

## Эффекты в геокосмосе, сопутствовавшие стартам группы ракет

Л. Ф. Черногор

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,  
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61077, Украина  
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 15 января 2008 г.

Проведены радиофизические и магнитометрические наблюдения за динамическими процессами в ионосфере и геомагнитном поле, последовавшими за стартами четырех ракет различной мощности и с различных пусковых установок. Установлено, что старты ракет сопровождалось усилением волновой активности в ионосфере и в геомагнитном поле. Реакции среды на разные источники (разные ракеты) накладывались, что затрудняло их идентификацию. Как плазменным, так и геомагнитным возмущениям были свойственны скорости распространения около  $1.2 \div 1.7$  км/с и  $440 \div 760$  м/с.

### Введение

Хорошо известно, что роль активных экспериментов, в частности стартов и полетов космических аппаратов с включенными двигателями, в изучении динамических процессов в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера (ЗАИМ) и взаимодействия ее подсистем трудно переоценить [1-4]. При этом можно приспособляться к месту и времени проведения активного эксперимента, типу ракеты, ее мощности и т. п.

Реакция околоземной среды на старты ракет (СР) изучается достаточно давно (см., например, справочное пособие [5] и библиографию в нем). Во всех известных работах описаны эффекты в среде, вызванные стартом и полетом одной ракеты. При этом установлено, что в ионосфере на расстояниях более 2000 км от космодрома возникают волновые возмущения, имеющие скорости в сотни метров в секунду, единицы, а иногда и десятки километров в секунду и общую продолжительность около  $2 \div 3$  ч.

18 февраля 2004 г. в России была проведена масштабная многоцелевая тренировка “Безопасность – 2004” [6]. В ходе этой трени-

ровки в интервале времени с 07:05 до 10:28 (здесь и далее UT) были запущены три баллистические ракеты наземного базирования и одна баллистическая ракета морского базирования. Для радиофизиков и геофизиков запуски стали редким и дорогостоящим активным экспериментом. В наблюдениях сопутствующих эффектов и их анализе принял участие автор работы.

Целью настоящей работы является изложение результатов исследования эффектов в ионосфере и геомагнитном поле, сопутствовавших следовавшим друг за другом четырем СР различного базирования.

### 1. Средства и методы наблюдения

*Доплеровский радар.* Для наблюдения эффектов в ионосфере использовался доплеровский радар. Он расположен в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина вблизи г. Харькова ( $49^{\circ}38'$  с. ш.,  $36^{\circ}20'$  в. д.) [7-9]. Основные параметры радара: диапазон частот  $f = 1 \div 24$  МГц, импульсная мощность радиопередающего устройства – 1 кВт, длительность импульса  $\tau \approx 500$  мкс, частота по-

вторения импульсов – 100 Гц, полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства – 10 Гц. Антенная система представляет собой вертикальный ромб с коэффициентом усиления  $G \approx 1 \div 10$  в зависимости от рабочей частоты радиоволны. Инструментальная погрешность измерения доплеровского смещения частоты около 0.01 Гц. Отношение сигнал/помеха достигает  $10^5 \div 10^6$ . Радар сопряжен с персональным компьютером, образуя программно-аппаратный комплекс, ведущий измерения и предварительную обработку сигнала в реальном масштабе времени.

Высотная протяженность отраженного сигнала обычно существенно превышала  $c\tau/2 \approx 75$  км, где  $c$  – скорость света в вакууме. Поэтому использовалось стробирование по высоте с дискретностью  $\Delta z = 75$  км в диапазоне действующих высот  $z = 75 \div 450$  км.

*Магнитометр-флюксметр.* Это устройство применялось для наблюдения эффектов в геомагнитном поле. Несерийный высокочувствительный магнитометр, включенный в состав программно-аппаратного комплекса, размещен в Магнитометрической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (с. Граково, Чугуевский район, Харьковская обл.) [10]. Его географические координаты –  $49^\circ 40'$  с. ш.,  $36^\circ 50'$  в. д.; геомагнитные координаты –  $+45^\circ 20'$  геомагнитной широты,  $119^\circ 20'$  в. д.

Абсолютная погрешность магнитометра определяется уровнем собственных шумов, который составляет  $0.5$  пТл  $\div$   $0.5$  нТл для периодов  $1 \div 10^3$  с соответственно.

*Методы анализа.* В настоящей работе, как и в [11, 12], для анализа временных вариаций центральной частоты доплеровских спектров, получаемой с погрешностью около 0.017 Гц, и уровня горизонтальных компонент геомагнитного поля  $H(t)$  и  $D(T)$  применялись специальные алгоритм обработки и формат представления данных, включающий временные вариации параметра сигнала, результаты спектрального анализа с помощью оконного преобразования Фурье (ОПФ), вейвлет-преобразования (ВП) и адаптивного преобразования Фурье (АПФ).

Для вычисления спектров сигнала  $f(t)$  на основе ОПФ, ВП и АПФ соответственно использовались следующие соотношения [11-16]:

$$Sf(T, \tau) = \sqrt{\frac{2}{t_{wS}}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g\left(\frac{t-\tau}{t_{wS}/2}\right) \exp\left(-i \frac{2\pi t}{T}\right) dt, \quad (1)$$

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

$$A_v f(T_v, \tau) = \sqrt{\frac{2}{vT_v}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g\left(\frac{t-\tau}{vT_v/2}\right) \times \exp\left(-i \frac{2\pi}{T_v}(t-\tau)\right) dt. \quad (3)$$

Здесь  $g$  – оконная функция,  $t_{wS}$  – ширина окна для ОПФ;  $T = 2\pi/\omega$  и  $T_v = 2a/v$  – величины, имеющие физический смысл периодов колебаний; символом “\*” обозначается комплексное сопряжение, а разложение производится по базису вейвлетов

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{a^{1/2}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right),$$

где  $a$  – параметр масштабирования ( $a > 0$ ),  $b$  – параметр сдвига. Удобно перейти к относительным периодам:  $\tilde{T} = T/t_{wS}$  и  $\tilde{T}_v = T_v/t_{wS}$ . Далее индекс  $v$  по возможности будет опускаться. Остальные величины также представлены в относительных единицах.

В данной работе для ОПФ и АПФ в качестве  $g(t)$  использовалось окно Хемминга, обладающее известными достоинствами и имеющее вид (см., например, [13]):

$$g_H(t) = \gamma[0.54 + 0.46 \cos \pi t],$$

где  $\gamma \approx 1.12$  – нормирующий множитель.

Для ВП в качестве  $\psi(t)$  применялся вейвлет Морле, который задается выражением [15]:

$$\psi(t) = \exp(-t^2/2) \cos 5t. \quad (4)$$

Здесь, как и выше,  $t$  – безразмерное время. Вейвлет (4) удобен для анализа коротких цугов волн, которые, как правило, и наблюдаются в ионосфере и в вариациях геомагнитного поля.

Наряду с выражениями (1) – (3) анализировались следующие зависимости, представляющие собой спектрограммы:

$$P_S f(\omega, \tau) = |Sf(\omega, \tau)|^2,$$

$$P_W f(a, b) = |Wf(a, b)|^2,$$

$$P_A f(a, \tau) = |A_v f(a, \tau)|^2.$$

Как известно, спектрограмма – двумерная плотность энергии исследуемого сигнала  $f(t)$ .

Кроме функций  $P_S(\tilde{T}, \tau)$ ,  $P_A(\tilde{T}, \tau)$  и  $P_W(\tilde{T}, \tau)$ , в работе использовались следующие величины:

$$E_S(\tilde{T}) = \int_{-\infty}^{\infty} P_S(\tilde{T}, \tau) d\tau,$$

$$E_A(\tilde{T}) = \int_{-\infty}^{\infty} P_A(\tilde{T}, \tau) d\tau,$$

$$E_W(\tilde{T}) = \int_{-\infty}^{\infty} P_W(\tilde{T}, \tau) d\tau.$$

Известно, что локальные максимумы в зависимостях  $E_W(\tilde{T})$ ,  $E_S(\tilde{T})$  и  $E_A(\tilde{T})$  указывают на распределение энергии по спектру (интервалу периодов) в течение всего времени анализа и на наличие определенных гармонических компонент с соответствующими периодами в анализируемом сигнале. Эти за-

висимости естественно называть энергограммами [11, 12].

Совместное использование ОПФ, ВП и АПФ оказывается целесообразным, поскольку при конечном времени обработки они дополняют друг друга и позволяют получить более полную информацию о частотно-временной (время-периодной) локализации компонент сложного, в общем случае нестационарного сигнала.

## 2. Краткие сведения о ракетах

Основные параметры ракет, эффекты от которых анализируются в настоящей работе, приведены в табл. 1. Из таблицы видно, что согласно классификации [17] ракета “Молния-М” относится к классу тяжелых ракет, ракета “Рокот” – к классу ракет средней тяжести, а ракеты “Тополь” и “Синева” – к классу легких ракет.

Мощности ступеней ракет можно оценить из следующей формулы:

$$P_f = q \frac{dm}{dt},$$

где  $q \approx 10$  МДж/кг – удельное энергосодержание топлива (т. е. смеси горючего и окислителя), которое для простоты принималось одинаковым для жидкостных и твердотопливных ракет;  $dm/dt$  – расход топлива.

Энерговыведение топлива

$$E_f = P_f \Delta t_f,$$

где  $\Delta t_f$  – время работы двигателя соответствующей ступени.

Для корректной интерпретации наблюдаемых магнитоионосферных эффектов необходимо знание не только места СР, но и, вообще говоря, траектории полета ракеты. Две ракеты были запущены с космодрома Плесецк, одна – с космодрома Байконур. Координаты этих космодромов хорошо известны. Четвертая ракета стартовала с подводного крейсера,

Таблица 1. Краткие сведения о ракетах

| Тип ракеты   | Молния-М | Рокот | Тополь | Синева |
|--|----------|-------|--------|--------|
| Полная масса, т  | 312.6    | 106.1 | 47.2   | 32.5   |
| Начальная тяга, МН   | 4.19     | 1.6   | 0.89   | 0.5    |
| Высота, м  | 40       | 29    | 22.7   | 13.2   |
| Максимальный диаметр, м                                      | 2.7      | 2.5   | 1.85   | 1.8    |
| Низкоорбитальная<br>(высота 200 км)<br>полезная нагрузка, кг | 1800     | 1950  | 1200   | 500    |
| Параметры нулевой ступени                                    |          |       |        |        |
| Масса, т   | 178.8    | –     | –      | –      |
| Тяга, МН   | 1        | –     | –      | –      |
| Диаметр, м   | 2.7      | –     | –      | –      |
| Высота, м  | 19       | –     | –      | –      |
| Время работы, с  | 119      | –     | –      | –      |
| Мощность, ГВт  | 16       | –     | –      | –      |
| Энерговыделение, ТДж   | 1.9      | –     | –      | –      |
| Параметры первой ступени                                     |          |       |        |        |
| Масса, т   | 101.9    | 85.4  |        |        |
| Тяга, МН   | 1        | 1.8   |        |        |
| Диаметр, м   | 2.7      | 2.5   |        |        |
| Высота, м  | 19       | 13.3  |        |        |
| Время работы, с  | 291      | 121   |        |        |
| Мощность, ГВт  | 3.8      | 7.6   |        |        |
| Энерговыделение, ТДж   | 1.1      | 0.9   |        |        |
| Параметры второй ступени                                     |          |       |        |        |
| Масса, т   | 25.2     | 15.1  |        |        |
| Тяга, МН   | 0.3      | 0.2   |        |        |
| Диаметр, м   | 2.6      | 2.5   |        |        |
| Высота, м  | 2.8      | 2.9   |        |        |
| Время работы, с  | 241      | 155   |        |        |
| Мощность, ГВт  | 0.9      | 1.0   |        |        |
| Энерговыделение, ГДж   | 260      | 150   |        |        |
| Параметры третьей ступени (разгонного блока)                 |          |       |        |        |
| Масса, т   | 6.7      | 5.6   |        |        |
| Тяга, МН   | 0.07     | 0.02  |        |        |
| Диаметр, м   | 2.4      | 2     |        |        |
| Высота, м  | 3.2      | 2.3   |        |        |
| Время работы, с  | 250      | 150   |        |        |
| Мощность, ГВт  | 0.3      | 0.4   |        |        |
| Энерговыделение, ГДж   | 69       | 58    |        |        |

который находился в Баренцевом море. Пуск этой ракеты осуществлял Военно-Морской Флот России, и точные координаты в средствах массовой информации не сообщались.

Несколько слов о траекториях ракет. Все они были ориентированы преимущественно на восток. Точное знание траекторий для настоящей работы не существенно по следующим причинам. Как отмечалось нами ранее, эффективная генерация волн различной природы ракетой с работающим двигателем имеет место при достижении космическим аппаратом ионосферных высот (см., например [12]). В то же время плотность атмосферы должна быть достаточно большой, чтобы в среде могли генерироваться ударные акустические волны. Такие оптимальные условия возникают на высотах  $100 \div 130$  км, которых ракета в зависимости от типа двигателя достигает за  $2 \div 3$  мин. За это время космический аппарат удаляется от ракетодрома не более чем на  $100 \div 150$  км. При расстояниях от обсерватории до космодрома  $1500 \div 2000$  км эта поправка не превышает  $5 \div 10$  %. Поэтому координаты места генерации волн в атмосфере часто отождествляют с координатами космодрома.

### 3. Состояние космической погоды

Временные вариации основных параметров, характеризующих состояние космической погоды, приведены на рис. 1. Из него видно, что 18 февраля 2004 г. концентрация, температура, скорость частиц и давление солнечного ветра были типичными для невозмущенных условий. Величины потоков заряженных частиц также соответствовали спокойным условиям. Возмущения межпланетного и геомагнитного полей были незначительными. В частности, до 14:00 индексы  $K_p \approx 1 \div 2$  и  $D_{st} \approx -10 \div -20$  нТл. Рассчитанная мощность солнечного ветра, поступающая в магнитосферу и описываемая функцией Акасофу, в среднем была около 5 ГДж/с.

Таким образом, можно считать, что естественная возмущенность геокосмоса в день активного эксперимента была слабой. Это позволило с определенной степенью уверенности утверждать, что наблюдаемые возмущения в ионосфере и геомагнитном поле вызваны СР.

### 4. Результаты наблюдений

СР “Молния-М”. Эта ракета стартовала с космодрома Плесецк в 07:05.

Остановимся вначале на описании временных вариаций доплеровских спектров (ДС) (рис. 2) и результатов спектрального анализа (рис. 3). Утром примерно до 06:40 в ионосфере имели место волновые возмущения (ВВ) с периодами  $T$  около  $15 \div 20$  и  $50 \div 70$  мин. Примерно за 20 мин до СР вариации ДС были незначительными (см. крайнюю левую панель на рис. 2). Через 17 мин после СР волновая активность усилилась: появились ВВ, которым соответствовали максимальные вариации центральной частоты ДС  $f_d \approx 0.2$  Гц. В спектре ВВ преобладали периоды от 5 до 10 и от 20 до 27 мин. В интервале времени с 08:10 до 08:15 значение  $f_d$  уменьшилось примерно на 0.5 Гц и за 2 мин вернулось к исходному значению. В течение последующих 15 мин  $f_d \approx 0$ .

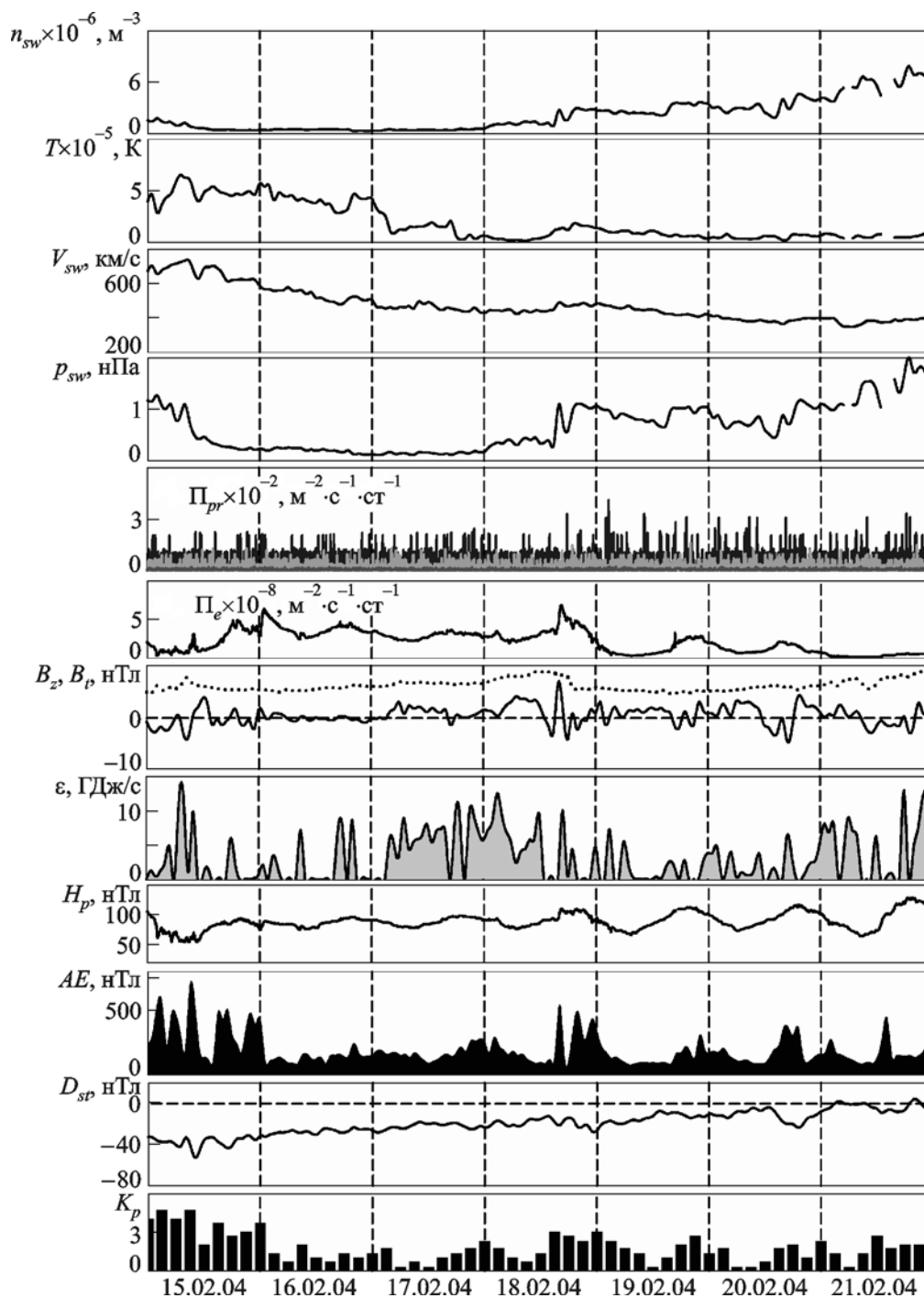
Очередное изменение характера вариаций ДС наблюдалось с 08:30 до 09:18.

Из рис. 3 видно, что после СР существенно изменился спектральный состав ВВ. Если до СР преобладали колебания с периодами  $T \approx 15 \div 20$  мин и  $T \approx 50 \div 70$  мин, то после СР стали превалировать колебания с  $T \approx 10$  мин и  $T \approx 20 \div 25$  мин. Продолжительность этих процессов была около  $70 \div 90$  мин.

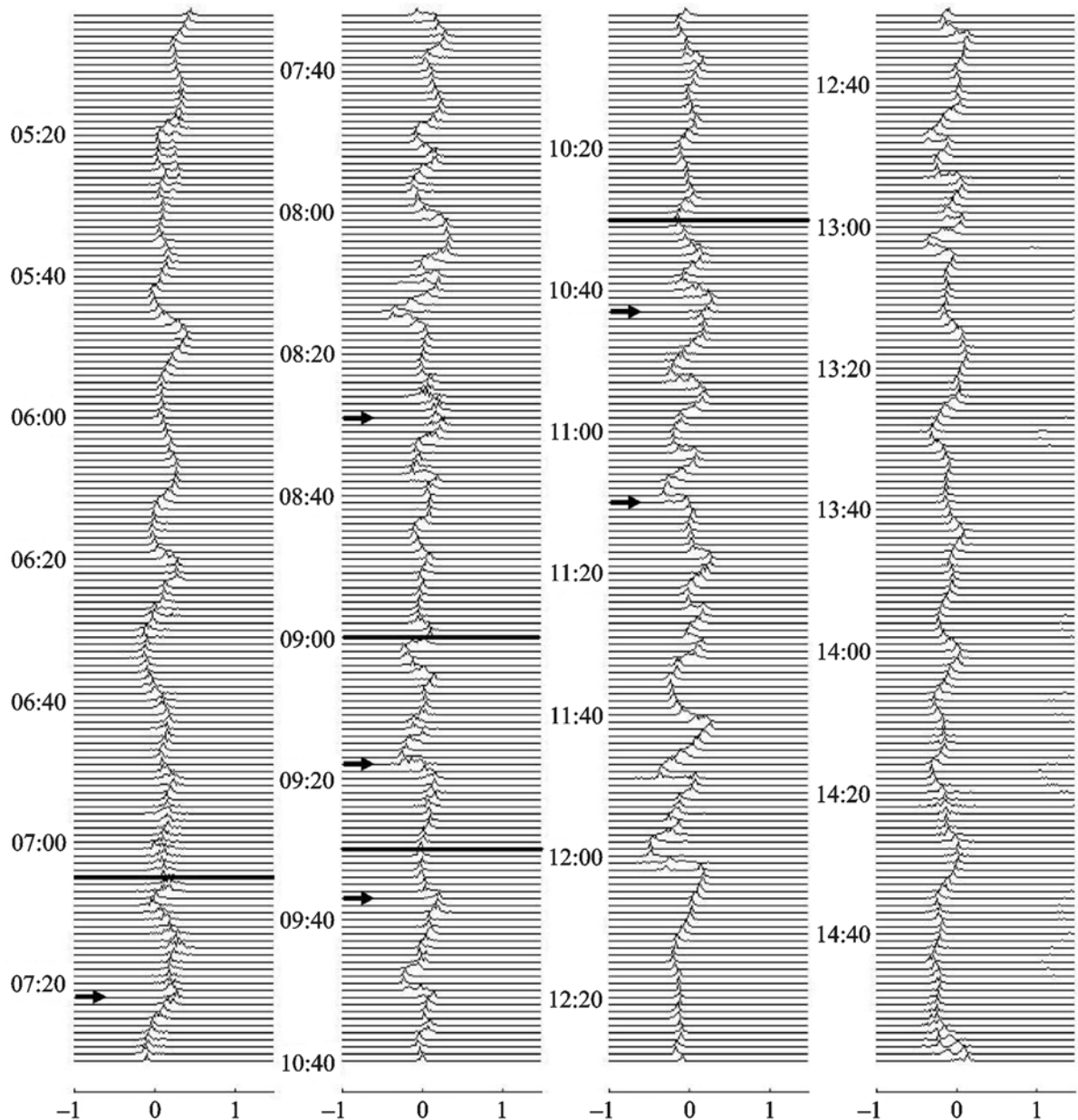
Далее рассмотрим временные вариации геомагнитного поля (рис. 4) и результаты спектрального анализа (рис. 5). До СР уровни обеих компонент изменялись по квазипериодическому закону с  $T \approx 7 \div 12$  мин. Примерно через 24 мин после СР произошел “сбой” существовавшего колебания. Это длилось  $7 \div 11$  мин.

Следующее изменение характера сигнала началось через 42 мин после СР и продолжалось 15 и 30 мин для  $D$ - и  $H$ -компоненты соответственно.

В интервале времени с 08:05 до 09:05 в  $D$ -компоненте наблюдались колебания с  $T \approx 10 \div 15$  мин (см. рис. 5, в). Две группы возникающих возмущений хорошо видны на спектрограммах, особенно на спектрограммах, полученных с помощью АПФ, (см. рис. 5, в, нижняя панель).



**Рис. 1.** Временные вариации параметров солнечного ветра: концентрации частиц  $n_{sw}$ , температуры  $T$ , радиальной скорости  $V_{sw}$  и расчетных значений динамического давления  $p_{sw}$  (ACE Satellite – Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor); – плотностей потоков протонов  $\Pi_{pr}$  (GOES-8 (W75)) и электронов  $\Pi_e$  (GOES-12); компонент  $B_z$ ,  $B_r$  межпланетного магнитного поля (ACE Satellite – Magnetometer); функции Акасофу  $\epsilon$ ;  $H_p$ -компоненты геомагнитного поля (GOES-12); AE-индекса авроральной активности (WDC Kyoto);  $D_{st}$ -индекса (WDC-C2 for Geomagnetism Kyoto University);  $K_p$ -индекса (Air Force Weather Agency)



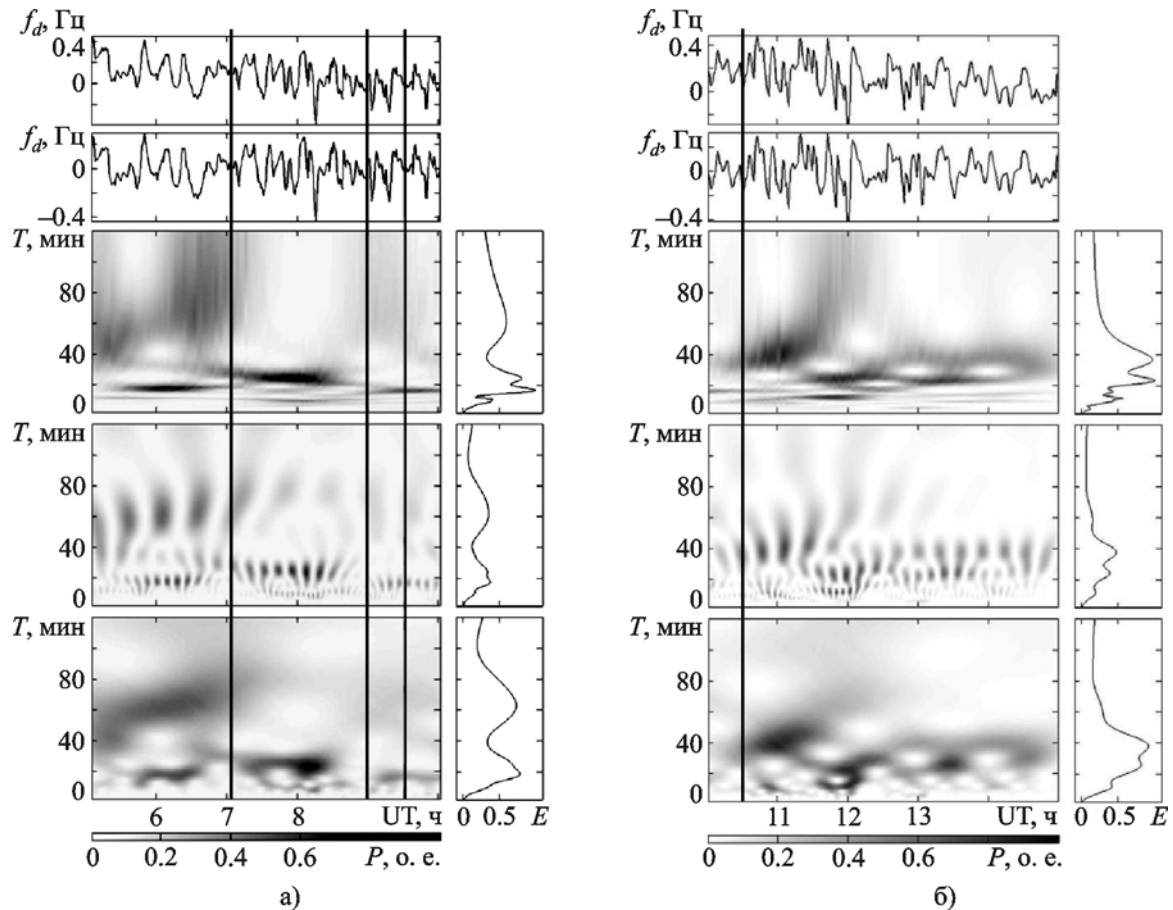
**Рис. 2.** Временные вариации ДС 18 февраля 2004 г. на частоте 2.4 МГц для строба, соответствующего диапазону высот 250 ÷ 325 км. Время указано слева от каждой панели. Моменты старта ракет показаны сплошными горизонтальными линиями. Стрелками показаны моменты начала изменения характера сигнала

СР “Рокот”. Эта ракета стартовала в 09:00 с шахтной пусковой установки космодрома Байконур.

Первое изменение характера временных вариаций ДС возникло примерно через 18 мин после СР (см. рис. 2, рис. 3). В течение пос-

ледующих 17 мин  $f_d \approx 0$ . Затем появилось ВВ с  $T \approx 10$  мин, которое наблюдалось до 10:27.

Поведение временных вариаций геомагнитного поля было следующим (см. рис. 4, рис. 5). Через 7 ÷ 10 мин после СР “Рокот” изменился характер вариаций сигнала: для  $D$ -ком-



**Рис. 3.** Результаты спектрального анализа временных вариаций центральной частоты  $f_d(t)$  в ДС для интервала времени с 05:00 до 10:00 (а) и с 10:00 до 15:00 (б) и соответствующие им энергограммы (панели сверху вниз): временные вариации  $f_d(t)$ , то же после удаления тренда, результаты ОПФ, результаты ВП, результаты АПФ

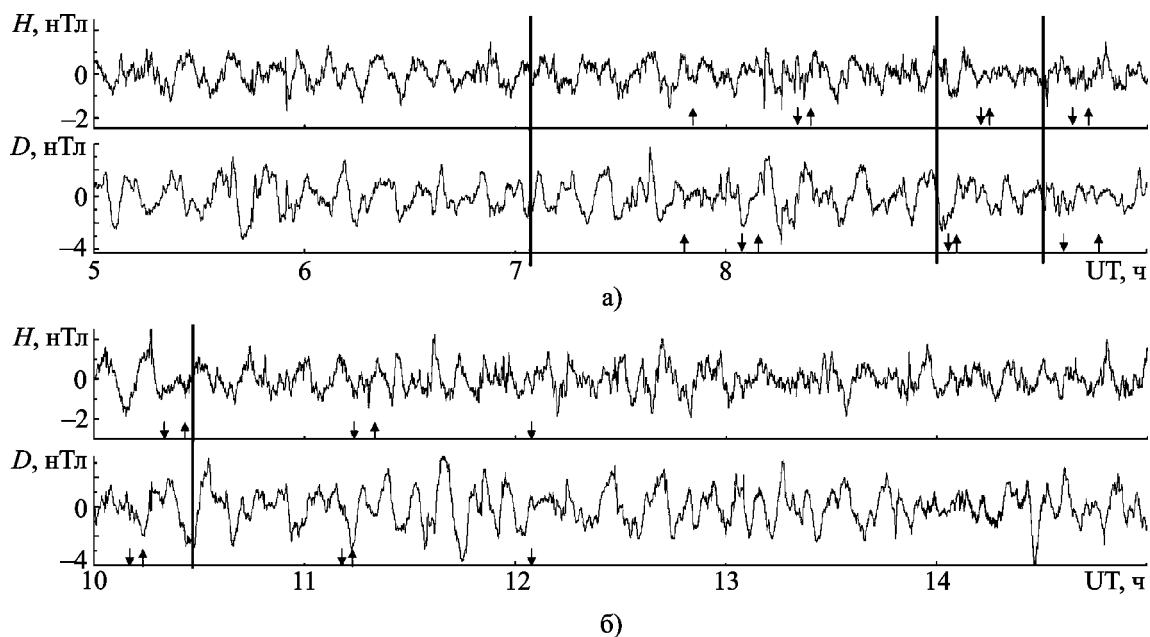
поненты уровень сигнала уменьшился примерно в 2 раза и сигнал стал более высокочастотным (такое поведение имело место примерно до 10:15); для  $H$ -компоненты в интервале времени с 09:10 – 09:40 уровень сигнала также уменьшился вдвое и сигнал стал более высокочастотным.

*СР “Синева”*. Старт произошел в 09:30 с подводного крейсера “Карелия”, который находился в акватории Баренцева моря. Расстояние  $R$  от обсерватории до места СР составляло около 3 тыс. км. Полет ракеты проходил в нештатном режиме. На 98-й секунде полета, когда ракета находилась на высоте около 10 км, произошло отклонение от заданной тра-

ектории, сработала система самоликвидации, и ракета была подорвана. При этом в ней оставалось около 15 т топлива с удельным энергосодержанием, близким к 10 МДж/кг. Если все топливо сдетонировало, энергия взрыва составляла около 150 ГДж, что эквивалентно взрыву примерно 40 т тринитротолуола (ТНТ).

Первое после СР изменение характера вариаций ДС, которому соответствовало ВВ с  $T \approx 10 \div 12$  мин, возникло примерно в 09:37 и продолжалось до 10:44 (см. рис. 2, рис. 3). После этого период ВВ уменьшился до  $5 \div 6$  мин. Такой период наблюдался в течение примерно 50 мин.





**Рис. 4.** Временные вариации  $H$ - и  $D$ -компоненты геомагнитного поля 18 февраля 2004 г.: а) – с 5:00 до 10:00; б) – с 10:00 до 15:00. Моменты старта ракет показаны сплошными вертикальными линиями. Стрелками, направленными вверх и вниз, показаны соответственно моменты начала и окончания изменения характера сигнала

Рассмотрим вариации магнитометрических сигналов. Для  $D$ -компоненты сигнал оставался высокочастотным до 10:15, его амплитуда не превышала  $1 \div 1.5$  нТл (см. рис. 4). В интервале времени 10:15 – 10:35 в сигнале преобладали колебания с  $T \approx 7 \div 16$  мин (см. рис. 5, г).

В интервале времени с 9:20 до 10:00 уровень  $H$ -компоненты также был в пределах  $1 \div 1.5$  нТл. С 10:00 до 10:17 он резко возрастал – возникал М-образный отклик с величиной квазипериода около  $8 \div 9$  мин.

Особенно интенсивный волновой пакет, хорошо заметный на спектрограммах, наблюдался в интервале времени с 09:50 до 10:15 и с 10:20 до 10:35 для  $H$ - и  $D$ -компоненты соответственно. Период колебаний составлял  $9 \div 13$  мин.

СР “Тополь”. Старт произошел в 10:28 с космодрома Плесецк.

Первое изменение характера вариаций ДС имело место в 10:44 (см. рис. 2, рис. 3). При этом на смену одному колебанию с  $T \approx 5$  мин

пришло другое с периодом  $T \approx 9$  мин. Кроме того, резко возросла амплитуда колебательного процесса с периодом  $35 \div 40$  мин. Это продолжалось в течение  $40 \div 60$  мин.

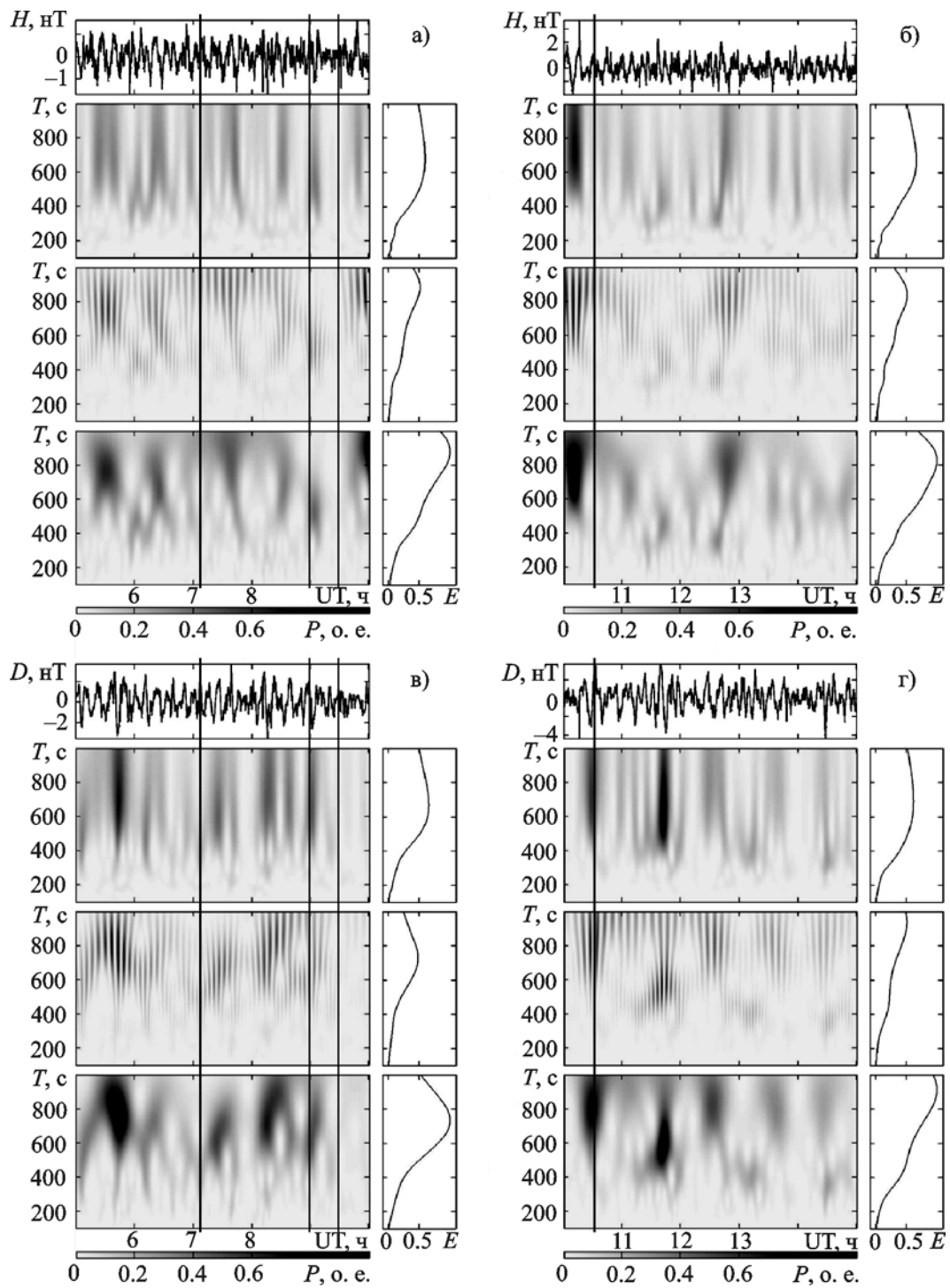
Второе изменение характера вариаций ДС наблюдалось в интервале времени 11:10 – 11:30. При этом колебательный процесс имел период около  $5 \div 6$  мин.

Следующее изменение характера вариаций ДС отмечалось с 11:30 до 12:10. Резко увеличилась амплитуда колебаний с  $T = 10 \div 20$  мин, а затем и с  $T = 25 \div 30$  мин.

Относительно короткопериодные ( $T \approx 5$  мин) колебания  $f_d$  имели место также с 12:30 до 13:04. Позже наблюдались вариации  $f_d$  с периодами  $15 \div 20$  мин.

Заметное изменение характера магнитометрических сигналов началось примерно через 42 мин после СР “Тополь” и продолжалось в течение 40 и 60 мин для  $H$ - и  $D$ -компоненты соответственно (см. рис. 4, рис. 5).

В спектрограммах для  $D$ -компоненты четко выделялся колебательный процесс с



**Рис. 5.** Результаты спектрального анализа временных вариаций  $H$ -компоненты (а, б) и  $D$ -компоненты (в, г) геомагнитного поля для интервала времени с 05:00 до 10:00 (а, в) и с 10:00 до 15:00 (б, г) и соответствующие им энергограммы (панели сверху вниз): временные вариации  $H(t)$  и  $D(t)$ , результаты ОПФ, результаты ВП, результаты АПФ

$T \approx 7 \div 12$  мин, наблюдавшийся в интервале времени 11:40 – 11:50. Судя по величинам времени запаздывания и периодов колебаний, он обусловлен СР.

Добавим, что заход Солнца на уровне Земли в обсерватории имел место около 15:00. Поэтому эффекты, связанные с прохождением солнечного терминатора, наблюдались после 16:00 и не могли накладываться на эффекты СР.

## 5. Обсуждение

*Эффекты в ионосфере.* Анализ временных вариаций ДС показал, что в интервале времени примерно с 07:20 до 12:10 волновая активность заметно увеличилась. Периоды колебаний стали меньше (вплоть до 5 мин), а амплитуда доплеровского смещения частоты  $f_{da}$  увеличивалась до  $0.2 \div 0.3$  Гц, а иногда даже до 0.4 Гц. Для оценки амплитуды относительных возмущений концентрации электронов в ВВ можно воспользоваться следующей формулой [7]:

$$f_{da} \approx \frac{4\pi f}{T} \delta_N L,$$

где  $f$  – рабочая частота радиоволны,  $T$  – период преобладающего колебания,  $L$  – толщина слоя, дающего основной вклад в доплеровское смещение частоты. Например, при  $T \approx 8$  мин,  $L \approx 30$  км,  $f \approx 3$  МГц и  $f_{da} \approx 0.4$  Гц имеем  $\delta_N \approx 7\%$ . При типичном значении  $f_{da} \approx 0.2 \div 0.3$  Гц, наблюдаемом в ходе этого активного эксперимента,  $\delta_N \approx 3 \div 5\%$ .

Оценим характерные скорости распространения возмущений, вызываемых стартами и полетами ракет.

После СР “Молния-М” первое изменение характера вариаций ДС имело место через время  $\Delta t_1 \approx 18$  мин. Если учесть, что возмущение в плазме генерируется после достижения ракетой ионосферных высот, скорректированное значение  $\Delta t'_1 = \Delta t_1 - \Delta t_0 \approx 15$  мин, где  $\Delta t_0 \approx 3$  мин – время движения ракеты до высоты  $z \approx 100$  км. Тогда при удалении ракеты от места наблюдения  $R \approx 1500$  км получим  $v'_1 \approx 1.7$  км/с.

Второе изменение характера временных вариаций ДС после СР наблюдалось через время  $\Delta t_2 \approx 47$  мин. Тогда  $v'_2 \approx 570$  м/с.

После СР “Тополь”  $\Delta t_2 \approx 60$  мин,  $v'_2 \approx 440$  м/с. Значение  $\Delta t_1$  надежно определить не удалось, так как на возмущение от ракеты “Тополь”, по-видимому, наложилось возмущение, вызванное подрывом ракеты “Синева”. Последнее рассмотрим несколько подробнее.

Энерговыделение при подрыве ракеты, по-видимому, не превышало энерговыделение эквивалента в 40 т ТНТ. Важно, что оно имело место на высоте около 10 км, где плотность воздуха примерно в  $4 \div 5$  раз меньше, чем у поверхности Земли. Поэтому по своим пространственно-временным масштабам этот взрыв был эквивалентен наземному взрыву с энерговыделением, соответствующим  $160 \div 200$  т ТНТ.

Для сравнения укажем, что в ходе ставшего классическим проекта МАССА, в процессе которого были проведены комплексные экспериментальные и теоретические исследования динамических процессов в подсистемах системы ЗАИМ, было взорвано 251 т ТНТ (см., например, [18, 19]). Поэтому подрыв ракеты был достаточно мощным источником воздействия на систему ЗАИМ и мог вызвать комплекс регистрируемых процессов в ионосфере и геомагнитном поле.

После подрыва ракеты “Синева” спустя время  $\Delta t_1 \approx 5$  мин изменился характер временных вариаций ДС. Вторично это произошло через время  $\Delta t_2 \approx 71$  мин. Заметим, что для достижения ионосферных высот ( $z \approx 100$  км) акустическому импульсу потребуется время около 5 мин, что очень близко к наблюдаемой временной задержке  $\Delta t_1$ . Этот импульс мог сгенерировать электромагнитное возмущение, которое в виде ионосферной МГД-волны дошло до места наблюдения и проявилось в вариациях ДС в интервале времени 09:37 – 10:20. Задержка  $\Delta t'_2 = \Delta t_2 - \Delta t_1 \approx 66$  мин при  $R \approx 3000$  км соответствовала скорости  $v'_2 \approx 760$  м/с.

Заметим, что изменение характера вариаций ДС имело место также в интервале времени 11:10 – 11:30. При этом  $\Delta t_3 \approx 100$  мин,  $\Delta t'_3 = \Delta t_3 - \Delta t_1 \approx 95$  мин,  $v'_3 \approx 530$  м/с.

Важно, что примерно такие же скорости наблюдались при изучении эффектов в ионосфере, вызванных СР, как другими авторами [20-24], так и нами [17, 25-29]. Соответствия скоростей и амплитуд ВВ, полученных в настоящей работе, результатам работ [20-25] свидетельствуют в пользу того, что в ходе активного эксперимента, проведенного 18 февраля 2004 г., действительно наблюдались эффекты, связанные со стартами и полетами ракет (включая подрыв одной из них).

*Эффекты в геомагнитном поле.* Если первое изменение характера сигнала, имевшее запаздывание  $\Delta t_1 \approx 24$  мин, связано с СР “Молния-М”, то  $v'_1 \approx 1.2$  км/с. Для  $\Delta t_2 \approx 42$  мин скорость  $v'_2 \approx 640$  м/с.

Возможная реакция на СР “Рокот” началась через время  $\Delta t_2 \approx 42$  мин. При этом  $v'_2 \approx 900$  м/с. Если СР связан со значительным ростом амплитуды сигнала  $H$ -компоненты, то  $\Delta t_2 \approx 60$  мин, а  $v'_2 \approx 610$  м/с. Последняя скорость представляется более правдоподобной.

Если реакция на подрыв ракеты “Синева” существовала, она могла начаться через  $\Delta t \approx 43$  мин, что видно по изменению характера вариаций  $D$ -компоненты сигнала. Для  $\Delta t_0 \approx 5$  мин время  $\Delta t' \approx 38$  мин и  $v' \approx 1.3$  км/с. Продолжительность этих вариаций  $\Delta T$  была около 60 мин. Величина  $\Delta t$  для  $H$ -компоненты составляла около 50 мин, и  $\Delta T \approx 50$  мин.

С СР “Тополь” могло быть связано изменение характера сигнала, имевшее запаздывание  $\Delta t_2 \approx 42$  мин. При этом  $v'_2 \approx 640$  м/с.

Таким образом, в ходе активного эксперимента изменения характера вариаций сигналов возникали, если возмущения переносились со скоростями  $v'_1 \approx 1.2 \div 1.3$  км/с и  $v'_2 \approx 610 \div 640$  м/с. Интересно, что примерно такие же скорости ( $v'_1 \approx 1.7$  км/с и  $v'_2 \approx 440 \div 760$  м/с) дают и доплеровские наблюдения. Очевидно, что плазменные и магнитные возмущения имели общую природу. Первую из указанных скоростей имеют медленные МГД-волны [30], вторую – акустико-гравитационные волны в ионосфере [31, 32]. Такие скорости ранее неоднократно наблюдались нами [25-29], а также другими исследователями [20-24].

Добавим, что в течение активного эксперимента временные изменения магнитометрических сигналов в целом были более быстрыми в интервале времени с 07:20 до 12:00. Этим регистрацией 18 февраля отличались от регистраций в фоновые дни 17 и 19 февраля 2004 г. (рис. 6, рис. 7). Усиление волновой активности, наблюдавшееся по вариациям ДС, также пришлось на время 07:20 – 12:00.

## 6. Выводы

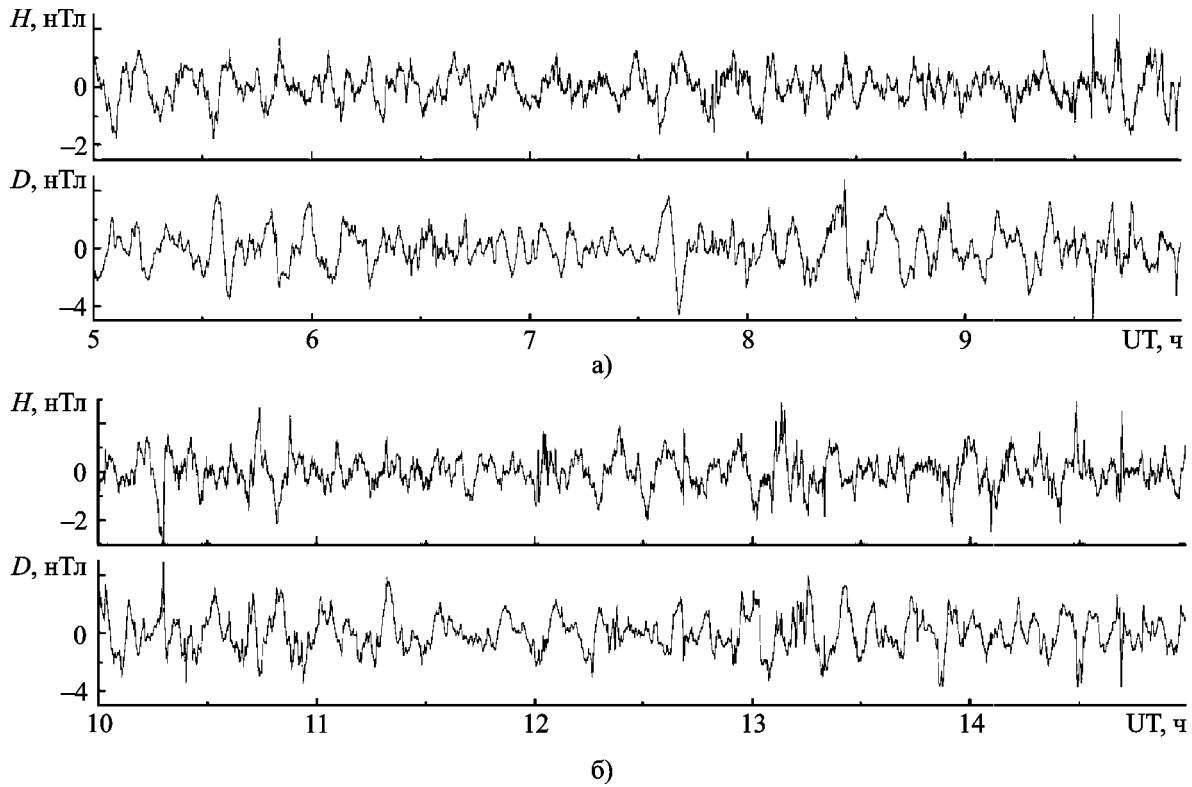
1. Проведение активного эксперимента (четыре старта и полета ракет, подрыв одной из них) в атмосфере и геокосмосе привело к усилению волновой активности в ионосфере и геомагнитного поля. Реакции на разные источники (разные ракеты) накладывались, что серьезно затрудняло их идентификацию. В соседние, фоновые, дни волновая активность была заметно ниже.

2. Амплитуда вариаций доплеровского смещения частоты в период активного эксперимента составляла  $0.2 \div 0.3$  Гц, но иногда достигала 0.4 Гц. При среднем периоде  $T \approx 8$  мин таким вариациям соответствовали значения  $\delta_N \approx 3 \div 5\%$  и  $7\%$  соответственно.

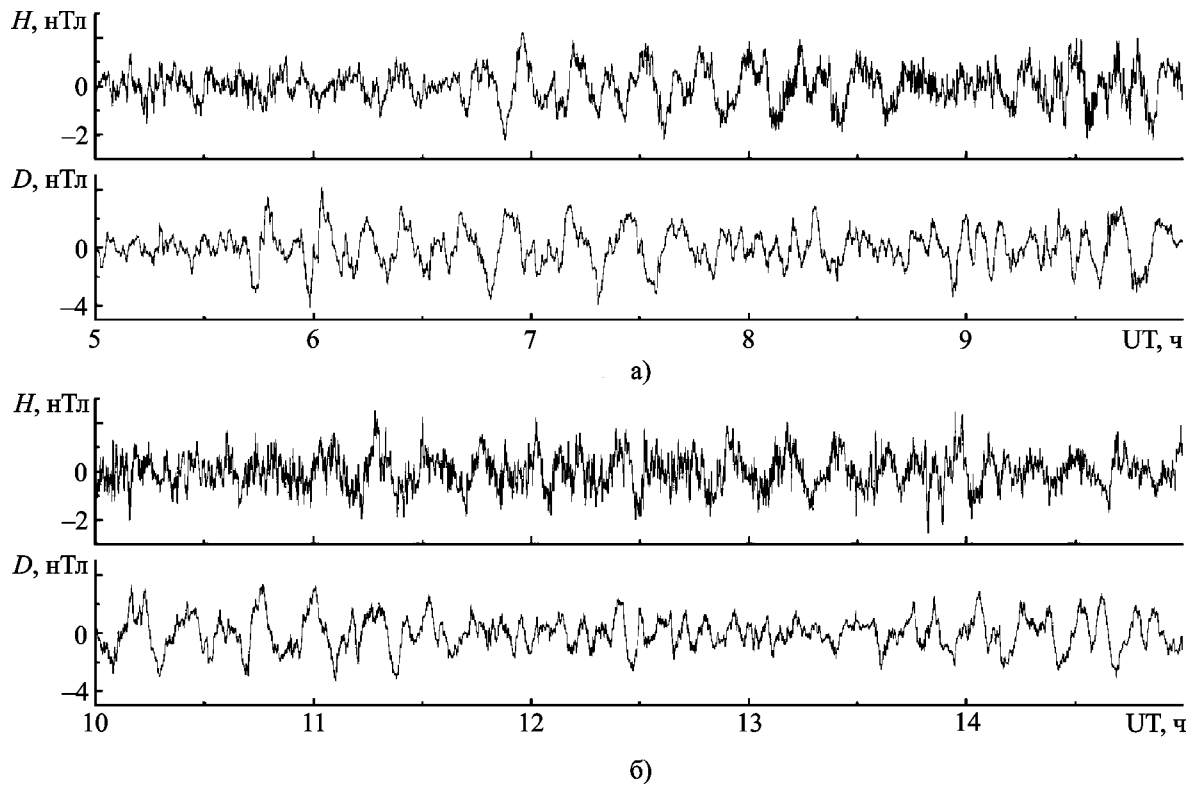
3. В день активного эксперимента (точнее с 07:20 до 12:00) вариации уровня геомагнитного поля по сравнению с фоновыми вариациями были более нерегулярными (более высокочастотными).

4. В ходе активного эксперимента наблюдались волновые возмущения с периодами инфразвуковых колебаний ( $5 \div 6$  мин) и внутренних гравитационных волн ( $T \geq 10$  мин). Для иллюстрации эволюции спектрального состава наблюдаемых возмущений оказался удобным разработанный нами ранее формат представления данных.

5. Подрыв ракеты, сопровождавшийся энерговыделением порядка 150 ГДж послужил, скорее всего, причиной появления волновых возмущений в ионосфере, имевших скорость распространения около 760 м/с, период  $6 \div 8$  мин и продолжительность, близкую к 55 мин.



**Рис. 6.** Временные вариации  $H$ - и  $D$ -компоненты геомагнитного поля в фоновый день 17 февраля 2004 г.: а) с 5:00 до 10:00; б) – с 10:00 до 15:00



**Рис. 7.** Временные вариации  $H$ - и  $D$ -компоненты геомагнитного поля в фоновый день 19 февраля 2004 г.: а) с 5:00 до 10:00; б) – с 10:00 до 15:00

6. СР “Молния-М” и “Тополь” с космодрома Плесецк сопровождалась подобными вариациями ДС, имевшими запаздывания около  $50 \div 60$  мин и продолжительности, близкие к  $25 \div 30$  мин. Таким запаздываниям соответствует скорость распространения возмущений, равная  $440 \div 530$  м/с.

7. Возмущениям параметров ионосферы и геомагнитного поля, сопровождавшим старты ракет, были свойственны близкие скорости, равные  $1.7$  км/с и  $440 \div 760$  м/с для ионосферы,  $1.2 \div 1.3$  км/с и  $610 \div 640$  м/с для геомагнитного поля. Большая скорость характерна для медленных МГД-волн, меньшая – для акустико-гравитационных волн.

8. Оцененные значения величины возмущения параметров ионосферы и геомагнитного поля, скорости их распространения и продолжительности находятся в соответствии с результатами других авторов и наших более ранних исследований.

Автор благодарен К. П. Гармашу и С. Г. Леусу за организацию непрерывных магнитометрических наблюдений, а С. В. Панасенко и М. А. Шамоте за помощь, оказанную в процессе подготовки настоящей работы.

## Литература

- Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – геокосмос как открытая динамическая нелинейная система // *Космічна наука і технологія*. – 2003. – Т. 9, № 5/6. – С. 96-105.
- Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2003. – Т. 8, №1. – С. 59-106.
- Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 // *Нелинейный мир*. – 2006. – Т. 4, №12. – С. 655-697.
- Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // *Нелинейный мир*. – 2007. – Т. 5, №4. – С. 198-231.
- Экологические проблемы и риски воздействия ракетно-космической техники на окружающую среду. *Справочное пособие* / Под ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова и А. В. Петрова. – М.: Анкил, 2000. – 640 с.
- www.itar-tass.com
- Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование естественно-возмущенной средней ионосферы // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 1999. – Т. 4, №3. – С. 209-226.
- Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергетичными источниками // *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. – 1999. – №7. – С. 3-15; 1999. – №8. – С. 3-19.
- Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И., Тырнов О. Ф., Черногор Л. Ф. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года // *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. – 2002. – №2. – С. 25-63.
- 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. – Т. 8, №2. – С. 163-180.
- Лазоренко О. В., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Адаптивное преобразование Фурье // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2005. – Т. 10, №10. – С. 39-49.
- Бурмака В. П., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических процессов в геокосмосе // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2007. – №11. – С. 3-24.
- Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
- Holschneider M. *Wavelets: An Analysis Tool*. – Oxford: Calderon Press, 1995. – 423 p.
- Дьяконов В. П. *Вейвлеты. От теории к практике*. – М.: Солон-Р, 2002. – 448 с.
- Малла С. *Вэйвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ.* – М.: Мир, 2005. – 671 с.
- 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.
- Альперович Л. С., Гохберг М. Б., Дробжев В. И. и др. Проект МАССА – исследование магнитосферно-ионосферных связей при сейсмоакустических явлениях // *Физика Земли*. – 1985. – № 11. – С. 5-8.

19. Альперович Л. С., Пономарев Е. А., Федорович Г. В. Моделируемые взрывом геофизические явления (Обзор) // Физика Земли. – 1985. – №11. – С. 9-20.
20. Arendt P. R. Ionospheric Undulations following Apollo 14 Launching // Nature. – 1971. – Vol. 231. – P. 438-439.
21. Noble S. T. A Large-Amplitude Travelling Ionospheric Disturbance Excited by the Space Shuttle During Launch // J. Geophys. Res. – 1990. – Vol. 95, No. A 11. – P. 19,037-19,044.
22. Нагорский П. М. Неоднородная структура области F ионосферы, образованная ракетами // Геомагнетизм и аэрномия. – 1998. – Т. 38, №2. – С. 100-106.
23. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П., Плотников А. В. Регистрация ионосферных откликов на ударно-акустические волны, генерируемые при запусках ракет-носителей // Геомагнетизм и аэрномия. – 2002. – Т. 42, №6. – С. 790-797.
24. Соколова О. И., Краснов В. М., Николаевский Н. Ф. Изменения геомагнитного поля под влиянием запусков ракет с космодрома Байконур // Геомагнетизм и аэрномия. – 2003. – Т. 46, №4. – С. 561-565.
25. 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 радиоаэрномия. – 2003. – Т. 8, №2. – С. 143-162.
26. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов // Геомагнетизм и аэрномия. – 2004. – Т. 44, №4. – С. 518-534.
27. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – №3. – С. 4-35.
28. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 1. Результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрномия. – 2006. – Т. 46, №2. – С. 193-208.
29. 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 аэрномия. – 2006. – Т. 46, №6. – С. 742-759.
30. Сорокин В. М., Федорович Г. В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. – М.: Энергоиздат, 1982. – 134 с.
31. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. – М.: Мир, 1978. – 532 с.
32. Григорьев Г. И. АГВ в атмосфере Земли (обзор) // Известия вузов. Радиофизика. – 1999. – Т. 42, №1. – С. 3-10.

## Ефекти у геокосмосі, що супроводжували старту групи ракет

**Л. Ф. Черногор**

Виконано радіофізичні та магнітометричні спостереження за динамічними процесами в іоносфері та геомагнітному полі, що виникли услід за стартами чотирьох ракет різної потужності та з різних пускових установок. Встановлено, що старту ракет супроводжувались підсиленням хвильової активності в іоносфері та в геомагнітному полі. Реакції середовища на різні джерела (різні ракети) накладалися, що утруднювало їх ідентифікацію. Як плазмовим, так і геомагнітним збуренням були властиві швидкості поширення близько  $1.2 \div 1.7$  км/с та  $440 \div 760$  м/с.

## Effects in Geospace Accompanying Multiple Rocket Launches

**L. F. Chernogor**

Radio and ground magnetometer observations of dynamic processes in the ionosphere and in the geomagnetic field have been made after four launches of rockets of different power from different launch pads. The rocket launches are found to be associated with an increase in wave activity in the ionosphere and in the geomagnetic field. The effects that different sources (different rockets) have on the medium interfere with each other, that makes their identification complicated. Both the plasma and geomagnetic disturbances have speeds in the  $1.2 \div 1.7$  km/s and  $440 \div 760$  m/s intervals.