

УДК 550.385.37: 550.388

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 космодромов Мыс Канаверал и Куру

Надійшла до редакції 31.03.08

Проаналізовано результати спостережень варіацій геомагнітного поля в діапазоні періодів 1—1000 с, які супроводжували старти 11 систем «Space Shuttle» з космодрому Мыс Канаверал та 15 ракет «Ariane-5» з космодрому Куру в 2002—2007 рр. Вимірювання виконано поблизу м. Харкова (віддалення від космодромів приблизно 10000 км). Для ракет «Ariane-5» спостерігались три групи збурень. Запізнення склали 28—88, 193—238 і 300—330 хв, а тривалості 30—70, 33—63 і 30—70 хв. У пульсаціях переважали періоди 12—14 хв. Для систем «Space Shuttle» виявлено також три групи збурень, що мали запізнєння 13—58, 133—163 і 193—253 хв. Їхні тривалості склали 36—60, 54—90 і 63—93 хв відповідно. У геомагнітних пульсаціях переважали періоди 6—10 хв для першої групи та 10—14 хв для другої та третьої груп. Амплітуди цих пульсацій досягали 3—5 нТл.

### ВВЕДЕНИЕ

Старты и полеты ракет относятся к одним из самых мощных источников антропогенного воздействия на атмосферу и геокосмос. Степень воздействия ракет на околоземную среду определяется типом ракеты, мощностью двигателей и количеством запусков. В окрестности космического аппарата возникают возмущения концентрации электронов, электрического и магнитного полей, величиной 50÷100 %, 5÷50 нТл и 1÷5 мВ/м соответственно [2]. Эти возмущения могут перемещаться на значительные расстояния, т. е. локальные процессы могут привести к крупномасштабным возмущениям и даже иметь глобальный характер. Необходимо учесть тот факт, что система Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (ЗАИМ) является открытой динамической нелинейной системой и в ней возможны триггерные механизмы высвобождения энергии [20—22]. Следовательно, эффекты стартов ракет (СР) могут иметь отклик во всех

подсистемах системы ЗАИМ, распространяться на большие расстояния и иметь определенные последствия не только вблизи места воздействия.

Исследованию вызванных СР возмущений ионосферы и геокосмоса посвящен ряд работ [1—11, 14—18, 23—27]. В основном анализе подвергались экспериментальные данные, полученные радиофизическими методами, и изучались ионосферные эффекты СР [1—10, 14—17, 25—27]. Исследований, посвященных эффектам стартов ракет в магнитном поле, к настоящему времени известно мало [11, 18, 23, 24].

В наших предыдущих работах [11, 23, 24] изложены результаты анализа временных вариаций магнитного поля Земли в диапазоне геомагнитных пульсаций, сопровождавших старты ракет с космодромов Плесецк, Байконур и КНР. Регистрация пульсаций осуществлялась вблизи г. Харьков (удаления около 1500, 2100 и 5000—6000 км соответственно). Практически всем рассмотренным стартам ракет сопутствова-

Таблица 1. Краткие сведения о ракетах «Space Shuttle» и «Ariane-5» (в скобках — для модификации «Ariane-5G»)

Тип ракеты	«Space Shuttle»	«Ariane-5 (-5G)»
Полная масса, т	2045	710
Начальная тяга, МН	28.6	—
Высота, м	56.14	59
Низкоорбитальная (на высоте 200 км) полезная нагрузка, кг	29500	21000 (16000)
<b>Параметры нулевой ступени (ускорителя)</b>	Ускоритель	Нулевая ступень
Масса, т	1209	530
Тяга, МН	25.8	6.47 (6.36)
Диаметр, м	3.71	3
Высота, м	50	31.2
Время работы, с	123	129
<b>Параметры первой ступени (топливного бака)</b>	Топливный бак	Первая ступень
Масса, т	756	170
Тяга, МН	—	1.34 (1.11)
Диаметр, м	8.38	5.4
Высота, м	47	29
Время работы, с	—	650 (589)
<b>Параметры второй ступени (Орбитер)</b>	Вторая ступень (Орбитер)	Вторая ступень
Масса, т	80	10
Тяга, МН	5.01	0.065 (0.027)
Диаметр, м	23.79	5.4
Высота, м	37.24	4.5
Время работы, с		960 (1100)

ли заметные или значительные изменения характера колебаний горизонтальных компонент геомагнитного поля в диапазоне периодов  $T = 1-1000$  с.

Представляет интерес изучение возможности возникновения эффектов СР на расстояниях около 10000 км. Для этого удобными являются соответственно американский и европейский космодромы Мыс Канаверал (США) и Куру (Фр. Гвиана), удаления до которых от места регистрации составляют около 10000 км.

Целью настоящей работы является изложение результатов анализа измеренных вблизи г. Харькова вариаций уровня и спектрального состава геомагнитных пульсаций, которые сопровождали старты 11 систем «Space Shuttle» и

Таблица 2. Краткие сведения о космодромах

Название	Координаты		Расстояние от космодрома до обсерватории, км	Количество запусков
	широта	долгота		
Мыс Канаверал	28.5° с. ш.	80.5° з. д.	9338	11
Куру	5.15° с. ш.	52.63° з. д.	9523	15

15 ракет «Ariane-5» с космодромов на мысе Канаверал и Куру соответственно.

Программно-аппаратный измерительный комплекс, использовавшийся для наблюдений, описан в работе [10].

Методики измерений и анализа аналогичны описанным авторами в работе [11].

#### СВЕДЕНИЯ О РАКЕТАХ И КОСМОДРОМАХ

Для изучения возможности распространения возмущения на расстояния порядка 10000 км целесообразно анализировать флуктуации компонентов геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам наиболее мощных ракет. Такими ракетами являются система «Space Shuttle» и ракета «Ariane-5» — наиболее мощные из американских и европейских космических аппаратов [15]. Характеристики и основные параметры этих ракет приведены в табл. 1. Видно, что согласно классификации [15] система «Space Shuttle» относится к классу сверхтяжелых ракет, а «Ariane-5» — к классу тяжелых ракет.

Краткие сведения о космодромах Мыс Канаверал и Куру приведены в табл. 2. Видно, что оба космодрома примерно равноудалены от места регистрации.

#### УРОВЕНЬ МАГНИТНОЙ ВОЗМУЩЕННОСТИ

Для общего контроля уровня магнитной возмущенности использовались  $A_p$ - и  $K_p$ -индексы, которые представлены в интернете (табл. 3). В этой таблице приведены значения индексов в день СР, а также за сутки и двое суток до него. Как видно из таблицы, старты имели место как в магнитоспокойные ( $\Sigma K_p < 24$ ), так и в магнитовозмущенные ( $\Sigma K_p \geq 24$ ) сутки. Первых было 18 сут, вторых — 8 сут.

Таблица 3. Уровень магнитной возмущенности накануне и в день запуска ракет

Ракета	Тип	Дата	Время, UT	2 сут до СР		1 сут до СР		Сутки с СР	
				$A_p$	$K_p$	$A_p$	$K_p$	$A_p$	$K_p$
«Ariane»	5	5 июля 2002 г.	23:22	7	18	7	16	13	24
«Ariane»	5	28 августа 2002 г.	22:45	18	26	15	25	10	21
«Ariane»	5G	9 апреля 2003 г.	22:52	6	14	20	31	25	29
«Ariane»	5	11 июня 2003 г.	22:38	28	31	27	32	15	25
«Ariane»	5	27 сентября 2003 г.	13:14	28	33	17	26	9	18
«Ariane»	5	2 марта 2004 г.	7:17	21	28	18	27	17	27
«Ariane»	5G	18 июля 2004 г.	0:44	12	19	24	29	9	18
«Ariane»	5	12 февраля 2005 г.	19:49	17	25	11	19	5	10
«Ariane»	5G	13 октября 2005 г.	22:32	6	10	1	1	4	8
«Ariane»	5	11 марта 2006 г.	22:32	4	8	12	20	12	20
«Ariane»	5	13 октября 2006 г.	20:56	3	7	5	11	24	28
«Ariane»	5	8 декабря 2006 г.	22:08	28	31	25	35	25	28
«Ariane»	5	11 марта 2007 г.	22:03	2	3	4	7	8	14
«Ariane»	5	4 апреля 2007 г.	22:29	3	4	4	9	2	3
«Ariane»	5	14 ноября 2007 г.	22:06	2	5	8	17	9	16
«Space Shuttle»	«Atlantis»	8 апреля 2002 г.	20:44	5	13	7	17	5	11
«Space Shuttle»	«Endeavour»	5 июня 2002 г.	21:22	12	23	17	26	10	19
«Space Shuttle»	«Atlantis»	7 октября 2002 г.	19:45	29	32	19	25	39	36
«Space Shuttle»	«Endeavour»	24 ноября 2002 г.	0:49	24	30	19	27	16	27
«Space Shuttle»	«Discovery»	26 июля 2005 г.	14:39	5	12	6	13	6	13
«Space Shuttle»	«Columbia»	4 июля 2006 г.	18:37	2	5	4	8	13	19
«Space Shuttle»	«Atlantis»	9 сентября 2006 г.	16:29	8	11	4	8	2	3
«Space Shuttle»	«Discovery»	10 декабря 2006 г.	1:47	2	3	3	6	5	11
«Space Shuttle»	«Atlantis»	8 июня 2007 г.	23:38	2	3	3	6	8	16
«Space Shuttle»	«Endeavour»	8 августа 2007 г.	22:38	12	17	23	28	6	11
«Space Shuttle»	«Discovery»	23 октября 2007 г.	15:38	4	8	5	11	7	13

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

**Старты ракет «Ariane-5».** Для примера рассмотрим два СР типа «Ariane-5».

На рис. 1, а приведены временные вариации и вейвлет-спектры горизонтальных компонентов геомагнитного поля, сопровождавших СР 12 февраля 2005 г. в 19:49 (здесь и далее используется время UT). В эти сутки  $\Sigma K_p = 10$ . Первое, заметное в обоих компонентах, изменение характера колебаний наблюдалось через 47 мин после старта. Оно имело продолжительность 34 мин и период 11 мин. Следующий квазипериодический процесс, сопровождавшийся увеличением амплитуды от 1 до 2 нТл, имел запаздывания 222 и 226 мин, продолжительность 41 мин и периоды около 14—15 мин для *H*- и *D*-компонентов сигнала соответственно.

Третье возмущение продолжительностью 82—84 мин регистрировалось через 300—306 мин после момента старта. Периоды пульсаций составляли 11—15 мин для обеих компонент.

Следующий запуск ракеты «Ariane-5» произошел 13 октября 2006 г. в 20:56 (рис. 1, б). Эти сутки относились к магнитовозмущенным, так как  $\Sigma K_p = 28$ . Примерно через 34—41 мин наблюдалось изменение характера сигнала, которое продолжалось примерно 45—50 мин и сопровождалось увеличением периода в *D*-компоненте (с 7 до 15 мин). Второй тип возмущения имел запаздывания 139—158 мин, длился 45—56 мин. В *H*-компоненте наблюдалось появление высокочастотной составляющей и уменьшение периода от 15 до 8 мин. В *D*-компоненте период колебания увеличился от 11 до 15 мин, а амплитуда возросла с 2 до 3.5 нТл.

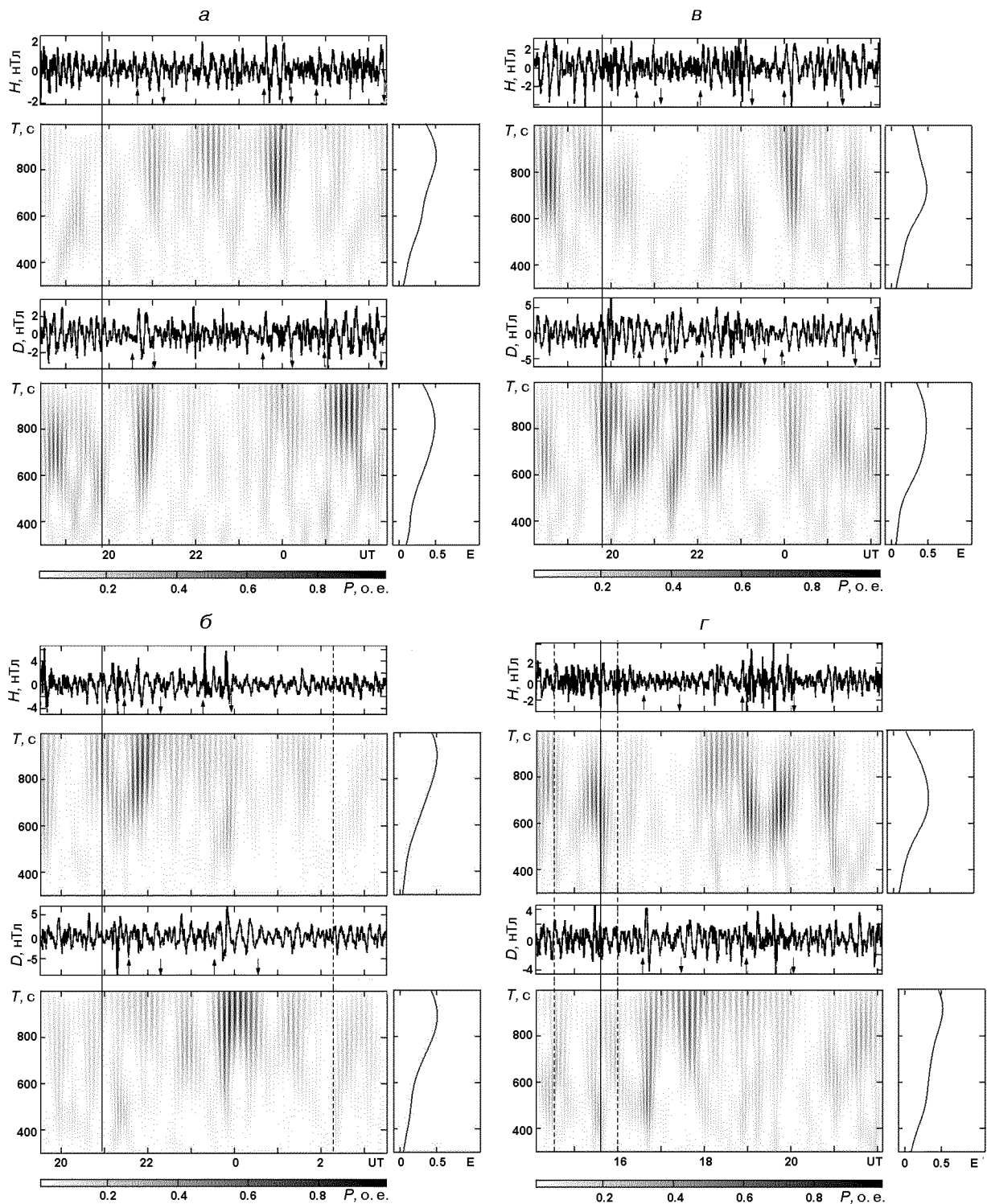


Рис. 1. Временные вариации  $H$ - и  $D$ -компонентов геомагнитного поля, соответствующие им вейвлет-спектры и распределения средней энергии  $E$  колебаний по периодам в диапазоне периодов 300—1000 с, сопровождавшие старт ракет США. Сплошной вертикальной линией показан момент старта ( $a$  — «Ariane-5», космодром Куру, 19:49 UT 12 февраля 2005 г.;  $б$  — «Ariane-5», космодром Куру, 20:56 UT 13 октября 2006 г.;  $в$  — «Space Shuttle», Мыс Канаверал, 19:45 UT 7 октября 2002 г.;  $г$  — «Space Shuttle», Мыс Канаверал, 15:38 UT 23 октября 2007 г.). Стрелками вверх и вниз отмечены моменты начала и конца изменений характера сигнала. Штриховые линии — моменты захода Солнца на уровне земли и на высоте 200 км вблизи г. Харькова

**Старты систем «Space Shuttle».** В качестве примера рассмотрим два старта космической системы «Space Shuttle».

На рис. 1, в представлены вариации  $H(t)$  и  $D(t)$ , сопутствовавшие старту космического челнока «Atlantis» 7 октября 2002 г. в 19:45. В день СР имела место магнитная буря (максимальное значение  $K_p = 6$ ,  $\Sigma K_p = 36$ ). Начиная с 20:29 и 20:32, наблюдалось подавление волнового процесса с периодами 7 и 13 мин в  $H$ - и  $D$ -компонентах, продолжавшееся 38 мин. Следующее возмущение возникло через 135–137 мин после СР и продолжалось 68–84 мин. Периоды составляли 13–15 мин. Третье изменение характера сигнала регистрировалось в интервале времени с 00:00 до 00:10 для  $H$ -компонента и до 00:19 для  $D$ -компонента. Периоды колебаний уровня обоих составляющих равнялись 11–12 мин.

Старт космического челнока «Discovery» 23 октября 2007 г. в 15:38 практически совпал с прохождением солнечного терминатора над обсерваторией вблизи г. Харькова (рис. 1, г). Сутки со СР относились к магнитоспокойным ( $\Sigma K_p = 13$ ). Этот факт затрудняет принятие решений о наличии эффектов СР, так как, скорее всего, волновые процессы от двух источников наложились. Значительное увеличение периода (от 7 до 15 мин) и увеличение амплитуды (от 1.5 до 4 нТл) в  $D$ -компоненте фиксировалось примерно через 53 мин и продолжалось 60 мин. В  $H$ -компоненте в этом же интервале времени наблюдалось незначительное подавление волнового процесса с периодом 7 мин.

Следующее возмущение проявилось около 18:55–19:00, оно имело четко выраженный характер в  $H$ - и  $D$ -компонентах (появление высокочастотной составляющей сигнала). Это возмущение продолжалось примерно 65–67 мин, оно имело периоды 10–12 мин для обоих компонентов.

**Результаты спектрального анализа.** Вейвлет-спектры свидетельствуют о наличии трех групп возмущений с периодами 10–14 мин (см. рис. 1, а). На рис. 1, б особенно четко проявляется второй тип возмущений, имеющий запаздывания 139–158 мин.

Спектрограммы временных вариаций уровня геомагнитных пульсаций, сопровождавших старты «Space Shuttle», приведены на рис. 1, в и г.

На них также видны три группы возмущений. После старта космического челнока 7 октября 2002 г. в основном наблюдалось увеличение периода волнового процесса. Для старта системы «Space Shuttle» 23 октября 2007 г. на спектрограмме временных вариаций уровня  $H$ -компонента особенно четко проявляется возмущение с запаздыванием около 200 мин и периодом 10–12 мин. В то же время усиление уровня пульсаций в  $D$ -компонента имело место примерно через 60 и 120 мин после старта космического челнока.

Амплитуда возмущений была больше для  $D$ -компонента для всех СР.

**Результаты статистического анализа.**

Гистограммы времен запаздывания  $\Delta t$ , продолжительностей  $\Delta T_i$  и периодов  $T_i$  преобладающих колебаний для стартов ракет «Ariane-5» приведены на рис. 2–4 (фрагменты а). Обработка выполнена для 15 стартов ракет. Видно, что после СР имели место три группы возмущений с запаздываниями  $\Delta t_1 \approx 13$ –88 мин,  $\Delta t_2 \approx 193$ –238 мин и  $\Delta t_3 \approx 300$ –330 мин, продолжительностями  $\Delta T_1 \approx 30$ –70 мин,  $\Delta T_2 \approx 33$ –63 мин,  $\Delta T_3 \approx 33$ –70 мин и периодами колебаний 12–14 мин.

Гистограммы параметров трех групп возмущений для стартов системы «Space Shuttle» приведены на рис. 2–4 (фрагменты в). Гистограммы

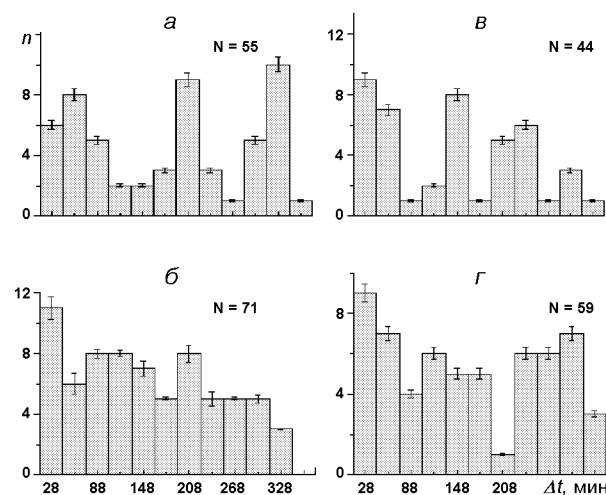


Рис. 2. Гистограммы времен запаздывания  $\Delta t$ : а, в — для возмущений геомагнитного поля, сопутствовавших СР «Ariane-5» и «Space Shuttle», б, г — для соответствующих фоновых дней

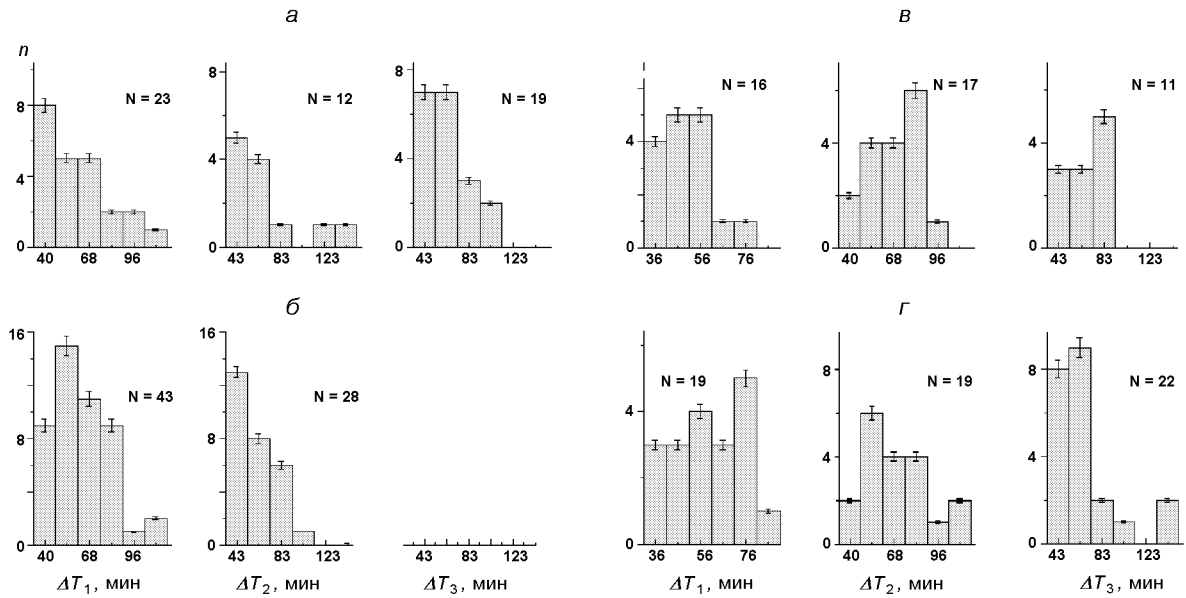


Рис. 3. Гистограммы продолжительностей  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$ ,  $\Delta T_3$ : а, в — для возмущений геомагнитного поля, сопутствовавших СР «Ariane-5» и «Space Shuttle» соответственно, б, г — для соответствующих фоновых дней

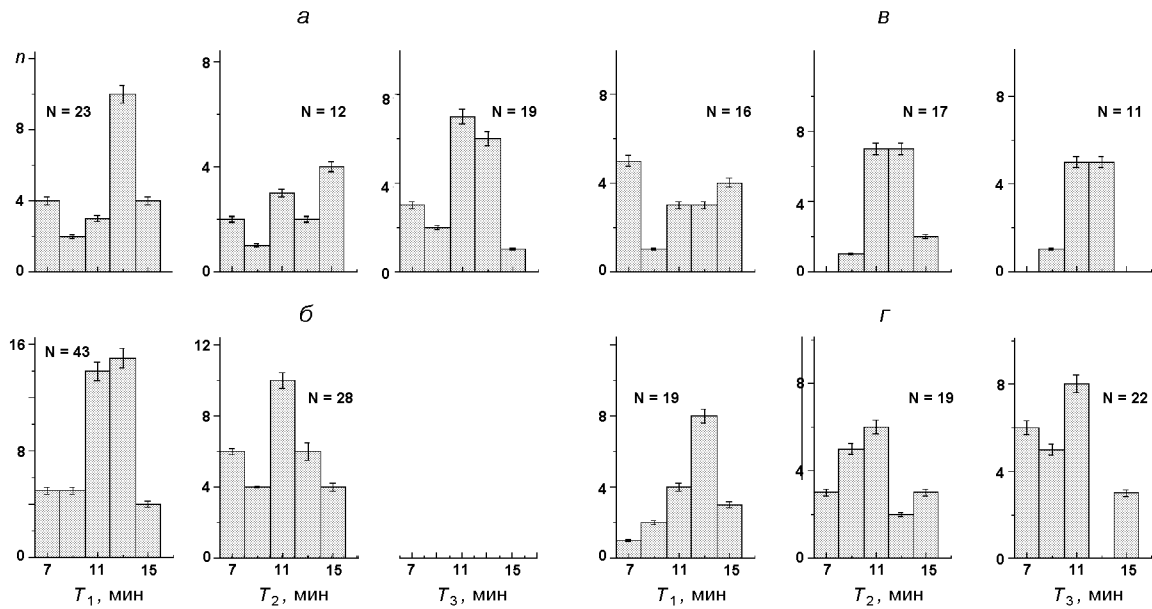


Рис. 4. Гистограммы периодов  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ : а, в — для возмущений геомагнитного поля, сопутствовавших СР «Ariane-5» и «Space Shuttle» соответственно, б, г — для соответствующих фоновых дней

Таблица 4. Статистические характеристики основных параметров возмущений, сопутствовавших СР «Ariane-5» ( $\Delta t$  — времена запаздывания возмущений,  $\Delta T$  и  $T$  — их продолжительности и периоды)

Параметр	Значение
$\Delta t_1$ , мин	$59.4 \pm 4.9$
$\Delta t_2$ , мин	$214.0 \pm 5.9$
$\Delta t_3$ , мин	$292.1 \pm 9.9$
$\Delta T_1$ , мин	$75.1 \pm 8.3$
$\Delta T_2$ , мин	$60.9 \pm 5.7$
$\Delta T_3$ , мин	$62.5 \pm 4.6$
$T_1$ , мин	$11.7 \pm 0.7$
$T_2$ , мин	$12.1 \pm 0.8$
$T_3$ , мин	$11.9 \pm 0.7$

свидетельствуют о трех группах возмущений с запаздываниями  $\Delta t_1 \approx 13\text{--}58$  мин,  $\Delta t_2 \approx 133\text{--}163$  мин и  $\Delta t_3 \approx 193\text{--}253$  мин, продолжительностями  $\Delta T_1 \approx 36\text{--}60$  мин,  $\Delta T_2 \approx 54\text{--}90$  мин и  $\Delta T_3 \approx 63\text{--}93$  мин и периодами колебаний  $T_1 \approx 6\text{--}10$  мин,  $T_2 \approx 10\text{--}14$  мин и  $T_3 \approx 10\text{--}14$  мин.

Результаты статистической обработки массивов значений запаздываний, продолжительностей и периодов колебаний для всех СР приведены в табл. 4. и 5.

Аналогичная статистическая обработка была выполнена для фоновых дней (за день до и на следующий день после СР). Определение параметров изменений характера сигнала проводилось относительно времен реальных стартов. Результаты статистической обработки регистраций для фоновых дней для двух типов ракет приведены на рис. 2—4 (фрагменты б, г). Видно, что экспериментальный закон распределения величин времен запаздываний появления волновых возмущений близок к равномерному, что свидетельствует о случайной природе возмущений в день до и день после СР.

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Практически после всех СР на регистрациях флуктуаций горизонтальных компонентов геомагнитного поля наблюдались изменения характера сигнала. Обычно увеличивалась амплитуда и период геомагнитных пульсаций. Иногда колебания подавлялись. Скорее всего, при этом при-

Таблица 5. Статистические характеристики основных параметров возмущений, сопутствовавших СР «Space Shuttle» ( $\Delta t$  — времена запаздывания возмущений,  $\Delta T$  и  $T$  — их продолжительности и периоды)

Параметр	Значение
$\Delta t_1$ , мин	$36.1 \pm 3.3$
$\Delta t_2$ , мин	$139.3 \pm 5.9$
$\Delta t_3$ , мин	$245.6 \pm 9.9$
$\Delta T_1$ , мин	$50.8 \pm 2.9$
$\Delta T_2$ , мин	$66.9 \pm 3.9$
$\Delta T_3$ , мин	$66.8 \pm 3.8$
$T_1$ , мин	$11.1 \pm 0.9$
$T_2$ , мин	$12.4 \pm 0.4$
$T_3$ , мин	$12.0 \pm 0.4$

ходил волновой процесс, фаза которого была сдвинута на  $180^\circ$  по отношению к фазе волнового процесса. Их наложение наблюдалось как подавление сигнала.

Важно, что вызванные стартами ракет пульсации геомагнитного поля мало чем отличались от естественных пульсаций [11, 23, 24]. Поэтому возникающие вслед за стартами изменения характера сигнала не дают полной уверенности, что эти изменения вызваны стартами ракет. Такой уверенности прибавляют результаты статистического анализа.

Как видно из рис. 2, есть три группы времен запаздывания возмущений геомагнитного поля. Конечно, число СР «Ariane-5» за пять лет было относительно небольшим (15 событий). Тем не менее, все три группы возмущений наблюдались уверенно.

Продолжительности трех типов возмущений были близки между собой и составляли 30—70 мин. Периоды преобладающих колебаний обычно находились в пределах от 12 до 14 мин.

Считая, что названные группы возмущений вызваны СР, оценим скорости их распространения. Как и ранее, будем полагать, что область эффективной генерации волн находится на высотах 100—150 км [2—7, 11, 23, 24] и что направление распространения возмущений близко к горизонтальному. Время движения  $\Delta t_0$  ракеты «Ariane-5» до середины этой области составляет около 5 мин. За это время ракета отклоняется в восточном направлении примерно на  $\Delta R \approx 500$  км. При этом скорректированные задержки  $\Delta t' = \Delta t - \Delta t_0$ , а скорректированные

расстояния  $R' = R - \Delta R \approx 9000$  км. Трех задержкам, приведенным в табл. 4, соответствуют значения скорректированных скоростей  $v'_1 \approx 2.5-3.1$  км/с,  $v'_2 \approx 680-740$  м/с и  $v'_3 \approx 500-530$  м/с.

При стартах системы «Space Shuttle» также наблюдаются три группы задержек (см. рис. 2—4, фрагменты  $\vartheta$ ). Как и при СР «Ariane-5», длительности возмущений во всех группах составляли 40—90 мин, а периоды преобладающих колебаний изменялись от 10 до 14 мин.

Оценим далее скорости распространения возмущений. Учтем, что траектории полета системы «Space Shuttle» заметно отличается от траекторий ракет «Союз», «Протон» и «Ariane-5». У космических челноков траектория более пологая. Высоты эффективной генерации волн система «Space Shuttle» достигает примерно через время  $\Delta t_0 \approx 9$  мин после старта. За это время система удаляется от космодрома примерно в восточном направлении на 1000—1500 км. Примем, что в среднем  $\Delta R \approx 1300$  км. Тогда  $R' \approx 8000$  км. Скорректированным по данным табл. 5 задержкам  $\Delta t'$  соответствуют скорректированные скорости  $v'_1 \approx 4.4-5.5$  км/с,  $v'_2 \approx 980-1070$  м/с и  $v'_3 \approx 540-590$  м/с.

Видно, что значения скоростей при СР «Ariane-5» и стартах системы «Space Shuttle» достаточно близки между собой. Близки они и к скоростям, наблюдаемым при СР с космодромов Плесецк ( $v'_1 \approx 4.9-6.1$  км/с,  $v'_2 \approx 880-910$  м/с и  $v'_3 \approx 325-400$  м/с), Байконур ( $v'_1 \approx 7-12$  км/с,  $v'_2 \approx 800-1100$  м/с и  $v'_3 \approx 300-440$  м/с) и космодромов Китая ( $v'_1 \approx 2.0-3.7$  км/с,  $v'_2 \approx 800-970$  м/с и  $v'_3 \approx 500-600$  м/с) [2—7, 11, 23, 24].

Значение скорости  $v_1$ , по-видимому, зависящее от состояния ионосферной плазмы и, вообще говоря, от направления по отношению к геомагнитному полю, свойственно медленным магнитогидродинамическим волнам.

Значение скорости  $v_2$ , изменяющееся от 700 до 1100 м/с относится, скорее всего, к ударно-волновым (нелинейным в начале пути) акустико-гравитационным (АГВ) волнам, представляющим собой волны плотности. Вблизи места генерации этих волн их относительная амплитуда достаточно большая (0.5—1), поэтому их именуют ударными. По мере удаления волн от места

их генерации они постепенно превращаются в привычные АГВ [12, 13]).

Скорость  $v_3 \approx 300-600$  м/с имеют линейные внутренние гравитационные волны. Не исключено, что задержки  $\Delta t_2$  и  $\Delta t_3$  могут относиться к одной и той же волне, к двум ее соседним периодам. При этом  $\Delta t_3 - \Delta t_2 \approx T$ , где  $T$  — период внутренней гравитационной волны. Значение  $T \approx 50-60$  мин характерно для относительно не сильно удаленных космодромов (Плесецк и Байконур). Для космодромов, удаленных на расстояние около 10000 км, значение  $T \approx 90-100$  мин.

Попытаемся ответить на вопросы, могут ли указанные типы волн распространяться на глобальные расстояния; как быстро они ослабевают; могут ли они вызывать регистрируемые возмущения вблизи г. Харькова?

Начнем с волн, которым соответствуют скорости  $v_2$  и  $v_3$ . По нашим оценкам, для них декремент затухания  $\Gamma \approx (2.5-3) \cdot 10^{-4}$  км<sup>-1</sup>. Это означает, что при СР с космодромов Мыс Канаверал и Куру амплитуда волн уменьшается в  $\beta = \exp(\Gamma R')$  раз. При  $R' \approx 7000$  км  $\beta \approx 5.8-8.2$ , а при  $R' \approx 9000$  км  $\beta \approx 9.5-14.9$ .

Кроме того, АГВ (внутренние гравитационные волны) ослабляются за счет расходимости волны. При каналировании этих волн в термосферном волноводе возмущение плотности и давления в атмосфере  $\Delta p$  убывает как  $1/\sqrt{R'}$ . Если для Байконура  $R' \approx 2500$  км, то для космодромов Мыс Канаверал и Куру  $R' \approx 7000$  км и  $R' \approx 9000$  км. При этом значение  $\Delta p$  уменьшается в 1.7 и 1.9 раза по сравнению с возмущением давления при СР с космодрома Байконур. В целом при СР с американских континентов волны ослабляются в 10—14 и 18—28 раз. При  $\Delta p/p = 1$  вблизи места генерации АГВ (внутренние гравитационные волны) в окрестности г. Харькова  $\Delta p/p \approx 0.07-0.1$  и  $\Delta p/p \approx 0.03-0.05$  при СР с космодромов Мыс Канаверал и Куру.

Возмущения давления в волне приводят к волновым возмущениям концентрации электронов  $N$  и геомагнитного поля. При указанных значениях  $\Delta p/p$  относительные возмущения  $\Delta N/N \approx 0.01-0.1$ . Такой эффект обнаруживается радиофизическими методами [1—9, 14—17].



Как показывают наши оценки, при  $\Delta N/N \approx 0.01-0.1$ , амплитуда геомагнитных пульсаций, генерируемых волновыми возмущениями  $N$  в диапазоне периодов 10—20 мин, порядка единиц нанотесла. Именно такие значения амплитуд возмущений наблюдались нами.

Ослабление медленных МГД-волн ранее не освещалось. Можно предположить, что оно не больше, чем ослабление АГВ.

Таким образом, есть основания считать, что возмущения, вызванные СР с космодромов Мыс Канаверал и Куру, могут доходить до г. Харькова и быть зарегистрированными.

Об этом свидетельствуют результаты многолетних исследований, в которых принимал участие один из авторов настоящей работы [2—9, 15, 20—22, 26]. Важно, что скорости распространения возмущений, даваемые радиофизическими и магнитометрическими методами, близки. Это означает, что геомагнитные пульсации генерируются возмущениями  $N$  вблизи места регистрации пульсаций. По этой причине скорости распространения, получаемые посредством геомагнитных наблюдений, скорее всего, не зависят (или слабо зависят) от ориентации трассы распространения по отношению к геомагнитному полю.

Дополнительным аргументом в пользу генерации геомагнитных пульсаций СР является сравнение гистограмм времен запаздываний для дней с СР и фоновых дней. Как и следовало ожидать, в фоновые дни закон распределения задержек близок к равномерному.

Следует также иметь в виду, что мощность системы «Space Shuttle» примерно в 3—7 раз больше мощности ракет «Протон» и «Союз» соответственно. Это означает, что и величина создаваемых в месте генерации возмущений в 3—7 раз больше, чем при стартах менее мощных ракет.

Что же касается ракеты «Ariane-5», ее мощность всего в 2.2 раза больше мощности ракеты «Союз». Мощности ракеты «Протон» и «Ariane-5» примерно равны.

#### ВЫВОДЫ

1. Изучены характеристики геомагнитных пульсаций, сопутствовавших стартам 11 систем

«Space Shuttle» и 15 ракет «Ariane-5» с космодромов Мыс Канаверал и Куру, имевших место в 2002—2007 гг. Установлено, что практически все СР сопровождалось генерацией пульсаций в диапазоне периодов 10—15 мин. Амплитуда пульсаций составляла несколько нанотесла.

2. В результате статистического анализа данных наблюдений выявлены три группы возмущений, имевших запаздывания 13—58, 133—163 и 193—253 мин при СР с космодрома Мыс Канаверал, а также 13—88, 193—238 и 300—330 мин при СР с космодрома Куру.

3. В предположении, что возмущения геомагнитного поля вызваны СР, определены скорости распространения, соответствующие трем группам запаздываний. Для американских ракет эти скорости близки к 4.4—5.5 км/с, 980—1070 м/с и 540—590 м/с. Для европейских ракет значения скоростей равны 2.5—3.1 км/с, 680—740 м/с и 480—540 м/с.

4. Непротиворечивость полученных параметров возмущений с результатами наших более ранних исследований и результатами других исследований позволяет нам утверждать, что описанные в настоящей работе геомагнитные пульсации могут генерироваться при полетах ракет, стартовавших с космодромов Мыс Канаверал и Куру.

Авторы благодарны К. П. Гармашу и С. Г. Лесусу за проведение систематических магнитометрических измерений.

1. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П., Плотников А. В. Регистрация ионосферных откликов на ударно-акустические волны, генерируемые при запусках ракет-носителей // Геомагнетизм и аэронавигация.—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 аэронавигация.—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 аэронавигация.—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 аэронавигация.—1999.—39, № 1.—С. 72—78.
10. Гармаш К. П., Леус С. Г., Пазюра С. А. и др. 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 аэронавигация.—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 аэронавигация.—1998.—38, № 2.—С. 100—106.
17. Нагорский П. М., Тарашук 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 космодрома КНР // Космічна наука і технологія.—2008.—14, № 4.—С. 92—99.
25. Arendt P. R. Ionospheric undulations following Apollo 14 Launching // Nature.—1971.—231.—P. 438—439.
26. 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.

---

**GEOMAGNETIC PULSATIONS ASSOCIATED WITH ROCKET LAUNCHES FROM THE CANAVERAL CAPE COSMODROME AND COURU COSMODROME**

*L. F. Chernogor, M. A. Shamota*

This paper analyses geomagnetic field variations in 1—1000 s period range that accompanied 11 Space Shuttle system launches from the Cape Canaveral Cosmodrome and 15 Ariane-5 rocket launches from the Couru Cosmodrome in 2002—2007. The measurements were made near Kharkiv city at approximately 10000 km from the cosmodromes. The analysis revealed three groups of disturbances for Ariane 5 with time delays of 28—88, 193—238 and 300—330 min and durations of 30—70, 33—63 and 30—70 min. The 12—14 min geomagnetic micropulsation periods became predominant. For Space Shuttle system, three groups of disturbances with time delays of 13—58, 133—163 and 193—253 min and durations of 36—60, 54—90 and 63—93 min were revealed. The 6—10 min geomagnetic micropulsation periods became predominant in the first group. The 10—14 min periods became predominant in the second and third groups of disturbances. The amplitudes of these micropulsations attained a value of 3—5 nT.