

УДК 550.388.2

## ЭФФЕКТЫ СТАРТОВ РАКЕТ В ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЯХ

М.А. Шамота

## EFFECTS OF ROCKET LAUNCHES IN GEOMAGNETIC PULSATIONS

M.A. Shamota

Проанализированы 65 стартов ракет разных типов с космодромов Байконур и Плесецк, имевших место в 2002–2007 гг. Измерения проводились вблизи г. Харькова (расстояния 1500 и 2100 км от космодромов Байконур и Плесецк соответственно). При помощи метода, основанного на вейвлет-преобразовании, обработаны сигналы на выходе уникального высокочувствительного магнитометра-флюксметра, расположенного в Радиофизической обсерватории ХНУ. Были обнаружены три группы возмущений. Приведена интерпретация результатов обработки.

We analyzed geomagnetic field variations in 1–1000 s period range that accompanied 65 rocket launches in 2002–2007. The measurements have been made near Kharkiv city at approximately 1500 km from the Plesetsk cosmodrome and 2100 km from Baikonur cosmodrome. With help of the statistical manipulation, spectral estimation and the method, based on wavelet-transformation, signal on the output of unique high-sensitive magnetometer fluxmeter, situated in Radiophysical observatory of KhNU was processed. The analysis has revealed three groups of disturbances. The discussion of the processing results was conducted.

### Введение

Эффекты в атмосфере и геокосмосе, вызванные стартами и полетами ракетно-космической техники, изучаются более 40 лет. Исследованию возможности возникновения крупномасштабных и глобальных эффектов при стартах ракет (СР) посвящены также наши работы [1–5, 7–9]. В этом случае само существование возмущений является спорным. Для их поиска целесообразно вначале провести наблюдения возможных эффектов при стартах достаточно мощных ракет с ближайших к месту регистрации (вблизи г. Харькова) космодромов. Такими космодромами являются Плесецк и Байконур.

Исследование волновых возмущений (ВВ) в атмосфере и геокосмосе представляет самостоятельный интерес. Дело в том, что ВВ почти всегда присутствуют в околоземной среде. Они играют значительную роль в переносе энергии и импульса из одних областей атмосферы и геокосмоса в другие, а также ответственны за взаимодействие подсистем в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера (ЗАИМ) [10]. С другой стороны, сами ВВ могут использоваться для дистанционной диагностики околоземной среды. Все это предопределяет повышенный интерес к волновым процессам.

Идея изучения ВВ, вызванных стартами и полетами космических аппаратов, оказывается весьма плодотворной. В этом случае хорошо известно место и время энерговыделения, а мощность источника достигает  $10^{11}$ – $10^{12}$  Вт, его энергия составляет  $10^{13}$ – $10^{14}$  Дж [10].

Целью настоящей работы является изложение результатов анализа возмущений в геомагнитном поле, сопутствовавших 65 стартам мощных ракет с российских космодромов в 2002–2008 гг.

### Средства наблюдения и методика обработки

*Магнитометр-флюксметр.* Несерийный высокочувствительный магнитометр, включенный в состав программно-аппаратного комплекса, размещен в обсерватории Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина (с. Граково, Чугуевский район, Харьковская обл.). Его геофизические коор-

динаты: 49°40' N, 36°50' E, геомагнитные координаты: +45°20' геомагнитной широты, 119°20' E.

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

Определению подлежали времена запаздывания возможной реакции геомагнитного поля на СР, ее продолжительность, амплитуды и спектральный состав возникающих возмущений. Далее путем усреднения вычислялись статистические характеристики этих возмущений [3, 4, 7–9].

Периоды квазипериодических процессов определялись при помощи вейвлет-анализа на основе вейвлета Морле.

### Результаты анализа

Результаты статистического анализа в виде гистограмм для космодрома Байконур приведены на рис. 1 и 2.

Из рис. 1 видно, что возникающие вслед за СР возмущения имеют 3 группы запаздываний:  $\Delta t_1 \leq 12$  мин,  $\Delta t_2 \approx 24$ –47 мин и  $\Delta t_3 \approx 72$ –83 мин в дневное время и  $\Delta t_1 \leq 12$  мин,  $\Delta t_2 \approx 45$ –65 мин и  $\Delta t_3 \approx 108$ –117 мин в ночное время. Продолжительности возмущений первой, второй и третьей групп обычно не превышали 20 и 30, 40–60 и 40–70, 50–60 и 50–70 мин в дневное и ночное время соответственно.

Периоды колебаний обычно находились в пределах 5–10 мин. Лишь для первой группы возмущений в дневное время  $T$  обычно не превышал 5–8 мин.

Аналогичная статистическая обработка была выполнена для фоновых дней (за день до и на следующий день после СР). Предполагалось, что в эти дни условные СР имели место в то же время, что и реальные старты. Результаты обработки приведены на рис. 2. Как и следовало ожидать, распределения времен запаздывания возмущений от воображаемых СР и их продолжительностей оказались близкими к равномерным. Некоторое отклонение от равномерного распределения связано с ограниченностью выборки, а также с влиянием возмущений другой природы (прохождение солнечного терминатора, магнитная активность, вариации космической и атмосферной погоды и т. п.).

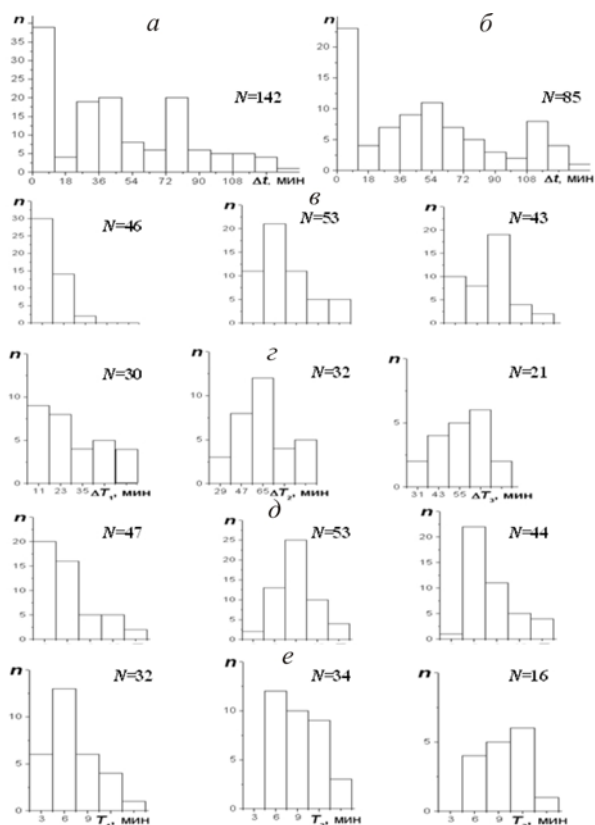


Рис. 1. Гистограммы времен запаздывания ( $\Delta t$ ) для дневного (а) и ночного (б) времени, продолжительностей ( $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$  и  $\Delta T_3$ ) (в) и (г), а также периодов ( $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$ ) (д) и (е) трех типов возмущений геомагнитного поля, сопутствовавших СР с космодрома Байконур, для дневного и ночного времени.

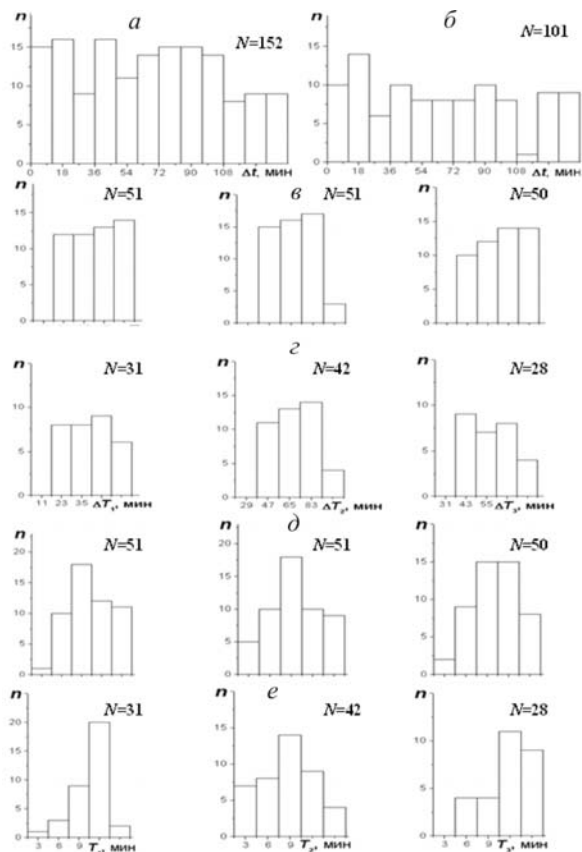


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, в фоновые дни (за день до и на следующий день после СР).

Значения же периодов колебаний оказались близкими к тем, что имели место в дни СР. Это означает, что возмущения от СР и других естественных источников по периодам принципиально ничем не отличаются друг от друга [3].

Гистограммы для космодрома Плесецк приведены на рис. 3. Из рисунка можно сделать вывод, что после старта в дневное, а возможно, и в вечернее время имели место три группы возмущений с запаздываниями  $\Delta t_1 \approx 7.1 \pm 1.2$  мин,  $\Delta t_2 \approx 30.5 \pm 1.1$  мин и  $\Delta t_3 \approx 78.7 \pm 5.2$  мин. Продолжительности возмущений –  $\Delta T_1 \approx 14.9 \pm 1.3$  мин,  $\Delta T_2 \approx 42.3 \pm 1.92$  мин и  $\Delta T_3 \approx 46.8 \pm 1.39$  мин.

В ночное время возмущения, которым соответствовало запаздывание  $\Delta t_1$ , отсутствовали.

Периоды колебаний обычно составляли  $T_1 \approx 7.2 \pm 0.6$  мин,  $T_2 \approx 11.1 \pm 0.4$  мин и  $T_3 \approx 11.9 \pm 0.5$  мин.

Аналогичная статистическая обработка была выполнена для фоновых дней (за день до и на следующий день после СР). Максимальное число выборок при этом удваивалось. Выделение подобных эффектов проводилось относительно времен реальных стартов. Результаты обработки приведены на рис. 4. Распределения времен запаздывания и продолжительностей возмущений от воображаемых СР оказались близкими к равномерным [8].

### Обсуждение

Для СР с космодрома Байконур чаще всего присутствовали три группы возмущений, имеющие разные времена запаздывания, –  $\Delta t_1 \approx 6-7$ ,  $\Delta t_2 \approx 35-45$  и  $\Delta t_3 \approx 90-130$  мин.

Первая группа возмущений днем наблюдалась почти всегда (и примерно в 50 % случаев в ночное время). Часто она имела нерегулярный (шумоподобный) характер и относительно небольшую (17–27 мин) продолжительность. Характерный уровень этих флуктуаций был 2–4 нТл. Периоды преобладающих пульсаций составили 5–8 мин.

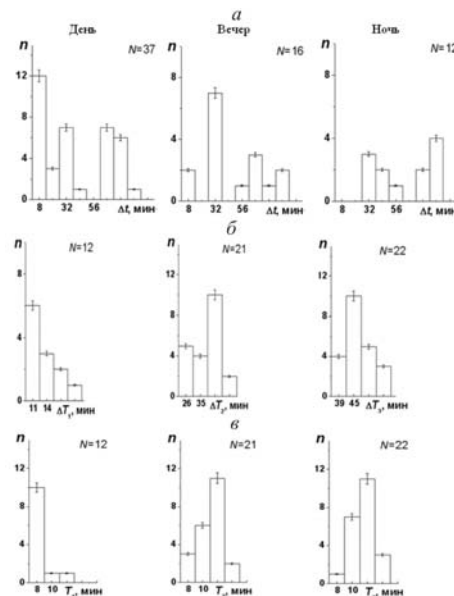


Рис. 3. Гистограммы времен запаздывания ( $\Delta t$ ) для дневного, вечернего и ночного времени суток (а), продолжительностей ( $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$  и  $\Delta T_3$ ) (б), а также периодов ( $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$ ) (в) трех типов возмущений геомагнитного поля, сопутствовавших СР с космодрома Плесецк.

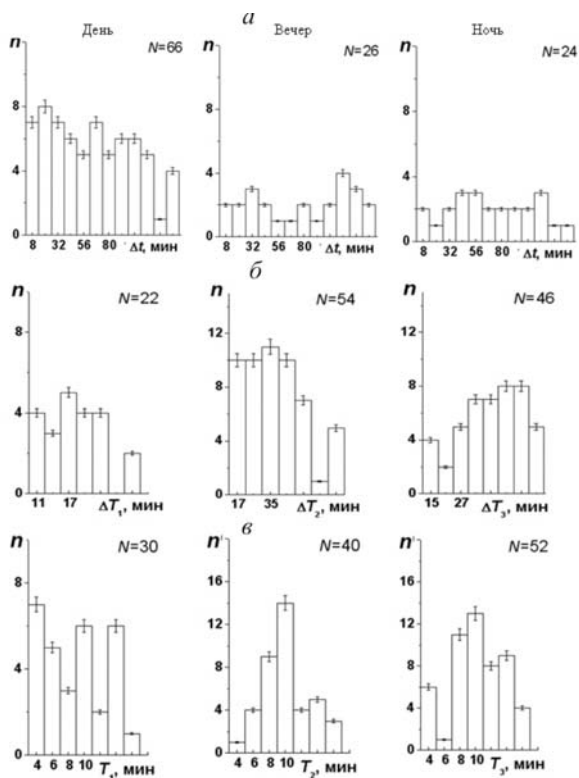


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, в фоновые дни (за день до и на следующий день после СР).

Возмущения с  $\Delta t_2 \approx 35\text{--}45$  мин наблюдались систематически. Они представляли собой цуги колебаний длительностью 45–80 мин с периодами 9–11 мин и амплитудами 3–5 нТл.

Самые медленные возмущения представляли собой также цуги колебаний с периодами 9–11 мин, амплитудами до 3–6 нТл и продолжительностью 40–70 мин с запаздыванием  $\Delta t_3 \approx 90\text{--}130$  мин. Эти возмущения наблюдались примерно в 50 и 25 % случаев в дневное и ночное время соответственно. Параметры возмущений второй и третьей группы близки, поэтому не исключено, что они могут представлять собой части одного и того же возмущения.

Практически всем из рассмотренных стартов ракет с космодрома Плесецк сопутствовали заметные или значительные изменения характера сигнала. В большинстве случаев наблюдалось увеличение амплитуды пульсаций, но в ряде случаев имело место и подавление колебаний, что, по-видимому, свидетельствует о противофазном сложении волновых процессов. Практически всегда изменение характера сигнала сопровождалось изменением периодов квазипериодических процессов.

В дневное время чаще всего присутствовали три группы возмущений с  $\Delta t_1 \approx 5\text{--}12$  мин,  $\Delta t_2 \approx 25\text{--}40$  мин и  $\Delta t_3 \approx 60\text{--}85$  мин. В ночное время наблюдались только две группы реакций с запаздываниями 35–45 мин и 80–95 мин соответственно для второго и третьего возмущения.

Первая группа возмущений ночью отсутствовала, днем же она появлялась в 86 % случаев, имела шумоподобный (высококачественный) характер и продолжительность порядка 10 мин, небольшие амплитуды (2–4 нТл) и периоды 7–9 мин.

Вторая и третья группы возмущений представляли собой цуги колебаний продолжительностью 40–50 мин. Периоды составляли 10–12 мин. Параметры возмущений второй и третьей групп близки, поэтому не исключено, что они представляют собой части одного и того же волнового процесса.

Вероятнее всего, возмущения магнитного поля генерируются на высотах 100–120 км. С одной стороны, на этих высотах имеют место достаточно большие значения концентрации электронов и плотности ионосферных токов, а значит, могут генерироваться волны электромагнитной природы. С другой стороны, на этих высотах плотность нейтральных частиц еще достаточно велика и поэтому могут генерироваться ударные волны в газе, превращающиеся на больших расстояниях в акустико-гравитационные волны.

Для космодрома Плесецк ( $R \approx 1500$  км) скорости распространения возмущений следующие:  $v'_1 \approx 4.9\text{--}6.1$  км/с,  $v'_2 \approx 880\text{--}910$  м/с и  $v'_3 \approx 325\text{--}330$  м/с. Эти скорости распространения возмущений близки скоростям, полученным для космодрома Байконур:  $v'_1 \approx 9$  км/с,  $v'_2 \approx 800\text{--}1100$  м/с и  $v'_3 \approx 300\text{--}400$  м/с. Параметры трех типов возмущений при СР с космодрома Плесецк хорошо согласуются с аналогичными параметрами для СР с космодрома Байконур (см. таблицу).

Статистические характеристики основных параметров возмущений, сопутствовавших СР ( $\Delta t$  – времена запаздывания возмущений,  $\Delta T$  и  $T$  – их продолжительности и периоды).

Параметр	Байконур		Плесецк
	День	Ночь	
$\Delta t_1$ , мин	6.7±1.1	7.5±0.9	7.1±1.2
$\Delta t_2$ , мин	40.4±6.7	41.5±8.4	30.5±1.1
$\Delta t_3$ , мин	97.8±19.5	109.7±26.2	78.7±5.2
$\Delta T_1$ , мин	16.1±2.2	29.3±10.9	14.9±1.3
$\Delta T_2$ , мин	55.1±9.8	62.1±12.9	42.3±1.9
$\Delta T_3$ , мин	50.5±14.7	56.7±13.1	46.8±1.4
$T_1$ , мин	5.2±0.3	7.7±0.5	7.2±0.6
$T_2$ , мин	10.6±0.2	8.7±0.4	11.1±0.4
$T_3$ , мин	8.7±0.2	10.9±0.5	11.9±0.5

Наименьшая из скоростей  $v'_3 \approx 300\text{--}400$  м/с – скорость распространения акустико-гравитационных волн в Е-области ионосферы. Скорости 800–1100 м/с ассоциируются со скоростью ударных волн, которые по мере удаления от источника постепенно превращаются в АГВ. Наиболее быстрые волны ( $v'_1 \approx 4.9\text{--}9$  км/с), по-видимому, относятся к волнам магнитогидродинамической природы.

В фоновые дни, как и следовало ожидать, гистограммы для времен запаздывания возмущений от воображаемых СР и их продолжительностей существенно отличаются от аналогичных гистограмм в дни реальных СР. В фоновые дни нет четко выраженных групп времен запаздывания возмущений и их продолжительностей. Это повышает достоверность полученных результатов [3, 4, 6–9].

**Выводы**

1. Проанализированы магнитометрические данные для 65 стартов ракет с космодромов Байконур и Плесецк. Установлено, что во всех случаях СР наблюдались заметные или значительные изменения характера колебаний геомагнитного поля, а значит, и параметров ионосферы и атмосферы.

2. Впервые выявлены три группы возмущений геомагнитного поля для СР с космодромов Байконур и Плесецк, имевших скорости 5–9 км/с, 800–1100 м/с и 300–400 м/с соответственно. Такие скорости имеют медленные МГД-волны, ВГВ и АГВ.

3. Установлено, что результаты исследования реакции геомагнитного поля на СР с космодромов Байконур и Плесецк хорошо согласуются между собой, а параметры возмущений оказались в целом подобными.

4. Проведено сравнение результатов статистической обработки для не возмущенных и возмущенных стартами ракет дней. Показано, что статистические характеристики вариаций геомагнитного поля в фоновые и возмущенные дни существенно отличаются. Это позволяет утверждать, что нами действительно впервые обнаружены эффекты стартов ракет в геомагнитном поле на расстоянии 1500–2100 км.

1. 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. Т. 44, № 4. С. 518–534.

2. 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. Т. 9, № 1. С. 5–28.

3. 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. Т. 13, № 7/6. С. 87–98.

4. Гармаш К.П., Леус С.Г., Черногор Л.Ф., Шамота М.А. Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с различных космодромов мира // Космічна наука і технологія. 2009. Т. 15, № 1. С. 31–43.

5. 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. Т. 4, № 3. С. 227–246.

6. Соколова О.И., Краснов В.М., Николаевский Н.Ф. Изменения геомагнитного поля под влиянием запусков ракет с космодрома Байконур // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. Т. 46, № 4. С. 561–565.

7. Черногор Л.Ф., Шамота М.А. Волновые возмущения геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Плесецк // Космічна наука і технологія. 2008. Т. 14, № 3. С. 29–38.

8. Черногор Л.Ф., Шамота М.А. Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с космодромов КНР // Космічна наука і технологія. 2008. Т. 14, № 4. С. 92–101.

9. Черногор Л.Ф., Шамота М.А. Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с космодромов Мыс Канаверал и Куру // Космічна наука і технологія. 2008. Т. 14, № 6. С. 89–98.

10. Черногор Л.Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. 2003. Т. 8, № 1. С. 59–106.

*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина МОН Украины, Харьков*