

УДК 550.388: 551.510.535

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ ЧАСТИЧНЫХ ОТРАЖЕНИЙ ОТКЛИКА СРЕДНЕШИРОТНОЙ D-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ НА УДАЛЕННЫЕ СТАРТЫ И ПОЛЕТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2006 г. А. М. Гоков, О. Ф. Тырнов

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина
e-mail: Alexander.M.Gokov@univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 17.05.2005 г.

После доработки 05.10. 2005 г.

Экспериментально с помощью метода частичных отражений исследованы изменения концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы в периоды старта и полета ракет различного типа при разных удалениях от места старта. Установлено, что ракеты средней и большой мощности способны производить кратковременные пульсирующие возмущения концентрации электронов в нижней ионосфере на расстояниях до нескольких тысяч км. По-видимому, эти эффекты вызваны стимулированными пульсирующими потоками электронов из магнитосферы в нижнюю ионосферу Земли с энергией $\sim 10^2$ – 10 кэВ и значениями потоков $p \sim 10^8$ – 10^9 м⁻² с⁻¹.

PACS: 94.20.de, 94.20.Vv

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что старты и полеты космических аппаратов (КА) с работающим двигателем, падение КА, вызывают ряд процессов в ионосфере (см., например [Бурмака и др., 2004]). Явления, сопровождающие запуски ракет, отличаются многообразием, своими пространственно-временными, энергетическими и другими характеристиками. Они зависят от расстояния до траектории КА, его высоты, типа топлива, мощности двигателей и состояния ионосферы как в месте старта и полета КА, так и в пункте наблюдения. Классификацию возмущений в ионосферной плазме, возникающих в период старта и полета КА, обычно производят по их пространственным масштабам. Возмущения с горизонтальным масштабом $L_1 \leq 100$ км, $L_2 \sim 100$ – 1000 км и $L_3 \sim 1000$ – 10000 км соответственно называют локализованными, крупномасштабными и глобальными. Традиционно значительное внимание уделяется поиску эффектов в E- и F-областях ионосферы. В настоящее время сравнительно хорошо (однако далеко не полностью) экспериментально изучены основные типы, величина и характер возмущений в плазме в E и F-областях ионосферы, выяснены механизмы переноса возмущений на глобальные расстояния, их скорости распространения. Возмущения в ионосферной плазме возникают в результате генерации ударной акустической волны (УАВ) и волн электромагнитной природы (различного типа магнитогидродинамические волны) (см., например, [Афраймович и др., 2002; Бурмака

и др., 2004; Костров и др., 1999]). Причинами генерации являются сверхзвуковое движение КА и реактивной струи (сгорание топлива) в атмосфере и ионосфере, а также сверхзвуковое расширение ионизированного вещества струи в магнитном поле Земли. При этом в окрестности КА возникают квазипериодические возмущения концентрации электронов N , магнитного ΔB , и электрического ΔE полей с амплитудами ~ 5 – 50 нТл и $\Delta E \sim 5$ мкВ/м – 5 мВ/м соответственно. Эти возмущения распространяются на высотах E и F-областей ионосферы в направлении, близком к горизонтальному, ослабляясь в основном, из-за расходимости волны не более, чем на 1–2 порядка. В месте наблюдений при этом возникают возмущения ионосферной плазмы с амплитудой $\Delta N/N \approx 10^{-2}$, которые регистрируются экспериментально (см., например, [Бурмака и др., 2004; Костров и др., 1999]).

Иная картина в настоящее время имеет место в исследованиях реакции нижней части ионосферы, – ее D-области, на старты и полеты КА. В литературе известны лишь эпизодические экспериментальные исследования (см., например, [Гармаш и др., 1999а, б; Chernogor et al., 1998]). Вызвано это, в первую очередь, сложностью состава и физико-химических процессов, протекающих в D-области, а также трудностями проведения длительных экспериментальных исследований. Поэтому до настоящего времени остаются не выясненными характер и типы возмущений параметров ионосферной плазмы, механизмы переноса возмущений на глобальные расстояния (если таковые имеют место), их скорости распростра-

нения, величина возмущений в D -области ионосферы.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований методом частичных отражений (ЧО) возможных вариаций концентрации электронов в среднеширотной D -области во время удаленных стартов ракет разного типа.

2. ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования в течение ряда лет проводились в Радиофизической обсерватории Харьковского Национального Университета им. В.Н. Каразина вблизи г. Харькова при помощи комплекса аппаратуры [Тупнов et al., 1994] методом ЧО (географические координаты: широта $49^{\circ} 38' N$, долгота $36^{\circ} 20' E$, магнитное наклонение $66^{\circ} 36.8'$, магнитное склонение $6^{\circ} 19.6'$, возвышение над уровнем моря – 156 м).

Основные параметры комплекса метода ЧО при проведении исследований были следующие: зондирующие частоты $f = 2.21$ и 2.31 МГц, длительность импульсов $\tau = 25$ мкс с частотой повторения $F = 1-10$ Гц, импульсная мощность $P \sim 150$ кВт, коэффициент усиления антенны $G \approx 40$. Во время эксперимента регистрировались высотно-временные зависимости амплитуд смеси частично отраженного сигнала и радишума $A_{so,x}(z, t)$ (где t – время, индексы “ o ” и “ x ” соответствуют обыкновенной и необыкновенной поляризациям) с 14 или 22 высотных уровней, начиная с 45 или 60 км через $\Delta z = 3$ км. Измерения $A_{so,x}(z, t)$ и $A_{no,x}(t)$ выполнялись непрерывными сеансами длительностью единицы-десятки часов. Для выделения амплитуд частично отраженных сигналов $A_{o,x}(z, t)$ записывались также амплитуды только радишума $A_{no,x}(t)$ (2–6 выборки в полосе частот 50 кГц), в моменты времени, предшествующие излучению зондирующего импульса. Оценки средних величин интенсивностей ЧО-сигнала $\langle A_{x,o}^2 \rangle$ и шумов $\langle A_{nx,no}^2 \rangle$ осуществлялись по 60 реализациям на интервале времени 60 с. Статистическая погрешность этих оценок не превышала 10%. Вычислялись высотно-временные зависимости $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z, t)$ и $\langle A_{nx,no}^2 \rangle(t)$.

По полученным $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z)$ на фиксированных высотах с шагом $\Delta z = 3$ км вычислялось их отношение R (высотные профили $R(z)$ вычислялись на интервалах усреднения $\Delta t = 5$ и 10 мин), используемое далее для получения профилей электронной концентрации $N(z)$ по методике дифференциального поглощения с применением алгоритма регу-

ляризации [Гармаш, Черногор, 1996]. Погрешность вычислений профилей $N(z)$ на интервалах усреднения в 10 или 5 мин не превышала 30% и 50% соответственно. Для оценки периодов достаточно медленных вариаций $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z, t)$ или концентрации электронов $N(t)$ использовался алгоритм быстрого преобразования Фурье на интервале времени 32, 64 или 128 мин. Временной ряд при этом образован из ежесекундных значений $A_{so,x}(z, t)$, $A_{o,x}(z, t)$ и $A_{no,x}(t)$. Анализировались высотно-временные вариации полученных зависимостей $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z, t)$, $\langle A_{nx,no}^2 \rangle(t)$ и $N(z, t)$.

Удаление от места старта ракет до пункта наблюдения составляло $R_1 \sim 700-10000$ км. Всего анализу подверглись около 200 экспериментов. Из них около 150 экспериментов выполнены во время стартов КА в ночное время и в периоды прохождения утреннего и вечернего солнечных терминаторов. Анализ этого массива экспериментальных данных показал, что в этих экспериментах однозначно связать изменения характеристик ЧО сигналов и радишумов, а также параметров ионосферы с возмущениями в ионосфере, производимыми стартом и полетом КА, не представляется возможным. Поэтому отдельно анализировались данные, полученные в дневное время, когда возможные изменения характеристик ЧО сигналов, радишумов и параметров ионосферы можно идентифицировать с рассматриваемыми возмущениями. В табл. 1 приведены основные сведения об экспериментах, проведенных в светлое время суток. Сведения о КА получены по сети Internet: <http://www.space.com>. Будем условно называть ракеты с начальной массой более 1000 т – сверхтяжелыми, с массой 300–1000 т – тяжелыми, с массой 100–300 т – средней тяжести, с массой 30–100 т – легкими, с массой 10–30 т – сверхлегкими.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Поскольку удаление пункта наблюдений от места стартов КА составляло, как отмечено выше, $R_1 \sim 700-10000$ км, то была предпринята попытка обнаружения возможных глобальных возмущений концентрации электронов в среднеширотной D -области во время удаленных стартов и полетов ракет различной мощности. Отметим, что отчетливые изменения $N(z, t)$ удалось зарегистрировать не во всех экспериментах. Это обусловлено рядом причин: условия в ионосфере в месте старта (полета) и наблюдения, тип (мощность двигателей) ракеты, состояние радиационных поясов Земли и др. Основные сведения о ракетах, в периоды стартов которых обнаружены особенности в изменениях $N(z, t)$, приведены в табл. 2.

Таблица 1. Сведения об экспериментах во время стартов ракет

Дата	Тип корабля	Место старта (космодром)	Географические широта, долгота, град.	Расстояние от места наблюдения, км.	Наклонение орбиты, (min, max), град.	Время старта, UT
15.05.1997	Союз	Байконур (Россия, Казахстан)	45.36 N 63.26 E	2050	49 99	12:10
13.08.1998	»	»	»	»	»	09:43:11
26.02.2001	»	»	»	»	»	08:09
28.04.2001	»	»	»	»	»	07:37
25.04.2002	»	»	»	»	»	06:26
26.06.2002	»	»	»	»	»	05:36:02
02.02.2003	»	»	»	»	»	12:59:40
15.05.1997	Atlantis	Мыс Канаверал, (США)	28.45 N 80.53 E	9330	28 57	08:07:48
24.05.1997	»	»	»	»	»	12:33
07.10.2002	»	»	»	»	»	18:45:41
12.07.2000	Протон	Байконур (Россия, Казахстан)	45.36 N 63.26 E	2050	49 99	04:56:36
20.11.1998	»	»	»	»	»	06:40
17.10.2002	»	»	»	»	»	04:41
21.10.2000	Зенит	Запускается с моря				05:52
17.07.1999	Зенит	Запускается с моря				06:38
25.08.1997	Delta-2	Мыс Канаверал, (США)	28.45 N 80.53 E	9330	28 57	14:39
24.10.1998	»	»	»	»	»	12:08
10.06.1999	»	»	»	»	»	13:48:43
30.01.2001	»	»	»	»	»	07:55
18.10.2001	»	»	»	»	»	18:51
04.05.2002	»	»	»	»	»	09:54:58
03.07.2002	»	»	»	»	»	06:47:41
20.11.2002	»	»	»	»	»	22:39
20.12.2000	Ariane	Куру (Франция)	5.2 N 52.73 W	9500	5 100	12:26
09.06.2001	»	»	»	»	»	05:45
05.06.2002	»	»	»	»	»	06:44
14.07.2000	Atlas	Мыс Канаверал, США)	28.45 N 80.53 E	9330	28 57	05:21
21.02.2002	»	»	»	»	»	14:43
23.07.1999	Columbia	»	»	»	»	04:28
16.01.2003	»	»	»	»	»	15:39
07.08.1997	Discovery	»	»	»	»	14:41
19.08.1997	»	»	»	»	»	11:08
17.03.2002	Рокот	Байконур (Россия, Казахстан)	45.36 N 63.26 E	2050	49 99	09:21
30.06.2003	»	»	»	»	»	14:15
06.08.2001	Titane	Мыс Канаверал, (США)	28.45 N 80.53 E	9330	28 57	07:28
08.04.2003	»	»	»	»	»	13:43
28.11.2002	Космос	Плесецк (Россия)	62.7 N 40.35 E	1470	59 83	06:07
15.07.2000	»	»	»	»	»	15:00
04.12.1998	Endeavour	Мыс Канаверал, (США)	28.45 N 80.53 E	9330	28 57	09:35:34
18.04.2001	GSLV-D1	Шрихорикота (Индия)	13.8 N 80.3 E	5630	44 47	10:13
17.10.2003	GSLV-05	»	»	»	»	04:52

Таблица 2. Параметры основных ракет (приведены примерные значения)

КА	Полная масса, т	Начальная тяга, кгс	Время работы 1(0), 2(1), 3(2) и 4(3) ступеней, с	Тип КА по тяжести	Мощность двигателей, Вт	Энерговыведение, Дж
Космос	110	160000	13, 375	средняя	$\sim 10^8-10^9$	$\geq 10^{11}$
Протон	715	903000	125, 206, 240, 600	тяжелая	$\sim 10^{10}-10^{11}$	$\geq 10^{13}$
Зенит	480	770000	150, 315	тяжелая	$\sim 10^{10}-10^{11}$	$\geq 10^{13}$
Союз	300	410000	150, 315	скорее тяжелая	$\sim 10^{10}-10^{11}$	$\geq 10^{13}$
Delta-II	230	360000	64(0), 256(1), 444(2), 88(3)	средняя	$\sim 10^9-10^{10}$	$\geq 10^{12}$
Atlas	234	362000	56(0), 172(1), 283(2), 393(3)	средняя	$\sim 10^9-10^{10}$	$\geq 10^{12}$
Ariane	470	550000	142(0), 205(1), 125(2), 759(3)	тяжелая	$\sim 10^{10}-10^{11}$	$\geq 10^{13}$

Рассмотрим основные особенности высотно-временных вариаций $N(z, t)$ в периоды стартов ракет разного типа, которые зарегистрированы в наших наблюдениях.

Для ракет типа “Космос” характерным оказалось следующее (старт 15.07.2000 г.): на $z \geq 84$ км через 40–45 мин после старта N уменьшалась на 50–100% в течение 40–50 мин с последующим восстановлением к суточному ходу; на $z \leq 81$ км в обоих экспериментах наблюдались рост и квазипериодические изменения N с амплитудой $\sim 50\%$ в течение примерно 2 ч. На рис. 1 приведен пример высотно-временных изменений N . Отметим, что старт ракет этого типа происходил на самом близком удалении от пункта наблюдений. В период старта КА “Протон” 20.11.1998 г. квазипериодические изменения N на $z \geq 87$ км с амплитудой $\sim 50\%$ с периодом $T \geq 30$ мин наблюдались через $\sim 10-15$ мин после старта (см. пример на рис. 2а). В период старта КА “Зенит” 17.07.1999 г. на 87–90 км через 10–15 мин после старта значения N уменьшились на $\sim 50\%$ в течение примерно 30 мин, затем примерно через 45–55 мин после старта во всей D -области наблюдались квазипериодические изменения N с амплитудой $\sim 50-100\%$ в течение примерно 3 ч (см. пример на рис. 2б).

Во время старта КА “Союз” обнаружены следующие основные особенности в изменениях N :

– 26.02.2001 г.: квазипериодические изменения N на 81–84 км с амплитудой $\sim 50\%$ и периодом ~ 50 мин через 40–50 мин после старта в течение примерно 3 ч;

– 02.02.2003 г.: квазипериодические изменения N почти во всей D -области с амплитудой $\geq 50\%$ и периодом ~ 50 мин через 40–50 мин после старта в течение 2–2.5 ч;

– 13.08.1998 г.: квазипериодические изменения N на $z \geq 93$ км с амплитудой $\sim 50-100\%$ и периодом $\sim 30-40$ мин через ~ 10 мин после старта. Пример таких вариаций $N(z, t)$ приведен на рис. 2в, г.

Квазипериодические изменения N на $z \geq 84$ км с амплитудой $\sim 50-100\%$ и периодом $\sim 30-40$ мин обнаружены через ~ 10 мин после старта КА

“Delta-II”. Пример таких вариаций приведен на рис. 2д, е. В период старта КА “Atlas” 21.02.2002 г. на высоте 84 км концентрация электронов возрастала через 10–15 мин после момента старта примерно на 80% в течение 25–30 мин с последующим типичным суточным ходом. Похожие особенности имели место и во время старта КА “Ariane” 05.06.2002 г.: концентрация электронов на высоте 84 км возрастала через 35–45 мин примерно на 100% в течение 25–30 мин с последующими квазипериодическими изменениями с амплитудой $\sim 50-100\%$ (см. пример на рис. 2ж). Представляет интерес поиск эффектов от старта тяжелой (масса около 400 т) ракеты GSVL. Ракеты запускались с космодрома в Индии, расстояние до места наблюдения составляло около 5600 км. Во время старта КА 18.04.2001 г. обнаружены квазипериодические изменения N на $z \geq 84$ км с амплитудой $\sim 50-100\%$ и периодом $\sim 30-40$ мин через ~ 10 мин

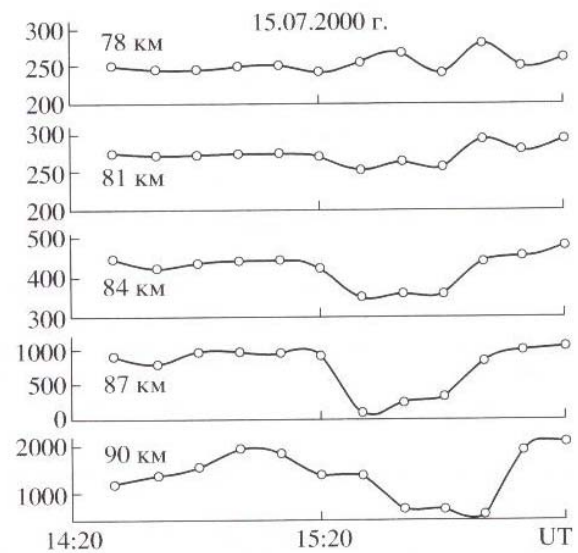


Рис. 1. Высотно-временные изменения концентрации электронов в среднеширотной D -области ионосферы в период старта КА “Космос” (время старта указано стрелкой).

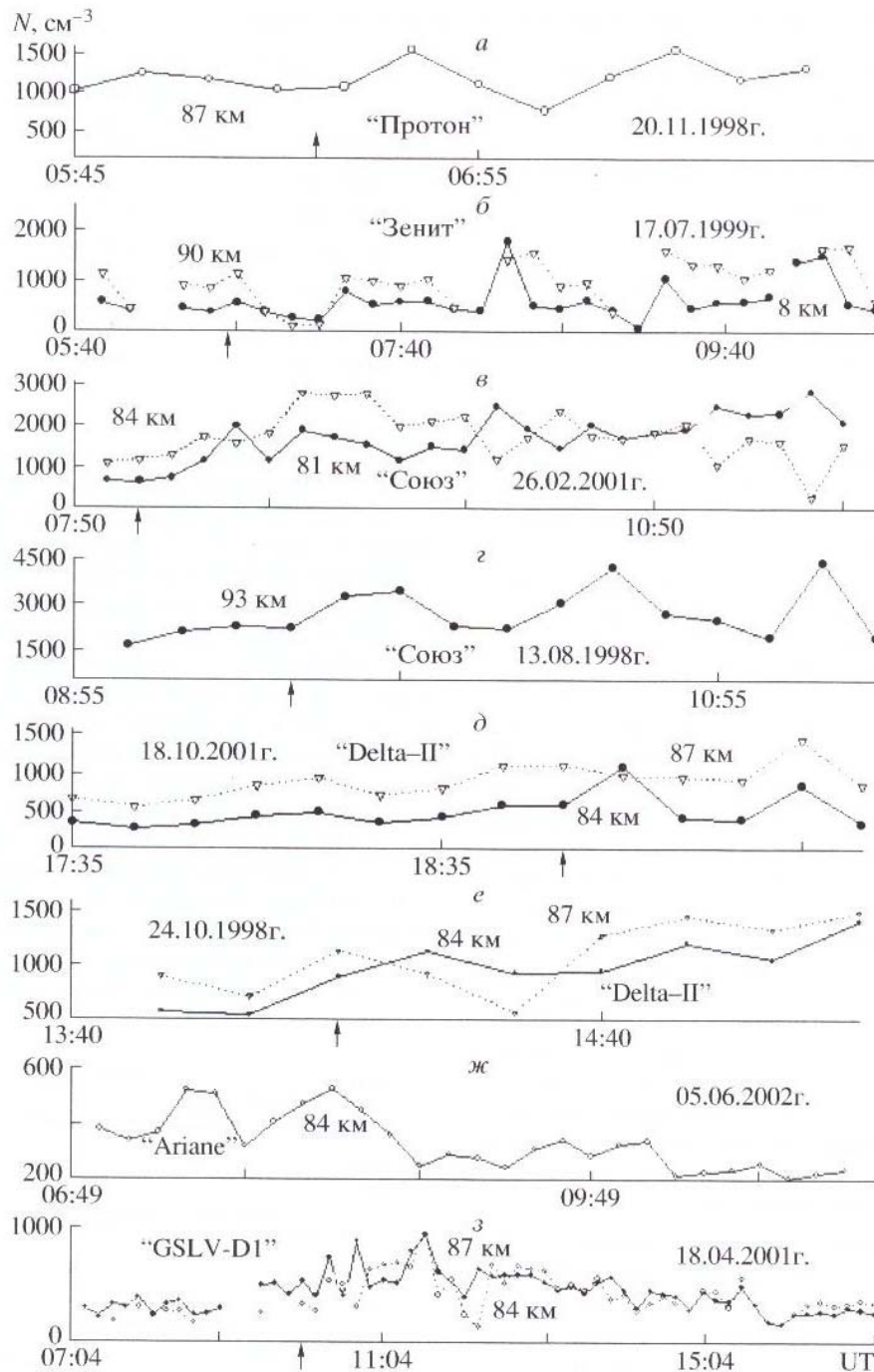


Рис. 2. Высотно-временные изменения концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы в периоды стартов КА "Протон" (а), "Зенит" (б), "Союз" (в, г), "Delta-II" (д, е), "Ariane" (ж, время старта 06:44 UT не отмечено) и "GSLV" (з).

после старта. Пример таких вариаций приведен на рис. 2з.

В период старта КА "Columbia" и "Atlantis" отчетливых изменений N , связанных со стартами, не обнаружено, поскольку старты происходили вблизи периода прохождения терминатора в пункте наблюдений и поэтому однозначно идентифи-

цировать наблюдаемые изменения N не представляется возможным.

В период старта КА малой тяжести "Рокот" (полная масса ракет этого типа составляла около 97 т, начальная тяга – около 160000 кгс), "Titan" (полная масса ракет этого типа составляла около 150 т, начальная тяга – около 194000 кгс) и

“Discovery” изменений N , связанных со стартами, не обнаружено.

Таким образом, установлены некоторые особенности в изменениях концентрации электронов в среднеширотной D -области ионосферы в период удаленных стартов и полетов ракет различного типа. Однако для детализации и выяснения полной картины необходимы дополнительные исследования, накопление большего массива данных и проведение статистического анализа.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В периоды удаленных стартов КА экспериментально обнаружены следующие особенности в высотном-временном изменении концентрации электронов в среднеширотной D -области ионосферы:

1) квазипериодические изменения N на $z \geq 81$ км с амплитудой $\sim 50\text{--}100\%$ и периодом $\sim 30\text{--}40$ мин через ~ 10 мин после старта;

2) квазипериодические изменения N на $81\text{--}90$ км с амплитудой $\sim 50\%$ и периодом $\sim 30\text{--}50$ мин через $40\text{--}50$ мин после старта в течение примерно $2\text{--}3$ ч;

3) во время старта КА “Космос” на высотах $z \geq 84$ км через $40\text{--}45$ мин после старта N уменьшалась на $50\text{--}100\%$ в течение $40\text{--}50$ мин с последующим восстановлением к суточному ходу.

В целом же поведение концентрации электронов (отклик) носит больше неоднозначный характер, обусловленный, по-видимому, рядом факторов, о которых кратко сказано ниже.

Известно (см., например, [Бурмака и др., 2004; Костров и др., 1999]), что старты КА сопровождаются крупномасштабными и глобальными возмущениями в ионосфере. В приземной атмосфере ($z < 90\text{--}100$ км) работа ракетных двигателей и полет КА со сверхзвуковой скоростью приводят к генерации и усилению ударных акустических волн (УАВ). Мощность таких УАВ составляет $P_A \approx 10^8\text{--}10^{10}$ Вт для тяжелых и сверхтяжелых ракет (примерно $10^{-3}\text{--}10^{-2}$ мощности реактивной струи). Наиболее благоприятным для генерации УАВ является диапазон высот в нижней части E -области ($100\text{--}130$ км), поскольку эта область ионосферной плазмы расположена над мезосферным волноводом, который эффективно захватывает и направляет волны акустического типа на большие расстояния. Атмосфера на этих высотах еще достаточно плотная, а КА движется уже со сверхзвуковой скоростью, что полностью удовлетворяет условиям генерации УАВ. Согласно экспериментальным наблюдениям [Афраймович и др., 2002] УАВ в месте ее генерации приводит к относительным изменениям концентрации электронов $\sim 10\text{--}100\%$. Ударная волна является источником акустико-гравитационных волн (АГВ), которые распространяются на высотах E - и F -областей

ионосферы на расстояния не менее 2000 км. Сверхзвуковое расширение плазмы реактивной струи ракетного двигателя и сверхзвуковое движение плазмы под действием КА в гиротропной ионосфере вызывает генерацию электромагнитных и магнитогидродинамических (МГД) волн различных типов (см. например [Афраймович и др., 2002; Сорокин и Федорович, 1982]).

Экспериментально обнаруженные возмущения концентрации электронов в среднеширотной D -области ионосферы примерно через $10\text{--}15$ мин после старта КА, исходя из времени задержки отклика, могут быть связаны с генерацией МГД-возмущений в ионосферной плазме, которые, при определенных условиях, воздействуя на радиационные пояса Земли, могут вызвать пульсирующие высыпания электронов высоких энергий. Последние, в свою очередь, могут вызывать наблюдаемые экспериментально изменения концентрации электронов на больших удалениях от места старта КА. Подобный механизм ранее был предложен для объяснения экспериментальных результатов, полученных во время мощных удаленных землетрясений и сильных гроз (см., [Гокков, 2001; Gokov and Tyunov, 1999]).

Возмущения концентрации электронов через $45\text{--}50$ мин после старта КА, по-видимому, связаны с включением корректирующих двигателей ракет. Маловероятно, что такие значительные возмущения связаны с распространением волн (в частности, АГВ) в нижней ионосфере. Более вероятно, что эти возмущения концентрации электронов вызваны пульсирующими потоками частиц из магнитосферы. Эти процессы высыпаний могут быть стимулированы включением корректирующих двигателей ракет.

Исходя из этой гипотезы на основе механизма о высыпании высокоэнергичных частиц (электронов, протонов) для обсуждаемых экспериментов оценим по методике [Chernogor et al., 1998] параметры потоков электронов. По величине электронной концентрации в невозмущенных N_0 и возмущенных N условиях оценивались скорости ионизации $q_0 = \alpha_0 N_0^2$, $q = \alpha N^2$, где α_0 и α – соответствующие коэффициенты рекомбинации. Для простоты будем пренебрегать нагревом атмосферы при высыпании частиц и полагать $\alpha \approx \alpha_0$. Считается также, что на меньших высотах преобладает рекомбинация электронов с ионами-связками, для которых $\alpha \approx 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$. Это справедливо при $z \leq 75\text{--}90$ км в условиях слабо возмущенной ионосферы для дневного и ночного времени соответственно [Chernogor et al., 1998]. На больших высотах α постепенно уменьшается от 10^{-11} до $2 \times 10^{-13} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$. Последнее значение характерно для рекомбинации электронов с ионами NO^+ и O_2^+ . Если пренебречь распределением высыпающихся частиц по

Таблица 3. Параметры потоков электронов

Дата	05.06.2000 г.	20.11.1998 г.	26.02.2001 г.	13.08.1998 г.	24.10.1998 г.	18.04.2001 г.
z , км	84	87	81	93	84	84
N_0 , м ⁻³	2.0×10^8	10×10^8	8.5×10^8	20×10^8	5.0×10^8	3.6×10^8
N , м ⁻³	4.2×10^8	16×10^8	1.9×10^9	35×10^8	11.5×10^8	9.0×10^8
q_0 , м ⁻³ с ⁻¹	2.8×10^5	2.0×10^6	7.2×10^6	8.5×10^5	1.8×10^6	7.2×10^5
q , м ⁻³ с ⁻¹	12.3×10^5	5.2×10^5	3.4×10^7	24.4×10^5	10.5×10^6	5.7×10^6
Δq , м ⁻³ с ⁻¹	9.5×10^5	3.2×10^6	2.7×10^7	1.6×10^6	8.7×10^6	5.0×10^6
P_1 , Дж м ⁻² с ⁻¹	3.2×10^{-6}	1.1×10^{-5}	9.2×10^{-5}	5.4×10^{-6}	3.0×10^{-5}	1.7×10^{-5}
p , м ⁻² с ⁻¹	2.1×10^8	9.2×10^8	2.1×10^9	4.5×10^8	2.1×10^9	1.1×10^9
ϵ , МэВ	0.1	0.08	0.15	0.08	0.1	0.1
P , Вт	3.2×10^8	1.1×10^9	9.2×10^9	5.4×10^8	3.0×10^9	1.7×10^9
E , Дж	7.7×10^{11}	13×10^{12}	2.8×10^{13}	6.5×10^{11}	5.4×10^{12}	3.1×10^{12}
ΔT , с	2.4×10^3	1.2×10^3	3.0×10^3	1.2×10^3	1.8×10^3	1.8×10^3

энергиям, которое при наземных наблюдениях неизвестно, то плотность потока мощности частиц $P_1 \approx 2\epsilon_i \Delta z \Delta q$, где $\Delta q = q - q_0$, $\epsilon_i \approx 35$ эВ – энергия, затрачиваемая на один акт ионизации, Δz – диапазон высот, где эффективно поглощается поток частиц данной энергии ϵ . Далее будем полагать, что $\Delta z = 10$ км. С другой стороны, параметр P_1 связан с потоком частиц p : $P_1 = \epsilon p$. Имея P_1 можно оценить мощность и энергию частиц высыпавшихся на площади S : $P = P_1 S$, $E = P \Delta T$, где ΔT – длительность высыпаний. Методика оценки параметров потока частиц сводится к вычислению величины Δq , затем – P_1 , p , P и E .

Результаты расчетов приведены в табл. 3. В расчетах принимали $S = 10^{14}$ м². Полагали также, что наиболее эффективно воздействуют на плазму в D -области потоки электронов с энергиями $\epsilon > 40$ кэВ, что вполне оправданно (см., например, [Chernogor et al., 1998]).

Результаты расчетов показывают, что наблюдаемые квазипериодические вариации N в нижней ионосфере могут быть вызваны пульсирующими потоками электронов с $p \sim 10^8$ – 10^9 м⁻² с⁻¹ с энергией 10²–10 кэВ. Такие значения концентрации потоков электронов сходны по величине с их значениями в периоды возмущений другой природы (см., например, [Кнут и Вюрцберг, 1976; Кнут и Федорова, 1977; Лаштовичка и Федорова, 1976; Chernogor et al., 1998; Gokov and Tyrnov, 1999]) и не представляются большими в условиях среднеширотной ионосферы. В высоких широтах, как известно, значения p на несколько порядков больше.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, ракеты средней и большой мощностей способны производить кратковременные пульсирующие возмущения концентрации электронов в нижней ионосфере на расстояниях

до нескольких тысяч км и более. По-видимому, эти эффекты вызваны стимулированными пульсирующими потоками электронов из магнитосферы в нижнюю ионосферу Земли с энергией $\sim 10^2$ – 10^4 эВ с значениями потоков $p \sim 10^8$ – 10^9 м⁻² с⁻¹. Эти процессы высыпаний могут быть стимулированы включением корректирующих двигателей ракет.

Авторы благодарят А.И. Гритчина за помощь в проведении экспериментальных исследований, К.П. Гармаша за программу расчета профилей концентрации электронов с применением метода регуляризации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афраймович Э.А., Перевалова Н.П., Плотников А.В. Регистрация ионосферных откликов на ударно-акустические волны, генерируемые при запусках ракет-носителей // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 43. № 6. С. 790–797. 2002.
- Бурмака В.П., Таран В.С., Черногор Л.Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 4. С. 518–534. 2004.
- Гармаш К.П., Черногор Л.Ф. Профили электронной концентрации D -области ионосферы в спокойных и возмущенных условиях по данным частичных отражений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 36. № 2. С. 75–79. 1996.
- Гармаш К.П., Костров Л.С., Розуменко В.Т., Тырнов О.Ф., Цымбал А.М., Черногор Л.Ф. Глобальные возмущения ионосферы, вызванные стартом ракеты, на фоне магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 39. № 1. С. 72–78. 1999а.
- Гармаш К.П., Гокон А.М., Костров Л.С., Поднос В.А., Тырнов О.Ф., Федоренко Ю.П., Цымбал А.М., Черногор Л.Ф. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 2. Процессы в ис-

- кусственно возмущенной ионосфере. Вариации характеристик радиосигналов. Моделирование возмущений // Вісник Харківського університету № 427. Радіофізика та електроніка. Вип. 1. С. 3–22. 1999б.
- *Гоков А.М.* К вопросу о реакции среднеширотной D-области ионосферы на удаленные сильные землетрясения // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 31. № 4. С. 532–536. 2001.
- *Кнут Р., Вюрцберг И.* Ионосферные возмущения на средних широтах, вызванные частицами высоких энергий // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 16. № 4. С. 666–673. 1976.
- *Кнут Р., Федорова Н.И.* Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 4. Высыпание энергичных частиц во время бухтообразного возмущения среднеширотной D-области ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 17. № 5. С. 854–861. 1977.
- *Костров Л.С., Розуменко В.Т., Черногор Л.Ф.* Дюплеровское радиозондирование возмущений в средней ионосфере, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 4. № 3. С. 227–246. 1999.
- *Лаитовичка Я., Федорова Н.И.* Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 3. Необычное среднеширотное ионосферное возмущение корпускулярного происхождения // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 16. № 6. С. 1018–1025. 1976.
- *Сорокин В.М., Федорович Г.В.* Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. М.: Энергия. 135 с. 1982.
- *Chernogor L.F., Garmash K.P., Rozumenko V.T.* Flux parameters of energetic particles affecting the middle latitude lower ionosphere // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 3. № 2. С. 191–197. 1998.
- *Gokov A.M., Tyrnov O.F.* Experimental investigations of strong thunderstorms having effects on the middle latitude ionospheric D-region parameters // Telecommun. Radio Engin. V. 53. № 7–8. P. 6–12. 1999.
- *Tyrnov O.F., Garmash K.P., Gokov A.M., Gritchin A.I., Dorohov V.L., Kontsevaya L.G., Kostrov L.S., Leus S.G., Martynenko S.I., Misyura V.A., Podnos V.A., Pokhilko S.N., Rozumenko V.T., Somov V.G., Tsybal A.M., Chernogor L.F., Shemet A.S.* The Radiophysical observatory for remote sounding of the ionosphere // Turkish J. Physics. V. 18. № 11. P. 1260–1265. 1994.