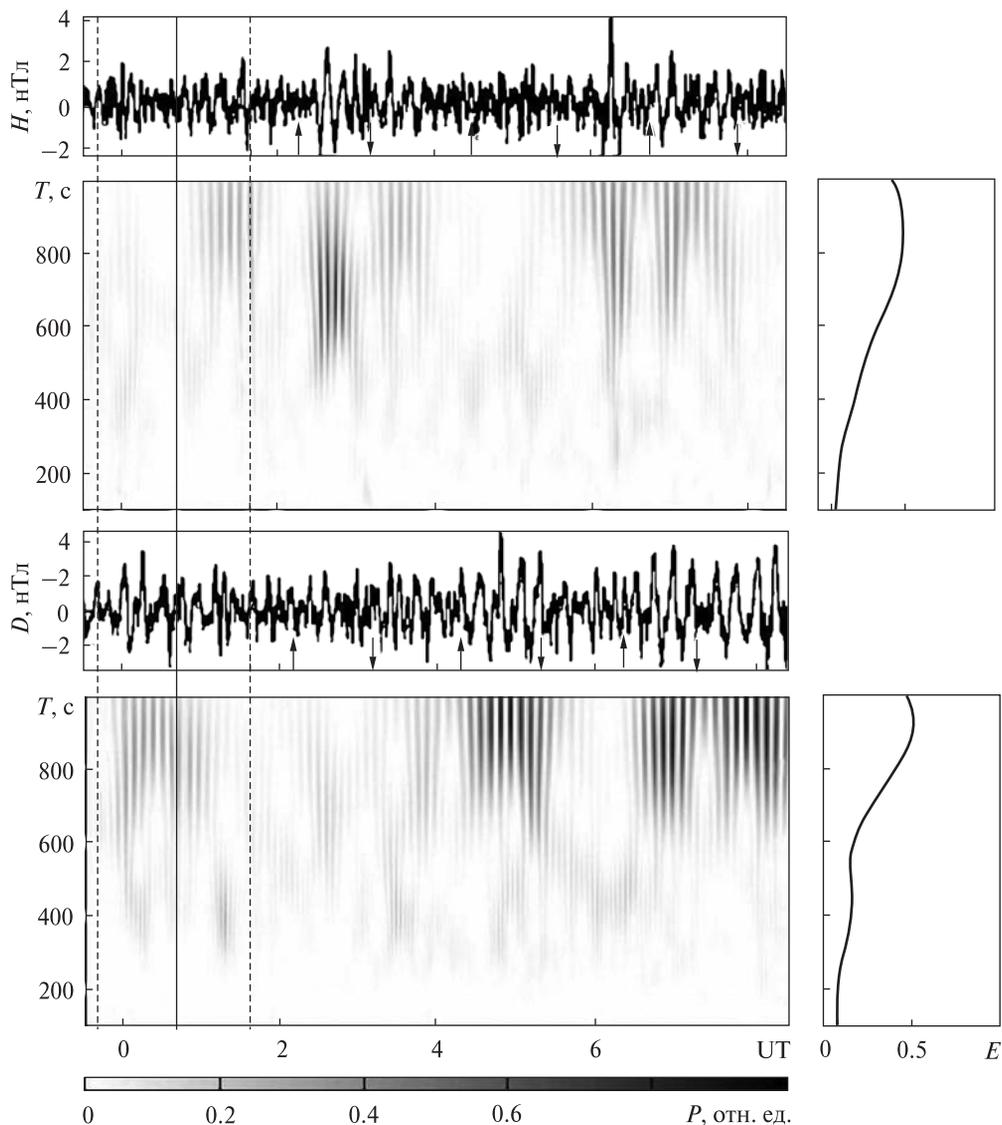


**Рис. 4.** То же, что и на рис. 1, для старта системы «Space Shuttle» с космодрома Мыс Канаверал 8 июня 2007 г. (23:38 UT). Пунктирными линиями показаны моменты восхода Солнца на высоте 200 км и на уровне Земли вблизи г. Харькова

дался с 03:50 до 05:13 для  $H$ -компонента и с 04:15 до 05:15 для  $D$ -компонента. Периоды геомагнитных пульсаций составляли около 13 мин для двух типов возмущений.

Флуктуации  $H$ - и  $D$ -составляющих магнитного поля, сопутствовавшие СР «Ariane 5» 18 июля 2004 г. в 00:44, приведены на рис. 5 ( $\Sigma K_p = 18$ ). В интервале времени примерно с 23:55 по 01:40 наблюдался восход Солнца соответственно на

высоте 200 км и на уровне Земли вблизи места расположения обсерватории. Эффекты, предположительно связанные со СР, начались примерно через 103 и 93 мин после запуска ракеты для  $H$ - и  $D$ -компонентов сигнала соответственно. Они сопровождались увеличением периода (от 6 до 11 мин) и амплитуды (в два раза) в  $H$ -компоненте и незначительным подавлением волнового процесса в  $D$ -компоненте с периода-



**Рис. 5.** То же, что и на рис. 1, для старта ракеты «Ariane 5» с космодрома Куру 18 июля 2004 г. (00:44 UT). Пунктирными линиями показаны моменты восхода Солнца на высоте 200 км и на уровне Земли вблизи г. Харькова

ми 9 мин. Продолжительность возмущения составляла 60–66 мин. Следующее изменение характера колебаний регистрировалось через 215–228 мин после СР, продолжалось оно около 67 мин. В *D*-компоненте фиксировалось увеличение периода преобладающих колебаний с 9 до 15 мин, в *H*-компоненте — уменьшение периода с 11 до 8 мин. Третье возмущение, наблюдаемое в обоих компонентах, имело запазды-

вания 315–340 мин. Оно продолжалось 93–108 мин, и периоды колебаний составляли около 14–15 мин для обоих компонентов сигнала.

### РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В наших предыдущих работах была проведена статистическая обработка отдельно для каждого

Таблица 3. Статистические характеристики основных параметров возмущений, сопутствовавших СР

Параметр	Плесецк	Байконур	Цеюянь	Тайюань	Сичан	Мыс Канаверал	Куру
$\Delta t_1$ , мин	$10.1 \pm 1.3$	$8.7 \pm 0.7$	$40.2 \pm 4.1$	$53.5 \pm 5.6$	$42.3 \pm 3.6$	$36.1 \pm 3.3$	$59.4 \pm 4.9$
$\Delta t_2$ , мин	$30.5 \pm 1.1$	$41.6 \pm 1.4$	$110.2 \pm 6.9$	$117.4 \pm 4.2$	$121.1 \pm 8.1$	$139.3 \pm 5.9$	$147.3 \pm 14.9$
$\Delta t_3$ , мин	$78.7 \pm 5.2$	$103.4 \pm 2.3$	$161.7 \pm 7.4$	$190.4 \pm 4.6$	$153.6 \pm 12.0$	$245.6 \pm 9.9$	$300.6 \pm 8.9$
$\Delta T_1$ , мин	$23.0 \pm 1.7$	$22.1 \pm 1.8$	$56.7 \pm 5.2$	$53.4 \pm 5.6$	$45.5 \pm 3.0$	$50.8 \pm 2.9$	$51.8 \pm 4.4$
$\Delta T_2$ , мин	$42.3 \pm 1.9$	$53.6 \pm 2.2$	$56.1 \pm 5.6$	$67.3 \pm 8.1$	$45.6 \pm 5.0$	$66.9 \pm 3.9$	$70.5 \pm 5.3$
$\Delta T_3$ , мин	$46.8 \pm 1.4$	$52.0 \pm 1.5$	$49.6 \pm 2.2$	$47.9 \pm 4.8$	$62.3 \pm 5.0$	$66.8 \pm 3.8$	$62.5 \pm 4.6$
$T_1$ , мин	$6.7 \pm 0.6$	$6.8 \pm 0.7$	$11.0 \pm 0.9$	$9.6 \pm 0.8$	$10.1 \pm 0.9$	$11.1 \pm 0.9$	$11.7 \pm 0.7$
$T_2$ , мин	$11.1 \pm 0.4$	$9.7 \pm 0.3$	$10.0 \pm 0.9$	$10.7 \pm 0.9$	$9.4 \pm 1.1$	$12.4 \pm 0.4$	$12.1 \pm 0.8$
$T_3$ , мин	$11.9 \pm 0.5$	$10.0 \pm 0.4$	$11.0 \pm 1.0$	$10.7 \pm 1.4$	$13.2 \pm 0.8$	$12.0 \pm 0.4$	$11.9 \pm 0.7$

из космодромов [11, 23–25]. Были выявлены три группы возмущений и определены их основные параметры (табл. 3). Видно, что значения средних времен запаздываний, продолжительностей и периодов увеличиваются по мере увеличения расстояния до космодромов.

Как и в более ранних работах, будем считать, что область эффективной генерации волн находится на высотах 100–150 км и что направление распространения возмущений близко к горизонтальному [2–7, 11, 23, 24]. Необходимо учесть, что в процессе движения ракета отклоняется от вертикального направления, и расстояние от места регистрации до области генерации возмущения отлично от географического расстояния между обсерваторией и космодромом. Для этого введем поправки к запаздыванию и расстоянию от места СР. Значения скорректированных расстояний  $R'$  приведены в табл. 4. Поправки для корректировки расстояния вводились с учетом отклонения траектории движения конкретных типов ракет за время  $\Delta t_0$  достижения середины области эффективной генерации волн.

На рис. 6 приведены зависимости средних значений запаздываний ( $a$ ), продолжительностей ( $b$ ), периодов ( $\theta$ ) и их доверительные интервалы.

Выполнен также регрессионный анализ результатов наблюдений. Построены линии регрессии для запаздываний, продолжительностей и периодов трех групп возмущений. Линии регрессии для запаздываний возмущений описыва-

ются выражениями

$$\begin{aligned} \Delta t_1 &= 2.36 + 0.006R', \\ \Delta t_2 &= 7.82 + 0.016R', \\ \Delta t_3 &= 28.83 + 0.028R' \end{aligned} \quad (1)$$

для первого, второго и третьего типов возмущений соответственно. Здесь, как и ниже в других регрессиях, временные характеристики измеряются в минутах, а расстояния — в километрах.

Очевидно, что  $\Delta t_1(0) \approx 2.4$  мин,  $\Delta t_2(0) \approx 8$  мин и  $\Delta t_3(0) \approx 29$  мин. Значение  $\Delta t_1(0)$  свидетельствует о том, что геомагнитные возмущения возникают при достижении ракетой высот  $z \approx 100$  км. Возмущения второго типа генерируются с запаздыванием около 8 мин, когда ракета движется на высотах  $z \approx 120$ –150 км почти горизонтально. Заметим, что разность  $\Delta t_3(0) - \Delta t_2(0) \approx 20$  мин близка к периоду генерируемых СР внутренних гравитационных волн (ВГВ).

Таблица 4. Скорректированные расстояния от области генерации возмущения до обсерватории

Название	Время движения ракеты до высот генерации, мин	Скорректированные расстояния от места генерации до обсерватории, км
Плесецк	3–5	1650
Байконур	3–5	2300
Цеюянь	3–5	5400
Тайюань	3–5	6100
Сичан	3–5	6300
Мыс Канаверал	9	8000
Куру	5	9000

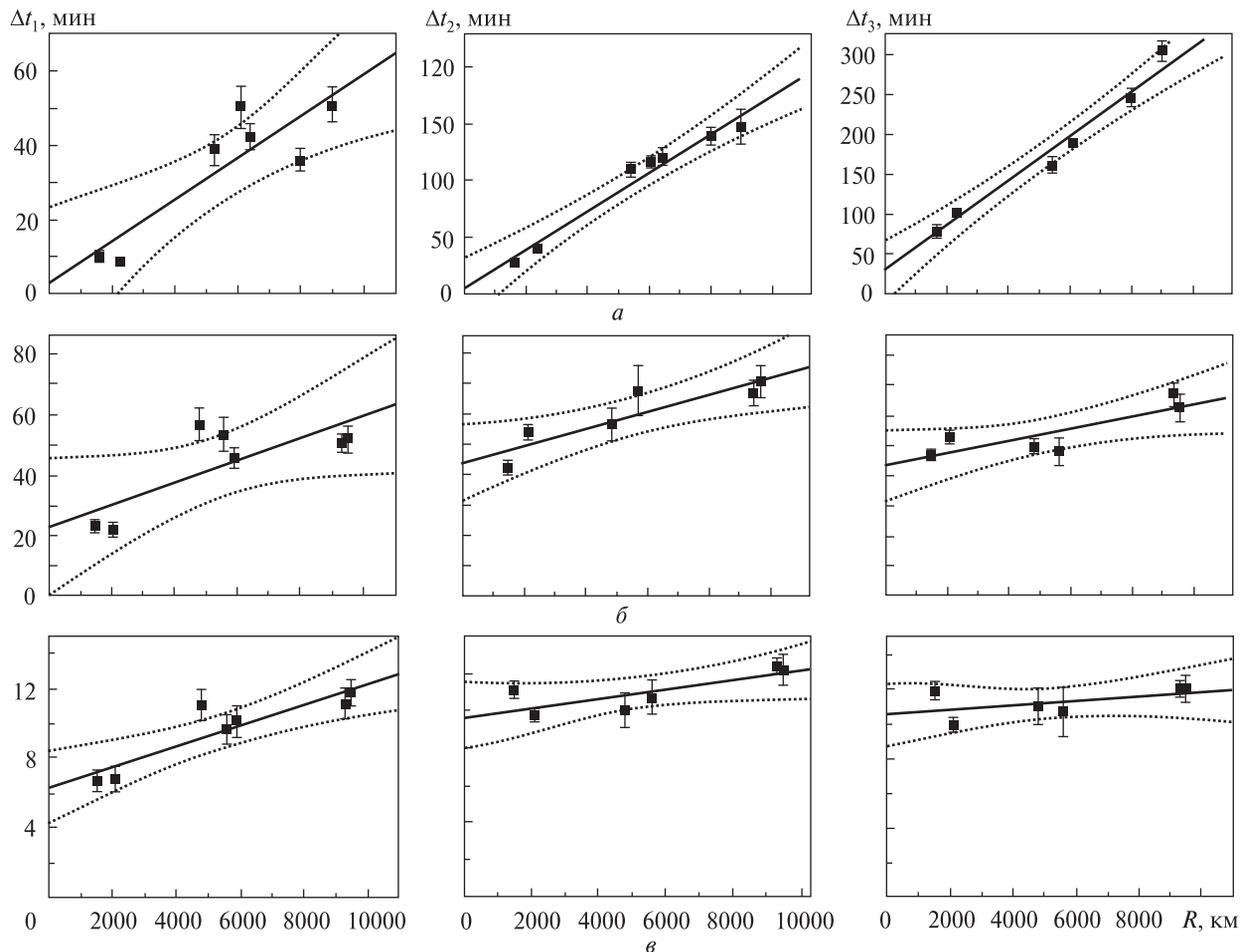


Рис. 6. Зависимости средних значений запаздываний (*a*), продолжительностей (*б*), периодов (*в*). Прямой линией показаны линии регрессии, а пунктирными линиями — доверительный интервал

Из выражений (1) следует, что времена запаздываний трех групп возмущений линейно увеличиваются с увеличением расстояния от обсерватории до места генерации возмущения. Значения продолжительностей и периодов также увеличиваются практически по линейному закону.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Регрессионный анализ зависимостей основных параметров возмущений от расстояния показал, что времена запаздываний трех групп возмущений линейно увеличивались по мере увеличения расстояния от места наблюдения до места генерации возмущений (рис. 6, *a*).

Используя выражения для линий регрессии (1), можно рассчитать скорости волн, соответствующих трем группам задержек. Значение скорости  $v'_i$  (где  $i = 1, 2, 3$ ) дается очевидным соотношением

$$v'_i = \left( \frac{d\Delta t_i}{dR'} \right)^{-1}.$$

Оказалось, что  $v'_1 \approx 2.7$  км/с,  $v'_2 \approx 1040$  м/с и  $v'_3 \approx 600$  м/с.

Значение скорости  $v'_1$  свойственно медленным магнитогидродинамическим (МГД) волнам. Такие скорости волн неоднократно наблюдались радиофизическими методами [1—10, 15, 27].

Скорость  $v'_2$  ассоциируется со скоростью ударных волн, а точнее ударно-волновых акустико-гравитационных волн (АГВ). Вблизи источника эти волны — нелинейные, и их скорость превышает скорость линейных волн. По мере удаления от места их генерации такие волны постепенно превращаются в привычные АГВ [12, 13].

Скорость  $v'_3$  имеют линейные ВГВ, которые также наблюдались ранее [2–10, 15]. Близость основных параметров второй и третьей групп возмущений дает основания предполагать, что они могут быть частями (двумя соседними периодами) одного волнового процесса.

Могут ли указанные типы волн иметь регистрируемую амплитуду в месте расположения обсерватории? Для ответа на этот вопрос заметим, что полученные значения скоростей хорошо согласуются со значениями скоростей, даваемыми радиофизическими методами [1–10, 15, 27]. Следовательно, возмущения геомагнитного поля, вероятнее всего, генерируются возмущениями электронной концентрации вблизи расположения обсерватории и не зависят от ориентации трассы распространения волн.

Как показывают наши оценки, для наиболее удаленных космодромов [25] для волн второй и третьей групп амплитуда геомагнитных пульсаций, генерируемых волновыми возмущениями концентрации в диапазоне периодов 10–20 мин, имеет порядок единиц нанотесла. Именно такие значения амплитуд возмущений наблюдались нами.

Ослабление медленных МГД-волн ранее не освещалось. Можно предположить, что ослабление этих волн не больше, чем для АГВ и ВГВ.

Что касается продолжительностей и периодов, то они изменялись практически по линейному закону в зависимости от расстояния до космодрома.

Линии регрессий для продолжительностей трех типов возмущений приведены на рис. 6, б. Видно, что значения  $\Delta T_i$  (где  $i = 1, 2, 3$ ) увеличивались от 20–30 до 60–70 мин по мере удаленности космодрома. Характерное расстояние, на котором продолжительности увеличивались в два раза, составляло около 5, 15 и 21 тыс. км для

трех типов возмущений. Выражения для регрессий имеют вид

$$\Delta T_1 = 22.81 + 0.004R,$$

$$\Delta T_2 = 44.11 + 0.003R,$$

$$\Delta T_3 = 42.98 + 0.002R.$$

Средние значения периодов преобладающих пульсаций линейно увеличивались в довольно узком интервале (7–12 мин) по мере удаленности космодрома (рис. 6, в). Значение периодов снизу ограничено, по-видимому, величиной периода Брента-Вяйсяля [12, 13], а сверху — частотной характеристикой магнитометра-флюксметра ( $T_{\max} = 17$  мин). Линии регрессии для периодов трех типов возмущений описываются выражениями

$$T_1 = 6.32 + 5.87 \cdot 10^{-4} R,$$

$$T_2 = 9.65 + 2.46 \cdot 10^{-4} R,$$

$$T_3 = 10.55 + 1.31 \cdot 10^{-4} R.$$

Физической причиной увеличения продолжительностей и периодов, скорее всего, является наличие дисперсии фазовой скорости волны в среде.

Являются ли наблюдаемые пульсации реакцией на СР? В пользу этого свидетельствуют следующие аргументы.

Во-первых, закон распределения времен запаздываний имеет достаточно хорошо выраженные максимумы. В фоновые дни этот закон близок к равномерному [11, 23–25]. Во-вторых, вычисленные нами значения скоростей хорошо согласуются со значениями скоростей, полученными другими методами [1–10, 15, 26, 27]. В-третьих, линии регрессий для запаздываний трех групп возмущений представляют собой прямые. Все это свидетельствует о том, что наблюдаемые изменения характера сигнала, вероятнее всего, связаны со СР.

## ВЫВОДЫ

1. Статистический и спектральный анализы уровня геомагнитных пульсаций, сопровождавших 149 СР с космодромов, удаленных от места регистрации на расстояния 1500–9500 км, пока-

зали, что после СР заметно изменялся характер пульсаций: увеличивался (реже уменьшался) их уровень и существенно изменялся спектральный состав.

2. Выявлено три группы возмущений. Их времена запаздываний линейно увеличивались с увеличением расстояния от места генерации возмущений до места наблюдений. Этим возмущениям соответствовали средние скорости около 2.7, 1.0 и 0.6 км/с.

Первая группа возмущений наблюдалась неуверенно. Второе и третье возмущения могли представлять одну группу возмущений.

3. Продолжительность возмущений обычно изменялась от 20—30 до 60—70 мин с увеличением расстояния от обсерватории до космодрома от 1500 до 9500 км. Продолжительности возмущений увеличивались почти по линейному закону.

Характерное расстояние, на котором продолжительности возмущений увеличивались в два раза, составляло около 5, 15 и 21 тыс. км для указанных трех групп возмущений.

4. Значения преобладающих периодов пульсаций также практически линейно изменялись с увеличением расстояния от 1500 до 9500 км, однако эти изменения были незначительными.

1. *Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П., Плотников А. В.* Регистрация ионосферных откликов на ударно-акустические волны, генерируемые при запусках ракет-носителей // *Геомагнетизм и аэрономия*. — 2002. — **42**, № 6. — С. 790—797.
2. *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. — **8**, № 2. — С. 143—162.
3. *Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В.* Волновые процессы в F-области ионосферы, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Байконур // *Геомагнетизм и аэрономия*. — 2006. — **46**, № 6. — С. 783—800.
4. *Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф.* Результаты комплексных радиофизических наблюдений волновых возмущений в геокосмосе, сопровождавших старты и полеты ракет // *Космічна наука і технологія. ДОДАТОК*. — 2003. — **9**, № 2. — С. 57—61.
5. *Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф.* Волновые возмущения в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов // *Геомагнетизм и аэрономия*. — 2004. — **44**, № 4. — С. 518—534.
6. *Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф.* Комплексные радиофизические исследования волновых возмущений в ионосфере, сопровождавших старты ракет на фоне естественных нестационарных процессов // *Радиофизика и радиоастрономия*. — 2004. — **9**, № 1. — С. 5—28.
7. *Бурмака В. П., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В.* Волновые возмущения в геокосмосе, сопровождавшие старты и полеты ракет «Союз» и «Протон» // *Радиофизика и радиоастрономия*. — 2005. — **10**, № 3. — С. 254—272.
8. *Гармаш К. П., Гоков А. М., Костров Л. С. и др.* Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 2. Процессы в искусственно-возмущенной ионосфере. Вариации характеристик радиосигналов. Моделирование возмущений // *Вестник Харьков. ун-та. Радиофизика и электроника*. — 1999. — № 427, вып. 1. — С. 3—22.
9. *Гармаш К. П., Костров Л. С., Розуменко В. Т. и др.* Глобальные возмущения ионосферы, вызванные стартом ракеты, на фоне магнитной бури // *Геомагнетизм и аэрономия*. — 1999. — **39**, № 1. — С. 72—78.
10. *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. — **8**, № 2. — С. 163—180.
11. *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.
12. *Гершман Б. Н.* Динамика ионосферной плазмы. — М.: Наука, 1974. — 256 с.
13. *Госсард Э. Э., Хук У. Х.* Волны в атмосфере. — М.: Мир, 1978. — 532 с.
14. *Засов Г. Ф., Карлов В. Д., Романчук Т. Е. и др.* Наблюдение возмущений в нижней ионосфере во время экспериментов по программе Союз—Аполлон // *Геомагнетизм и аэрономия*. — 1977. — **17**, № 2. — С. 346—348.
15. *Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф.* Доплеровское радиозондирование возмущений в средней ионосфере, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов // *Радиофизика и радиоастрономия*. — 1999. — **4**, № 3. — С. 227—246.
16. *Нагорский П. М.* Неоднородная структура области F ионосферы, образованная ракетами // *Геомагнетизм и аэрономия*. — 1998. — **38**, № 2. — С. 100—106.

17. Нагорский П. М., Таращук Ю. Е. Искусственная модификация ионосферы при стартах ракет, выводящих на орбиту космические аппараты // Изв. вузов. Физика. — 1993. — № 10. — С. 94—106.
18. Соколова О. И., Краснов В. М., Николаевский Н. Ф. Изменения геомагнитного поля под влиянием запусков ракет с космодрома Байконур // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2003. — 46, № 4. — С. 561—565.
19. Сорокин В. М., Федорович Г. В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. — М.: Энергоиздат, 1982. — 134 с.
20. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. — 2003. — 8, № 1. — С. 59—106.
21. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 // Нелинейный мир. — 2006. — 4, № 12. — С. 655—697.
22. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // Нелинейный мир. — 2007. — 5, № 4. — С. 55—97.
23. 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.
24. Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с космодромов КНР // Космічна наука і технологія. — 2008. — 14, № 4. — С. 92—101.
25. 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.
26. Arendt P. R. Ionospheric undulations following Apollo 14 Launching // Nature. — 1971. — 231. — P. 438—439.
27. Chernogor L. F., Garmash K. P., Kostrov L. S., et al. Perturbations in the ionosphere following U.S. powerful space vehicle launching // Radio Physics and Radio Astronomy. — 1998. — 3, N 2. — P. 181—190.

Надійшла до редакції 30.05.08

K. P. Garmash, S. G. Leus,  
L. F. Chernogor, M. A. Shamota

#### GEOMAGNETIC PULSATIONS ASSOCIATED WITH ROCKET LAUNCHES FROM DIFFERENT COSMODROMES OF THE WORLD

We analysed geomagnetic field variations in 1—1000 s period range that accompanied 149 rocket launches of different types from different cosmodromes in 2002—2008. The measurements were made near Kharkiv city (distance from the cosmodromes of about 1500—9500 km). The statistical analysis revealed, three groups of disturbances. Times of delays and durations were increased with the increase of the distance from the cosmodromes. The 6-14 min geomagnetic micropulsation periods became dominant, and their amplitudes attained a value of 3—5 nT.