

Статистические характеристики сигналов доплеровского ВЧ радара при зондировании средней ионосферы, возмущенной стартами ракет и солнечным терминатором

В. П. Бурмака, Л. С. Костров, Л. Ф. Черногор

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина,
Украина, 61077, г. Харьков, пл. Свободы, 4
Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 18 сентября 2002 г.

В результате статистического анализа вариаций доплеровских спектров, сопровождавших 43 старта ракет, выявлены четыре группы кажущихся скоростей распространения возмущений: $0.5 \div 0.8$, $1 \div 6$, $7 \div 9$ и $15 \div 20$ км/с. С ними связаны акустико-гравитационные (первая группа), медленные магнитогидродинамические и магнитоградиентные (вторая группа), а также гиротропные волны (третья и четвертая группы).

Анализ 31 случая прохождения солнечного терминатора позволил определить статистические характеристики вариаций доплеровских спектров (изменение значения постоянной составляющей доплеровского смещения частоты, продолжительность реакции ионосферы, преобладающий период и амплитуду квазипериодических возмущений центральной частоты).

У результаті статистичного аналізу варіацій доплерівських спектрів, що супроводжували 43 старти ракет, виявлено чотири групи позірних швидкостей розповсюдження збурень: $0.5 \div 0.8$, $1 \div 6$, $7 \div 9$ та $15 \div 20$ км/с. З ними пов'язані акустико-гравітаційні (перша група), повільні магнітогідродинамічні та магнітоградієнтні (друга група), а також гіротропні хвилі (третья та четверта групи).

Аналіз 31 випадку проходження сонячного термінатора дозволив визначити статистичні характеристики варіацій доплерівських спектрів (зміна значення сталої складової доплерівського зміщення частоти, тривалість реакції іоносфери, переважаючий період та амплітуду квазіперіодичних збурень центральної частоти).

Введение

В последнее время значительное внимание уделяется системному подходу к исследованию физических процессов в геокосмосе [1]. Видное место в таких исследованиях занимает изучение реакции ионосферы на воздействие источников с большим энерговыделением [2-4]. Оно позволяет проследить перенос возмущений на значительные и глобальные расстояния, определить механизмы переноса и физическую природу “переносчика”, а так-

же выявить особенности взаимодействия подсистем в системе тектоносфера – атмосфера – ионосфера – магнитосфера [1].

В настоящей работе в качестве естественного источника энерговыделения рассматривается солнечный терминатор. Он отличается предсказуемостью и регулярностью воздействия, а также значительной энергетикой [4].

В качестве искусственного источника рассматриваются старты мощных ракет, происходившие в 1999 – 2002 гг. в различных точках земного шара и удаленные от места на-

блюдения на 1500 ÷ 10000 км. Для наблюдателя этот источник энерговыделения является “бесплатным”. Различные удаления космодромов, различная мощность ракет, различный состав топлива и разнообразные траектории космических аппаратов (КА) обеспечивают варьирование “начальных условий” и гибкость в исследовании реакции геокосмоса на воздействие такого источника.

Целью работы является статистический анализ характеристик сигналов доплеровского радара, которые отражались в средней ионосфере, возмущенной стартами ракет и прохождением солнечного терминатора. Обсуждаются также типы волн, переносящие возмущения на расстояния вплоть до глобальных. Статья является продолжением работ [5-7].

Измерительный комплекс, методика наблюдений и обработки результатов

Наблюдательные данные получены с помощью ВЧ доплеровского радара вертикального зондирования [2, 3] на двух близких частотах в диапазоне 2.8 ÷ 3.5 МГц. Значения огибающей биений между колебаниями отраженного радиосигнала и опорного генератора регистрировались на магнитный носитель с частотой опроса 10 Гц. Спектральная оценка производилась ежеминутно по 512 отсчетам на интервалах времени 51.2 с (разрешение по частоте около 0.02 Гц). Доплеровские спектры (ДС) вычислялись в диапазоне частот от -1 до +1.5 Гц. При необходимости, также как и в [5, 6], вычислялись длиннопериодные (2.56 ÷ 128 мин) спектры.

Использовался радар радиофизической обсерватории (РФО) Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина, расположенный в окрестности с. Гайдары Харьковской области (географические координаты: 49°38' с. ш., 36°20' в. д.).

Результаты наблюдений

Старты ракет (СР). Статистической обработке подлежали вариации ДС, сопровождавшие СР в 1999-2002 гг. (табл. 1). Проана-

лизированы данные для 72 стартов ракет, произведившихся с космодромов России, США, Франции, Японии и других стран. Ниже опишем вариации ДС, которые предшествовали СР и следовали за ними.

Пример вариаций ДС при запуске российской ракеты “Союз-У” с космодрома Плесецк показан на рис. 1. Это событие произошло в 21:00 9 сентября 1999 г. (здесь и далее время киевское). Полная масса ракеты составляла около 300 т, начальная тяга – 4 МН. Время работы нулевой, первой и второй ступеней равнялось 118, 286 и 250 с соответственно. Выключение этих ступеней происходило на высотах 48, 171 и 200 км, которым отвечали дальности от космодрома 44, 451 и 1680 км. Скорости КА составляли при этом 1.8, 3.5 и 7.7 км/с [6]. Ракеты типа “Союз” относятся скорее к тяжелым, мощность их двигателей ~ $10^{10} \div 10^{11}$ Вт, а энерговыделение не менее 10^{13} Дж.

Из рис. 1 видно, что до СР имели место сравнительно слабые вариации ДС, по-видимому, связанные с прохождением вечернего терминатора (см. ниже). Спектр был практически одномодовым. В интервале времени 21:10 – 22:00 спектр заметно уширился, а амплитуда сигнала оставалась почти постоянной. С 22:00 до 22:35 характер вариаций ДС снова изменился: возникли или усилились колебания доплеровского смещения частоты f_d , а спектр стал практически одномодовым.

Пример вариаций ДС при запуске другой ракеты “Союз-У” показан на рис. 2. Событие произошло на космодроме Байконур в 08:47 1 февраля 2000 г. Как видно из рис. 2, примерно до 7:00 вариации ДС были сильными, а в интервале времени 7:00 – 9:00 они стали значительно меньше. В интервале времени 8:47 – 9:08 доплеровское смещение частоты $f_d > 0$. С 9:08 до 9:40 ДС практически не изменялись. После этого наблюдались вариации средней частоты и заметное уширение ДС, что продолжалось до 11:00.

Рассмотрим далее старт американского космического корабля многоразового использования “Discovery”, который произошел в 00:15 11 августа 2001 г. с космодрома на мысе Канаверал. Полная масса ракеты была около 2030 т,

Таблица 1. Сведения о стартовавших ракетах и геомагнитной обстановке в день старта

Дата	Время старта	Название КА	Название космодрома	Страна	A_p	$\sum K_p$
3.01.99	22:21	Дельта 2	Мыс Канаверал	США	4	9
16.02.99	3:45	Атлас 2	Мыс Канаверал	США	4	8
20.02.99	6:18	Союз	Байконур	Россия	3	4
15.03.99	5:06	Союз	Байконур	Россия	14	22
21.03.99	2:09	Протон	Байконур	Россия	5	9
27.05.99	13:49	Дискавери	Мыс Канаверал	США	7	14
20.06.99	5:15	Титан 2	Ванденберг	США	4	10
24.06.99	18:44	Дельта 2	Мыс Канаверал	США	4	10
5.07.99	16:32	Протон	Байконур	Россия	2	5
16.07.99	19:36	Союз	Байконур	Россия	4	8
23.07.99	7:28	Колумбия	Мыс Канаверал	США	11	19
9.09.99	21:00	Союз	Плесецк	Россия	9	18
7.10.99	15:51	Дельта 2	Мыс Канаверал	США	5	12
18.10.99	16:32	Союз	Байконур	Россия	6	12
19.10.99	9:22	Ариан	Куру	Франция	6	9
15.11.99	9:29	Н 2	Танегашима	Япония	5	9
23.11.99	6:06	Атлас 2	Мыс Канаверал	США	19	26
20.12.99	2:50	Дискавери	Мыс Канаверал	США	3	6
21.01.00	3:03	Атлас 2	Мыс Канаверал	США	2	2
25.01.00	3:04	Ариан	Куру	Франция	7	14
1.02.00	8:47	Союз	Байконур	Россия	8	16
4.02.00	1:30	Атлас	Мыс Канаверал	США	5	11
12.03.00	6:07	Протон	Байконур	Россия	19	22
12.03.00	11:29	Таурис	Ванденберг	США	19	22
12.03.00	16:49	Зенит	Платформа для морского старта	Украина	19	22
20.03.00	20:28	Союз	Байконур	Россия	6	10
4.04.00	8:10	Союз	Байконур	Россия	22	27
19.04.00	3:29	Ариан	Куру	Франция	12	21
25.04.00	23:08	Союз	Байконур	Россия	5	12
24.06.00	3:28	Протон	Байконур	Россия	15	20
5.07.00	2:44	Протон	Байконур	Россия	9	17
12.07.00	7:56	Протон	Байконур	Россия	9	17
6.08.00	21:27	Союз	Байконур	Россия	3	24
7.09.00	1:33	Ариан	Куру	Франция	15	24
8.09.00	15:45	Атлантик	Мыс Канаверал	США	17	27

Таблица 1. Продолжение

15.09.00	1:54	Ариан	Куру	Франция	12	16
21.09.00	13:22	Титан 2	Ванденберг	США	9	19
12.10.00	2:17	Дискавери	Мыс Канаверал	США	6	12
20.10.00	3:40	Атлас 2	Мыс Канаверал	США	3	5
21.10.00	8:52	Зенит	Платформа для морского старта	Украина	3	5
31.10.00	9:52	Союз	Байконур	Россия	13	21
16.11.00	3:07	Ариан	Куру	Франция	3	5
21.11.00	20:24	Дельта 2	Ванденберг	США	9	18
30.11.00	21:59	Протон	Байконур	Россия	6	13
20.12.00	14:26	Ариан	Куру	Франция	3	5
11.01.01	0:09	Ариан 4	Куру	Франция	4	10
24.01.01	6:28	Союз	Байконур	Россия	12	16
30.01.01	9:55	Дельта 2	Мыс Канаверал	США	3	6
08.02.01	1:05	Ариан 44	Куру	Франция	5	12
08.02.01	1:13	Атлантис	Мыс Канаверал	США	5	12
26.02.01	10:09	Союз	Байконур	Россия	5	11
27.02.01	23:20	Титан 4	Мыс Канаверал	США	8	14
19.03.01	0:33	Зенит	Платформа для морского старта	Украина	19	24
7.04.01	18:02	Дельта 2	Мыс Канаверал	США	17	23
18.04.01	13:13	GSLV-D1	Шрихарикота	Индия	22	25
28.04.01	10:37	Союз	Байконур	Россия	34	32
15.05.01	4:11	Протон	Байконур	Россия	10	17
18.05.01	20:45	Дельта 2	Мыс Канаверал	США	11	19
09.06.01	8:45	Ариан 44	Куру	Франция	19	25
16.06.01	4:49	Протон	Байконур	Россия	4	9
19.06.01	7:41	Атлас 2	Мыс Канаверал	США	12	18
23.07.01	10:23	Атлас 2	Мыс Канаверал	США	6	16
06.08.01	10:28	Титан 4	Мыс Канаверал	США	14	23
08.08.01	19:13	Дельта 2	Мыс Канаверал	США	7	14
11.08.01	0:15	Дискавери	Мыс Канаверал	США	2	5
08.09.01	18:25	Атлас 2	Ванденберг	США	5	10
26.09.01	2:21	Ариан 44	Куру	Франция	13	20
06.10.01	5:38	Титан 4	Мыс Канаверал	США	6	13
11.10.01	3:32	Атлас 2	Мыс Канаверал	США	13	19
18.10.01	21:51	Дельта 2	Мыс Канаверал	США	2	6
15.01.02	23:28	Титан 4	Мыс Канаверал	США	9	19
11.02.02	19:44	Дельта 2	Ванденберг	США	6	12

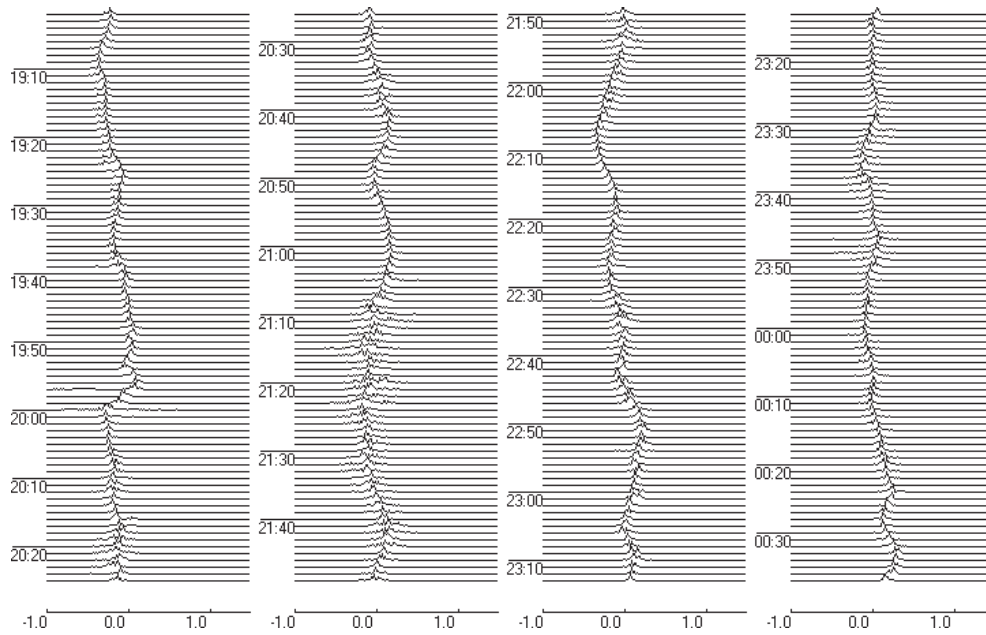


Рис. 1. Вариации доплеровских спектров (ДС) на частоте 2.8 МГц при старте КА “Союз-У” в 21:00 9 сентября 1999 г. На этом и других рисунках на горизонтальной оси указано доплеровское смещение частоты радиосигнала в Гц, а на вертикальной оси – киевское время

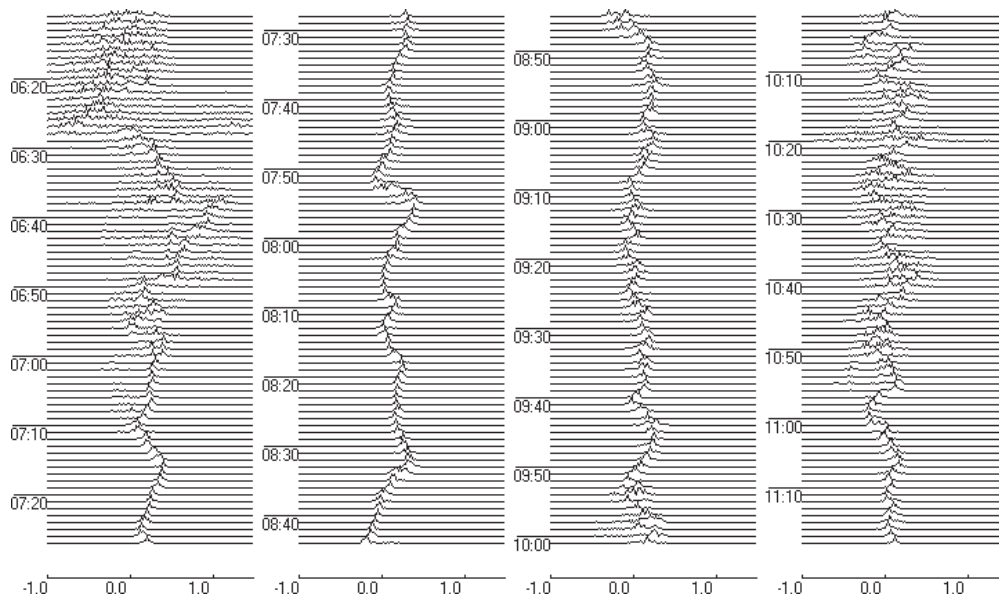


Рис. 2. Вариации ДС на частоте 3.5 МГц при старте КА “Союз-У” в 08:47 1 февраля 2000 г

начальная тяга ~ 26 МН, продолжительность работы разгонного блока и двигателей составляла 124, 480 и 480 с. Такие ракеты относятся к классу сверхтяжелых, мощность их двигателей $\sim 10^{11} \div 10^{12}$ Вт, а энерговыделение не

менее 10^{14} Дж [6]. Примерно за 1 ч до старта ионосфера оставалась спокойной, наблюдался квазипериодический процесс с $T \approx 20$ мин и амплитудой доплеровского смещения $f_{da} \approx 0.1$ Гц (рис. 3). Постоянная со-

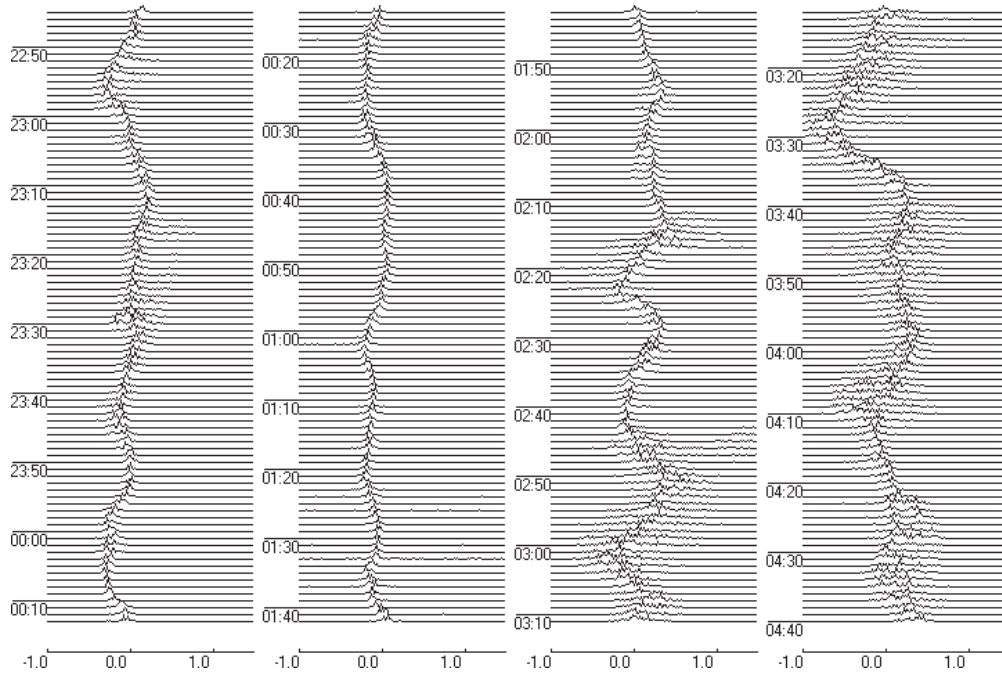


Рис. 3. Вариации ДС на частоте 3.5 МГц при старте КА “Discovery” в 00:15 11 августа 2001 г

ставляющая f_{d0} в длиннопериодном спектре $f_d(t)$ была отрицательной и не превосходила 0.1 Гц. Почти такая же картина наблюдалась в течение последующих 85 мин. Примерно в 1:40 характер сигнала изменился: постоянная составляющая стала положительной, причем $f_{d0} \approx 0.1$ Гц, а величина квазипериода осталась прежней – около 20 мин. После 2:15 в ионосфере возник квазипериодический процесс с переменным периодом (15 ÷ 25 мин) и $f_{da} \approx 0.3$ Гц, ДС заметно расширились (от 0.1 до 0.5 Гц). Такая картина наблюдалась по крайней мере до 4:40 (до конца сеанса наблюдения).

Для сравнения опишем эффекты в ионосфере, сопровождавшие СР средней тяжести. Ракета типа “Atlas 2AS” стартовала с космодрома на мысе Канаверал в 18:25 8 сентября 2001 г. Ее полная масса была 234 т. Время работы нулевой, первой, второй и третьей ступеней составляло 56, 172, 283 и 392 с, а их тяга – $4 \times 0.48, 2.09, 0.39$ и 0.18 МН.

В течение примерно 165 мин до СР ионосфера оставалась спокойной (рис. 4). Первые заметные изменения характера сигнала (ска-

чок f_d на -0.2 Гц, эпизодическое появление двухлучевости) произошли в 18:45 (время запаздывания $\Delta t_0 = 20$ мин). Реакция ионосферы продолжалась не менее 40 мин. В 19:35 (запаздывание $\Delta t_1 = 70$ мин) характер сигнала снова заметно изменился: появилось квазипериодическое возмущение. После 20:00 начали проявляться эффекты, вызванные прохождением вечернего терминатора.

Представляет интерес анализ последствий старта тяжелой (около 400 т) ракеты GSLV-D1, запущенной в 13:13 18 апреля 2001 г. с космодрома Шрихарикота (Индия). Расстояние от космодрома до места наблюдения составляло около 5600 км. До 13:00 ионосфера была относительно возмущенной, а ДС – скорее “рассыпанным”. После этого момента времени сигнал стал практически одномодовым. Изменение его характера произошло в 13:46. Доплеровское смещение частоты резко увеличилось от 0 до 0.13 Гц, затем в течение 8 мин уменьшилось до -0.25 Гц. Далее наблюдался резкий переход от этого значения к $f_d = 0$. В последующем никаких существенных изменений характера сигнала не наблюдалось.

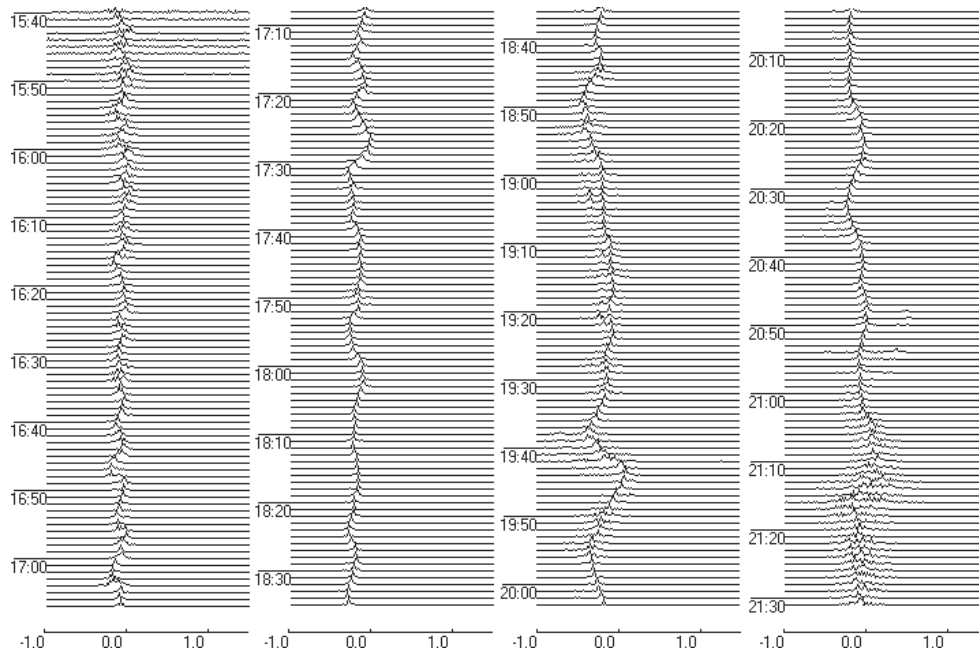


Рис. 4. Вариации ДС на частоте 3.5 МГц при старте КА "Atlas 2AS" в 18:25 8 сентября 2001 г

Из представленных результатов следует, что на первый взгляд описанные вариации ДС до и после СР принципиально не отличались (характер сигнала изменялся много раз в течение каждого сеанса наблюдений). Поэтому для выделения реакции ионосферы на запуск КА целесообразен статистический анализ большого массива данных.

Прохождение солнечного терминатора (СТ). Всего проведено 35 сеансов наблюдений. Три сеанса отбраковано из-за некачественной записи. В регистрации 25.01.00 присутствовали сильные естественные возмущения. Детально проанализированы процессы при прохождении 21 утреннего и 10 вечерних терминаторов. Ниже описаны вариации ДС, которые могут быть связаны с возмущениями, вызванными СТ.

Рассмотрим пример реакции ионосферы на воздействие утреннего СТ (рис. 3). Приблизительно в 2:15 в ионосфере усилился квазипериодический процесс с переменным периодом (восход Солнца (ВС) в этот момент времени имел место на высоте ~ 450 км). Около 2:45 характер сигнала изменился (ВС наблюдался

при этом на высоте 350 км). Величина $T \approx 15 \div 20$ мин. После ВС на высоте около 250 км (3:13) постоянная составляющая f_{d0} увеличилась по модулю от $0.0 \div 0.1$ до -0.3 Гц. Это продолжалось около 20 мин. Затем f_{d0} изменилась от -0.3 до $+0.1$ Гц, что наблюдалось в течение ~ 30 мин. Далее $f_{d0} \approx 0$. Наблюдался квазипериодический процесс с $f_{da} \approx 0.1 \div 0.2$ Гц и $T \approx 20$ мин. Реакция, связанная с утренним терминатором, длилась не менее 2 ч.

Пример вариаций ДС при прохождении вечернего СТ показан на рис. 1. С 19:00 до 19:40 величина f_d постепенно уменьшилась от $-(0.2 \div 0.3)$ до 0 Гц. Затем в течение 15 мин $f_d \approx 0$. Примерно с 20:00 до 20:30 $f_d < 0$. Далее наблюдался слабо выраженный квазипериодический процесс с $f_{da} \approx 0.1$ Гц и $T \approx 15$ мин.

Другой пример реакции ионосферы на прохождение вечернего терминатора, показан на рис. 4. Заход Солнца (ЗС) на уровне Земли имел место около 19:06. В течение почти 30 мин ионосфера оставалась спокойной. После 19:35 стал регистрироваться квазипериодический процесс с $T \approx 17$ мин. Постоянная

составляющая f_{d0} уменьшилась от -0.1 до -0.2 Гц. Картина оставалась практически неизменной до 20:10 (момент ЗС на высоте 120 км). В интервале времени 20:15 ÷ 20:40 существовало слабо выраженное колебание с $f_{da} \approx 0.1$ Гц, $T \approx 15$ мин. Далее с 20:40 до 21:00 (момента ЗС на высоте 300 км) ионосфера оставалась спокойной. Затем $f_{d0} \approx 0$ и ДС значительно расширились (от 0.1 до 0.5 Гц). Уширение наблюдалось не менее 40 мин.

Результаты статистического анализа

Старты ракет. Из 72 сеансов наблюдений отбракован 21 сеанс по причине некачественной регистрации сигнала. Во время проведения 8 сеансов наблюдений (15.11.99, 19.04.00, 25.04.00, 06.08.00, 20.10.00, 21.11.00, 30.11.00, 16.05.01 и 26.09.01) среда была сильно возмущена естественными источниками (см. табл. 1). Статистическому анализу были подвергнуты оставшиеся 43 сеанса. По изменениям характера сигнала определялись задержки предполагаемой реакции среды Δt и вычислялись нескорректированные значения скоростей $v = R_0 / \Delta t$, где R_0 – расстояние от космодрома до места наблюдения. Такие скорости будем именовать кажущимися. Гистограмма кажущихся скоростей приведена на рис. 5. Видно, что можно выделить четыре группы скоростей.

Первая группа скоростей, $0.5 \div 0.8$ км/с, наблюдалась только при СР с космодромов Плесецк и Байконур (всего 10 случаев).

Во второй группе статистически значимыми являются скорости $1 \div 6$ км/с (32 случая). Они наблюдались преимущественно при СР с космодромов США и Франции, причем среднее значение – $v = (3.1 \pm 0.2)$ км/с.

К третьей группе относятся скорости $7 \div 9$ км/с (5 случаев).

К четвертой группе принадлежат скорости $15 \div 20$ км/с (4 случая). Скорости из двух последних групп наблюдались редко и только при

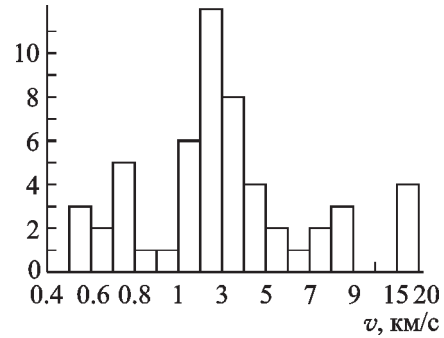


Рис. 5. Гистограмма кажущихся скоростей распространения возмущений, сопровождавших СР (масштаб по горизонтальной оси неравномерный)

СР с космодромов, удаленных на расстояния ~ 10000 км.

Прохождение солнечного терминатора. Статистическому анализу подлежало 31 событие. Заметные изменения характера сигнала, сопровождающие прохождение СТ, отмечены во всех случаях. Эти изменения заключались в увеличении значения постоянной составляющей доплеровского смещения частоты в утреннее время и его уменьшении в вечернее время, в генерации квазипериодических возмущений в ионосфере и появлении в ряде случаев двухмодовости (а также многомодовости или развала ДС) в сигнале.

Гистограммы модулей $|f_{d0}|$, амплитуд f_{da} и периодов T квазипериодических колебаний приведены на рис. 6. Видно, что величина $|f_{d0}|$ изменялась от 0.1 до 0.9 Гц, причем среднее значение $\overline{|f_{d0}|} \approx (0.27 \pm 0.02)$ Гц. Средняя продолжительность вариаций f_{d0} составляла около $1 \div 2$ ч.

Гистограмма периодов наблюдаемых колебаний имеет резкий максимум в диапазоне T от 10 до 15 мин. При этом среднее значение $\overline{T} \approx (15.2 \pm 1.1)$ мин.

Амплитуда квазипериодических вариаций центральной частоты в ДС изменялась от 0.1 до 0.6 Гц, причем в среднем $\overline{f_{da}} \approx (0.28 \pm 0.03)$ Гц.

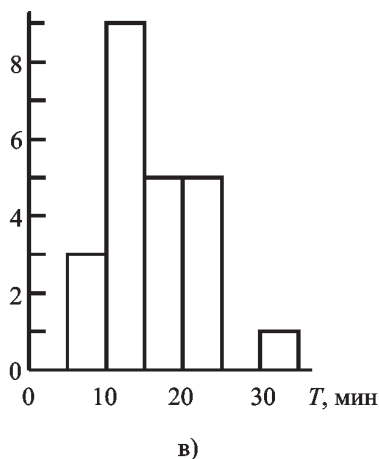
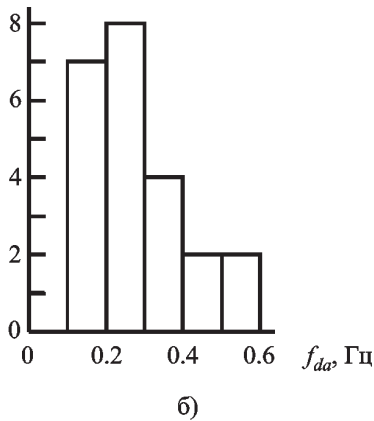
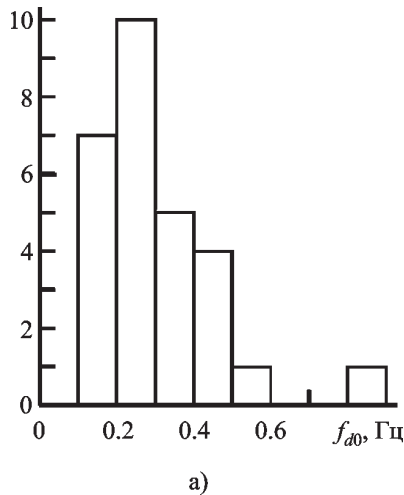


Рис. 6. Гистограммы модулей изменений значений постоянной составляющей доплеровского смещения частоты (а), амплитуд (б) и периодов (в) квазипериодических вариаций центральной частоты в ДС, сопровождавших прохождение солнечного терминатора

Перенос возмущений. Типы волн

Выше показано, что СР сопровождаются крупномасштабными и глобальными возмущениями в ионосфере. Ключевыми вопросами являются следующие. Каким образом возмущения генерируются? Какими способами они переносятся на расстояния 1000 ÷ 10000 км? Какова величина возмущений?

Атмосфера на высотах до 100 км является сравнительно плотной средой, здесь работа ракетных двигателей и движение КА со сверхзвуковой скоростью сопровождается генерацией ударной акустической волны (УАВ). В ее мощность P_a преобразуется $10^{-3} \div 10^{-2}$ мощности реактивной струи. Для тяжелых и сверхтяжелых ракет последняя достигает 10^{11} и 10^{12} Вт соответственно, так что $P_a \approx 10^8 \div 10^{10}$ Вт. Оптимальный диапазон высот для генерации УАВ – 100 ÷ 130 км. С одной стороны, эта область высот лежит над мезосферным волноводом (который эффективно захватывает и каналирует волны акустического типа), здесь атмосфера еще достаточно плотная, а с другой стороны, ракета движется уже со сверхзвуковой скоростью, т. е. выполняются условия генерации ударной волны. Кроме того, в указанном диапазоне высот траектория ракеты близка к горизонтальной. Справедливость сказанного подтверждают наблюдения (см. работу [8]) и расчеты (см. [9]). Важно, что УАВ в месте ее генерации приводит к относительным изменениям концентрации электронов $\sim 10 \div 100\%$ [8]. Ударная волна является источником акустико-гравитационных волн (АГВ). Кроме того, сверхзвуковое расширение плазмы реактивной струи и сверхзвуковое движение плазмы под действием КА в гиротропной ионосфере вызывает генерацию электромагнитных и магнитогидродинамических (МГД) волн. Рассмотрим эти волны подробнее.

Акустико-гравитационные волны. Для АГВ в изотермической слабо неоднородной атмосфере дисперсионное уравнение имеет вид [10]:

$$\omega^4 - \omega^2 v_s^2 \left(k_x^2 + k_z^2 + \frac{1}{4H^2} \right) + (\gamma - 1) g^2 k_x^2 = 0, \quad (1)$$

где ω – частота волны; k_x, k_z – проекции волнового вектора (ось z направлена вверх, а ось x – горизонтально); $H = kT_a/Mg$ – приведенная высота нейтральной атмосферы, k_B – постоянная Больцмана, M – масса молекулы газа, g – ускорение свободного падения; $\gamma = 1.4$ – показатель адиабаты. Здесь

$$v_s = \sqrt{\gamma \frac{k_B T_a}{M}} \quad (2)$$

есть скорость звука [11].

Из уравнения (1) следует выражение для показателя преломления АГВ:

$$n^2 = \frac{\omega_A^2 - \omega^2}{\omega_{BV}^2 \cos^2 \alpha - \omega^2} = \frac{\beta_0^2 Y - 1}{Y \cos^2 \alpha - 1},$$

где $\beta_0^2 = \omega_A^2 / \omega_{BV}^2 = \gamma^2 / 4(\gamma - 1) = 1.225$, $Y = (\omega_{BV} / \omega)^2$, α – угол между осью x и волновым вектором,

$$\omega_A^2 = \frac{\gamma g}{4H}, \quad \omega_{BV}^2 = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{g}{H}. \quad (3)$$

Здесь ω_{BV} – частота Брента-Вяйсяля [11]. При $\omega > \omega_A$ волны являются акустическими волнами, а при $\omega < \omega_B \cos \alpha$ – внутренними гравитационными волнами (ВГВ).

Для объяснения крупномасштабных возмущений в ионосфере наибольший интерес представляет ситуация когда $\alpha \approx 0$. При этом

$$n^2 = \frac{\beta_0^2 Y - 1}{Y - 1}, \quad v_{ph} = \frac{v_s}{n},$$

$$v_g = v_{gx} = v_s \frac{n(Y - 1)}{n^2 + \beta_0^2 Y - 2},$$

где v_{ph}, v_g – фазовая и групповая скорости АГВ. Для достаточно длинных ВГВ (формально $Y \gg 1$) имеем

$$n \approx \beta_0, \quad v_{ph} \approx v_g \approx \frac{v_s}{\beta_0} \approx 0.9v_s.$$

Результаты расчета основных параметров ВГВ приведены в табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2. Параметры модели атмосферы и ВГВ (при $\alpha=0$). Здесь $T_B = 2\pi/\omega_{BV}$ – период волн

z , км	100	150	200	250	300	350	400
H , км	6.5	25	40	50	60	63	65
v_s , м/с	300	590	740	830	910	930	940
$\omega_{BV} \cdot 10^2$, с ⁻¹	2.08	1.06	0.84	0.75	0.68	0.67	0.66
T_B , мин	5.0	9.9	12.5	14.0	15.4	15.7	16.0

Таблица 3. Зависимость v_{ph} и v_g от T_B/T (при $\alpha = 0$)

T_B/T	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
v_{ph}/v_s	0.68	0.78	0.83	0.86	0.88	0.89	0.90	0.90	0.90	0.90
v_g/v_s	0.20	0.47	0.64	0.75	0.81	0.85	0.88	0.89	0.90	0.90

Как известно, на высотах ионосферы, $z \leq 1000$ км, ионизированная компонента является малой примесью и ей навязывается динамика нейтрального газа. Легко показать, что относительные вариации электронной концентрации N связаны с относительными изменениями давления нейтрального газа p и концентраций нейтральных частиц N_n следующим образом:

$$\frac{\Delta N}{N} \approx \frac{H}{L_N} \frac{\Delta p}{p} = \frac{H}{L_N} \frac{\Delta N_n}{N_n}, \quad (4)$$

где $L_N = N |dz/dN|$ – характерный масштаб изменения N . Временные вариации ΔN регистрируются доплеровским радаром.

Медленные магнитогидродинамические (ММГД) волны. Хорошо известно, что в полностью ионизированной плазме возбуждаются и распространяются МГД-волны, характерная скорость которых равна (см., например, [12])

$$v_a = \frac{B_0}{\sqrt{\mu_0 \rho_p}} = \frac{B_0}{\sqrt{\mu_0 N M_i}},$$

где B_0 – индукция внешнего магнитного поля, μ_0 – магнитная постоянная, M_i – масса иона, ρ_p – объемная плотность плазмы.

В слабо ионизированной плазме аналогом МГД-волн являются ММГД-волны, введенные авторами работы [13]. Характерная скорость этих волн

$$v_{as} = \frac{B_0}{\sqrt{\mu_0 \rho}} = \frac{B_0}{\sqrt{\mu_0 N_n M}} = v_a s^{1/2},$$

где ρ – объемная плотность газа, $s = N/N_n$ – степень ионизации. На всех высотах ионосферы $s \ll 1$ и $v_{as} \ll v_a$.

Результаты расчета v_{as} приведены в табл. 4.

Выражение для комплексного показателя преломления ММГД-волн можно представить в виде [13]:

$$\tilde{n}_{\pm} = \frac{c}{v_{as}} (1 \pm \alpha_1 - i\beta)^{-1/2}, \quad (5)$$

где c – скорость света в вакууме, $\alpha_1 = \omega/s\Omega_H$; $\beta = \omega/v_1$; ω – частота волн; $v_1 = v_{ni}/(1 + v_e v_{in}/\omega_B \Omega_B)$; ω_B , Ω_B – гирочастота электронов и ионов, v_e – частота соударений электронов с ионами и молекулами; v_{in} – частота соударений ионов с нейтральными частицами; $v_{ni} = v_{in}s$. (Знаки “+” и “-” соответствуют виду поляризации волны).

Из выражения (5) можно получить соотношение для показателей преломления и поглощения:

$$n_{\pm} = \frac{c}{\sqrt{2} v_{as}} \frac{a_{1\pm}}{a_{2\pm}},$$

$$\kappa_{\pm} = \frac{c}{\sqrt{2} v_{as}} \frac{\beta}{a_{1\pm} a_{2\pm}},$$

где $a_1 = (1 \pm \alpha_1 + a_2)^{1/2}$, $a_2 = ((1 \pm \alpha_1)^2 + \beta^2)^{1/2}$.

Таблица 4. Параметры модели атмосферы и ионосферы, а также характерная скорость ММГД-волн для дня (в скобках – для ночи)

z , км	50	100	120	150	200	250	300	350	400
ρ , кг/м ³	10^{-3}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	$3 \cdot 10^{-10}$	10^{-10}	$3 \cdot 10^{-11}$	10^{-11}
s	10^{-15} (10^{-17})	10^{-8} (10^{-9})	10^{-7} (10^{-8})	10^{-6} (10^{-7})	10^{-5} (10^{-6})	10^{-4} (10^{-5})	10^{-3} (10^{-4})	$3 \cdot 10^{-3}$ (10^{-3})	10^{-2} ($5 \cdot 10^{-3}$)
v_{as} , км/с	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	0.16	0.5	1.6	3	5	10	16

Для расчета основных характеристик ММГД-волн (фазовой скорости $v_{ph\pm}$, глубины затухания $L_{\pm} = c/\omega k_{\pm}$) использовались параметры модели ионосферной плазмы, приведенные в табл. 5.

Результаты расчета характеристик ММГД-волн для двух высот, 150 и 250 км, представлены соответственно в табл. 6 и табл. 7. Эти высоты выбраны из тех соображений, что наибольший вклад в доплеровский эффект при вертикальном зондировании вносит слой ионосферы в окрестности области отражения [5]. При час-

тогах радиоволн 2.8 ÷ 3.5 МГц эта область располагалась примерно на высотах 150 и 250 км в дневное и ночное время соответственно.

Из табл. 6 и табл. 7 видно, что при помощи ММГД-волн возмущения могут переноситься на расстояния ~1000 км при $\omega \leq 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ (период $T \geq 10$ мин), а на глобальные расстояния – при $\omega \leq 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (период $T \geq 100$ мин). Фазовая скорость волн при этом составляет 6 ÷ 10 км/с и менее.

Гиротронные волны. Эти волны введены в рассмотрение авторами работы [13]. Они пред-

Таблица 5. Параметры модели ионосферной плазмы для дня и ночи (в скобках)

z, км	50	100	120	150	200	250	300	350	400
$v_{in}, \text{ с}^{-1}$	$3 \cdot 10^7$	$1.2 \cdot 10^4$	10^3	10^2	12	4	1.5	0.6	0.3
$v_e, \text{ с}^{-1}$	$7 \cdot 10^7$ ($7 \cdot 10^7$)	$5 \cdot 10^4$ ($4 \cdot 10^4$)	10^4 ($6 \cdot 10^3$)	$1.5 \cdot 10^3$ ($8 \cdot 10^2$)	$6 \cdot 10^2$ (10^2)	$7 \cdot 10^2$ (40)	$8 \cdot 10^2$ ($1.2 \cdot 10^2$)	$7 \cdot 10^2$ ($2 \cdot 10^2$)	$6 \cdot 10^2$ ($2.7 \cdot 10^2$)
$v_1, \text{ с}^{-1}$	$2.1 \cdot 10^{-14}$ ($2.1 \cdot 10^{-16}$)	$8.5 \cdot 10^{-5}$ ($0.9 \cdot 10^{-5}$)	10^{-4} (10^{-5})	10^{-4} (10^{-5})	$1.2 \cdot 10^{-4}$ ($1.5 \cdot 10^{-5}$)	$4 \cdot 10^{-4}$ ($4 \cdot 10^{-5}$)	$1.5 \cdot 10^{-3}$ ($1.5 \cdot 10^{-4}$)	$2 \cdot 10^{-3}$ ($6 \cdot 10^{-4}$)	$3 \cdot 10^{-3}$ ($1.5 \cdot 10^{-3}$)
$\Omega_B, \text{ с}^{-1}$	170	170	170	180	250	320	330	335	340
$\omega_B, \text{ с}^{-1}$	$8.8 \cdot 10^6$	$8.8 \cdot 10^6$	$8.8 \cdot 10^6$	$8.8 \cdot 10^6$	$8.8 \cdot 10^6$	$8.8 \cdot 10^6$	$8.8 \cdot 10^6$	$8.8 \cdot 10^6$	$8.8 \cdot 10^6$

Таблица 6. Характеристики ММГД-волн (высота 150 км, день)

$\omega, \text{ с}^{-1}$	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}
$v_{ph+}, \text{ км/с}$	19	6	2	0.7
$v_{ph-}, \text{ км/с}$	33	10	3	0.6
$L_+, \text{ км}$	330	1000	3600	25000
$L_-, \text{ км}$	200	630	1900	94000

Таблица 7. Характеристики ММГД-волн (высота 250 км, день, ночь)

$\omega, \text{ с}^{-1}$	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}
$v_{ph}, \text{ км/с}$	66	21	6	3
$L, \text{ км}$	660	2100	8600	24000

ставляют собой поперечные электромагнитные волны в гиротропной плазме с периодами $T \sim 10 \div 10^4$ с. Магнитная компонента волны приводит к вариациям геомагнитного поля на поверхности планеты $\Delta B \approx 1 \div 10$ нТл [13].

Гиротропные волны распространяются горизонтально в своеобразном волноводе на высотах E -области ионосферы ($z \approx 100 \div 130$ км) практически без затухания лишь при $\alpha = 0$, α – угол между волновым вектором \vec{k}_{gt} и \vec{B}_0 . С увеличением α затухание быстро растет. При $\alpha \rightarrow \pi/2$ распространение волн становится невозможным. Показатель преломления гиротропных волн имеет вид [14]:

$$n = \frac{c}{v_{gt} \cos^2 \alpha} (x(1 + \operatorname{cth} x))^{-1/2}, \quad (6)$$

где $x = |\vec{k}_{gt}| z_0$, z_0 – высота волновода толщиной l над уровнем Земли;

$$v_{gt} = \frac{1}{\mu_0 \sigma_H \sqrt{l z_0}}$$

есть характерная скорость гиротропных волн, $\sigma_H = \tilde{\sigma}_H \epsilon_0$ – холловская проводимость,

$$\tilde{\sigma}_H = \frac{\omega_p^2 \omega_B}{\omega_B^2 + v_{en}^2} + \frac{\Omega_p^2 \Omega_B}{\Omega_B^2 + v_{in}^2},$$

ϵ_0 – электрическая постоянная.

На высотах E -области вкладом ионов в σ_H можно пренебречь. Кроме того, $\omega_B^2 \gg v_{en}^2$. Тогда

$$\tilde{\sigma}_H \approx \frac{\omega_p^2}{\omega_B}, \quad \sigma_H \approx \frac{\omega_p^2}{\omega_B} \epsilon_0,$$

$$v_{gt} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0 \tilde{\sigma}_H \sqrt{l z_0}} = \frac{c^2}{\tilde{\sigma}_H \sqrt{l z_0}} = \frac{c^2 \omega_B}{\omega_p^2 \sqrt{l z_0}}.$$

Полагая $z_0 = 120$ км, $l = 30$ км, $\omega_B = 8.8 \cdot 10^6$ с⁻¹, $\omega_p^2 = 3.2 \cdot 10^{13}$ с⁻² и $\omega_p^2 = 3.2 \cdot 10^{14}$ с⁻² ($N = 10^{10}$ м⁻³ и

$N = 10^{11}$ м⁻³) для ночи и дня, получим соответственно $v_{gt} \approx 410$ км/с и $v_{gt} \approx 41$ км/с.

Рассмотрим формулу (6) для двух предельных случаев. При $x \ll 1$, т. е. при достаточно больших T , имеем $\operatorname{cth} x \approx 1/x$, тогда

$$n \approx \frac{c}{v_{gt} \cos^2 \alpha}, \quad v_g = v_{ph} = \frac{c}{n} = v_{gt} \cos^2 \alpha. \quad (7)$$

При достаточно малых T имеем $x \gg 1$, $\operatorname{cth} x \approx 1$,

$$n \approx \frac{c}{\sqrt{2x v_{gt} \cos^2 \alpha}}.$$

Поскольку x неявно зависит от n , окончательно получим

$$n \approx \frac{c}{(2\omega z_0 v_{gt}^2 \cos^4 \alpha)^{1/3}},$$

$$v_g = \frac{3}{2} v_{ph}, \quad v_{ph} = (2\omega z_0 v_{gt}^2 \cos^4 \alpha)^{1/3}.$$

С учетом $\omega = 2\pi/T$,

$$v_{ph} = \left(\frac{4\pi z_0}{T} v_{gt}^2 \cos^4 \alpha \right)^{1/3}. \quad (8)$$

При некотором критическом значении $T = T_{cr}$ оценки v_{ph} по формулам (7) и (8) должны быть одного порядка. Это имеет место при

$$T_{cr} = \frac{4\pi z_0}{v_{gt} \cos^2 \alpha}.$$

Например, при меридиональном распространении волны над Харьковом, где угол маг-

нитного наклона $\alpha \approx 66.4^\circ$, $T_{cr} = 10$ и 100 с для ночи и дня соответственно.

Для доплеровского радиозондирования представляют интерес формулы (7), поскольку метод позволяет исследовать волновые процессы с $T > 1 \div 2$ мин. Результаты расчета фазовой скорости гиротропных волн для различных значений N в E -области ионосферы приведены в табл. 8. Важно, что у этих волн практически отсутствуют дисперсия.

Магнитоградиентные волны (волны Хантадзе). Новая ветвь собственных и вынужденных колебаний магнитоактивной ионосферы изучена в работах [15, 16]. Существование волн Хантадзе обусловлено наличием в динамо-области ионосферы ($z \approx 100 \div 130$ км) широтного градиента вертикальной проекции геомагнитного поля $\partial B_{0z} / \partial y$ (ось y направлена вдоль меридиана). При прохождении этих волн в E -области ионосферы колеблются только электроны с вмороженными в электронный газ магнитными силовыми линиями.

Выражения для фазовой скорости волн Хантадзе, распространяющихся вдоль параллели, можно представить в виде:

$$v_H = \left(\frac{c}{\omega_p} \right)^2 \left| \frac{\partial \omega_{Bz}}{\partial y} \right| \approx \left(\frac{c}{\omega_p} \right)^2 \frac{\omega_B}{L_B}, \quad \omega_{Bz} = \frac{eB_{\Delta z}}{m}$$

где $L_B = |B_0 \partial y / \partial B_{0z}|$ – характерный масштаб изменения вертикальной составляющей B_{0z} . Добавим, что выражение для v_H можно записать следующим образом:

$$v_H = (\mu_0 e N)^{-1} \left| \frac{\partial B_{0z}}{\partial y} \right| \approx (\mu_0 e N L_B)^{-1} B_0.$$

Таблица 8. Фазовая скорость гиротропных волн и волн Хантадзе в E -области ионосферы

$N \cdot 10^{-10}, \text{ м}^{-3}$		0.6	0.8	1	2	4	6	8	10	20
$v_{ph}, \text{ км/с}$	$\alpha = 0^\circ$	680	513	410	205	103	64	51	41	2.1
	$\alpha = 30^\circ$	510	385	308	154	77	48	38	31	1.6
	$\alpha = 60^\circ$	170	128	103	51	26	16	13	10	0.5
$v_H, \text{ км/с}$	$\alpha = 90^\circ$	4.7	3.5	2.8	1.4	0.7	0.5	0.4	0.3	0.1

Оценим L_B . Учтем, что на экваторе $B_{0z} \approx 0$, а у полюсов $B_{0z} \approx 6 \cdot 10^{-5}$ Гн. Тогда $|\partial \omega_{Bz} / \partial y| \approx 1 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Результаты оценок скорости волн Хантадзе приведены в табл. 8. Из нее видно, что v_H составляет величины порядка $0.1 \div 0.5$ км/с и $0.5 \div 5$ км/с для дневного и ночного времени соответственно.

Амплитуда магнитной компоненты волн Хантадзе

$$\Delta B = \frac{e N \mu_0 v_e}{k_x} = \frac{v_e T}{2\pi} \frac{\partial B_{0z}}{\partial y} = \frac{B_0 v_e T}{2\pi L_B},$$

где $v_e = E_i / B_0$ – дрейфовая скорость электронов, E_i – ионосферное электрическое поле; $k_x = 2\pi / \lambda$, $\lambda = v_H T$ – длина волны Хантадзе; T – ее период. При $E_i = 1$ мВ/м имеем $v_e = 20$ м/с, $\Delta B = 2 \div 200$ нТл для $T = 10^2 \div 10^4$ с.

Обсуждение

Прохождение солнечного терминатора. При воздействии СТ в ионосфере наблюдаются следующие эффекты: смещение постоянной составляющей f_{d0} (как правило, вечером $f_{d0} < 0$, а утром $f_{d0} > 0$), генерация или усиление квазипериодических возмущений в ионосфере с переменным периодом от 10 до 30 мин и более, многолучевость, уширение и даже развал ДС.

При ВС реакция часто начинается за $40 \div 50$ мин до прохождения СТ на высоте отражения зондирующей радиоволны. Возможно, это обусловлено приходом волновых возмущений, которые на высотах F -области ионосферы опережают фронт СТ. Действительно, скорость последнего на широте РФО со-

ставляла около 300 м/с. Фазовая и групповая скорости внутренних гравитационных волн (ВГВ), которые перемещаются перед фронтом СТ, при $T > T_B$ несколько меньше v_s (см. табл. 3). Как известно, при $z \leq 200 \div 250$ км ВГВ являются слабозатухающими (их амплитуда уменьшается вдвое на расстоянии в нескольких тысячах километров) [11].

Начало реакции на прохождение СТ наблюдалось уже через ~ 50 мин после захода Солнца на уровне Земли, т. е. задолго до наступления этого события в области отражения волны. Вариации ДС отмечались также в течение $50 \div 60$ мин после прохождения СТ через область отражения зондирующей волны. По-видимому, это связано с приходом ВГВ, генерируемых фронтом СТ.

Средний период наблюдаемых колебаний центральной частоты в ДС составлял около 15 мин. Это значение несколько превышает период Брента-Вяйсяля (см. формулу (3)):

$$T_B = \frac{2\pi}{\sqrt{\gamma-1}} \frac{v_s}{g},$$

результаты расчета которого приведены в табл. 2.

Старты ракет. Эффекты, сопровождающие полеты КА, отличаются разнообразием. Они зависят от расстояния до траектории аппарата, высоты его полета, вида топлива и, конечно, мощности двигателей, а также состояния ионосферы (см. также [2, 3, 6, 7]).

Обратимся вновь к СР “Союз-У” 9 сентября 1999 г. (см. рис. 1). Изменения характера вариаций ДС имели место в 21:10 и 22:00. Если они вызваны СР, то им соответствуют запаздывания $\Delta t_0 \approx 10$ мин и $\Delta t_1 \approx 60$ мин. Радиоволна с частотой 2.8 МГц в интервале времени с 21:00 до 22:00 отражалась на высотах $160 \div 180$ км. Если считать, что возмущение от источника распространялось примерно на этой же высоте почти горизонтально по отношению к поверхности Земли, то время подъема δt ракеты на высоту 170 км составляло около 5 мин. При этом скорректированные значения равны $\Delta t'_0 \approx 5$ мин, $\Delta t'_1 \approx 55$ мин. За

время $\delta t \approx 5$ мин КА удаляется в основном в восточном направлении от космодрома примерно на 500 км (расстояние до места регистрации составляло $R \approx 1700$ км). При этом $v'_0 = R/\Delta t'_0 \approx 5.7$ км/с, $v'_1 \approx 515$ м/с.

Первое значение скорректированной скорости близко к скорости ММГД-волн с частотой $10^{-3} \div 10^{-2}$ с⁻¹ (периодом $10 \div 100$ мин). Для этих волн глубина затухания составляет несколько тысяч километров (см. табл. 6, 7). Второе значение соответствует скорости звука в атмосфере при $T_a \approx 610$ К (см. соотношение (2)). Это типичное значение температуры атмосферы на высотах около $160 \div 180$ км в вечернее время.

Вернемся к СР “Союз-У”, который произошел 1 февраля 2000 г. (см. рис. 2). Как уже отмечалось, существенные изменения ДС имели место в интервалах времени $09:10 \div 09:43$ и $09:43 \div 11:10$. Если они вызваны СР, то запаздывания реакции среды составили $\Delta t_0 \approx 23$ мин и $\Delta t_1 \approx 56$ мин. Радиоволна с $f = 3.5$ МГц в утреннее время отражалась на высоте около 170 км. Тогда скорректированные значения запаздывания реакции среды $\Delta t'_0 \approx 18$ мин и $\Delta t'_1 = \Delta t_1 - \delta t \approx 51$ мин. За время δt ракета удалась от космодрома на восток на $\Delta R \approx 450$ км. Тогда расстояние от места генерации до пункта наблюдения составило $R = R_0 + \Delta R$, где $R_0 \approx 2050$ км – расстояние от Байконура до РФО ХНУ. При $R \approx 2500$ км значения скорректированных скоростей распространения возмущений $v'_0 \approx 2.3$ км/с, $v'_1 \approx 820$ м/с.

Первое значение соответствует скорости ММГД-волн при $\omega \approx 10^{-4}$ с⁻¹. Для них $L_{\pm} \approx 1000 \div 3600$ км в дневное время при $z \approx 150$ км (см. табл. 6). Второе – близко к скорости звука в атмосфере. При $v_s = 683$ м/с имеем $T_a \approx 1070$ К. Такое значение T_a действительно может наблюдаться в период высокой солнечной активности на высотах $180 \div 190$ км в дневное время.

Разумность полученных оценок v и T_a свидетельствует в пользу того, что 9 сентября 1999 г. и 1 февраля 2000 г. наблюдалась реакция ионосферы на старты КА. Общая продолжительность возмущений приближалась к 120 мин. Сопровождавшие СР колебания име-

ли квазипериод $T \approx 15$ мин. Величина T , как это и должно быть, несколько превышает период Брента-Вяйсяля. При $v_s = 515 \div 683$ м/с имеем $T_B \approx 8.7 \div 11.5$ мин.

При старте КА "Discovery" характер сигнала изменился (f_d стала положительной) с запаздываниями $\Delta t_1 \approx 85$ и $\Delta t_2 \approx 120$ мин (см. рис. 3). Высот 100 и 150 км КА достиг за время около 7 и 15 мин, его дальность от космодрома составляла около 300 и 4000 км, а от места наблюдения примерно 10000 и 6000 км соответственно. Тогда скорость движения возмущения $v'_1 = R/\Delta t'$ в E - и F -областях примерно равнялась 2.1 и 1.4 км/с. По-видимому, возмущение вызванное КА, продолжалось до 02:15, затем на него наложилось иное возмущение, обусловленное началом второго волнового процесса. В результате этого ДС заметно расширились (до 0.5 Гц). Такая реакция ионосферы продолжалась не менее 40 мин. Скорость $1 \div 3$ км/с имеют ММГД-волны в F -области ионосферы, если $\omega \leq 10^{-4}$ с⁻¹. При этом глубина затухания волн более 10000 км.

Отдельно остановимся на колебаниях с большой амплитудой доплеровского смещения частоты, которые имели место после 02:15. Если $\Delta t_2 \approx 120$ мин, то $\Delta t'_2 \approx 105$ мин и $v'_2 \approx 2.2$ км/с. Такую скорость имеют также ММГД-волны в ночной F -области ионосферы при $\omega \leq 10^{-4}$ с⁻¹.

Проверим возможность переноса возмущений при помощи волн Хантадзе, которые распространяются вдоль параллелей. Полагая, что с космодрома на мысе Канаверал ракета стартовала на северо-восток, высоты $z \approx 130$ км она достигла примерно через 12 мин. КА при этом удалился от космодрома на расстояние около 2350 км. Расстояние R до места наблюдения составляло примерно 7650 км. При этом $v \approx 1.2$ км/с. Примерно такую скорость имеют волны Хантадзе в вечернее время, когда в E -области ионосферы $N \approx 3 \cdot 10^{10}$ м⁻³. Заметим, что старт ракеты произошел около 16:00 по местному времени.

Похоже, что в данных измерениях возмущения могли переноситься при помощи ММГД-волн и волн Хантадзе. Заметим, однако, что последние распространяются лишь вдоль параллелей.

Большая амплитуда колебаний могла быть связана с тем фактом, что после 02:15 реакции на СР и прохождение утреннего терминатора наложились друг на друга.

Старт КА "Atlas 2AS" сопровождался возмущениями, которые имели задержки $\Delta t_0 \approx 20$ мин и $\Delta t_1 \approx 70$ мин (см. рис. 4). Если они связаны с работой двигателей ракеты, из этих задержек необходимо вычесть время движения КА до соответствующей области ионосферы (при $z \approx 100$ км $\delta t \approx 4$ мин, $\Delta R \approx 200$ км). Тогда $v'_0 = R/\Delta t'_0$ составляет 10 км/с, если возмущение распространяется в E -области ионосферы (радиоволна отражалась на высоте около 150 км). Для скорости $v_1 = R/\Delta t'_1$ имеем 2.5 км/с при распространении в той же области ионосферы.

Скорость $v'_0 \approx 10$ км/с практически совпадает со скоростью гиротропных волн в дневной E -области ионосферы при $N \approx 10^{11}$ м⁻³ и $\alpha = 60^\circ$. Значение $v \approx 2.5$ км/с близко к скорости ММГД-волн ($v \approx 2 \div 3$ км/с) на высоте около 200 км (см. табл. 6, 7), если $\omega \approx 10^{-3}$ с⁻¹ ($T \approx 100$ мин). Именно при таких ω волна способна дойти до места наблюдения, т. е. должно выполняться условие $L_{\pm} \geq 10000$ км.

Заметим, что о возмущении с задержкой $\Delta t_1 \approx 70$ мин нельзя говорить с полной уверенностью, так как на реакцию, вызванную КА, наложилась реакция, обусловленная прохождением вечернего терминатора.

Тем не менее есть основания считать, что в этом эксперименте возмущения могли переноситься при помощи гиротропных и ММГД-волн.

При СР с космодрома Шрихарикота 18 апреля 2001 г. $\Delta t_1 \approx 33$ мин. Для $R_0 \approx 5600$ имеем $v_1 \approx 2.8$ км/с. При $\delta t \approx 5$ мин $v' \approx 3.3$ км/с. Эта скорость близка к скорости ММГД-волн.

Приведенные выше результаты согласуются с данными, описанными в [17].

Добавим, что достаточно уверенная реакция наблюдалась во всех рассмотренных 43 случаях СР.

Обсудим теперь гистограмму кажущихся скоростей. Наблюдались четыре группы скоростей: $0.5 \div 0.8$, $1 \div 6$, $7 \div 9$ и $15 \div 20$ км/с. Нет сомнения, что первая из них связана с УАВ и АГВ.

Во второй группе средняя скорость $\bar{v} \approx (3.1 \pm 0.2)$ км/с. Такую скорость имеют ММГД-волны с частотами $\omega \sim 10^{-3}$ с⁻¹ (период $T \sim 100$ мин) (см. табл. 6, 7). Близкое значение скорости имеют также волны Хантадзе в ночное время, однако они распространяются лишь в широтном направлении.

Скорости $7 \div 9$ км/с свойственны гиротропным волнам в дневное время, когда в E -области ионосферы $N \approx (1 \div 1.5) \cdot 10^{11}$ м⁻³. Кажущимся скоростям $v = 15 \div 20$ км/с (задержка около 10 мин) соответствуют скорости $v' \approx 30$ км/с при $R \approx 10000$ км и $\delta t \approx 5$ мин. Такие значения v' характерны также для гиротропных волн, когда в E -области ионосферы N уменьшалась до $4 \cdot 10^{10}$ м⁻³ (утреннее, вечернее время). Сказанное здесь справедливо при $\alpha = 60^\circ$. Заметим, что для места расположения РФО наклонение магнитного поля составляет 66.4° . Таким образом, скорости $7 \div 9$ и $15 \div 20$ км/с следует отнести к одной группе – к скоростям гиротропных волн в различное время суток. Добавим, что затухание гиротропных волн при таких углах α – значительно.

Величина возмущений. Рассмотрим сначала прохождение терминатора. Обычно полная реакция длилась не менее $1 \div 2$ ч. Время прохождения терминатора, движущегося со скоростью около 300 м/с, через диаграмму направленности антенны доплеровского радара шириной около 200 км составляет примерно 700 с. К этому времени необходимо прибавить время жизни электронов, обусловленное фотохимическими процессами в ионосфере. На высотах $150 \div 200$ км оно составляет $300 \div 500$ с. Тогда характерное время становления N в окрестности области отражения радиоволны $t_r \approx 1000 \div 1200$ с. Воспользуемся формулой из [5]:

$$f_d = \frac{f L_g}{c t_r},$$

где L_g – групповой путь в области, где n существенно отличен от 1 (ее толщина приблизительно равна L_N), индекс r обозначает, что параметр относится к области отражения.

Полагая $f = 3$ МГц, $L_g \approx 30$ км, получим $f_d \approx 0.25 \div 0.3$ Гц. Наблюдения дали близкое значение $\bar{f}_d \approx 0.27 \div 0.02$ Гц.

Доплеровское смещение частоты при прохождении СТ может трактоваться также как смещение, вызванное движением области отражения со скоростью v_r . В этом случае

$f_d = 2f \frac{v_r}{c}$. Отсюда для $f_d = 0.3$ Гц, $f = 3$ МГц получим, что $v_r \approx 15$ м/с. За время t_r область отражения сместилась примерно на 15 км.

Перейдем к рассмотрению СР. Чувствительность доплеровского метода составляет величину около 0.1 Гц, что соответствует минимальным наблюдаемым значениям $(\Delta N/N_0)_{\min} \approx 5 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-2}$ при $T \approx 10^2 \div 10^3$ с. Возмущение ΔN можно вычислить из уравнения непрерывности

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \text{div } N \vec{v}_d = 0, \quad (9)$$

где \vec{v}_d – скорость движения плазмы. При распространении в ионосфере электромагнитных волн для модуля \vec{v}_d имеем

$$v_d \approx \frac{\Delta E}{B_0}, \quad (10)$$

где ΔE – напряженность электрической компоненты волны, приводящей к дрейфу электронов в скрещенных $\Delta \vec{E}$ и \vec{B}_0 полях.

Заменяя производные в уравнении (9) их оценкой, получим

$$\frac{\Delta N}{N} \approx \frac{v_{dz} T}{L_N}. \quad (11)$$

Здесь v_{dz} – вертикальная проекция дрейфовой скорости v_d . Из соотношения (11) имеем

$$v_{dz} \approx \frac{\Delta N}{N} \frac{L_N}{T}.$$

Для типичного значения $L_N \approx 10 \div 100$ км получим $v_{z\min} \approx 0.5 \div 5$ м/с. Такие скорости дрейфа, как следует из (10), можно ожидать при $\Delta E_{\min} \approx 2.5 \cdot 10^{-5} \div 2.5 \cdot 10^{-4}$ В/м. Поскольку для ММГД-волн, гиротропных волн и волн Хантадзе $n \approx 10^4 \div 10^6$, индукция магнитной компоненты волн

$$\Delta B_{\min} \approx \frac{n}{c} \Delta E_{\min} = \Delta E_{\min} / v_{ph} \approx 2.5 \cdot 10^{-11} \div 2.5 \cdot 10^{-8} \text{ Тл.}$$

Вариации магнитного поля с амплитудой $\Delta B \approx 25$ пТл \div 25 нТл не представляются слишком большими. Покажем это.

Скорость истечения реактивной струи около $3 \div 4$ км/с. В поперечном направлении струя расширяется с тепловой скоростью порядка 1 км/с (температура газов в струе около $3000 \div 4000$ К). Важно, что эти скорости превышают как v_s , так и v_{as} . В результате такого соотношения скоростей генерируются скачки давления газа Δp , электронной концентрации ΔN и магнитного поля ΔB . Струя вызывает ускоренное движение ионосферной плазмы. В отличие от ионов, электроны на высотах E -области ионосферы являются замагниченными. Это обстоятельство обуславливает возникновение тока j , который в свою очередь генерирует возмущения магнитного поля ΔB .

Из роторного уравнения Максвелла для \vec{B} следует, что амплитуда пульсаций порядка

$$\Delta B = \mu_0 j l_p,$$

где j – плотность тока, вызванного в основном движением электронов, l_p – характерный размер возмущенной области. Поскольку

$$j = \sigma_H E_{\perp} = \sigma_H v_{\perp} B_0 \approx \epsilon_0 \frac{\omega_p^2}{\omega_B} v_{\perp} B_0,$$

для ΔB имеем:

$$\Delta B = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\omega_p^2}{\omega_B} v_{\perp} B_0 l_p = B_0 \frac{\omega_p^2 v_{\perp} l_p}{c^2 \omega_B}.$$

Здесь \vec{v}_{\perp} – поперечная по отношению к \vec{B}_0 скорость носителей, навязанная движением реактивной струи; E_{\perp} – поперечная к \vec{v}_{\perp} и \vec{B}_0 составляющая электрического поля в плазме ($\vec{E}_{\perp} = [\vec{v}_{\perp}, \vec{B}_0]$). Полагая $v_{\perp} = 1$ км/с, $l_p = 3$ км, $\omega_p^2 = 3 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-2}$ для ночи и $\omega_p^2 = 3 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-2}$ для дня, получим соответственно $\Delta B = 5$ нТл и $\Delta B = 50$ нТл. Для $v_{ph} \approx 1 \div 10^2$ км/с имеем $\Delta E \approx \Delta B v_{ph} \approx 0.005$ и 5 мВ/м. Такого порядка должны быть величины полей в месте их генерации. Вследствие расходимости волн их амплитуда в месте регистрации на несколько порядков меньше, но, как оказывается, достаточна для объяснения заметного возмущения N , которое обнаруживается доплеровским методом.

Что касается АГВ, то величине $f_d \approx 0.1 \div 0.2$ Гц соответствовало значение скорости частиц в волне,

$$v_z = \frac{1}{2} \frac{f_d}{f} c,$$

порядка $5 \div 10$ м/с. Такие значения v_z реальны. Поскольку $\Delta N_n / N_n = v_z / v_s$, из соотношения (4) получаем:

$$\frac{\Delta N}{N} \approx \frac{H}{L_N} \frac{v_z}{v_s}.$$

Например, на высоте 150 км в дневное время $L_N \approx 10$ км, $H \approx 25$ км, $v_s \approx 600$ м/с. Тогда при $v_z = 5 \div 10$ м/с имеем $\Delta N / N \approx 2 \cdot 10^{-2} \div 4 \cdot 10^{-2}$. Как уже отмечалось, такие возмущения удастся регистрировать доплеровским методом.

Подведем итог. Возмущения в ионосферной плазме возникают в результате генерации ударной акустической волны, а также волн электромагнитной (МГД) природы. Причинами генерации являются сверхзвуковое движение КА и реактивной струи, а также сверхзвуковое расширение ионизированного вещества струи в магнитном поле Земли. При этом в окрестности КА возникают квазипериодические возмущения N , ΔB и ΔE с амплитудами

$\sim 10 \div 100$ %, $5 \div 50$ нТл и $\Delta E \sim 5$ мкВ/м \div 5 мВ/м соответственно. Эти возмущения распространяются на высотах E - и F -областей в направлении, близком к горизонтальному, ослабляясь в основном из-за расходимости волны не более, чем на $1 \div 2$ порядка. В месте регистрации возникают возмущения плазмы с амплитудой $\Delta N/N \approx 10^{-2}$, которая может быть зарегистрирована доплеровским методом.

Выводы

1. В результате статистического анализа вариаций доплеровских спектров, сопровождавших 43 старта ракет, выявлены четыре группы кажущихся скоростей распространения возмущений: $0.5 \div 0.8$, $1 \div 6$, $7 \div 9$ и $15 \div 20$ км/с. Реакция на СР уверенно регистрировалась практически во всех случаях.

Первая группа скоростей наблюдалась только при СР с космодромов Плесецк и Байконур. С такими скоростями распространяются слабо затухающие ВГВ с периодом $10 \div 15$ мин. Эти волны относятся к сильно диспергирующим.

Вторая группа скоростей фиксировалась при СР с космодромов России, США и Франции ($R_0 \approx 2000 \div 10000$ км). Приблизительно такие скорости имеют ММГД-волны, а также волны Хантадзе. Фазовая скорость и глубина затухания (дальность распространения) первых существенно зависят от частоты волны. Скорость распространения волн Хантадзе в основном определяется значением концентрации электронов в E -области ионосферы. Эти волны практически не затухают и не диспергируют.

Третья и четвертая группы (фактически их можно объединить в одну группу скоростей) сопровождают СР на удаленностях ~ 10000 км. Перенос возмущений в этом случае, скорее всего, осуществляется при помощи гиротропных волн. Их скорость и затухание существенно зависят от времени суток и ориентации волнового вектора по отношению к геомагнитному полю.

2. Оценены амплитуды возмущений параметров среды под действием расширяющейся реактивной струи КА. Показано, что эти амплитуды достигают значительных величин. Это в конечном итоге обеспечивает наблюдаемые на расстояниях порядка $1500 \div 10000$ км возмущения в ионосфере.

литуды достигают значительных величин. Это в конечном итоге обеспечивает наблюдаемые на расстояниях порядка $1500 \div 10000$ км возмущения в ионосфере.

3. Статистический анализ 31 случая прохождения солнечного терминатора показал, что заметная реакция на него регистрировалась во всех случаях. При этом наблюдались увеличение (уменьшение) значения постоянной составляющей доплеровского смещения частоты в утреннее (вечернее) время суток в среднем на (0.27 ± 0.02) Гц продолжительностью $1 \div 2$ ч, а также генерация квазипериодических возмущений в ионосфере со средним периодом $T \approx (15.2 \pm 1.1)$ мин и средней амплитудой колебаний центральной частоты в ДС (0.28 ± 0.03) Гц.

Авторы благодарны В. А. Подносу, С. Г. Чулакову и С. Н. Шапталю за помощь в организации и проведении экспериментов.

Работа выполнена при поддержке Научно-технологического центра Украины, проектное соглашение № 1772.

Литература

1. Л. Ф. Черногор. Радиофизика и радиоастрономия. 2003, **8**, №1 с. 59-106.
2. К. П. Гармаш, А. М. Гоков, Л. С. Костров, В. Т. Розуменко, О. Ф. Тырнов, Ю. П. Федоренко, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор. Вестник Харьковского университета. Радиофизика и электроника. 1998, №405, с. 157-177; 1999, №427, с. 3-22.
3. К. П. Гармаш, В. Т. Розуменко, О. Ф. Тырнов, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор. Успехи современной радиоэлектроники. 1999, №7, с. 3-15; №8, с. 3-19.
4. Л. Ф. Черногор. Космічна наука і технологія. 1999, **5**, №1, с. 38-47.
5. Л. С. Костров, В. Т. Розуменко, Л. Ф. Черногор. Радиофизика и радиоастрономия. 1999, **4**, №3, с. 209-226.
6. Л. С. Костров, В. Т. Розуменко, Л. Ф. Черногор. Радиофизика и радиоастрономия. 1999, **4**, №3, с. 227-246.
7. L. F. Chernogor, V. T. Rozumenko. Кинематика и физика небесных тел. Приложение. 2000, №3, с. 514-516.
8. Э. А. Афраймович, В. В. Кирюшкин, Н. П. Первалова, А. В. Плотников. В кн.: Труды XX все-русской конференции по распространению

- радиоволн. Н. Новгород, 2–4 июля 2002 г., с. 98-99.
9. Y. Q. Li, A. R. Jacobson, R. C. Carlos, R. S. Massey, Y. N. Taranenko, G. Wu. *Geophys. Res. Lett.* 1994, **21**, pp. 2737–2740.
10. Е. А. Пономарев, А. И. Ерущенко. *Известия вузов. Радиофизика.* 1977, 20, №12, с. 1773-1789.
11. Э. Э. Госсард, У. Х. Хук. *Волны в атмосфере.* Москва, Мир, 1978, 532 с.
12. В. Л. Гинзбург. *Распространение электромагнитных волн в плазме.* Москва, Наука, 1967, 684 с.
13. В. М. Сорокин, Г. В. Федорович. *Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме.* Москва, Энергоиздат, 1982, 136 с.
14. В. М. Сорокин. *Геомагнетизм и аэрономия.* 1987, **27**, №1, с 104-108.
15. А. Г. Хантадзе. *Доклады Академии наук.* 2001, **376**, №2, с. 250-252.
16. А. Г. Хантадзе. *Геомагнетизм и аэрономия.* 2002, **42**, №3, с. 333-335.
17. L. F. Chernogor, L. S. Kostrov, V. T. Rozumenko. *Кинематика и физика небесных тел. Приложение.* 2000, №3, с. 497-499.

**Statistics of Signals of HF Doppler Radar
Probing the Bottomside Ionosphere
Disturbed by Rocket Launches
and Solar Terminator**

**V. P. Burmaka, L. S. Kostrov,
L. F. Chernogor**

The statistical analysis of the variations in the Doppler spectra resulting from forty-three rocket launches has revealed four groups of apparent velocities of disturbance transfer: $0.5 \div 0.8$, $1 \div 6$, $7 \div 9$, and $15 \div 20$ km/s. They are related to acoustic-gravity, slow magnetohydrodynamic, magnetogradient, and possibly gyrotropic waves.

The analysis of thirty-one events of the moving solar terminator has made it possible to obtain the statistics of Doppler spectra variations (variations in the mean Doppler shift of frequency, duration of ionospheric response, predominant time period, and the amplitude of the central frequency of quasi-periodic disturbance).