

УДК 550.388:551.510

**В. П. Бурмака<sup>1</sup>, В. И. Таран<sup>1</sup>, Л. Ф. Черногор<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Інститут іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України, Харків

<sup>2</sup>Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна

**Результаты комплексных радиопизических наблюдений волновых возмущений в геокосмосе, сопровождавших старты и полеты ракет**

---

Проаналізовано результати спостережень методами некогерентного розсіяння (НР) та доплерівського зондування (ДЗ) хвильових збурень (ХЗ) в іоносфері на висотах 180—500 км, що супроводжували старту ракет на віддаленнях 2000—10000 км. Оцінені відносна амплітуда та періоди ХЗ, викликаних як стартами ракет, так і джерелами природного походження. Вивчено потенційні можливості методів НР і ДЗ в дослідженнях таких ХЗ. Результати вимірювань вказаними методами добре відповідали один одному. Спостережені швидкості ХЗ, що супроводжували старту ракет, близькі до виявлених нами раніше. Вони відповідають швидкостям акустико-гравітаційних, повітряних МГД- і, можливо, гіротропних хвиль в іоносфері.

---

**ВВЕДЕНИЕ**

В последнее время значительное внимание уделяется исследованию волновых возмущений (ВВ) в околоземном космосе. ВВ генерируются в результате воздействия «снизу» и «сверху» источников естественного и искусственного происхождения (вспышки на Солнце, геокосмические бури, мощные атмосферные процессы, извержения вулканов, землетрясения, старты крупных ракет, мощные взрывы и др). Воздействия источников искусственного происхождения можно рассматривать как активные эксперименты с большим энерговыделением, которые занимают видное место в рамках системного подхода к исследованию физических процессов в геокосмосе [10]. При этом известны основные параметры воздействия: время, место, величина энерговыделения, продолжительность воздействия и др.

Актуальность исследования ВВ заключается в том, что эти возмущения являются индикатором состояния космической погоды, переносчиком энергии между подсистемами в системе тектоносфера — атмосфера — ионосфера — магнитосфера [10]. Кроме того, ВВ существенно влияют на функционирование телекоммуникационных систем.

Целью настоящей работы является изложение результатов наблюдения методом некогерентного рассеяния (НР) волновых возмущений (ВВ) в ионосфере, вызванных природными и искусственными источниками.

Для выявления ВВ электронной концентрации  $N$  с малыми относительными амплитудами ( $\delta_N \sim 0.1—1\%$ ) разработана методика измерения и обработки данных наблюдений, проанализированы потенциальные возможности метода НР для достижения этой цели.

Выполнен корреляционный анализ квазипериодических флюктуаций мощности НР сигнала в ионосфере, возмущенной стартами ракет (СР) и прохождением солнечного терминатора (СТ).

**СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЯ**

Радар НР расположен в Ионосферной обсерватории Института ионосферы вблизи г. Харькова (49°36' с. ш., 36°18' в. д.). Основные параметры радара следующие: частота — 158 МГц, диаметр зенитной параболической антенны — 100 м, эффективная площадь антенны — около 3700 м<sup>2</sup>, коэффициент усиления антенны — около 10<sup>4</sup>, ши-

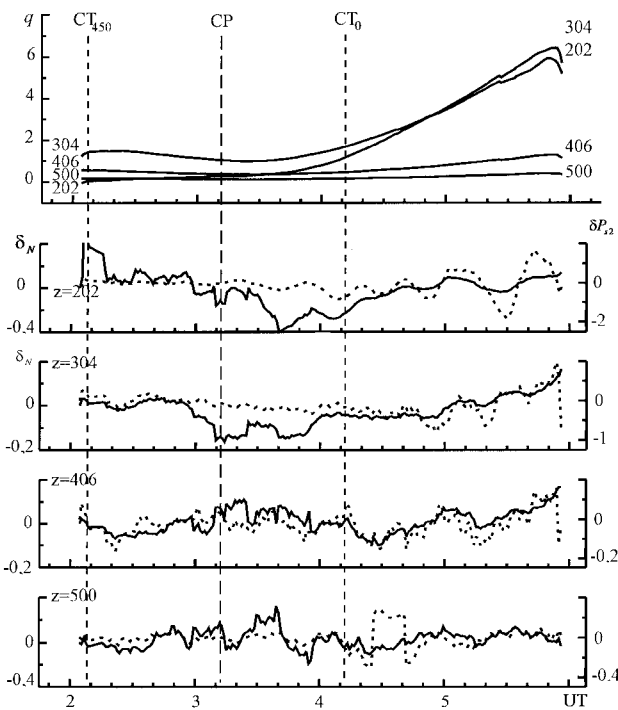


Рис. 1. Пример вариаций  $q$ ,  $\delta_N$  и  $\delta P_{s2} = \langle P_{s1} - P_{s0} \rangle$ , где  $P_{s1}$  — усредненное значение  $P_{s0}$  на интервале 1 ч со скольжением в  $\Delta T_0$ ,  $P_{s0}$  — базовая величина НР-сигнала, полученная на интервале  $\Delta T_0 = 1 \dots 1.5$  мин ( $\delta P_{s2}$  — пунктирная линия, шкала справа) для высот 202, 304, 406 и 500 км по данным радара НР во время старта ракеты «Союз» в 3:11 30 сентября 2002 г. (угловые скобки означают усреднение на интервале времени 15 мин со скольжением в  $\Delta T_0$ ). CP — момент старта ракеты,  $CT_0$ ,  $CT_{100}$  и  $CT_{450}$  — моменты прохождения солнечного терминатора на уровне Земли и на высотах 100 и 450 км

рина основного лепестка диаграммы направленности около  $1^\circ$ , импульсная ( $P$ ) и средняя мощности радиопередающего устройства достигают 3.6 МВт и 100 кВт соответственно, длительность импульса  $\tau \leq 800$  мкс, частота следования импульсов  $F = 24.4$  Гц. Полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства составляет 5.5—9.5 кГц [6, 7].

Радар доплеровского зондирования удален от радара НР расстояние порядка 10 км. Он кратко описан в работах [3, 4].

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВВ

При применении метода НР для исследования кратковременных возмущений ионосферы, ее неоднородной структуры и волновых процессов возникает ряд трудностей. Они связаны с малостью

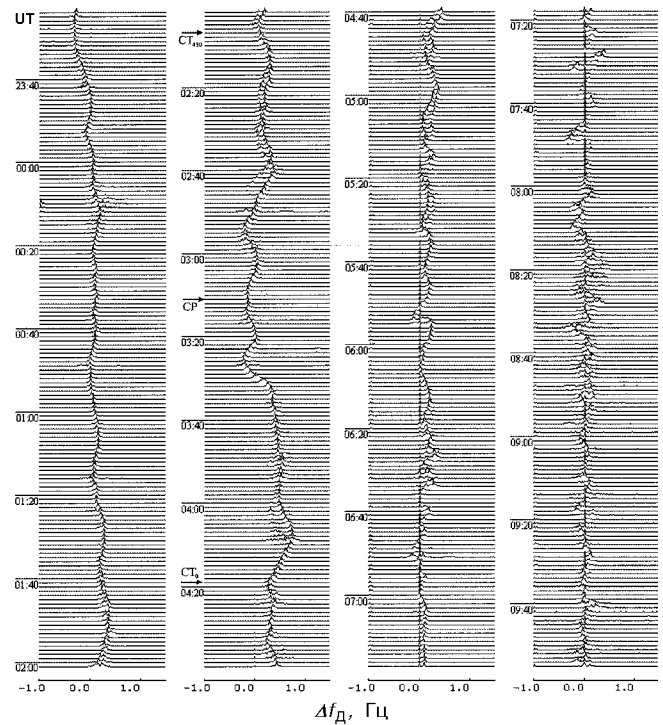


Рис. 2. Вариации ДС на частоте 3.5 МГц во время старта ракеты «Союз» в 3:11 30 сентября 2002 г. По горизонтальной оси — доплеровское смещение частоты радиосигнала  $\Delta f_D$

относительных флуктуаций  $N$  (обычно  $\delta_N \sim \sim 0.1 \dots 1 \%$ , редко  $\delta_N \sim 10 \%$ ) и особенностями метода НР. К последним относятся следующие: стохастический характер сигнала; низкое отношение сигнал/шум  $q = P_s/P_n$  ( $P_s$  и  $P_n$  — мощности сигнала и шума (помехи)); статистическая связь характеристик сигнала с параметрами среды и ее многопараметричность (характер НР-сигнала определяется многими параметрами атмосферы и ионосферы); исследуемый объект (радиолокационная цель) является пространственно-распределенным. Из сказанного вытекает, в частности, необходимость статистического усреднения  $P_s$  и  $P_n$  на интервале времени  $\Delta T$ , который при низких значениях  $q$  достигает десятков минут. В то же время  $\Delta T$  не должно превышать времени жизни случайных неоднородностей  $t_{\Delta N}$  или периода  $T$  волновых возмущений  $N$ . Первое в F-области ионосферы может изменяться в пределах  $1 \dots 10^4$  с для неоднородностей с характерным масштабом 1—100 км. Обычно величина периода  $T \sim 10 \dots 100$  мин и более. Трудности возникают при  $t_{\Delta T}$  и  $T$ , меньших 15 мин, и малых

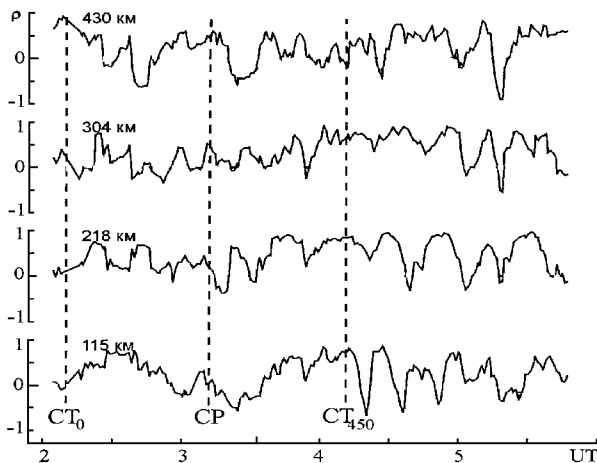


Рис. 3. Пример вариаций коэффициента взаимной корреляции НР сигналов  $\rho(t)$  при старте ракеты «Союз» 30 октября 2002 г. ( $CT_0$  и  $CT_{450}$  — моменты прохождения терминатора на высотах 0 и 450 км). В качестве опорной высоты выбрана высота 202 км, близкая к высоте центра атмосферного волновода

значениях  $\delta_N$ . В этом случае требуется оптимизация параметров установки радара НР, методик измерения и обработки данных, а также оценка погрешностей и чувствительности методик определения величины  $\delta_N$ .

При корреляционном анализе использовались высотно-временные зависимости  $P_s$ . Для каждой высоты на интервале времени  $10\Delta T_0$  со сдвигом  $\Delta T_0$  вычислялся нормированный коэффициент корреляции  $\rho = R_{nm}/\sigma_n\sigma_m$ . Здесь  $R_{nm}$  — коэффициент корреляции флюктуаций  $P_s$  для высот  $n$  и  $m$ ,  $\sigma_n^2$  и  $\sigma_m^2$  — дисперсии  $P_s$  для этих высот. В качестве опорной выбиралась высота  $z \approx 200$  км, где приблизительно находится центр атмосферного волновода. Применение корреляционного анализа позволило уточнить параметры атмосферного волновода, расположенного на высотах 120—350 км, а также усовершенствовать методику выявления ВВ электронной концентрации в ионосфере [1].

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

Разработана близкая к оптимальной методика выявления ВВ электронной концентрации по измерениям мощности НР-сигнала. Показано, что методика позволяет обнаружить ВВ с  $\delta_N \geq 0.1$  % при изменении отношения сигнал/шум  $q \approx 0.1...3$ . Дальнейшее увеличение (больше 3—5) не приводит

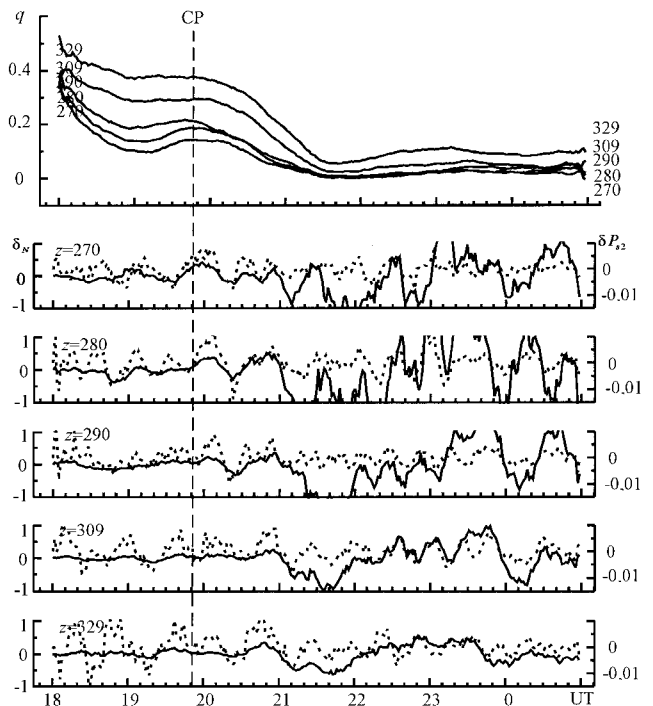


Рис. 4. Пример вариаций  $q$ ,  $\delta_N$  и  $\delta P_{s2}$  для высот 270, 280, 290, 309, 329 км по данным радара НР при старте КА «Space Shuttle» в 19:46 7 октября 2002 г. (обозначения см. на рис. 1)

к значительному повышению чувствительности методики.

При выборе параметров радара, близких к экстремальным ( $\tau_{max} = 300$  мкс,  $F_{max} = 200$  Гц,  $P_{max} = 4$  МВт), чувствительность методики повышается более чем на порядок. В этом случае принципиально оказывается возможным выделение ВВ с  $\delta_{Nmin} \approx 0.5...0.06$  % при отношении сигнал/шум  $q \approx 0.1...3$ . По потенциальной чувствительности метод НР может превзойти метод доплеровского зондирования (ДЗ), и тем более метод вертикального зондирования (ВЗ), которые также используются для наблюдения ВВ. Методу НР нет равных в высокой информативности. Разрешающая способность по времени метода НР несколько уступает показателям методов ДЗ и ВЗ (около 1 мин).

При помощи методов НР и ДЗ проведены комплексные наблюдения за возмущениями в ионосфере, сопровождавшими старты ракет с сильно (до порядка величины) отличающимися массами с космодромов, расстояние до которых изменялось от 2000 до 10000 км. Энергетические характеристики радара НР в различных наблюдениях различались больше чем на порядок. Существенно отличалась и геофизическая обстановка.

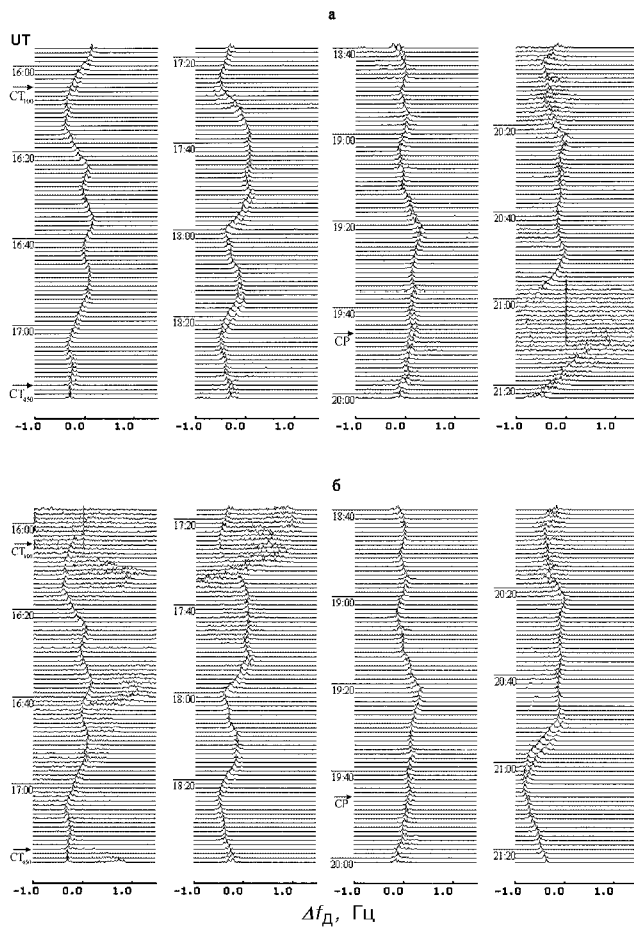


Рис. 5. Вариации ДС на частоте 3.5 МГц во время старта КА «Space Shuttle» в 19:46 7 октября 2002 г. (а — действующая высота 275—350 км, б — действующая высота 350—415 км)

Наблюдения за стартом ракеты «Союз» в 03:11 UT 30 октября 2002 г. совпали по времени с прохождением утреннего терминатора, что серьезно затруднило идентификацию эффектов, вызванных стартом космического аппарата (рис. 1—3). По-видимому, старт сопровождался генерацией возмущений двух типов, кажущиеся скорости  $v$  которых примерно равнялись 5.8 км/с и 700—800 м/с. Эти значения скорости близки к скоростям медленных МГД-волн частотой порядка  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$  и волн акустического типа (ударных акустических волн, внутренних гравитационных волн).

Наблюдения за стартом космического аппарата «Space Shuttle» в 19:46 UT 7 октября 2002 г. выполнены в переходное время суток, когда отношение сигнал/шум в методе НР постепенно уменьшалось до порядка величины (рис. 4—6). Это обстоятельство наряду с низким отношением сиг-

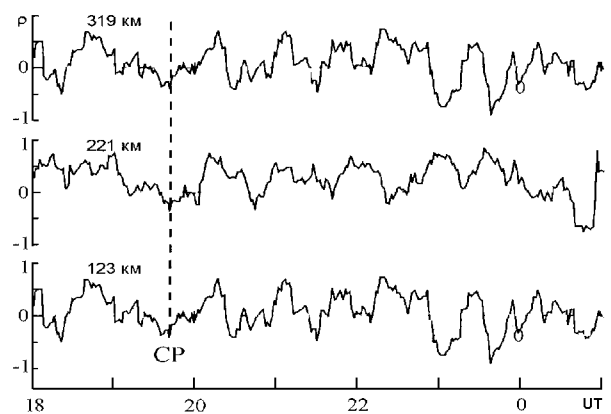


Рис. 6. Вариации  $\rho(t)$  во время старта КА «Space Shuttle» 7 октября 2002 г. В качестве опорной высоты выбрана высота 211 км.

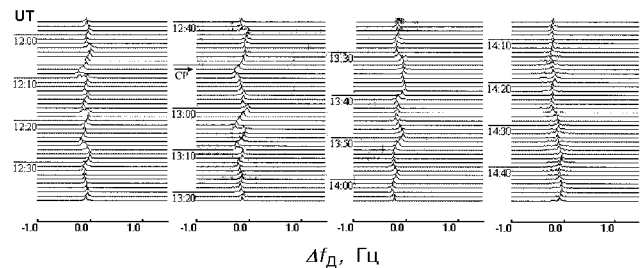


Рис. 7. Вариации ДС на частоте 3.5 МГц при старте ракеты «Delta» в 12:51 7 октября 1999 г. (действующая высота 275—350 км)

нал/шум серьезно затруднило выявление ВВ в ионосфере. Более уверенно наблюдалось возмущение второго типа, имеющее среднюю по трассе распространения ВВ скорость около 2.4—2.5 км/с. Такая скорость свойственна медленным МГД-волнам. Тип возмущений, для которых  $v \approx 10$ —20 км/с, мог иметь естественное происхождение.

Наблюдения за стартом ракеты «Delta» в 12:51 UT 7 октября 1999 г. совпали с прохождением вечернего терминатора (рис. 7, 8). Зарегистрированы возмущения, которые, по-видимому, вызваны стартом ракеты. Их скорость близка к скорости медленных МГД-волн. Кроме того, зафиксированы возмущения, имеющие  $v \approx 25$  км/с. Не исключено, что эти ВВ обусловлены генерацией гиротропных волн реактивной струей двигателя.

Четко наблюдались ВВ, вызванные движением вечернего терминатора. Их относительная амплитуда составляла 1.5—2 %, период преобладающего колебания — около 1 ч, время существования — более 2 ч.