

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

## Вариации геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам и полетам космических аппаратов

Надійшла до редакції 09.01.07

Проаналізовано результати спостережень варіацій геомагнітного поля в діапазоні періодів 1—1000 с, які супроводжували старти 43 ракет типу «Союз» і «Протон» з космодрому Байконур в 2002—2006 рр. Вимірювання виконано поблизу м. Харкова (віддалення від космодрому 2100 км). Виявлено три групи збурень, що мали запізнення 6—7, 35—45 і 90—130 хв. Їхня тривалість складала відповідно 17—27, 45—80 і 40—70 хв. У геомагнітних пульсаціях переважали періоди 5—8, 9—11 и 9—11 хв відповідно. Амплітуди цих пульсацій досягали 3—6 нТл.

### ВВЕДЕНИЕ

Эффекты в атмосфере и геокосмосе, вызванные стартами и полетами ракетно-космической техники, изучаются более 40 лет [24]. В большинстве работ описаны эффекты, которые возникают вдоль траектории полета космического аппарата [1, 19, 21]. Изучению процессов на большом удалении от траектории летательного аппарата (тысячи километров) посвящено мало работ [14, 16, 25, 27, 29]. Исследованию возможности возникновения крупномасштабных и глобальных эффектов стартов ракет (СР) посвящены также наши работы [8, 9, 11, 17, 26, 28]. В этом случае само наличие возмущений является проблематичным. Для их поиска целесообразно вначале провести наблюдения возможных эффектов при стартах достаточно мощных ракет с ближайших к месту регистрации космодромов. Такими космодромами для Харькова являются Плесецк и Байконур. На первом из них объявленные пуски ракет осуществляются сравнительно редко, да и мощность стартующих ракет меньше, чем мощность ракет, стартующих с Байконура. Поэтому в настоящей работе описа-

ны результаты наблюдений возмущений в ионосфере, сопутствовавших СР типа «Союз» и «Протон» с космодрома Байконур в 2002—2006 гг. Основное внимание уделялось поиску реакции геомагнитного поля на СР и изучению волновых возмущений (ВВ) в среде, ответственных за перенос возмущений на расстояния около 2100 км.

Исследование волновых возмущений в атмосфере и геокосмосе представляет самостоятельный интерес [12, 22, 23]. Дело в том, что ВВ почти всегда наблюдаются 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) [23]. Волновые возмущения существенно влияют на функционирование радиотехнических и телекоммуникационных систем, заметно ограничивая их потенциальные возможности. 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  $10^{11} \dots 10^{12}$  Вт, его энергия составляет  $10^{13} \dots 10^{14}$  Дж [2, 5].

В цитируемых выше работах для наблюдения реакции околоземной и космической сред на старты и полеты ракет использовались ионозонды, средства доплеровского зондирования, радары некогерентного рассеяния и др. Лишь в отдельных работах [21, 27] применялся магнитометрический метод, основанный на наблюдении сравнительно низкочастотных (единицы — десятки—сотни минут) изменений геомагнитного поля. В работе [21] расстояние  $R$  между космодромом и пунктом наблюдения составляло около 800 км. По результатам работы [27] нельзя сделать однозначный вывод о природе длиннопериодических (около 80 мин) возмущений геомагнитного поля. Они могли быть вызваны как естественными источниками, так и СР.

Целью настоящей работы является изложение результатов наблюдений достаточно высокочастотных (периоды 1—1000 с) флуктуаций геомагнитного поля вблизи Харькова, которые сопровождали старты 43 ракет типа «Союз» и «Протон» с космодрома Байконур ( $R \approx 2100$  км).

## 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.) [10]. Его геофизические координаты:  $49^{\circ}40'$  с. ш.,  $36^{\circ}50'$  в. д., геомагнитные координаты:  $+45^{\circ}20'$  геомагнитной широты,  $119^{\circ}20'$  в. д.

Комплекс содержит индукционный магнитометр-флюксметр ИМ-II, устройство регистрации на базе персонального компьютера, оснащенного картой расширения многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) ЕС 1839.3004 и блока бесперебойного питания с аккумулятором емкостью 65 А·ч. Последний

может обеспечить автономное функционирование комплекса продолжительностью до 18 ч.

Индукционный магнитометр конструктивно представляет собой выносные активные индукционные датчики (до трех датчиков в комплексе) и моноблок, имеющий в своем составе: 3-канальный блок контроля и усиления (БКУ); блок полосовых фильтров для целей традиционной обсерваторской регистрации в узких частотных диапазонах. Дополнительно в состав могут включаться блок питания и калибровочный низкочастотный генератор, а также устройства регистрации (самописец или медленный аналоговый магнитофон).

Основные технические характеристики активного индукционного датчика следующие:

- полоса рабочих частот от 0.001 до 15 Гц (дифференциальная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) в полосе 0.001—2 Гц);
- внутренние шумы на частотах 1, 0.1, 0.01 Гц не превышают 0.5, 5 и 50 пТл соответственно;
- коэффициент преобразования на выходе активного датчика (дифференциальная АЧХ)  $1 \pm 0.2 \text{ мВ}/(\text{Гц} \cdot \text{nTl})$ ;

Блок контроля и усиления имеет следующие параметры:

- полоса рабочих частот (с завалом  $-3 \pm 1$  дБ от чистой дифференциальной АЧХ) от 0.001 до 2 Гц;
- коэффициент преобразования (с подключенным активным датчиком) от 2 до 32 мВ/(Гц·нТл) для частот 0.001—2 Гц соответственно;
- шаг ступенчатой регулировки усиления  $6 \pm 0.6$  дБ;
- глубина регулировки усиления 24 дБ;
- крутизна среза АЧХ на верхней границе полосы пропускания не менее 24 дБ/октава;
- выходное напряжение  $\pm 7$  В.

Сигнал для оцифровки снимается непосредственно с выхода БКУ. Кроме того, задействованы только датчики измерения горизонтальных компонент геомагнитного поля.

Устройство регистрации функционирует под управлением операционной системы MS-DOS 6.22. Программа регистрации, написанная на языке Turbo Pascal 6, осуществляет непрерывное периодическое считывание данных с каждого измерительного канала АЦП, их предварительную фильтрацию с помощью блочного циф-

рового фильтра нижних частот с полосой 1 Гц и сохранение в файлах с уникальными именами на жестком диске. Частота считывания данных составляет 2 Гц, разрядность АЦП — 12 двоичных разрядов. Основная временная привязка данных осуществляется при помощи считывания информации из энергонезависимых часов CMOS компьютера. Для повышения стабильности и точности хода часов их кварцевый резонатор был заменен на прецизионный генератор 32 КНЗ фирмы Dallas Semiconductor, в результате чего была достигнута точность хода не хуже  $5 \cdot 10^{-7}$  в диапазоне комнатных температур. Погрешность начальной установки часов по сигналам станций службы точного времени не хуже  $\pm 0.5$  с.

Считывание накопленной информации и, при необходимости, корректировка часов производится раз в 2—3 месяца. Дальнейшая обработка и анализ данных производится с использованием специального программного обеспечения, включающего узкополосную цифровую фильтрацию, спектральное, статистическое оценивание и т. д.

Подчеркнем, что речь идет о магнитометро-флюксметре, а не о феррозондовом магнитометре. Во втором случае измеряются абсолютные значения компонентов геомагнитного поля, и приходится аппаратным способом компенсировать вклад главного магнитного поля (его постоянную составляющую), индукция которого около  $5 \cdot 10^{-5}$  Тл. В результате этого чувствительность такого магнитометра сравнительно невысока. Она определяется относительной нестабильностью схемы компенсации, которая на сегодняшний день составляет около  $2 \cdot 10^{-7}$ , что приводит к чувствительности феррозондового магнитометра порядка 10 пТл. В случае магнитометра-флюксметра измеряется лишь уровень флуктуаций, и поэтому его чувствительность определяется уровнем шумов и величиной ЭДС индукционного датчика, которая обратно пропорциональна  $T$ . Поэтому чувствительность прибора ухудшается с увеличением  $T$ . Чувствительность 0.5—1 пТл близка к рекордной. Следовательно, описываемый магнитометр по своей чувствительности относится к уникальным.

**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, оконному преобразованию Фурье, адаптивному преобразованию Фурье и вейвлет-преобразованию, описанным в работе [18].

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

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

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 с 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, амплитуды и спектральный состав возникающих возмущений. Далее путем усреднения вычислялись статистические характеристики этих возмущений. Усреднения вначале производились раздельно для ракет типа «Союз» и «Протон», для дневного и ночного времени суток, для  $H$ - и  $D$ -компонент. Если гистограммы какого-либо параметра были подобны для обоих компонентов или обоих типов ракет, исходные массивы объединялись в общий массив.

**Краткие сведения о ракетах.** Российская ракета «Союз» относится к тяжелым ракетам. Ее полная масса составляет 305 т, начальная тяга 4.14 МН, высота 46.1 м, низкоорбитальная полезная нагрузка 6855 кг на высоте 200 км. Параметры нулевой ступени следующие: масса  $4 \times 44.4$  т, тяга  $4 \times 1.02$  МН, диаметр 2.7 м, высота 19.6 м, время работы 120 с. Параметры

первой ступени такие: масса 105.4 т, тяга 1 МН, диаметр 3 м, высота 27.8 м, время работы 286 с. Вторая ступень имеет следующие параметры: масса 25.2 т, тяга 0.3 МН, диаметр 2.7 м, высота 6.7 м, время работы 300 с.

Ракета «Протон» относится к самым тяжелым российским ракетам. Ее полная масса составляет 711 т, начальная тяга 8.84 МН, высота 59 м, низкоорбитная полезная нагрузка 19.76 т на высоте 200 км. Параметры первой ступени: масса 450.5 т, тяга 10.46 МН, диаметр 4.2 м, высота 21.2 м, время работы 124 с. Параметры второй ступени: масса 167.8 т, тяга 2.4 МН, диаметр 4.2 м, высота 14 м, время работы 206 с. Третья ступень имеет следующие параметры: масса 50.7 т, тяга 0.63 МН, диаметр 4.2 м, высота 6.5 м, время работы 238 с. Параметры четвертой ступени: масса 17.3 т, тяга 0.085 МН, диаметр 3.7 м, высота 7.1 м, время работы 600 с.

#### УРОВЕНЬ МАГНИТНОЙ ВОЗМУЩЕННОСТИ

Уровень магнитной возмущенности контролировался по значениям индексов  $A_p$  и  $K_p$ , взятых из сети интернет. В табл. 1 приведены значения суммарных индексов в день СР, а также за сутки и двое суток до него. Видно, что практически все запуски ракет происходили в магнито-спокойных условиях. Лишь старт 2 июня 2003 г. имел место в несколько возмущенных условиях (суммарный индекс  $\Sigma K_p$  достигал 36).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

**Старты ракет «Союз».** Для примера рассмотрим четыре СР типа «Союз», имевшие место в

дневное, вечернее, ночное и утреннее время.

Временные вариации уровней горизонтальных компонентов геомагнитного поля и их вейвлет-спектров, сопровождавшие дневной СР, приведены на рис. 1, а. Старт произошел 12 августа 2003 г. в 14:20 (здесь и далее используется время UT). Первые заметные изменения сигнала имели место примерно в интервале времени 14:25—14:30. Значительные изменения характера сигнала начались после 14:40 и 15:00 для  $H$ - и  $D$ -компонентов. Следующее изменение характера сигнала наблюдалось после 16:20 и 16:30 соответственно. Последние два процесса продолжались около 60 мин.

Результаты измерений и анализа вариаций геомагнитного поля в вечернее время приведены на рис. 1, б. СР произошел 2 июня 2003 г. в 17:45. Примерно за 20 мин до этого в месте измерения наблюдался заход Солнца на уровне Земли, а примерно через час — на высоте  $z \approx 100$  км, где находится максимум токовой струи. Скорее всего, именно она ответственна за описываемые вариации геомагнитного поля. Первое хорошо заметное изменение характера сигналов  $H(t)$  и  $D(t)$  проявилось в интервале времени 17:50—18:00. Второе, еще более четко выраженное изменение характера сигнала произошло с 18:15 до 19:20. Наконец, в интервале времени 20:00—21:00 амплитуда пульсаций с периодами  $T \approx 8$ —10 мин значительно увеличилась и достигла 3—4 нТл.

Результаты измерений и анализа в ночное время показаны на рис. 1, в. Ракета стартовала 28 февраля 2005 г. в 19:09. Видно, что существенное изменение характера сигнала произошло примерно после 20:10—20:20. Интересно, что амплитуда квазипериодических колебаний  $H$ -компонента увеличилась, а  $D$ -компонента —

Таблица 1. Уровень магнитной возмущенности накануне и в день запуска ракет

Дата и время старта	Ракета	За 2 сут до СР		За 1 сут до СР		Сутки с СР	
		$A_p$	$\Sigma K_p$	$A_p$	$\Sigma K_p$	$A_p$	$\Sigma K_p$
02.06.03 (17:45 UT)	«Союз»	17	24	19	25	39	36
12.08.03 (14:20 UT)	«Союз»	12	21	11	19	25	31
28.02.05 (19:09 UT)	«Союз»	9	19	8	14	12	21
01.10.05 (03:54 UT)	«Союз»	6	12	11	18	13	24
30.03.02 (17:25 UT)	«Протон»	6	14	7	13	17	25
10.06.02 (01:14 UT)	«Протон»	15	22	15	25	16	25
25.07.02 (15:13 UT)	«Протон»	18	26	12	22	13	24
08.09.05 (21:53 UT)	«Протон»	9	15	15	22	8	15

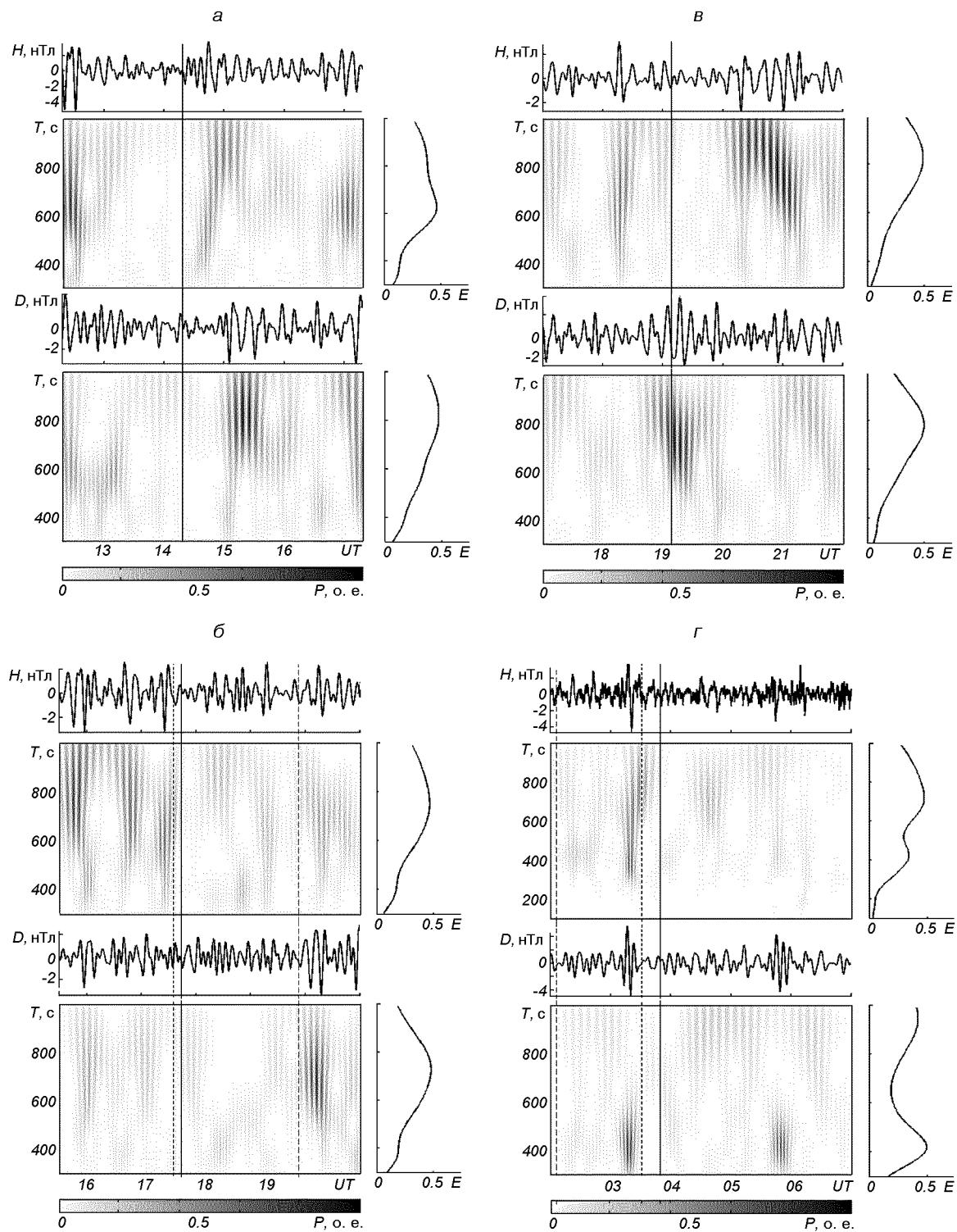


Рис. 1. Временные вариации  $H$ - и  $D$ -компонент геомагнитного поля, соответствующие им вейвлет-спектры и энергограммы (распределение средней энергии колебаний по периодам), сопровождавшие старты ракет «Союз»: *а* — 12 августа 2003 г. (14:20 UT), *б* — 2 июня 2003 г. (17:45 UT), *в* — 28 февраля 2005 г. (19:09 UT), *г* — 1 октября 2005 г. (03:54 UT). Сплошными вертикальными линиями показаны моменты старта, штриховыми — моменты восхода (захода) Солнца на уровне Земли в месте расположения обсерватории и на высоте 200 км

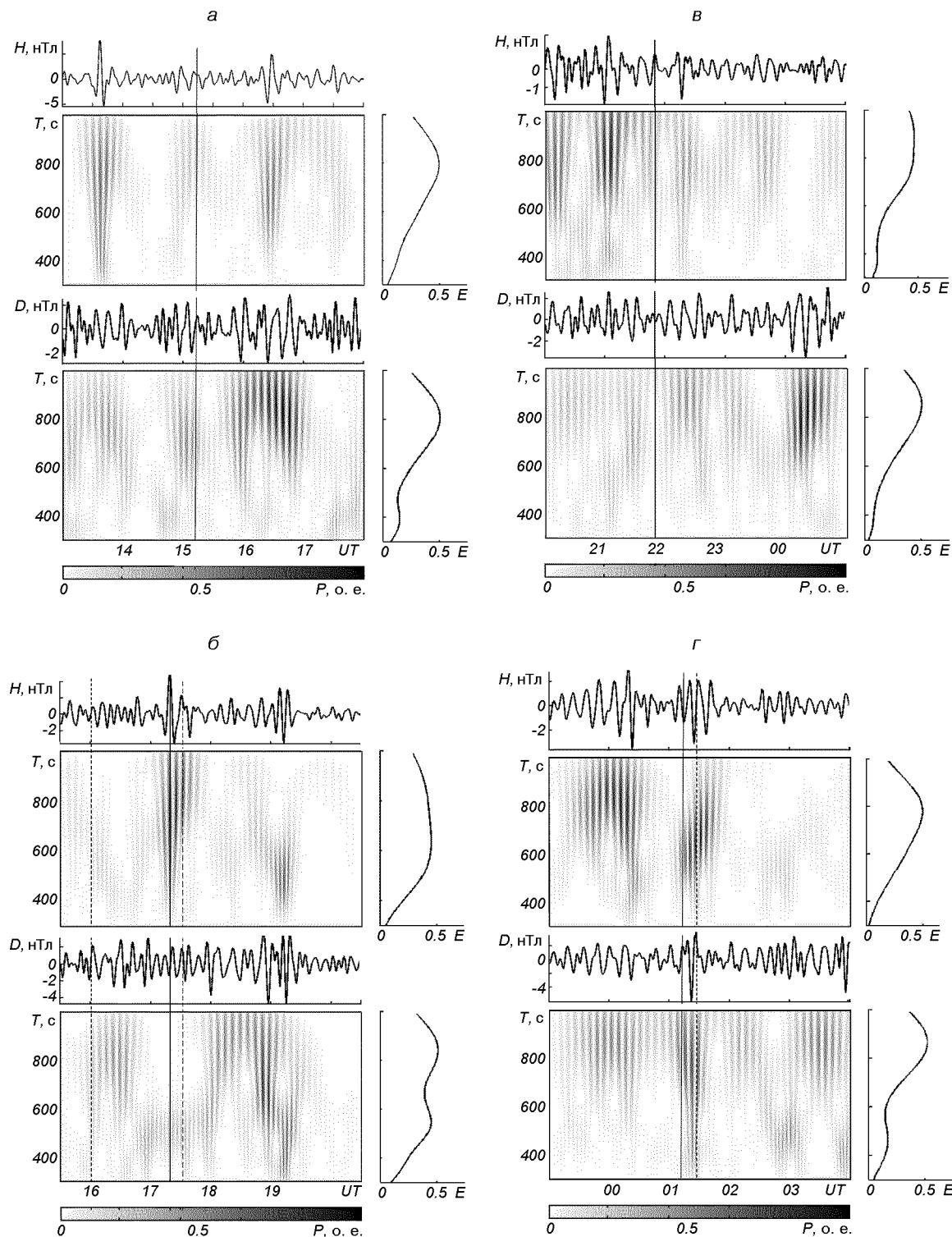


Рис. 2. То же, для стартов ракеты «Протон»: *a* — 25 июля 2002 г. (15:13 UT), *б* — 30 марта 2002 г. (17:25 UT), *в* — 8 сентября 2005 г. (21:53 UT), *г* — 10 июня 2002 г. (01:14 UT)

уменьшилась, т. е. имело место подавление квазипериодического процесса. Это продолжалось около 80 и 40 мин для сигналов  $H(t)$  и  $D(t)$ . После этого имело место еще одно изменение характера сигнала. Амплитуда пульсаций в диапазоне периодов 10–15 мин достигала 2–4 нТл.

Пример вариаций сигналов  $H(t)$  и  $D(t)$  и их вейвлет-спектров в утреннее время показан на рис. 1, г. Прохождение утреннего терминатора сопровождалось кратковременным увеличением амплитуд  $H(t)$  и  $D(t)$  примерно в два раза. Продолжительность этого процесса была около 15 мин (примерно с 03:15 до 03:30). Старт ракеты произошел 1 октября 2005 г. в 03:54. Первые кратковременные (~10 мин) и слабо выраженные изменения характера сигнала (уменьшение амплитуд колебаний) наблюдались примерно в интервале времени 04:15–04:30. Следующее изменение характера сигнала (увеличение амплитуд колебаний) проявилось в интервале 04:30–05:00 и 04:20–05:15 для сигналов  $H(t)$  и  $D(t)$ . Примерно с 05:30 до 06:10 имело место значительное (в 1.5–2 раза) увеличение амплитуд пульсаций с преобладающими периодами 6–7 мин.

**Старты ракет «Протон».** Далее опишем результаты наблюдений вариаций геомагнитного поля при четырех СР типа «Протон».

Первое кратковременное (~5 мин) заметное изменение характера сигнала (сбой фазы колебания, уменьшение его амплитуды) наблюдалось через 1–2 мин после дневного СР, который произошел 25 июля 2002 г. в 15:13 (рис. 2, а). Возникли пульсации с периодами  $T \approx 1\ldots100$  с и амплитудой около 1 нТл. Примерно в 15:45 и 16:00 характер сигналов  $D(t)$  и  $H(t)$  изменился опять. Наблюдалось увеличение амплитуды пульсаций геомагнитного поля до 4 нТл. Преобладали колебания с периодом 12–15 мин. Очередное изменение характера сигнала (лучше выраженное для  $D$ -компоненты) имело место в интервале времени 17:00–18:00. При этом период пульсаций уменьшился примерно вдвое, а амплитуда была на уровне 2–3 нТл.

Пример вариаций  $H(t)$  и  $D(t)$ , а также их вейвлет-спектров после вечернего СР, имевшего место 30 марта 2002 г. в 17:25, показан на рис. 2, б. Уверенно фиксируемые изменения характера сигнала наблюдалось в интервале вре-

мени 17:50–18:45. Они заключались в сбое фазы и уменьшении амплитуды колебания  $H(t)$ , а также в сбое фазы и увеличении амплитуды колебания  $D(t)$ . Изменился также период пульсаций обоих сигналов.

Заход Солнца на высоте 100 км произошел около 17:00. Связанные с ним изменения характера сигнала (увеличение его амплитуды) наблюдались в  $H$ -компоненте с 17:00 до 17:40. Для  $D$ -компонента, напротив, отмечалось некоторое уменьшение амплитуды колебания. Далее (с 18:45 до 19:30) имело место увеличение в 1.5–2 раза амплитуд пульсаций в диапазоне периодов 8–10 мин.

Пример наблюдений эффектов, сопровождавших ночной старт (8 сентября 2005 г. в 21:53), показан на рис. 2, в. Первое изменение характера сигнала (сбой фазы и увеличение амплитуды колебания) возникли примерно через 9–10 мин после СР и продолжались около 30–40 мин для сигналов  $H(t)$  и  $D(t)$ . Следующее изменение характера сигнала проявились в интервале времени от 22:50–23:00 до 23:50 для этих же сигналов соответственно. Третий раз изменение характера сигнала (увеличение амплитуды колебаний) имело место примерно с 00:00 до 01:00. Для  $D$ -компонента эффект выражен более ярко: амплитуда пульсаций возросла до 3 нТл, а период увеличился до 12–13 мин.

Старт 10 июня 2002 г. в утреннее время (01:14) имел место вскоре после восхода Солнца на высоте  $z \approx 100$  км (рис. 2, г). Прохождение утреннего терминатора сопровождалось резким (до двух раз) увеличением амплитуды пульсаций в сигнале  $H(t)$  и в последующем уменьшением их периода в 1.5–2 раза (от 8–12 до 6 мин) в интервале времени 23:30–00:30. Примерно через 5–7 мин после СР имело место увеличение в 2–4 раза амплитуд пульсаций и в 1.5–2 раза их периодов. Это продолжалось в течение 20–30 мин для  $D$ - и  $H$ -компонент соответственно. Следующее существенное изменение характера сигнала (уменьшение амплитуд колебаний) наблюдалось примерно с 01:50 до 02:20–02:40 для  $H$ - и  $D$ -компонент соответственно. После этого наступило еще одно изменение характера сигнала (увеличение амплитуд), длившееся около 30 мин.

**Результаты статистической обработки.** Обработка выполнена для 43 СР (рис. 3). Для

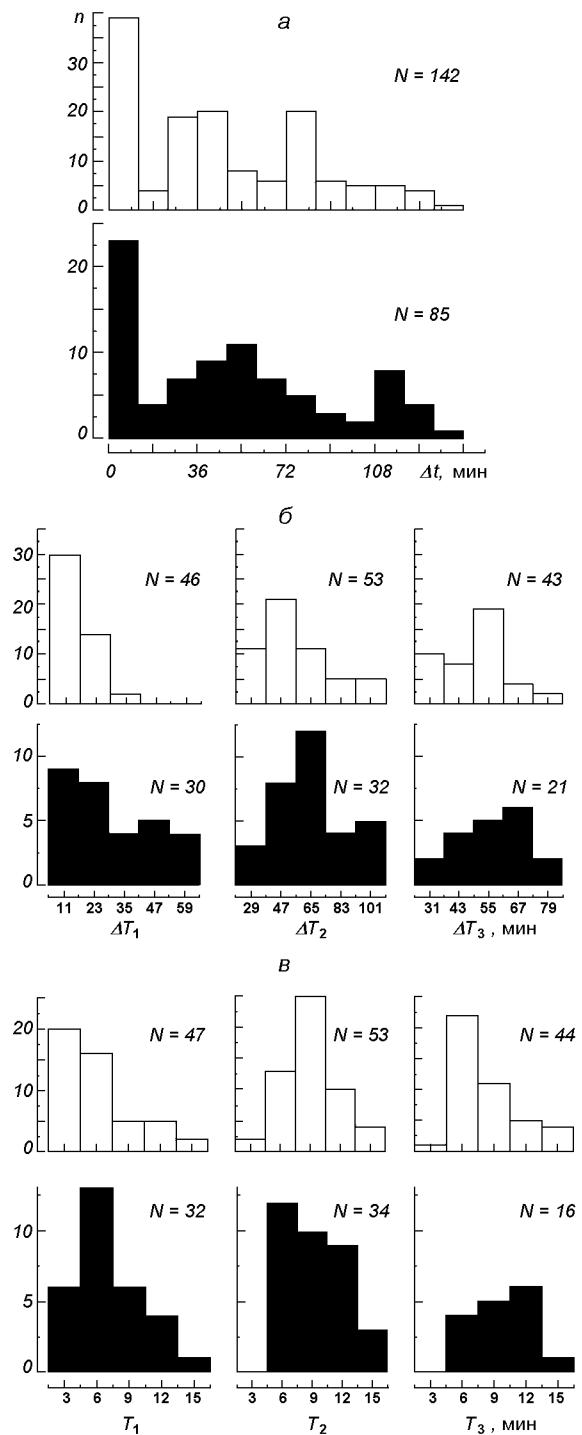


Рис. 3. Гистограммы времен запаздывания  $\Delta t$ , продолжительностей  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$  и  $\Delta T_3$ , а также периодов  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  трех типов возмущений геомагнитного поля, сопутствовавших СР для дневного и ночного времени (светлые и темные столбики соответственно)

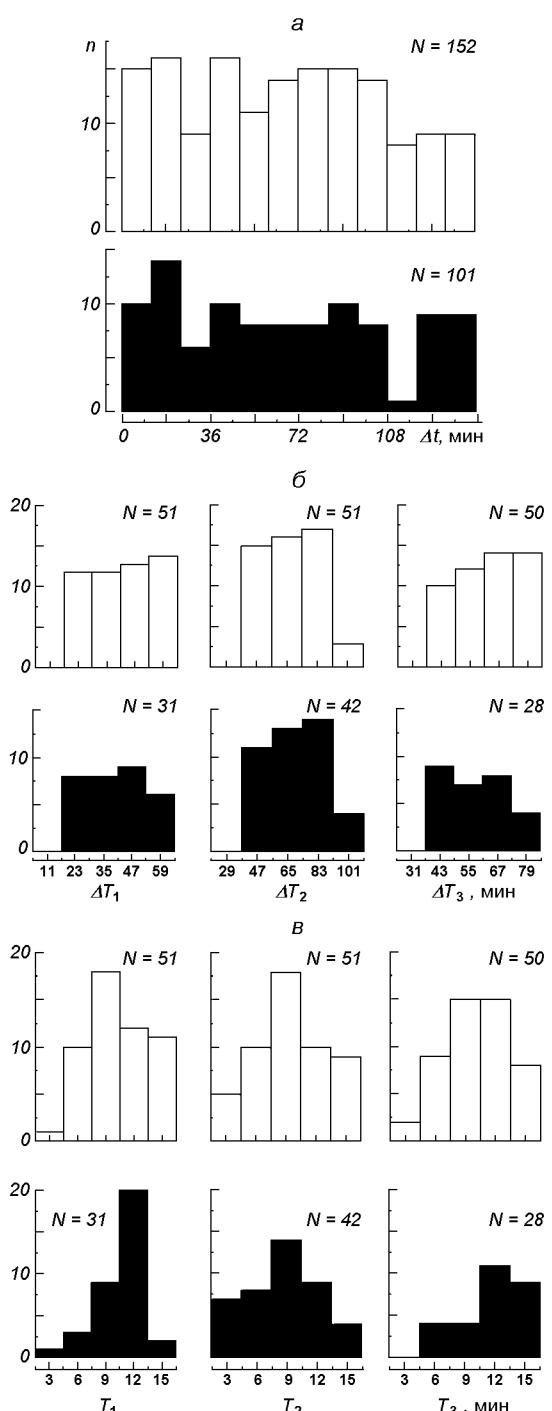


Рис. 4. То же для фоновых суток (за сутки до и на следующие сутки после СР)

двух компонентов сигнала, отдельно для светлого и темного времени суток максимальное число реализаций  $N_{\max}$  при оценке продолжительности и периодов возмущений могло составлять 86, а при оценке запаздываний трех групп возмущений (см. ниже) — 258. Реальное число выборок показано на соответствующих гистограммах. На них число реализаций  $N$  меньше  $N_{\max}$ . В оставшихся  $N_{\max} - N$  случаях принятие решения о наличии реакции на СР было затруднено.

Из рис. 3 видно, что возникающие вслед за стартами ракет возмущения имеют три группы запаздываний:  $\Delta t_1 \leq 12$  мин,  $\Delta t_2 \approx 24\dots47$  мин и  $\Delta t_3 \approx 72\dots83$  мин в дневное время и  $\Delta t_1 \leq 12$  мин,  $\Delta t_2 \approx 45\dots65$  мин и  $\Delta t_3 \approx 108\dots117$  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 составляли 5—10 мин. Лишь для первой группы возмущений в дневное время периоды не превышали 5—8 мин.

Аналогичная статистическая обработка была выполнена для фоновых суток (за сутки до и на следующие сутки после СР). Предполагалось, что в эти сутки «СР имели место» в то же самое время, что и реальные старты. Результаты обработки приведены на рис. 4. Как и следовало ожидать, законы распределения времен запаздывания возмущений от воображаемых СР и их продолжительностей оказались близкими к равномерным. Некоторое отклонение от равномерного закона связано с ограниченностью выборки, а также с влиянием возмущений другой природы (прохождений солнечного терминатора, магнитной активности, вариациями космической и атмосферной погоды и т. п.). 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.

Все перечисленные факты свидетельствуют о том, что СР могут усиливать или ослаблять (если генерация ВВ происходит в противофазе) происходящие в околосземной среде квазипериодические процессы с периодами от единиц до 10—15 мин.

Таблица 2. Статистические характеристики основных параметров трех типов возмущений

Параметр	День	Ночь
$\Delta t_1$ , мин	$6.7 \pm 1.1$	$7.5 \pm 0.9$
$\Delta t_2$ , мин	$40.4 \pm 6.7$	$41.5 \pm 8.4$
$\Delta t_3$ , мин	$97.8 \pm 19.5$	$109.7 \pm 26.2$
$\Delta T_1$ , мин	$16.1 \pm 2.2$	$29.3 \pm 10.9$
$\Delta T_2$ , мин	$55.1 \pm 9.8$	$62.1 \pm 12.9$
$\Delta T_3$ , мин	$50.5 \pm 14.7$	$56.7 \pm 13.1$
$\Delta H_1$ , нТл	$5.2 \pm 0.3$	$6.7 \pm 0.5$
$\Delta H_2$ , нТл	$3.6 \pm 0.2$	$2.6 \pm 0.1$
$\Delta H_3$ , нТл	$4.8 \pm 0.6$	$3.4 \pm 0.6$
$\Delta D_1$ , нТл	$4.2 \pm 0.5$	$3.1 \pm 0.2$
$\Delta D_2$ , нТл	$4.6 \pm 0.1$	$3.3 \pm 0.1$
$\Delta D_3$ , нТл	$5.6 \pm 0.5$	$4.1 \pm 0.1$
$T_1$ , мин	$5.2 \pm 0.3$	$7.7 \pm 0.5$
$T_2$ , мин	$10.6 \pm 0.2$	$8.7 \pm 0.4$
$T_3$ , мин	$8.7 \pm 0.2$	$10.9 \pm 0.5$

Оценки основных параметров возмущений, полученных путем статистической обработки данных для 43 СР, приведены в табл. 2. Видно, что параметры геомагнитных возмущений, сопровождавших СР, в течение суток изменялись сравнительно слабо.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Всем рассмотренным СР сопутствовали заметные или значительные вариации уровня геомагнитных флюктуаций и их спектрального состава. Чаще всего наблюдались три группы возмущений, имеющие разные времена запаздывания:  $\Delta t_1 \approx 6\dots7$ ,  $\Delta t_2 \approx 35\dots45$  и  $\Delta t_3 \approx 90\dots130$  мин.

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

Возмущения с  $\Delta t_2 \approx 35\dots45$  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 имели запаздывание  $\Delta t_3 \approx 90\ldots130$  мин. Эти возмущения наблюдались примерно в 80 и 66 % случаев в дневное и ночное время соответственно. Параметры возмущений второй и третьей групп близки, поэтому не исключено, что они могут представлять собой части одного и того же возмущения.

Оценим характерные скорости распространения возмущений, вызванных стартами и полетами ракет. Скорее всего, возмущения генерируются непосредственно в ионосфере, когда ракета достигает высоты 100 км. Под воздействием реактивной струи (факела ракеты) существенно изменяется проводимость плазмы в динамо-области ионосферы (высоты 100—120 км) и генерируются волны электромагнитной (магнитогидродинамической) природы [2]. На этих же высотах эффективно генерируются и ударные волны в газе, которые распространяются от ракеты со скоростью, превышающей скорость звука в газе [1, 2]. На достаточно больших удалениях от траектории ракеты ударная волна превращается в акустико-гравитационную волну (АГВ). В работе [1] ей соответствовали периоды 4—5 мин.

Акустико-гравитационные волны модулируют концентрацию электронов и частоты соударений электронов с тяжелыми частицами в ионосфере. Это приводит к модуляции проводимости плазмы и ионосферного электрического поля. В результате возникают геомагнитные пульсации с теми же периодами, что и у АГВ. Таким образом, ионосферный и магнитный эффекты СР оказываются связанными между собой.

Время  $\Delta t_0$  достижения ракетой высоты 100—120 км зависит от типа ракеты и составляет 2—3 мин. При этом время распространения возмущений  $\Delta t' = \Delta t - \Delta t_0$ . Тогда  $\Delta t_1' \approx 4$  мин,  $\Delta t_2' \approx 32\ldots42$  мин и  $\Delta t_3' \approx 90\ldots130$  мин. Им соответствуют скорости  $v_1' \approx 9$  км/с,  $v_2' \approx 0.8\ldots1.1$  км/с и  $v_3' \approx 0.3\ldots0.4$  км/с. Скорости  $v_1' \approx 9$  км/с, очевидно, относятся к электромагнитным волнам (точнее, МГД-волнам). Скорость  $v_2' \approx 0.8\ldots1.1$  км/с свойственна медленным МГД-волнам [2, 22], а также ударным волнам на высотах F-области ионосферы [1]. Скорость последних несколько превышает скорость АГВ на этих высотах, которая близка к

0.7—0.8 км/с. Значение скорости  $v_3' \approx 0.3\ldots0.4$  км/с примерно соответствует скорости АГВ на высотах E-области ионосферы.

В работе [21] для короткопериодических ( $T \approx 2\ldots3$  мин) колебаний геомагнитного поля было получено  $\Delta t_1 \approx 3\ldots4$  мин,  $\Delta t_1' \approx 1\ldots2$  мин и  $v_1' \approx 7\ldots13$  км/с (в среднем  $v_1' \approx 10$  км/с). Значение  $v_1'$  очень близко к полученному нами. Это представляется удивительным, поскольку скорость МГД-волн существенно зависит от ориентации направления распространения волны по отношению к геомагнитному полю. В нашем случае имело почти поперечное распространение волны, а в работе [21] — почти продольное. Амплитуда короткопериодических возмущений, полученная в работе [21], составляла 6—20 нТл, а в нашем случае — 2—4 нТл, т. е. в несколько раз меньше. С учетом того, что расстояния  $R$  равнялись 800 и 2100 км, такого соотношения амплитуд и следовало ожидать.

Согласно данным [19] для медленных возмущений  $\Delta t_2 \approx 10\ldots15$  мин,  $\Delta t_2' \approx 7.5\ldots12$  мин и  $v_2' \approx 1.1\ldots1.8$  км/с. Эти значения  $v_2'$  близки к нашим (0.8—1.1 км/с). Амплитуда медленных возмущений в работе [19] была около 10 нТл, а в наших наблюдениях она составляла 3—5 нТл, т. е. уменьшалась с увеличением расстояния  $R$ . Скорее всего, у этих возмущений одна и та же природа.

Эффекты от СР типа «Союз» и «Протон» в целом были подобными.

Оцененные выше параметры волн (и прежде всего их скорость) близки к тем, что мы наблюдали по ионосферным эффектам [2—9, 11]. Следовательно, атмосферный, плазменный и магнитный эффекты СР связаны между собой.

Таким образом, повторяемость основных закономерностей при стартах ракет различных типов в различное время суток и года, при отличающихся уровнях магнитной активности, приемлемость значений параметров волн, переносящих возмущения, и непротиворечивость полученных результатов результирующим магнитометрическим измерениям [21] в ближней зоне ( $R \approx 800$  км) и ионосферным измерениям [2—9, 11] на удалениях  $R \approx 2100$  км позволяют утверждать, что нами впервые обнаружены значительные вариации уровня геомагнитного поля на удалениях более 2100 км от места старта.

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что все сорок три старты и полета ракет типа «Союз» и «Протон» сопровождались заметными вариациями уровня и спектрального состава флуктуаций геомагнитного поля в диапазоне периодов 1—1000 с.

2. Впервые выявлены три группы возмущений, имевших запаздывания 6—7, 35—45 и 90—130 мин. Им соответствовали продолжительности процессов 17—27, 45—80 и 40—70 мин и преобладающие периоды 5—8, 9—11 и 9—11 мин.

3. Отмечено, что быстрые возмущения (скорость около 10 км/с) выражены менее ярко и наблюдались примерно в 80 % случаев, как правило в дневное время. Скорее всего, они переносятся при помощи МГД-волн. Возмущения со скоростями 0.8—1.1 и 0.3—0.4 км/с наблюдались практически всегда уверенно. Появление самых медленных волн обусловлено движением плазмы в магнитном поле под действием АГВ. Природа волн, имеющих скорость 0.8—1.1 км/с, может быть связана с распространением либо пакета волн, образованного ударной волной в атмосфере, либо медленных МГД-волн.

4. Установлено, что амплитуда всех видов возмущений составляла 3—6 нТл.

5. Замечено, что реакции геомагнитного поля на СР типа «Союз» и «Протон» в целом подобны.

Авторы благодарны С. В. Панасенко за помощь в процессе подготовки настоящей работы.

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 радиара 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 волн-

вых 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 возмущений источниками различной природы. 2. Процессы в искусственно возмущенной ионосфере. Вариации характеристик радиосигналов. Моделирование возмущений // Вестн. Харьк. ун-та. Сер. 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. и др. Статистические характеристики флуктуаций электромагнитного поля Земли // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 2.—С. 163—180.
11. Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф. и др. Радиофизические исследования процессов в околосолнечной плазме, возмущенной высокoenергетичими источниками // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники.—1999.—№ 8.—С. 3—19.
12. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. — М.: Мир, 1978.—532 с.
13. Григоренко Е. И., Лазоренко С. В., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопровождавшие вспышку на Солнце и сильнейшую магнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Геомагнетизм и аэрономия.—2003.—43, № 6.—С. 770—787.
14. Деминов М. Г., Ораевский В. Н., Ружин Ю. Я. Ионосферно-магнитосферные эффекты запусков ракет в сторону высоких широт // Геомагнетизм и аэрономия.—2001.—41, № 6.—С. 772—781.
15. Дьяконов. Вейвлеты. От теории к практике. — М.: Солон-Р, 2002.—448 с.
16. 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.
17. 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.
18. Лазоренко О. В., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Адаптивное преобразование Фурье // Электромагнитные волны и электронные системы.—2005.—10, № 10.—С. 39—49.
  19. Нагорский П. М. Неоднородная структура области F ионосферы, образованная ракетами // Геомагнетизм и аэрономия.—1998.—38, № 2.—С. 100—106.
  20. 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.
  21. Соколова О. И., Краснов В. М., Николаевский Н. Ф. Изменения геомагнитного поля под влиянием запусков ракет с космодрома Байконур // Геомагнетизм и аэрономия.—2003.—46, № 4.—С. 561—565.
  22. Сорокин В. М., Федорович Г. В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. — М.: Энергоиздат, 1982.—134 с.
  23. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 1.—С. 59—106.
  24. Экологические проблемы и риски воздействия ракетно-космической техники на окружающую среду. Справочное пособие / Под ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова, А. В. Петрова. — М.: Анкил, 2000.—640 с.
  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 Phys. and Radio Astronomy.—1998.—3, N 2.—P. 181—190.
  27. Foster J. C., Holt J. M., Lanzerotti L. J. Mid-latitude ionospheric perturbation associated with Spacelab-2 plasma depletion experiment at Millstone Hill // Ann. Geophys.—2000.—18.—P. 111—120.
  28. Garmash K. P., Gokov A. M., Kostrov L. S., et al. Radiophysical investigations and modeling of ionospheric processes generated by sources of various nature. 2. Processes in a modified ionosphere signal parameters variations. Disturbance simulation // Telecommun. and Radio Engineering.—1999.—53, N 6.—P. 1—22.
  29. Noble S. T. A Large-amplitude traveling ionospheric disturbance excited by the space shuttle during launch // J. Geophys. Res.—1990.—95, N A11.—P. 19.037—19.044.
- 
- GEOMAGNETIC FIELD VARIATIONS ACCOMPANYING  
MISSILE LAUNCHES AND THE FIRING  
OF SPACECRAFT ORBITAL MANEUVERING  
SUBSYSTEM THRUSTERS**
- K. P. Garmash, S. G. Leus, L. F. Chernogor,  
M. A. Shamota*
- We analysed geomagnetic field variations in 1—1000 s period range that accompanied 43 Soyuz and Proton rocket launches from 2002 to 2006. The measurements were made near Kharkiv city, at a distance of about 2100 km from the Baikonur cosmodrome. Our analysis revealed three groups of disturbances with time delays of 6—7, 35—45, and 90—130 min and with durations of 17—27, 45—80, and 40—70 min, respectively. The 5—8, 9—11, and 9—11 min geomagnetic micropulsation periods became dominant, and their amplitudes attained a value of 3—6 nT.