

УДК 550.388

Л. С. Костров, В. Т. Розуменко, Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків

**Результаты доплеровских наблюдений
возмущений в геокосмосе, сопутствовавших
полетам космических аппаратов**

В результаті статистичного аналізу варіацій доплерівських спектрів, що супроводжували 72 старту ракет, виявлено чотири групи уявних швидкостей розповсюдження збурень: 0.5—0.8, 1—6, 7—9 і 15—20 км/с. З ними пов'язані акусто-гравітаційні хвилі (перша група), повільні магнітогідродинамічні і магнітоградієнтні хвилі (друга група), а також гіротропні хвилі (третья і четверта групи).

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время значительное внимание уделяется системному подходу к исследованию физических процессов в геокосмосе [7]. Видное место в исследованиях занимает изучение реакции ионосферы на воздействие источников с большим энерговыделением [6, 7]. Оно позволяет проследить перенос возмущений на значительные и глобальные расстояния определить механизмы переноса и физическую природу «переносчика», а также выявить особенности взаимодействия подсистем в системе тектоносфера — атмосфера — ионосфера — магнитосфера. В настоящей работе в качестве источника используются старты ракет (СР), происходившие в 1999—2002 гг. и удаленные от места наблюдения на расстояния 1500—10000 км. Различные удаления космодромов, мощность ракет, состав топлива и разнообразие траектории космических аппаратов (КА) обеспечивают варьирование «начальных условий» и гибкость в исследовании реакции [1—5, 8].

Целью работы является изложение результатов статистического анализа характеристик радиосигналов доплеровского радара, отраженных в средней ионосфере, возмущенной СР. Обсуждаются также типы волн, переносящие возмущения.

Для наблюдения использовался двухчастотный доплеровский радар вертикального зондирования, работавший в диапазоне 2.8—3.5 МГц. Регистрация значений огибающей биений между колебаниями отраженного радиосигнала и опорного генератора осуществлялась с частотой 10 Гц. Спектральное

оценивание производилось ежеминутно по 512 отсчетам (разрешение по частоте около 0.02 Гц). Доплеровские спектры (ДС) вычислялись в диапазоне частот от -1 до +1.5 Гц. Находились также длиннопериодные ($T = 2.56...128$ мин) спектры временных вариаций доплеровского смещения частоты f_d . Радар расположен в Радиофизической обсерватории (РФО) Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (49° 38' с. ш., 36° 20' в. д.).

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Пример вариаций ДС при СР «Союз» с космодрома Плесецк показан на рис. 1, а до старта имели место сравнительно слабые вариации ДС, по-видимому, связанные с прохождением терминатора. Спектр был практически одномодовым. В интервале времени 21:10—22:00 спектр заметно уширился, а амплитуда сигнала оставалась практически постоянной. Следующее изменение характера вариаций ДС наблюдалось с 22:00 до 22:35.

Пример вариаций ДС при СР «Союз» с космодрома Байконур показан на рис. 1, б. Примерно до 7:00 наблюдались сильные вариации ДС, которые стали значительно меньше в интервале времени 7:00—9:00. В интервале времени 8:47—9:08 доплеровское смещение частоты $f_d > 0$. ДС практически не изменялись с 9:08 до 9:40. После этого наблюдались вариации средней частоты и заметное уширение ДС, это продолжалось до 11:00.

Примерно за 1 ч до старта КА «Discovery» с космодрома на мысе Канаверал ионосфера оставалась спокойной, наблюдался квазипериодический процесс с $T \approx 20$ мин и амплитудой доплеровского смещения $f_{da} \approx 0.1$ Гц (рис. 1, в). Постоянная составляющая f_{d0} в длиннопериодном спектре $f_d(t)$ была отрицательна 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, величина квазипериода была прежней — около 20 мин. После 2:15 в ионосфере возникло волновое возмущение (ВВ) с периодом 15–25 мин и $f_{da} \approx 0.3$ Гц, ДС расширились от 0.1 до 0.5 Гц. Такая картина наблюдалась по крайней мере до 4:40.

Из представленного анализа 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.

Всего проанализировано 72 СР с космодромов России, США, Франции, Японии и других стран. 21 сеанс наблюдений отбраковано по причине некачественных регистраций. В 8 сеансах среда была сильно возмущена естественными источниками. Статистическому анализу было подвергнуто 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 РФО. Такие скорости именуют кажущимися (рис. 4). Имело место четыре группы скоростей: 0.5–0.8, 1–6, 7–9 и 15–20 км/с. Первая скорость (0.5–0.8 км/с) наблюдалась только при СР с космодромов Плесецк и Байконур. Во второй группе статистически значимыми являются скорости 1–6 км/с. Такие значения наблюдались преимущественно при СР с космодромов США и Франции. Для этой группы среднее значение $\bar{v} = 3.1 \pm 0.2$ км/с. В третьей группе $\bar{v} \approx 7..9$ км/с. К четвертой группе принадлежат скорости 15–20 км/с. Скорости из двух последних групп наблюдались редко и только при СР с космодромов, удаленных на расстояния порядка 10000 км.

ПЕРЕНОС ВОЗМУЩЕНИЙ

Старты ракет сопровождаются крупномасштабными и глобальными возмущениями в ионосфере. Ключевыми являются следующие вопросы. Как возмуще-

ния генерируются? Как они переносятся на расстояния до 10000 км? Какова величина возмущений?

Работа ракетных двигателей и движение КА со сверхзвуковой скоростью на высотах до 100–130 км сопровождается генерацией ударной акустической волны (УАВ). В ее мощность P_a преобразуется 0.001–0.01 мощности реактивной струи, достигающей 10^{11} – 10^{12} Вт. При этом $P_a \approx 10^8 \dots 10^{10}$ Вт. Оптимальным для генерации УАВ диапазоном высот является 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. С другой стороны — ракета движется уже со сверхзвуковой скоростью, что относится к условиям генерации ударной волны. На этих высотах траектория ракеты близка к горизонтальной. УАВ в месте ее генерации приводит к относительным изменениям концентрации электронов 10–100 %. Она является источником акустико-гравитационных волн (АГВ). Сверхзвуковое расширение плазмы реактивной струи и сверхзвуковое движение плазмы под действием КА в гиротропной ионосфере вызывает генерацию электромагнитных и магнитогидродинамических (МГД) волн. Наличие в динамо-области ионосферы широтного градиента вертикальной проекции магнитного поля обуславливает существование магнитоградиентных волн (волн Хантадзе).

ОБСУЖДЕНИЕ

Эффекты, сопровождающие полеты КА, зависят от расстояния до траектории аппарата, его высоты, вида топлива, мощности двигателей и состояния ионосферы.

Типы волн. Изменения характера вариаций ДС имели место в 21:10 и 22:00 (см. рис. 1). Если они вызваны СР, то им соответствуют времена 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 160–180 км. Если считать, что возмущение от источника распространялось примерно на этой же высоте почти горизонтально по отношению к поверхности Земли, время подъема δt ракеты на высоту 170 км составляло около 5 мин. При этом скорректированные значения $\Delta t_0 \approx 5$ мин, $\Delta t_1 \approx 55$ мин. За время $\delta t \approx 5$ мин КА удаляется от космодрома примерно на 500 км в основном в восточном направлении (расстояние до обсерватории 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 скорости близко к скорости мед-

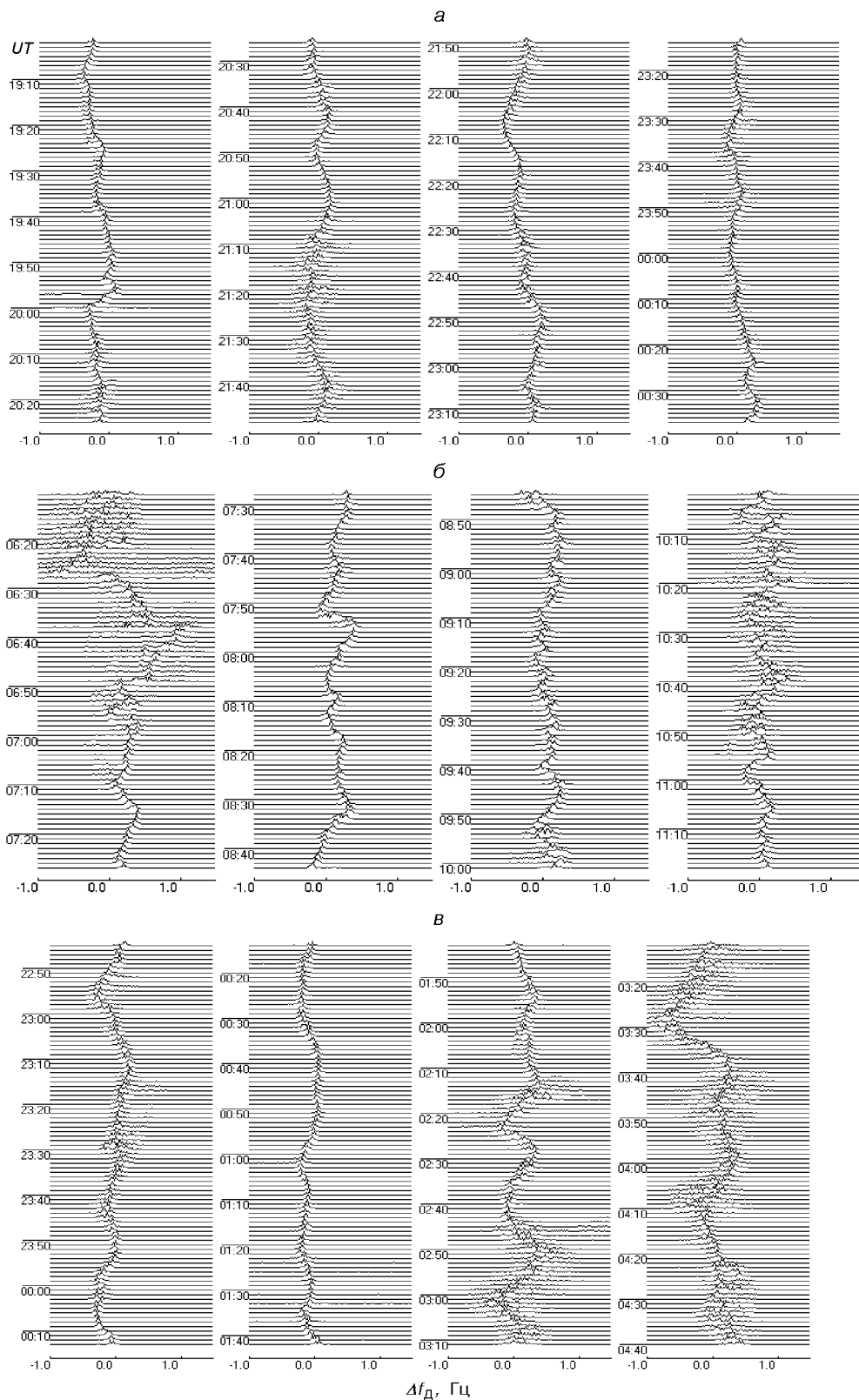


Рис. 1. Вариации ДС: *а* — на частоте 2.8 МГц при старте КА «Союз» в 21:00 9 сентября 1999 г.; *б* — на частоте 3.5 МГц при старте КА «Союз» в 08:47 1 февраля 2000 г.; *в* — на частоте 3.5 МГц при старте КА «Discovery» в 00:15 11 августа 2001 г. По горизонтальной оси — доплеровское смещение частоты радиосигнала, по вертикальной оси — киевское время

ленных МГД-волн (ММГД) с частотой $\omega \approx 0.001 - 0.01 \text{ с}^{-1}$. Для этих волн глубина затухания L составляет несколько тысяч километров. Второе значение скорости соответствует скорости звука v_s в атмосфере при $T_a \approx 610 \text{ К}$.

Существенные изменения ДС при СР «Союз» 1 февраля 2000 г. имели место в интервалах времени 09:10—09:43 и 09:43—11:10. Если они вызваны СР, то запаздывания реакции среды составили $\Delta t_0 \approx 23 \text{ мин}$ и $\Delta t_1 \approx 56 \text{ мин}$. Радиоволна с $f = 3.5 \text{ МГц}$ в утреннее время отражалась на высоте около 170 км. Скорректированные значения времени запаздывания реакции среды равны 18 и 51 мин. За время δt ракета удалилась от космодрома на восток на расстояние $\Delta R \approx 450 \text{ км}$. Расстояние от места генерации до пункта наблюдения составило $R = R_0 + \Delta R$, где $R_0 \approx 2050$ — расстояние от Байконура до РФО. При $R \approx 2500 \text{ км}$ имеем для скорректированных скоростей распространения возмущений $v_0 \approx 2.3 \text{ км/с}$, $v_1 \approx 820 \text{ м/с}$. Первое значение скорости соответствует скорости ММГД-волн при $\omega \approx 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Для них в дневное время при $z \approx 150 \text{ км}$ $L \approx 1000...3600 \text{ км}$. Второе значение скорости близко к v_s . При $v_s = 683 \text{ м/с}$ имеем $T_a \approx 1070 \text{ К}$. 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. Продолжительность возмущений приближалась к 120 мин. Сопровождавшие СР колебания имели квазипериод $T \approx 15 \text{ мин}$. Величина T несколько превышает период Брента—Вяйсяля T_B . При $v_s = 515...683 \text{ м/с}$ имеем $T_B \approx 8.7...11.5 \text{ мин}$.

При старте КА «Discovery» характер сигнала изменился (стало $f_d > 0$) с запаздываниями $\Delta t_1 \approx 85 \text{ мин}$ и $\Delta t_2 \approx 120 \text{ мин}$. Высот порядка 100 и 150 км изделие достигло за время δt 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 Е- и F-областях примерно равнялась 2.1 и 1.4 км/с. По-видимому, возмущения от КА продолжались до 02:15. В результате прихода второго ВВ ДС заметно (до 0.5 Гц) расширились. Такая реакция ионосферы продолжалась не менее 40 мин. Скорость 1—3 км/с имеют ММГД-волны в ночной F-области ионосферы, если $\omega \leq 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. При этом $L \geq 10000 \text{ км}$. Отдельно остановимся на колебаниях с большой амплитудой доплеровского смещения частоты, которое место после 02:15. Если $\Delta t_2 \approx 120 \text{ мин}$, то $\Delta t_2 \approx 105 \text{ мин}$, $v' \approx 2.2 \text{ км/с}$. Такую скорость

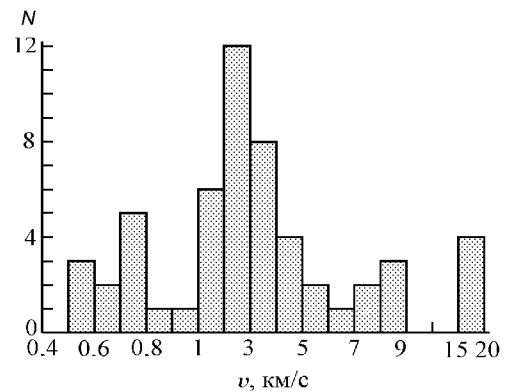


Рис. 2. Гистограмма кажущихся скоростей распространения возмущений, сопровождавших СР (масштаб по горизонтальной оси неравномерный)

имеют ММГД-волны в ночной F-области ионосферы при $\omega \leq 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Проверим возможность переноса возмущений при помощи волн Хантадзе, которые распространяются вдоль параллелей. Полагая, что ракета стартовала на северо-восток, высоты 130 км она достигла примерно к 12 мин. КА при этом удалился от космодрома на расстояние около 2350 км. Расстояние R до места наблюдения составляло примерно 7650 км. При этом $v \approx 1.2 \text{ км/с}$. Такую скорость имеют волны Хантадзе в вечернее время, когда в Е-области ионосферы $N \approx 3 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$. Заметим, что СР имел место около 16:00 по местному (для космодрома) времени. Похоже, что в данных измерениях возмущения могли переноситься как при помощи ММГД-волн, так и волн Хантадзе. Большая амплитуда колебаний связана с наложением реакций на СР и прохождение утреннего терминатора.

Из 43 СР достаточно уверенная реакция наблюдалась во всех случаях. Судя по рис. 2, имели место четыре группы скоростей: 0.5—0.8, 1—6, 7—9 и 15—20 км/с. Первая из них связана с УАВ и АГВ. Во второй группе средняя скорость $v \approx 3.1 \pm 0.2 \text{ км/с}$. Такую скорость имеют ММГД-волны с частотами $\omega \sim 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Близкое значение v имеют также волны Хантадзе в ночное время, однако они распространяются лишь в широтном направлении. Скорости 7—9 км/с свойственны гиротропным волнам в дневное время, когда в Е-области ионосферы $N \approx (1...1.5) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Кажущимся скоростям $v = 15—20 \text{ км/с}$ (время задержки около 10 мин) соответствуют скорости $v' \approx 30 \text{ км/с}$ при $R \approx 10000 \text{ км}$ и $\delta t \approx 5 \text{ мин}$. Такие значения v' характерны также для гиротропных волн, когда в

Е-области ионосферы значение N уменьшалось до $4 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ (утреннее, вечернее время) при угле между волновым вектором и индукцией геомагнитного поля $\alpha = 60^\circ$. Заметим, что для места расположения РФО наклонение магнитного поля составляет 66.4° . Скорости 7—9 и 15—20 км/с следует отнести к одной группе — к скоростям гиротропных волн в различное время суток.

Величина возмущений. Чувствительность доплеровского метода составляет величину около 0.1 Гц, что при $T \approx 100\text{—}1000$ с соответствует $(\Delta N/N_0)_{\min} \approx 0.005\text{—}0.05$. Возмущение ΔN можно вычислить из уравнения непрерывности

$$\partial N/\partial t + \text{div} N \mathbf{v}_d = 0, \quad (1)$$

где \mathbf{v}_d — скорость дрейфа плазмы. При распространении в ионосфере электромагнитных волн имеем $\mathbf{v}_d \approx \Delta E/B_0$, где ΔE — напряженность электрической составляющей поля, приводящей к дрейфу электронов в скрещенных ΔE и ΔB_0 полях. Из (1) получим $\Delta N/N \approx v_{dz} T/L_N$. Здесь v_{dz} — вертикальная проекция \mathbf{v}_d , $L_N = |N(dz/dN)|$. Тогда $v_{dz} = (\Delta N/N)(L_N/T)$. Для $L_N \approx 10\text{—}100$ км имеем $v_{z\min} \approx 0.5\text{—}5$ м/с. Такие \mathbf{v}_d следует ожидать при $\Delta E_{\min} \approx 2.5 \cdot 10^{-5}\text{—}2.5 \cdot 10^{-4}$ В/м. Поскольку для ММГД-, гиротропных волн и волн Хантадзе $n \approx 10^4\text{—}10^6$, индукция магнитной составляющей волн $\Delta B_{\min} \approx \Delta E_{\min} n/c \approx 2.5 \cdot 10^{-11}\text{—}2.5 \cdot 10^{-8}$ Тл. Амплитуды $\Delta B \approx 25$ пТл ... 25 нТл не представляются экзотическими. Покажем это.

Скорость истечения реактивной струи около 3—4 км/с. В поперечном направлении струя расширяется со скоростью порядка 1 км/с. Струя генерирует скачки давления порядка Δp , электронной концентрации ΔN , магнитного поля ΔB и вызывает ускоренное движение ионосферной плазмы. Замагниченные на высотах Е-области ионосферы электроны обуславливают ток плотностью j , а значит и возмущения ΔB . Из уравнений Максвелла для \mathbf{B} следует, что амплитуда $\Delta B \approx \mu_0 j l$, где j — плотность тока, вызванного в основном движением электронов, l — вертикальный размер возмущенной области. Тогда $\Delta B \approx B_0 v_\perp l \omega_p^2 / c^2 \omega_B$. Здесь v_\perp — поперечная по отношению к \mathbf{B}_0 скорость носителей, навязанная движением струи, \mathbf{E}_\perp — поперечная к \mathbf{v}_\perp и \mathbf{B}_0 составляющая электрического поля в плазме. Полагая $v_\perp = 1$ км/с, $l = 3$ км, $\omega_p^2 = 3 \cdot 10^{13}\text{—}3 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-2}$ для ночи и дня, получим соответственно $\Delta B = 5\text{—}50$ нТл, $\Delta E \approx 0.005\text{—}5$ мВ/м. Такого порядка должны быть поля в месте их генерации. Вследствие расходимости и затухания волн их амплитуда в месте регистрации на несколько порядков мень-

ше, но достаточная для возникновения возмущений ΔN .

Что касается АГВ, то величине $f_d \approx 0.1\text{—}0.2$ Гц соответствовало значение скорости частиц в волне $v_z = c f_d / 2f \approx 5\text{—}10$ м/с. Поскольку $\Delta N_n / N_n = v_z / v_s$, получаем $\Delta N/N \approx (H/L_N)(v_z/v_s)$, где H — приведенная высота атмосферы. На высоте 150 км в дневное время $L_N \approx 10$ км, $H \approx 25$ км, $v_s \approx 600$ м/с. При $v_z = 5\text{—}10$ м/с имеем $\Delta N/N \approx 2 \cdot 10^{-2}\text{—}4 \cdot 10^{-2}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате статистического анализа вариаций ДС, сопровождавших 43 СР, выявлены четыре группы кажущихся скоростей распространения возмущений: 0.5—0.8, 1—6, 7—9 и 15—20 км/с. Реакция на СР уверенно регистрировалась во всех случаях. Первая группа скоростей наблюдалась только при СР с космодромов Плесецк и Байконур. С такими скоростями распространяются АГВ с периодом 10—15 мин. Вторая группа скоростей фиксировалась при СР с космодромов России, США и Франции ($R_0 \approx 2000\text{—}10000$ км). Приблизительно такие скорости имеют ММГД-волны, а также волны Хантадзе. Третья и четвертая группы (а они составляли фактически одну группу скоростей) имели место при СР на удалениях порядка 10000 км. Перенос возмущений в этом случае, скорее всего, осуществлялся при помощи гиротропных волн.

Оценены амплитуды возмущений параметров среды под действием расширяющейся реактивной струи КА. Показано, что эти амплитуды достигают значительных величин. Это в конечном итоге обеспечивает наблюдаемые в ионосфере возмущения при $R \leq 10000$ км.

Работа выполнена при поддержке НТЦ Украины, проектное соглашение № 1772.

1. 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 радиоастрономия.—2003.—8.—С. 143.
2. Гармаш К. П., Гоков А. М., Костров Л. С. и др. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 2. Процессы в искусственно возмущенной ионосфере. Вариации характеристик радиосигналов. Моделирование возмущений // Вісник Харків. ун-ту. Радиофізика та електроніка.—1999.—Вип. 1 (№ 427).—С. 3.
3. Гармаш К. П., Костров Л. С., Розуменко В. Т. и др. Глобальные возмущения ионосферы, вызванные стартом

- ракеты, на фоне магнитной бури // Геомагнетизм и аэронавигация.—1999.—39.—С. 72.
4. Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф. и др. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 2 // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники.—1999.—8.—С. 3.
 5. Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование возмущений в средней ионосфере, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов // Радиофизика и радиоастрономия.—1999.—4.—С. 227.
 6. Черногор Л. Ф. Энергетика процессов в атмосфере и околоземном космосе в свете проекта «Попередження» // Космічна наука і технологія.—1999.—5, № 1.— С. 38—47.
 7. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8.—С. 59.
 8. Chernogor L. F., Kostrov L. S., Rozumenko V. T. Radio probing of the perturbations originating in the near-Earth plasma from natural and anthropogenic energy sources // Кинематика и физика небес. тел. Приложение.—2000.—№ 3.—С. 497.
-
- HF DOPPLER OBSERVATIONS OF DISTURBANCES IN GEOSPACE, WHICH ACCOMPANIED SPACE VEHICLE LAUNCHES**
- L. S. Kostrov, V. T. Rozumenko, L. F. Chernogor**
- Our statistical analysis of variations in the Doppler spectra derived during seventy-two rocket launches revealed four groups of apparent velocities of disturbance transfer: 0.5—0.8, 1—6, 7—9, and 15—20 km/s. They are related to acoustic-gravity, slow magnetohydrodynamic, magneto-gradient, and possibly gyrotropic waves.