

## Комплексные радиофизические исследования волновых возмущений в ионосфере, сопровождавших старты ракет на фоне естественных нестационарных процессов

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

*Институт ионосферы НАНУ и МОНУ,  
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 16  
E-mail: iion@kpi.kharkov.ua*

<sup>1</sup>*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,  
Украина, 61077, г. Харьков, пл. Свободы, 4  
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua*

*Статья поступила в редакцию 10 июля 2003 г.*

Проанализированы результаты наблюдений методами некогерентного рассеяния (НР) и доплеровского зондирования (ДЗ) волновых возмущений (ВВ) в ионосфере на высотах  $180 \div 500$  км, сопутствовавших стартам ракет на удалениях  $2000 \div 10000$  км. Оценены относительная амплитуда и периоды ВВ, вызванных источниками различного происхождения. Изучены потенциальные чувствительности методов НР и ДЗ к обнаружению таких ВВ. Результаты измерений указанными методами хорошо соответствуют друг другу. Наблюдаемые скорости ВВ, сопровождавших старты ракет, близки к выявленным нами ранее. Они соответствуют скоростям акустико-гравитационных, медленных МГД и, возможно, гиротропных волн в ионосфере.

Проанализовано результати спостережень методами некогерентного розсіяння (НР) та доплерівського зондування (ДЗ) хвильових збурень (ХЗ) в іоносфері на висотах  $180 \div 500$  км, що супроводжували старту ракет на відстані  $2000 \div 10000$  км. Оцінено відносну амплітуду та періоди ХЗ, викликаних джерелами різного походження. Вивчено потенційні чутливості методів НР і ДЗ до виявлення таких ХЗ. Результати вимірювань вказаними методами добре відповідають один одному. Спостережені швидкості ХЗ, що супроводжували старту ракет, близькі до виявлених нами раніше. Вони відповідають швидкостям акустико-гравітаційних, повільних МГД і, можливо, гіротропних хвиль в іоносфері.

### Введение

Исследование волновых возмущений – одна из основных проблем физики атмосферы и ионосферы [1-8]. Причин для этого несколько.

Во-первых, околоземная среда редко бывает спокойной, в ней присутствуют возму-

щения, в том числе и волновой природы. Волновые возмущения (ВВ) сопровождают вспышки на Солнце, геокосмические бури, мощные атмосферные процессы, извержения вулканов, землетрясения и т. п. ВВ генерируются также при стартах крупных ракет, мощных взрывах и других высокоэнер-



гичных воздействиях на околоземную среду. Частоту появления ВВ оценить трудно. Она зависит от метода обнаружения ВВ, точнее от его чувствительности к величине относительной амплитуды  $\delta_N = \Delta N/N$  вариаций электронной концентрации  $N$ , от частоты проявления источников этих возмущений и других факторов. Можно лишь утверждать, что частота появления ВВ – не менее нескольких десятков процентов от всего времени наблюдения (см., например, [5, 9]).

Во-вторых, ВВ играют существенную роль в переносе энергии из нижней атмосферы в среднюю и верхнюю атмосферу [8]. Это означает, что ВВ ответственны за взаимодействие подсистем в системе тектоносфера – атмосфера – ионосфера – магнитосфера (ТАИМ) [10]. Без знания особенностей и деталей этого взаимодействия невозможно построить адекватные физико-математические модели процессов в системе ТАИМ.

В-третьих, ВВ заметно влияют на точностные характеристики радиосистем различного назначения, на качество функционирования телекоммуникационных систем и т. д.

В-четвертых, изучение свойств, параметров ВВ в ионосфере и их источников далеко до завершения. Наблюдения за ними ведутся, как правило, эпизодически. Чувствительность методов обнаружения ВВ также оставляет желать лучшего. Кроме того, большинство методов (и в первую очередь радиофизических) позволяют определить лишь параметры ВВ электронной концентрации. Вместе с ней изменяются также температуры частиц, давление газа и другие параметры среды. Поэтому для систематического изучения ВВ в околоземной среде целесообразно использовать весь арсенал имеющихся методов, в том числе метод некогерентного рассеяния (НР), который, как известно, относится к комплексным методам диагностики параметров плазмы (см., например, [11-13]).

По указанным выше причинам обсуждаемая тема актуальна.

В настоящей работе изложены результаты наблюдения ВВ в ионосфере, вызванных природными (солнечный терминатор и другие) и

искусственными (старты ракет) источниками. Для выявления ВВ с малыми относительными амплитудами ( $\delta_N \sim 1\%$ ) разработана методика измерения и обработки данных наблюдений, проанализированы потенциальные возможности метода НР для достижения этой цели. (Как принято в статистической теории оценивания, под потенциальными возможностями понимается минимальное значение относительной амплитуды ВВ  $\delta_N$ , которое можно измерять с заданной погрешностью при заданных значениях отношения сигнал/шум и других параметрах измерителя [14]). Достоверность полученных результатов подтверждается одновременными наблюдениями на радаре доплеровского зондирования (ДЗ) декаметрового диапазона радиоволн.

Исследованию реакции ионосферы на прохождение солнечного терминатора и старты ракет посвящено большое количество работ. Не имея возможности перечислить все, отметим лишь следующее. В литературе описаны в основном эффекты, возникающие вдоль траектории полета ракеты (см., например, [15-33]). Результаты исследований суммированы в справочном пособии [28].

Значительно меньше работ посвящено крупномасштабным и тем более глобальным возмущениям (см., например, [9, 29-34]). Дело в том, что при поиске крупномасштабных ( $\sim 1000$  км) и глобальных ( $\sim 10000$  км) эффектов исследователю приходится отвечать на следующие сложные вопросы. Каким образом возмущения генерируются? Какими способами они переносятся на расстояния  $1000 \div 10000$  км? Какова величина этих возмущений? Ответы на эти вопросы нами частично получены [31, 32, 35-37]. В частности, показано, что в условиях спокойной ионосферы крупномасштабные и глобальные возмущения, как правило, наблюдаются устойчиво (например, в работе [32] для 43 стартов в 43 случаях). В переходное время суток и при сильной возмущенности среды принятие решения о наличии или отсутствии ВВ затруднительно, что и демонстрируется в настоящей статье, которая является естественным продолжением выше перечисленных наших работ.



### Средства радиозондирования

*Радар некогерентного рассеяния.* Единственный в среднеширотной Европе радар НР расположен в Ионосферной обсерватории Института ионосферы вблизи г. Харькова (49°36' с. ш., 36°18' в. д.) [38]. Основные параметры радара следующие: частота – 158 МГц, диаметр параболической антенны – 100 м, эффективная площадь антенны – около 3700 м<sup>2</sup>, коэффициент усиления антенны – около 10<sup>4</sup>, ширина основного лепестка диаграммы направленности на уровне половинной мощности – около 1°, импульсная и средняя мощности радиопередающего устройства – до 3.6 МВт и 100 кВт соответственно, длительность импульса – до 800 мкс, частота следования импульсов – 24.4 Гц. Полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства составляет 5.5 ÷ 9.5 кГц. Эффективная шумовая температура системы  $T_n$ , приведенная ко входу радиоприемного устройства, зависит от времени суток, сезона и уровня промышленных радиопомех:

$$T_n = T_{ea} + T_r,$$

где  $T_r = (k_n - 1)T_0$  – шумовая температура радиоприемного устройства,  $k_n \approx 1.8$  – коэффициент шума,  $T_0 = 290$  К;

$$T_{ea} = \eta_a T_\Sigma + (1 - \eta_a) T_a.$$

Здесь  $T_a$  – шумовая температура антенны,  $\eta_a \approx 0.45$  – к. п. д. антенно-фидерного тракта,

$$T_\Sigma = T_1 + T_2 + T_3,$$

где  $T_1$  – температура электромагнитного излучения космического происхождения (в течение суток  $T_1$  дважды увеличивается от своего минимального значения примерно в 1.5 раза; эти всплески обусловлены радиоизлучением Галактики);  $T_2$  – температура электромагнитного излучения атмосферы, включая промышленные радиопомехи;  $T_3$  – температура электромагнитного излучения Земли. Средние значения указанных температур приведены в табл. 1. Из нее

Таблица 1. Шумовая температура системы и ее составляющие

Температура	Минимальное значение	Максимальное значение
$T_r$ , К	230	230
$T_a$ , К	300	300
$T_1$ , К	1300	2200
$T_2$ , К	400	600
$T_3$ , К	250	250
$T_\Sigma$ , К	1950	3050
$T_{ea}$ , К	1040	1540
$T_n$ , К	1270	1770

видно, что расчетная температура системы  $T_n \approx 1270 + 1770$  К. Оцененная из данных наблюдений  $T_n$  составляла 1300 ÷ 1800 К.

Радар подключен к локальной вычислительной сети, образуя измерительно-вычислительный комплекс, который осуществляет предварительную обработку НР-сигнала в реальном масштабе времени.

*Радар доплеровского зондирования.* Единственный в своем роде доплеровский радар расположен в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина вблизи г. Харькова (49°38' с. ш., 36°20' в. д.) [31, 32, 34, 37]. Основные параметры радара: диапазон частот – 1 ÷ 24 МГц, импульсная мощность радиопередающего устройства – 1 кВт, длительность импульса – 500 мкс, частота повторения импульсов – 100 Гц, полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства – 10 Гц. Антенная система представляет собой вертикальный ромб с коэффициентом усиления равным 1 ÷ 10 в зависимости от частоты волны. Инструментальная погрешность измерения доплеровского смещения частоты – около 0.01 Гц. Соотношение сигнал/шум достигает 10<sup>5</sup> ÷ 10<sup>6</sup>. Радар сопряжен с персональным компьютером, образуя программно-аппаратный комплекс, который проводит измерения и предварительную обработку сигнала в реальном масштабе времени.



**Ионозонд.** Стандартный ионозонд "БАЗИС" предназначен для общего контроля состояния ионосферы и калибровки мощности НР-сигналов. Погрешность измерения частоты составляет около  $0.05 \div 0.1$  МГц, мощность радиопередаточного устройства – 10 кВт, диапазон частот –  $0.3 \div 20$  МГц, время получения одной ионограммы –  $1 \div 15$  мин. Ионозонд расположен в Ионосферной обсерватории рядом с радаром НР.

### Методика выявления волновых возмущений

**Метод некогерентного рассеяния.** Этот метод, как известно, относится к наиболее информативным методам исследования параметров околосферной плазмы [11-13]. Он используется, в основном, для получения сведений о регулярных параметрах среды. При применении метода НР для исследования кратковременных возмущений ионосферы, ее неоднородной структуры и, в частности, волновых процессов, встречается ряд трудностей. Они связаны с малостью относительных флуктуаций электронной концентрации  $N$  (обычно  $\delta_N \sim 1\%$ , редко  $\delta_N \sim 10\%$ ) и особенностями метода НР. К последним относятся следующие: стохастический характер сигнала; низкое отношение сигнал/шум  $q = P_s/P_n$  ( $P_s, P_n$  – мощности сигнала и шума (помехи)); статистическая связь характеристик сигнала с параметрами среды, 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 должен превышать времени жизни случайных неоднородностей  $t_{\Delta N}$  или периода  $T$  волновых возмущений электронной концентрации. В  $F$ -области ионосферы  $t_{\Delta N}$  может изменяться в пределах  $1 \div 10^4$  с для неоднородностей с характерным масштабом в интервале  $1 \div 100$  км. Обычно величина  $T \approx 10 \div 100$  мин и более. Изучение неоднородностей  $N$  с  $t_{\Delta N} > 15$  мин или  $T > 15$  мин особых затрудне-

ний не вызывает. Результаты таких исследований приведены, например, в работе [35]. Трудности возникают при  $t_{\Delta T} \leq 15$  мин,  $T \leq 15$  мин и малых значениях  $\delta_N$ . В этом случае требуется оптимизация параметров радара НР, методик измерения и обработки данных, а также оценка погрешностей и чувствительности методик определения  $\Delta N/N$ .

Методики выявления кратковременных возмущений, случайных крупномасштабных ( $10 \div 100$  км) неоднородностей и волновых возмущений  $N$  в ионосфере принципиально не отличаются. Поэтому для определенности рассмотрим ниже методику выявления волновых процессов.

Предположим, что регистрация смеси НР сигнала и шума  $P_{sn}$  ведется с частотой повторения зондирующих импульсов  $F$  и с дискретностью по высоте  $\Delta z_0$ . За время  $\Delta T$  регистрируется  $n = F\Delta T$  выборок  $P_{sn}$ . Пусть число выборок мощности шума для каждой радиолокационной развертки равно  $m$ . Тогда за время  $\Delta T$  регистрируется  $mn$  выборок  $P_n$ .

Рассмотрим основные этапы статистической обработки  $P_{sn}$  и  $P_n$ . На предварительном этапе (интервал времени  $\Delta T_0 = 1 \div 1.5$  мин) получают базовые оценки  $P_{n0}$  и  $P_{s0} = P_{sn0} - P_{n0}$  для каждой высоты. Дисперсии этих оценок рассчитываются по формулам:

$$\sigma_{s0}^2 = P_{s0}^2 \frac{(q+1)^2 + m^{-1}}{n_0 q^2}, \quad \sigma_{n0}^2 = \frac{P_{n0}^2}{mn_0}, \quad (1)$$

где  $n_0 = F\Delta T_0$ .

На первом этапе вычисляются скользящие средние значения мощностей  $P_{s1}$  и  $P_{n1}$  по  $n_1$  отсчетам (тренд во временных зависимостях  $P_{s1}(t)$ ,  $P_{n1}(t)$ ), т. е.  $P_{s1} = \langle P_{s0} \rangle$  и  $P_{n1} = \langle P_{n0} \rangle$  (угловыми скобками обозначен результат усреднения) и разность между  $P_{s0}$  и  $P_{s1}$ :

$$\langle P_{s0} \rangle = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} P_{s0}(i), \quad (2)$$

$$\delta P_{s1} = P_{s0} - \langle P_{s0} \rangle. \quad (3)$$



Дисперсии оценок (2), (3):

$$\sigma_{s1}^2 = \frac{\sigma_{s0}^2}{n_1}, \quad \sigma_{s11}^2 = \sigma_{s0}^2 + \sigma_{s1}^2 = \sigma_{s0}^2 \frac{1+n_1}{n_1}. \quad (4)$$

При этом отношение сигнал/шум  $q = P_{s1}/P_{n1}$ .

На втором этапе вычисляется скользящее среднее  $\delta P_{s1}$  по  $n_2$  отсчетам:

$$\delta P_{s2} = \langle \delta P_{s1} \rangle = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} \delta P_{s1}(i).$$

Дисперсия этой оценки равна

$$\sigma_{s22}^2 = \frac{\sigma_{s11}^2}{n_2} = \sigma_{s0}^2 \frac{1+n_1}{n_1 n_2}. \quad (5)$$

При изучении волновых процессов в ионосфере представляет интерес оценка относительной амплитуды квазипериодических вариаций электронной концентрации  $\delta_{Nm} = \Delta N_m / N_0$  ( $\Delta N_m$  – амплитудное значение  $\Delta N$ ):

$$\delta_{Nm} \approx \frac{\delta P_{s2m}}{P_{s1}} = \frac{\langle \delta P_{s1} \rangle_m}{P_{s1}},$$

где  $\delta P_{s2m} = \langle \delta P_{s1} \rangle_m$  – амплитуда колебаний зависимости  $\delta P_{s2}(t)$ . Относительная дисперсия оценки  $\delta_{Nm}$  составляет

$$\tilde{\sigma}_N^2 = \tilde{\sigma}_1^2 + \tilde{\sigma}_2^2,$$

где  $\tilde{\sigma}_1^2, \tilde{\sigma}_2^2$  – относительные дисперсии оценок  $P_{s1}$  и  $\delta P_{s2}$  соответственно.

Как следует из (4) и (5),

$$\tilde{\sigma}_1^2 = \frac{\sigma_{s1}^2}{P_{s1}^2} = \frac{\sigma_{s0}^2}{P_{s1}^2} \frac{1}{n_1},$$

$$\tilde{\sigma}_2^2 = \frac{\sigma_{s22}^2}{\delta P_{s2m}^2} = \frac{\sigma_{s22}^2}{(\langle \delta P_{s1} \rangle_m)^2} = \frac{1}{\delta_{Nm}^2} \frac{\sigma_{s22}^2}{P_{s1}^2} = \frac{1}{\delta_{Nm}^2} \frac{\sigma_{s0}^2}{P_{s1}^2} \frac{1+n_1}{n_2}.$$

Тогда

$$\tilde{\sigma}_N^2 = \frac{\sigma_{s0}^2}{P_{s1}^2} \frac{1}{n_1} \left( 1 + \frac{1}{\delta_{Nm}^2} \frac{1+n_1}{n_2} \right).$$

Относительная ошибка в оценке  $\delta_{Nm}$  равна

$$\tilde{\sigma}_N = \frac{\sigma_{s0}}{P_{s1}} \frac{1}{\sqrt{n_1}} \sqrt{1 + \frac{1}{\delta_{Nm}^2} \frac{1+n_1}{n_2}},$$

или с учетом (1), где необходимо заменить  $P_{s0}$  на  $P_{s1}$ , а  $P_{n0}$  на  $P_{n1}$ , получим:

$$\tilde{\sigma}_N = \sqrt{\frac{(1+q)^2 + m^{-1}}{q^2 n_0 n_1}} \left( 1 + \frac{1}{\delta_{Nm}^2} \frac{1+n_1}{n_2} \right).$$

Обычно  $m \gg 1, n_1 \gg 1$ . При этом

$$\tilde{\sigma}_N = \frac{1+q}{q} \frac{1}{\sqrt{n_0 n_1}} \left( 1 + \frac{n_1}{\delta_{Nm}^2 n_2} \right).$$

Как правило  $\delta_{Nm}^2 n_2 \ll n_1$ . Тогда

$$\tilde{\sigma}_N = \frac{1+q}{q} \frac{1}{\delta_{Nm} \sqrt{n_0 n_2}}. \quad (6)$$

Результаты расчета относительных погрешностей на всех этапах обработки НР-сигнала приведены в табл. 2. Как и следовало ожидать, при малых значениях  $q$  и  $\delta_N$  обнаружение волновых возмущений  $N$  в ионосфере становится невозможным. Определение чувствительности рассматриваемой методики выявления ВВ сводится к вычислению значения



**Таблица 2.** Значение относительных погрешностей на различных этапах обработки НР-сигнала ( $m = 49$ ;  $n_0 = 2196$ ;  $n_1 = 20$ ;  $n_2 = 10$ ;  $n_3 = 9$ )

$q$	0.03	0.1	0.3	1	3	10	30
$\sigma_n/P_n, \%$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
$\sigma_{s0}/P_{s0}, \%$	72.1	25.3	9.1	4.2	2.8	2.3	2.2
$\sigma_{s1}/P_{s0}, \%$	16.1	5.6	2.0	0.9	0.6	0.5	0.5
$\sigma_{s11}/P_{s0}, \%$	73.9	25.9	9.3	4.3	2.9	2.4	2.3
$\sigma_{s22}/P_{s0}, \%$	23.4	8.3	3.0	1.4	0.9	0.8	0.7
$\tilde{\sigma}_{N n_N=1}, \%$	27.8	9.7	3.5	1.6	1.0	0.9	0.9
$\tilde{\sigma}_{N n_N=0.1}, \%$	228	79.5	28.4	12.8	8.5	7.1	7.1
$\tilde{\sigma}_{N n_N=0.01}, \%$	2277	792	283	127	85	71	71
$\tilde{\sigma}_{N n_N=1; n_3=9}, \%$	9.3	3.2	1.2	0.5	0.3	0.3	0.3
$\tilde{\sigma}_{N n_N=0.1; n_3=9}, \%$	76	26.5	9.5	4.3	2.8	2.4	2.4
$\tilde{\sigma}_{N n_N=0.01; n_3=9}, \%$	759	265	95	43	28	24	24

$$\delta_{N\min} = \frac{1+q}{q\tilde{\sigma}_{N\max}\sqrt{n_0n_2}}$$

Например, при  $\tilde{\sigma}_{N\max} = 0.9$ ,  $n_0 = 2196$  ( $F = 24.4$  Гц,  $T_0 = 1.5$  мин),  $n_2 = 10$ , т. е.  $\Delta T_2 = n_2 \Delta T_0 = 15$  мин, имеем:

$$\delta_{N\min} = 7.5 \cdot 10^{-3} \frac{1+q}{q}$$

Результаты оценки  $\delta_{N\min}$  приведены в табл. 3. Из табл. 3 видно, что при  $q \leq 1$  обнаружение волновых возмущений в ионосфере возможно лишь при  $\delta_{N\min} \geq 1.4\%$ .

Для дальнейшего увеличения чувствительности методики выявления таких возмущений целесообразен третий этап обработки – усреднение  $\delta_N$  по всему диапазону высот, где имеют место волновые процессы, либо лишь по той его части, где эти процессы еще близки к синфазным. Пусть число таких высот равно  $n_3$ . Заметим, что  $\delta_N$  сравнительно слабо зависит от высоты, так как при обработке зависимость  $P_s \sim z^{-2}$  исключается.

**Таблица 3.** Значение минимальной относительной амплитуды  $\delta_{N\min}$  волновых возмущений, обнаруживаемых методом НР ( $n_0 = 2196$ ,  $n_2 = 10$ ,  $n_3 = 1$ ,  $\sigma_{N\max} = 0.9$ ), и его потенциальные возможности ( $\delta_{Np}$ ) ( $n_0 n_2 = 2 \cdot 10^5$ ,  $n_3 \approx 27$ ,  $\sigma_{N\max} = 0.9$ )

$q$	0.03	0.1	0.3	1	3	10	30
$\delta_{N\min}, \%$	25.8	8.3	3.3	1.5	1.0	0.83	0.78
$\delta_{Np}, \%$	1.6	0.5	0.2	0.1	0.06	0.05	0.05

Естественно, что  $\delta_N$  несколько изменяется с высотой за счет диссипации волны, за счет ее каналирования в атмосферном волноводе и т. п. После усреднения дисперсия оценки  $\langle \delta_N \rangle$  (угловые скобки означают усреднение по диапазону высот) равна

$$\tilde{\sigma}_{N3} = \tilde{\sigma}_N \sqrt{\frac{1+(n_3-1)\rho}{n_3}}$$

где  $\rho = R_{ij}/\sigma_i\sigma_j = \overline{\Delta P_{s0}(i)\Delta P_{s0}(j)}/\sigma_i\sigma_j$  – коэффициент взаимной корреляции выборок, соответствующих разным высотам,  $R_{ij}$  – функция взаимной корреляции,  $\sigma_i^2 = \overline{\Delta P_{s0}^2(i)}$ ,  $\sigma_j^2 = \overline{\Delta P_{s0}^2(j)}$ . Далее будем считать, что в пределах заданного диапазона высот высотной зависимостью  $\sigma_i$  и  $\rho_i$  можно пренебречь. Тогда  $\sigma_i = \sigma_j = \sigma_{s0}$ ,  $\rho_{ij} = \rho$  при  $i \neq j$  (при  $i = j$  имеем  $\rho = 1$ ). Коэффициент корреляции  $\rho$  описывает корреляцию флуктуаций  $\Delta P_{s0}$  по высоте в пределах рассеивающего объема плазмы. Протяженность последнего по высоте равна  $\Delta z_s = ct$ , где  $c$  – скорость света в вакууме,  $t$  – длительность импульса. При полной корреляции выборок  $c = 1$  и  $\tilde{y}_{N3} = \tilde{y}_N$ , т. е. уменьшения относительной дисперсии достичь не удастся. В случае полной декорреляции выборок  $c = 0$  и  $y_{N3} = y_N/\sqrt{n_3}$ . Если же декорреляция имеет место лишь на высотах, число которых  $n_4 < n_3$ , то  $\tilde{y}_{N3} = \tilde{y}_N \sqrt{n_4/n_3}$ . Реально  $n_3$  может приблизиться к 25 и  $\tilde{y}_{N3} = \tilde{y}_N/5$ . При этом значения  $\delta_{N\min}$ , приведенные в табл. 3, уменьшатся в 5 раз и даже при  $q \approx 0.1$  и  $q = 0.03$  возможно обнаружение волновых возмущений  $N$  с относительной амплитудой не менее 1.6% и 5% соответственно.



Оценим далее потенциальные возможности обсуждаемой методики обнаружения волновых возмущений  $N$  с периодом  $T$  и относительной амплитудой  $\delta_{N\min}$ . При  $\delta_N^2 n_2 \ll n_1$  и  $\rho = 0$  имеем:

$$\delta_{Np} = \frac{1+q}{q\tilde{\sigma}_{N\max}\sqrt{n_0 n_2 n_3}},$$

где  $(n_0 n_2)_{\max} = FT_{\min}$ ,  $n_3 = \Delta z / \Delta z_s$ . Здесь  $\Delta z$  – диапазон высот, где имеют место квазисинфазные возмущения  $N$ ;  $\Delta z_s$  – высотная протяженность рассеивающей области, равная  $c\tau$ . При исследовании волновых процессов в диапазоне высот  $\Delta z = 150 + 550$  км максимальная высота  $z_{\max}$  зондирования может быть выбрана равной 750 км. Ей соответствует  $F_{\max} = c/(2z_{\max}) = 200$  Гц. При  $\tau = 50$  мкс имеем  $c\tau = 15$  км, а  $n_3 \approx 27$ ,  $(n_0 n_2)_{\max} \approx 2 \cdot 10^5$  (при  $T_{\min} \approx 10^3$  с). Для  $\tilde{\sigma}_{N\max} = 0.9$  получим:

$$\delta_{Np} = 4.8 \cdot 10^{-4} \frac{1+q}{q}.$$

В частности, при  $q \ll 1$  и  $q \gg 1$  имеем соответственно:

$$\delta_{Np} \approx 4.8 \cdot 10^{-4} \cdot q^{-1},$$

$$\delta_{Np} \approx 4.8 \cdot 10^{-4}.$$

В последнем случае  $\delta_{Np}$  не зависит от  $q$ . Результаты оценок  $\delta_{Np}$  также приведены в табл. 3. Из нее видно, что обсуждаемая методика выявления волновых возмущений принципиально применима даже при  $q \geq 0.03$ , если только  $\delta_N > 1.5\%$ . Кроме того, увеличение  $q$ , после достижения значения  $q=3$ , не играет заметной роли.

Добавим, что  $q \propto \tau$ , а  $n_3 \propto \tau^{-1}$ . При  $q \ll 1$  имеем  $\delta_{Np} \propto \tau^{-1/2}$ , т. е. для повышения чувствительности методики целесообразно увеличивать длительность импульса, например, до 300 мкс, хотя при этом уменьшается  $n_3$ . При таких  $\tau$  значения  $\delta_{Np}$ , приведенные в табл. 3, уменьшатся примерно в 2.5 раза.

Тогда значение  $\delta_{Np} \approx 0.02\%$  представляет собой предельную величину, обнаруживаемую методом НР при указанных параметрах радара и периоде ВВ.

Конечно, увеличение  $F$  и  $\tau$  приведет к росту средней мощности радиопередающего устройства  $\bar{P} = P\tau F$ .

В наших исследованиях  $\bar{P}$  изменялась примерно от 3 до 40 кВт. Если же  $F = 300$  Гц,  $\tau = 300$  мкс, то  $\bar{P} = 180$  кВт.

Добавим также, что значительное увеличение  $F$  неизбежно приведет к завышенной оценке  $P_n$ , особенно в дневное время при сравнительно больших уровнях  $P_s$  в окрестности высоты  $z_{\max}$ , для которой оценивается  $P_n$ . Кроме того, при полосе пропускания входных цепей радиоприемного устройства  $\Delta f = 5$  кГц и  $z_{\max} = 750$  км значение  $m$  не может быть больше 3 + 5.

Для уточнения периодов ВВ производилось спектральное оценивание на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для этого использовались временные зависимости

$$\delta P_{s2}(t) \text{ или } \delta P_{s3}(t) = \sum_{i=1}^{n_3} \delta P_{s2}(i, t).$$

При этом интервал обработки  $T_f$  составлял 64 или 128 мин.

Сравним далее чувствительности используемых методов выявления ВВ.

*Метод вертикального зондирования.* В этом методе критические частоты  $f_{o,x} F2$  в области  $F$  измеряются с погрешностью  $\Delta f$  около 0.05 МГц, а значения частоты, соответствующие следу на ионограмме при  $f < f_{o,x} F2$ , – с погрешностью около 0.1 МГц. Поскольку

$$\delta_N = \frac{\Delta N}{N} = 2 \frac{\Delta f_p}{f_p},$$

минимальные значения  $\delta_{N\min} \approx 1\%$  и  $2\%$  для случаев максимума ионизации и ниже его соответственно. Здесь  $f_p$  – плазменная частота электронов, а  $\Delta f_p$  – вариации, вызванные прохождением ВВ.

Частота получения ионограмм определяет временную дискретность. Для наблюдения ВВ эта частота должна быть не менее 1 мин<sup>-1</sup>.



Для уточнения периодов ВВ зависимости  $\Delta f(t)$  также подвергались БПФ на интервалах времени 64 или 128 мин.

*Метод доплеровского зондирования.* В данном методе обычно изучаются временные вариации доплеровских спектров (ДС), каждый из которых получен на интервале времени 51.2 с. Для определения периодов ВВ временные зависимости средней частоты в ДС подвергались БПФ на интервалах времени 64 или 128 мин.

В этом методе обычно минимальное значение смещения частоты  $f_{d\min} \approx 0.01 \div 0.1$  Гц. Такое значение не является предельным. Потенциальная точность измерения  $f_d$  ограничена погрешностью, для которой при некоторых упрощающих предположениях получено следующее соотношение:

$$\Delta f_{dp} = \sqrt{\frac{12}{qT_d^2}},$$

где  $T_d$  – интервал времени, на котором осуществляется спектральное оценивание.

Отношение сигнал/шум для метода ДЗ можно вычислить из основного уравнения радиолокации:

$$P_{s\pm} = \frac{P_{\pm} G S_a \sigma_{d\pm} L_a}{(4\pi z^2)^2},$$

где  $P_{\pm}$  – излучаемая мощность,  $G$  и  $S_a$  – коэффициент усиления и эффективная площадь приемно-передающей антенны,  $L_a$  – потери в антенно-фидерном тракте,

$$\sigma_{d\pm} = \sigma_{d0} e^{-4K_{\pm}} \approx 4\pi z^2 e^{-4K_{\pm}}$$

есть эффективная площадь рассеяния радиолокационной цели,  $K_{\pm}$  – интегральный коэффициент поглощения зондирующей радиоволны (знаки  $\pm$  соответствуют двум близким к круговой поляризациям).

Мощность шума (помехи) определяется полосой пропускания оконечного фильтра  $\Delta f_f$ :

$$P_{n\pm} = kT_{n\pm} \Delta f_f,$$

где  $k$  – постоянная Больцмана.

Тогда основное уравнение дистанционного радиозондирования для метода ДЗ примет вид:

$$q_{\pm} = \frac{P_{s\pm}}{P_n} = \frac{P_{\pm} G S_a L_a e^{-4K_{\pm}}}{4\pi z^2 k T_{n\pm} \Delta f_f}.$$

При направлении распространения радиоволн, близком к продольному по отношению к вектору индукции геомагнитного поля, справедливо соотношение:

$$K_- \approx \left( \frac{f + f_B}{f - f_B} \right)^2 K_+,$$

где  $f_B$  – гирочастота электронов, примерно равная 1.5 МГц. При зондировании радиоволной с  $f \approx 3$  МГц, имеем  $K_- \approx 10K_+$ . Это означает, что при  $4K_- \gg 1$  компонента волны с данной поляризацией полностью поглощается в ионосфере. При излучении антенной с линейной поляризацией  $P_+ \approx P_- \approx P/2$ . При приеме такой антенной радиоволны с круговой поляризацией мощность сигнала на выходе уменьшится еще в два раза. С учетом этого получим:

$$q_+ = \frac{P G S_a L_a e^{-4K_+}}{16\pi z^2 k T_{n+} \Delta f_f}.$$

При  $P = 1$  кВт,  $G = 3$ ,  $f = 3$  МГц,  $S_a \approx 3 \cdot 10^3$  м<sup>2</sup>,  $L_a \approx 0.9$ ,  $\Delta f_f = 10$  Гц имеем для дня и ночи  $q \approx 3.4 \cdot 10^5 \div 7 \cdot 10^5$ . При расчетах использовались типичные профили параметров ионосферы, а также принималось, что  $T_n = 3 \cdot 10^9$  К днем и  $3 \cdot 10^{10}$  К ночью. Высота отражения зондирующей волны полагалась равной 150 и 250 км для дневного и ночного времени соответственно. При этом  $K_+ \approx 1 \div 1.4 \cdot 10^{-2}$ . Заметим, что в ночное время, когда значение  $K_-$  сравнительно мало ( $\leq 0.1$ ), возможна ситуация, при которой  $q_+$  и  $q_-$  одного порядка.



Потенциальная чувствительность метода ДЗ к выявлению ВВ составит

$$\delta_{Np} = \frac{T}{2\pi L_N} \frac{c \Delta f_{dp}}{f},$$

где  $L_N$  – протяженность области высот, дающей основной вклад в доплеровский эффект. Результаты расчета  $\delta_{Np}$  и  $\Delta f_{dp}$  при  $T = 10^3$  с,  $L_N = 30$  км,  $c = 3 \cdot 10^5$  км/с,  $f = 3$  МГц приведены в табл. 4. Из табл. 4 видно, что при  $q \approx 10^6$ ,  $T_d = 51.2$  с значение  $\Delta f_{dp} \approx 6.7 \cdot 10^{-5}$  Гц, а  $\delta_{Nmin} \approx 3.5 \cdot 10^{-3}$  %. Естественно, должна обеспечиваться кратковременная (в пределах  $\sim 1$  мин) относительная нестабильность частоты не хуже  $10^{-11}$ . Такими показателями обладает, например, рубидиевый стандарт частоты.

Разумеется, погрешность  $\Delta f_{dp}$  не имеет смысла сводить к значениям, намного меньшим величины разрешающей способности по частоте  $\delta f_d$  при доплеровском оценивании. Без применения методов, позволяющих получить сверхразрешение,  $\delta f_d \approx 1/T_d$ . При этом погрешность оценки  $f_d$  составляет около  $\delta f/2$ . Так, при  $T_d = 51.2$  с имеем  $\delta f_d \approx 2 \cdot 10^{-2}$  Гц. Для достижения  $\delta f_d \approx 10^{-4} \div 10^{-3}$  Гц интервал  $T_d$  необходимо увеличить до  $10^4 \div 10^3$  с соответственно. При этом, однако, должно выполняться очевидное неравенство  $T \gg T_d$  или, по крайней мере,  $T \geq 2T_d$  (следствие теоремы Котельникова). Поэтому при  $T_{min} \approx 600$  с имеем  $T_{dmin} = 300$  с,  $\delta f_d \approx 3 \cdot 10^{-3}$  Гц,  $\delta f_{dmin} \approx 1.5 \cdot 10^{-3}$  Гц и  $\delta_N \approx 0.05$  %.

К уширению доплеровских спектров приводит также рассеяние зондирующей волны случайными неоднородностями электронной

концентрации. При ряде упрощающих предположений в работе [9] получено следующее выражение для дисперсии флуктуаций доплеровского смещения частоты:

$$\sigma_f^2 = f^2 \frac{\bar{\sigma}_{N0}^2}{c^2 t_{\Delta N}^2} L_{ef} l,$$

где  $\bar{\sigma}_{N0}^2 = (\Delta N/N)^2$  – относительная дисперсия флуктуаций  $N$ ;  $t_{\Delta N}$  – характерное время становления флуктуаций  $N$ ;  $L_{ef}$  – эффективная толщина слоя ионосферы в окрестности области отражения радиоволны, дающая вклад в эффект рассеяния;  $l$  – размер рассеивающих неоднородностей. При обратном рассеянии  $l = \lambda/2$ , где  $\lambda$  – длина радиоволны. Наши модельные расчеты показали, что обычно  $L_{ef} \approx 30$  км. Значение  $t_{\Delta N}$  определяется амбиполярной диффузией.

В окрестности области отражения волновой вектор необыкновенной волны почти параллелен вектору индукции  $\vec{B}_0$  геомагнитного поля. Из-за больших значений продольной компоненты  $D_{||}$  тензора амбиполярной диффузии ( $\sim 3 \cdot 10^3 \div 10^5$  м<sup>2</sup>/с на высотах 150 ÷ 250 км) для  $l = 50$  м имеем  $t_{\Delta N} = l^2/D_{||} \approx 0.03 \div 0.8$  с. Малость  $t_{\Delta N}$  по сравнению с  $T_d = 51.2$  с означает, что в продольном направлении отсутствуют неоднородности с размером  $l \approx 50$  м.

Иначе дело обстоит с обыкновенной волной, волновой вектор которой практически перпендикулярен  $\vec{B}_0$ . При этом поперечная составляющая тензора  $D_{\perp} \approx 0.1 \div 1$  м<sup>2</sup>/с, а для  $t_{\Delta N}$  получаем  $2.5 \cdot 10^4 \div 2.5 \cdot 10^3$  с на высотах 150 ÷ 250 км. При промежуточных значениях угла между волновым вектором и  $\vec{B}_0$  значение

Таблица 4. Значения потенциальной точности измерения доплеровского смещения частоты и относительной амплитуды волновых возмущений, обнаруживаемых методом ДЗ

$q$	1	10	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>
$\Delta f_{dp}$ , Гц	$6.7 \cdot 10^{-2}$	$2.1 \cdot 10^{-2}$	$6.7 \cdot 10^{-3}$	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$6.7 \cdot 10^{-4}$	$2.1 \cdot 10^{-4}$	$6.7 \cdot 10^{-5}$
$\delta_{Np}$ , %	3.5	1.1	$3.5 \cdot 10^{-1}$	$1.1 \cdot 10^{-1}$	$3.5 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$3.5 \cdot 10^{-3}$



коэффициента амбиполярной диффузии  $D \approx 30 \div 300 \text{ м}^2/\text{с}$ , а время  $t_{\Delta N} \approx 10^2 \div 10 \text{ с}$  на высотах  $150 \div 250 \text{ км}$ . При этом

$$\sigma_f = \frac{f}{c} \frac{\tilde{\sigma}_{N0}}{t_{\Delta N}} \sqrt{L_{ef} l} = \frac{2D}{\lambda^2} \sqrt{2 \frac{L_{ef}}{\lambda}} \tilde{\sigma}_{N0}$$

составляет  $1.5 \cdot 10^{-3} \div 4.4 \cdot 10^{-2} \text{ Гц}$  для  $\tilde{\sigma}_{N0} = 10^{-2} \div 3 \cdot 10^{-2}$ .

Добавим, что рассеяние волн на неоднородностях приводит к ее заметному ослаблению. Можно показать, что при этом

$$P_{s\pm} = P_{s\pm 0} e^{-2\sigma_{\Phi\pm}^2},$$

$$\sigma_{\Phi\pm}^2 = (2\pi)^2 \left( \frac{f}{c} \right)^2 \tilde{\sigma}_{N0}^2 L_{ef\pm} l,$$

где  $P_{s\pm 0}$  – мощность сигнала в отсутствие статистической дифракции,  $L_{ef\pm}$  – то же, что и  $L_{ef}$  для обыкновенной и необыкновенной волн. При  $L_{ef-} \approx L_{ef+} \approx 30 \text{ км}$ ,  $l = \lambda/2 = 50 \text{ м}$ ,  $\tilde{\sigma}_{N0} = 10^{-2} \div 3 \cdot 10^{-2}$ ,  $f = 3 \text{ МГц}$  имеем  $\sigma_{\Phi\pm} \approx 0.6 \div 6$ . При таких  $\sigma_{\Phi\pm}$  отношение  $P_{s\pm}/P_{s\pm 0} = 0.3 \div 6 \cdot 10^{-6}$ .

В наших наблюдениях  $\Delta f_{d \min} \approx 0.01 \text{ Гц}$ , чему при  $T = 10 \text{ мин}$  соответствовало значение  $\delta_{N \min} \approx 0.3\%$ .

Метод ДЗ обеспечивает разрешающую способность по времени около 1 мин, т. е. примерно такую же, как и метод вертикального зондирования (ВЗ), использующей ионозонды.

В методе НР, в силу случайной природы НР-сигнала, разрешающая способность по времени хуже,  $10 \div 15 \text{ мин}$ . Но по потенциальной чувствительности метод НР превосходит методы ДЗ и ВЗ (при равном отношении сигнал/шум). И, конечно, методу НР нет равных по информативности. Однако к его недостаткам следует отнести высокую стоимость и сложность радара.

### Процессы в ионосфере, сопутствовавшие старту ракеты “Союз”

Целью наших наблюдений был поиск ВВ при старте сравнительно мощной ракеты на относительно небольшом удалении от места регистрации. Параметры радара НР выбирались так, чтобы обеспечить значение отношения сигнал/шум  $q = 0.3 \div 3$ . При  $\tilde{\sigma}_{N \max} = 0.5$  гарантировалось обнаружение ВВ с  $\delta_{N \min} = 2.6 \div 0.8 \%$  соответственно.

*Сведения о ракете.* Российская ракета “Союз” относится к тяжелым ракетам. Ее полная масса составляет 305 т, начальная тяга – 4.14 МН, высота – 46.1 м, низкоорбитная полезная нагрузка – 6855 кг на высоте 200 км. Параметры нулевой ступени следующие: масса – 4×44.4 т, тяга – 4×1.02 МН, диаметр – 2.7 м, высота – 19.6 м, время работы – 120 с. Параметры первой ступени: масса – 105.4 т, тяга – 1 МН, диаметр – 3 м, высота – 27.8 м, время работы – 286 с. Параметры второй ступени: масса – 25.2 т, тяга – 0.3 МН, диаметр – 2.7 м, высота – 6.7 м, время работы – 300 с.

Старт ракеты (СР) с космодрома Байконур имел место в 03:11 УТ 30 октября 2002 г. (здесь

**Таблица 5.** Параметры радара НР, интервал предварительной обработки ( $\Delta T_0$ ) и интервал дискретизации по высоте ( $\Delta z_0$ )

Дата	$P_i$ , МВт	$\bar{P}$ , кВт	$\tau$ , мкс	$F$ , Гц	$\Delta T_0$ , мин	$\Delta z_0$ , км
30.10.02	2.2	7.2	135	24.4	1	4.5
07.10.02	1.8	2.8	65	24.4	1.5	10
07.10.99	2.2	42.9	800	24.4	1	18



и далее используется мировое время). Расстояние между местом наблюдения и космодромом  $R \approx 2050$  км.

**Наблюдения методом НР.** Измерения для диапазона высот  $108 \div 610$  км выполнены в интервале времени  $02:00 \div 06:00$ . Параметры радара перечислены в табл. 5. СР пришелся на переходное время от ночи ко дню. Уровень мощности  $P_{s0}$  НР сигнала, усредненный за  $\Delta T_0 = 1$  мин, увеличился при этом от  $\sim 1$  до 40 (здесь и далее относительные единицы – о. е.). Из рис. 1 (верхняя панель) видно, что  $P_{s0}$  почти

монотонно, с незначительными флуктуациями, нарастает во времени. Здесь показаны также временные вариации мощности шума  $P_{n0}$ , усредненные на интервале времени 1 мин. Видно, что после начала измерений имело место падение  $P_{n0}$  от 6.7 до 5.1 о. е., а затем – постепенный рост до 6.4 о. е. Примерно после  $05:30$  наблюдалось незначительное уменьшение  $P_{n0}$ .

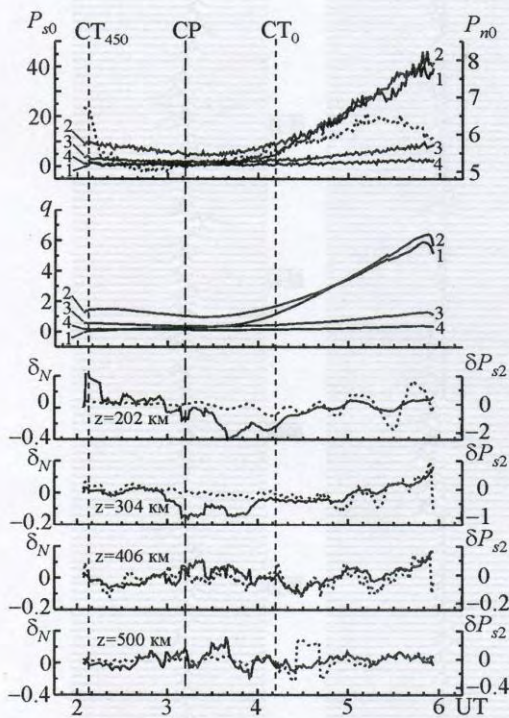
Значение отношения сигнал/шум (средняя панель) в процессе эксперимента изменялось в пределах  $0.02 \div 13$  для высот  $108 \div 610$  км. В момент СР оно составляло  $0.05 \div 1.2$  для указанного диапазона высот.

Добавим, что СР происходил на фоне эффектов, связанных с прохождением утреннего терминатора. Восход Солнца имел место около  $02:30, 02:40, 02:50, 03:00, 03:15, 03:35, 04:20$  для высот 300, 250, 200, 150, 100, 50 и 0 км.

На нижней панели рис. 1 приведены временные зависимости  $\delta_N$  для ряда высот. Четко видны колебания параметра  $\delta_N(t)$  как до, так и после СР. Это имело место в нижней части  $F$ -области ионосферы.

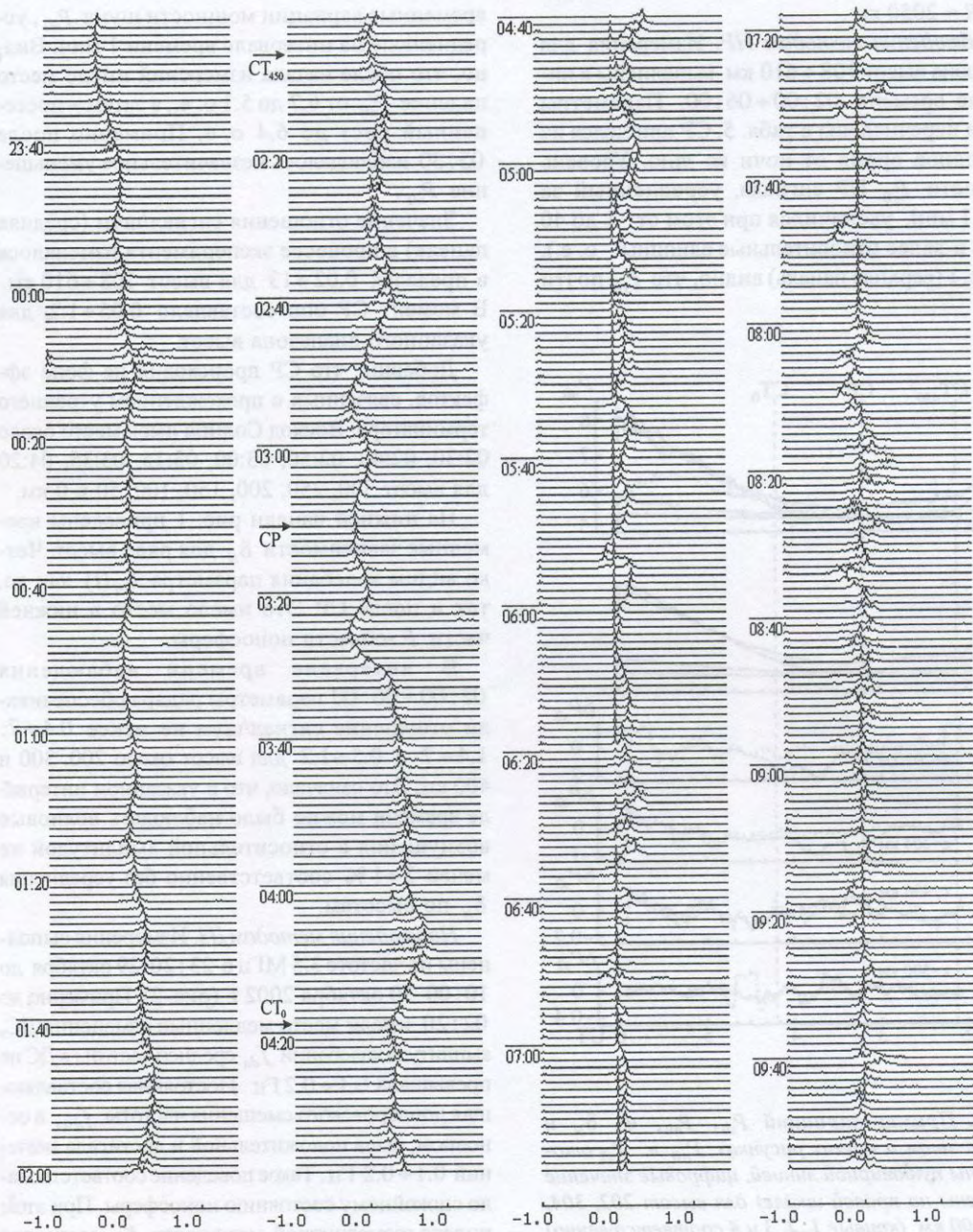
В интервале времени наблюдения  $02:00 \div 06:00$  параметры радара обеспечивали отношение сигнал/шум не менее  $0.4 \div 7; 1.4 \div 7$  и  $0.5 \div 1.2$  для высот около 200, 300 и 400 км. Это означало, что в указанном интервале времени можно было наблюдать волновые возмущения с относительной амплитудой не менее  $3 \div 1\%$  соответственно без усреднения  $\delta_N$  по высотам.

**Наблюдения методом ДЗ.** Измерения выполнены на частоте 3.5 МГц с  $23:20$  29 октября до  $10:00$  30 октября 2002 г. (рис. 2). Примерно до  $02:20$  имели место медленные изменения ДС, амплитуда колебаний  $f_{da}$  средней частоты в ДС не превышала  $0.1 \div 0.2$  Гц. Постоянная составляющая доплеровского смещения частоты  $f_{d0}$ , в основном, была положительной и достигала значений  $0.1 \div 0.2$  Гц. Такое поведение соответствовало спокойному состоянию ионосферы. При этом индекс геомагнитной активности  $K_p$  составлял  $2 \div 3$ . Примерно с  $02:40$  до  $03:30$   $f_{d0} \approx -0.2$  Гц,  $f_{da} \approx 0.1$  Гц. В интервале времени  $03:30 \div 06:30$   $f_{d0}$  изменялась от 0.5 до 1 Гц. Примерно с  $05:00$  и до  $06:20$  наблюдался хорошо выраженный квазипериодический процесс с периодом



**Рис. 1.** Пример вариаций  $P_{s0}$ ,  $P_{n0}$ ,  $q$ ,  $\delta_N$  и  $\delta P_{s2}$  (на этом и других рисунках  $P_{n0}$  и  $P_{s2}$  отображены пунктирной линией, цифровые значения приведены на правой шкале) для высот 202, 304, 406 и 500 км (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно) по данным радара НР во время старта ракеты "Союз" в  $03:11$  30 сентября 2002 г. На этом и других рисунках: СР – момент старта ракеты,  $СТ_{100}$  и  $СТ_{450}$  – моменты прохождения солнечного терминатора на уровне земли и на высотах 100 и 450 км





**Рис. 2.** Вариации ДС на частоте 3.5 МГц во время старта ракеты "Союз" в 03:11 30 сентября 2002 г. (действующая высота 315 ± 390). На этом и других рисунках по горизонтальной оси указано доплеровское смещение частоты радиосигнала в герцах, а по вертикальной оси — мировое время



$T \approx 10$  мин и  $f_{da} \approx 0.13$  Гц. В интервале времени 06:20÷10:00 имели место сильные вариации ДС, причем  $f_{d0} \approx 0$ , порой наблюдались явно не гармонические колебания  $f_d(t)$  с периодами 5÷10 мин. В интервале времени 6:00÷12:00 магнитная активность была повышенной ( $K_p = 5 \div 4$  соответственно). Это означает, что в высоких широтах ( $\sim 70^\circ$  с. ш.) могли генерироваться ВВ, которые распространялись в экваториальном направлении. При средней скорости около 500 м/с (см., например, [3]) они достигали места наблюдения ( $\sim 50^\circ$  с. ш.) с запаздыванием, близким к 70 мин. Как видно из рис. 2, примерно после 07:20 характер ВВ сущ. естественно отличался от ВВ, имевших место в интервале времени 03:00–06:00.

### Процессы в ионосфере, сопутствовавшие старту космического аппарата "Space Shuttle"

Отличительной особенностью этих наблюдений было то, что измерения методом НР выполнены при большом ( $\sim 10000$  км) удалении от места СР с высоким разрешением по высоте ( $\sim 10$  км) и низких значениях отношения сигнал/шум ( $0.1 \div 1$ ).

*Сведения о ракете.* Ракета космического аппарата (КА) "Space Shuttle" – самая крупная из всех стартующих на сегодняшний день, она относится к сверхтяжелым ракетам. Ее полная масса составляет 2029.633 т, начальная тяга – 25.73 МН, высота – 56 м, низкоорбитная полезная нагрузка – 24400 кг на высоте 204 км. Разгонный блок (нулевая ступень) имеет следующие параметры: масса –  $2 \times 589.67$  т, тяга –  $2 \times 11.51$  МН, диаметр – 1 м, высота – 38.5 м, время работы – 124 с. Параметры первой ступени: масса – 750.975 т, тяга – 0 МН, диаметр – 8.7 м, высота – 46.9 м, время работы – 480 с. Параметры второй ступени: масса – 99.318 т, тяга – 6.8 МН, диаметр – 4.9 м, высота – 37.2 м, время работы – 480 с.

Старт космического аппарата имел место в 19:46 7 октября 2002 г. с космодрома на мысе Канаверал ( $R \approx 9300$  км).

*Наблюдения методом НР.* Измерения в диапазоне высот 83÷604 км выполнены в интер-

вале времени с 18:00 7 октября по 1:00 8 октября 2002 г. Заход Солнца имел место около 15:03, 15:47, 16:05, 16:19, 16:31, 16:41, 16:50, 16:58, 17:06 и 17:14 для уровня земли и высот 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 и 450 км соответственно. К моменту наблюдения за СР процессы, обусловленные движением терминатора, закончились. Параметры радара, а также значения  $\Delta T_0$  и  $\Delta z_0$  представлены в табл. 5. Старт космического аппарата пришелся на переходное время ото дня к ночи. На всех высотах уровень мощности  $P_{s0}$  уменьшился на порядок, причем его падение имело место в основном в течение 1÷1.5 часов после СР (рис. 3). Это обстоятельство, наряду с малым отношением сигнал/шум ( $q \approx 0.1 \div 0.02$ ), резко усложнило выявление ВВ, сопутствующих старту космического аппарата. Дело в том, что при таких  $q$  величина  $\delta_{N \min}$

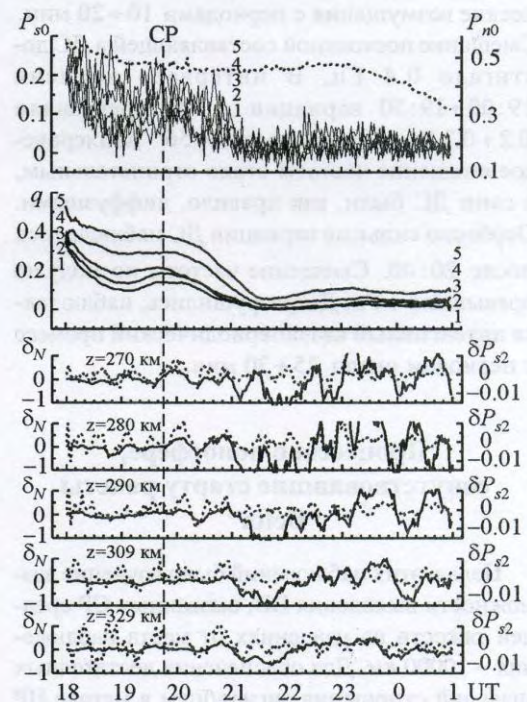


Рис. 3. Пример вариаций  $P_{s0}$ ,  $P_{n0}$ ,  $q$ ,  $\delta_N$  и  $\delta P_{s2}$  для высот 270, 280, 290, 309, 329 км (кривые 1, 2, 3, 4 и 5 соответственно) по данным радара НР при старте КА "Space Shuttle" в 19:46 7 октября 2002 г.



составляет около  $8 \div 38\%$  соответственно. Маловероятно, чтобы столь сильные ВВ наблюдались на расстоянии 10000 км от места СР. Для увеличения чувствительности методики выявления было выполнено суммирование  $P_{s0}$  по высоте. После этого минимальное значение  $q = q_{\Sigma} \approx 0.5$ , а  $\delta_{N\min} \approx 2\%$ . Результаты такой обработки показали, что значения  $\delta_{N\Sigma}$  до СР не превышали  $2 \div 3\%$ , а после старта увеличились до  $10 \div 20\%$ . Необходимо, однако, иметь в виду, что такой рост  $\delta_{N\Sigma}$  вызван не столько СР, сколько уменьшением  $P_{s0}$ . Этим же объясняются сильные флуктуации  $\delta_N$  на всех высотах в интервале времени  $21:30 \div 22:30$ .

*Наблюдения методом ДЗ.* Измерения в день старта космического аппарата также были выполнены на частоте 3.5 МГц в интервале времени  $15:50 \div 21:10$  (рис. 4). Примерно с 16:00 до 19:00 имели место сильные (до 1 Гц) вариации  $f_d$ , порой наблюдались квазипериодические возмущения с периодами  $10 \div 20$  мин. Смещение постоянной составляющей в ДС достигало 0.4 Гц. В интервале времени  $19:00 \div 19:50$  вариации  $f_d$  не превышали  $0.2 \div 0.3$  Гц. Примерно в 19:56 доплеровское смещение частоты стало отрицательным, а сами ДС были, как правило, диффузными. Особенно сильные вариации ДС наблюдались после 20:40. Смещение частоты по модулю превышало 1 Гц, ДС разрушились, наблюдался интенсивный квазипериодический процесс с периодом около  $25 \div 30$  мин.

### Процессы в ионосфере, сопутствовавшие старту ракеты “Delta”

Целью этих наблюдений было изучение возможности выявления ВВ, вызванных СР средней тяжести на удалениях от места наблюдения  $\sim 10000$  км. Для обеспечения достаточных значений отношения сигнал/шум в методе НР использовались очень длинные импульсы (около 800 мкс) и большой шаг по высоте (18 км) (см. табл. 5). При этом в зависимости от высоты и времени наблюдения  $q$  составляло  $5 \div 35$ , а чувствительность методики выявления ВВ без суммирования по высотам – около  $0.6\%$ .

*Сведения о ракете.* Ракета “Delta 7925” относится к ракетам средней тяжести. Ее полная масса составляет 231.870 т, начальная тяга – 3.52 МН, высота – 38.1 м, низкоорбитная полезная нагрузка – 5089 кг на высоте 185 км, геостационарная полная нагрузка – 1818 кг. Нулевая ступень имела следующие параметры: масса –  $9 \times 13.064$  т, тяга –  $9 \times 0.49$  МН, диаметр – 1 м, высота – 13 м, время работы – 64 с. Параметры первой ступени: масса – 101.9 т, тяга – 1.05 МН, диаметр – 2.4 м, высота – 26.1 м, время работы – 265 с. Параметры второй ступени: масса – 6.954 т, тяга – 0.04 МН, диаметр – 3.7 м, высота – 5.9 м, время работы – 431 с. Третья ступень имеет следующие параметры: масса – 3.697 т, тяга – 0.1 МН, диаметр – 1.6 м, высота – 1.8 м, время работы – 120 с. Параметры четвертой ступени: масса – 2.141 т, тяга – 0.07 МН, диаметр – 1.2 м, высота – 2 м, время работы – 88 с.

СР имел место в 12:51 октября 1999 г. с космодрома на мысе Канаверал ( $R \approx 9300$  км).

*Наблюдения методом НР.* Измерения для диапазона высот  $125 \div 1760$  км выполнены в интервале времени  $13:00 \div 21:00$ , т. е. в переходное время ото дня к ночи. К сожалению, измерения были начаты через 9 мин после СР (рис. 5). Это сделало невозможным идентификацию возмущений первого типа, время запаздывания которых того же порядка.

Примеры временных вариаций  $P_{s0}$  для отдельных высот,  $P_{n0}$ , а также  $q$  показаны на рис. 5. Видно, что в интервале времени  $14:00 \div 17:00$  имело место быстрое убывание  $P_{s0}$  и  $q$ . Поведение  $P_{n0}(t)$  было немонотонным: с 15:00 до 17:20 наблюдался рост от 1.5 до 2.1 о. е., затем происходило уменьшение до 1.6 о. е. Такое поведение  $P_n(t)$  связано с влиянием шумового нетеплового излучения Галактики.

Добавим, что заход Солнца имел место около 15:03, 15:47, 16:05, 16:19, 16:31, 16:41, 16:50, 16:58, 17:06 и 17:14 на уровне земли и на высотах 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 и 450 км соответственно.

Временные вариации  $\delta_N$  показаны на рис. 5 (нижняя панель). Видно, что ВВ наблюдались на всех высотах в течение всего времени измерения, хотя характер их несколько изменялся. Относительная амплитуда обычно



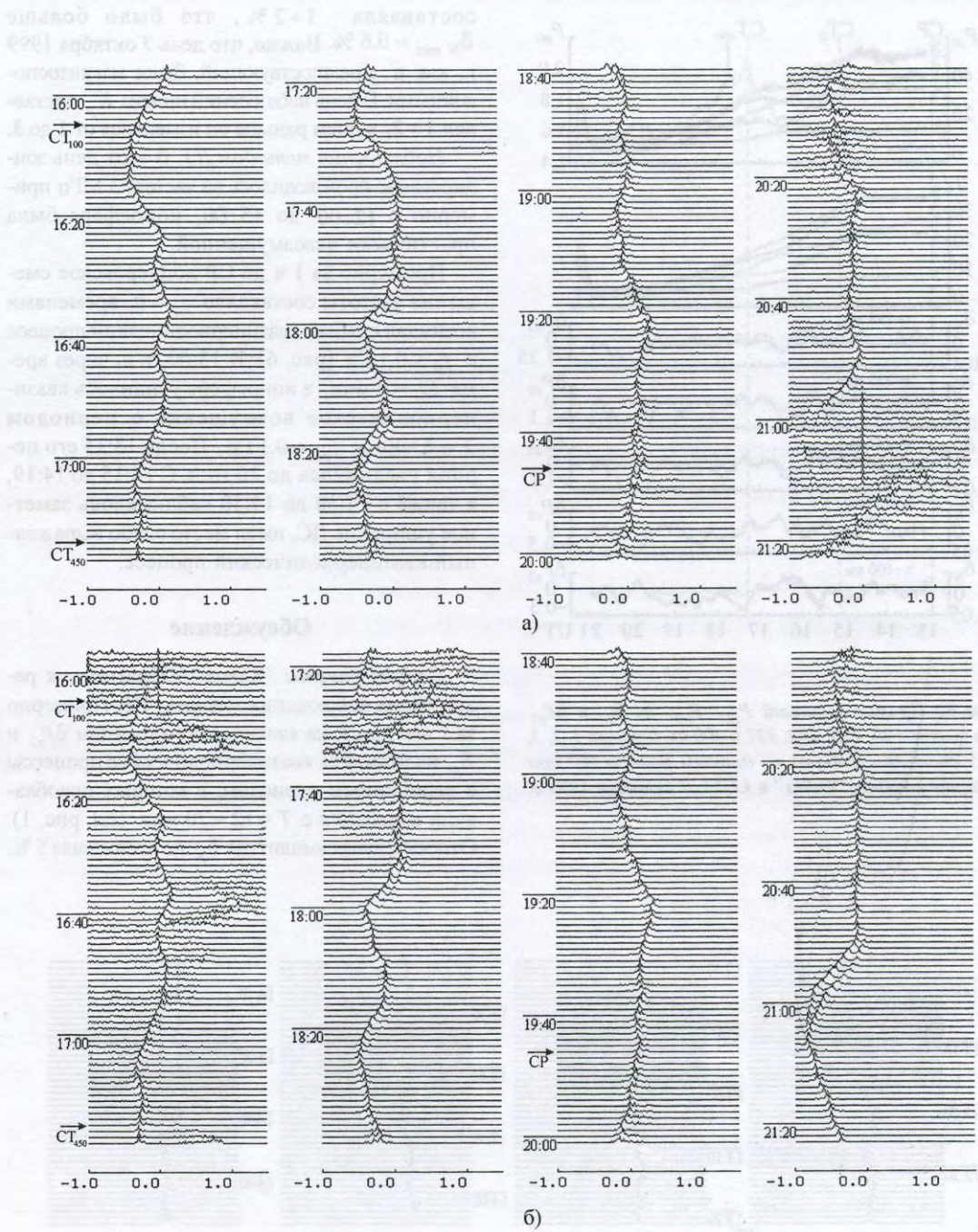


Рис. 4. Вариации ДС на частоте 3.5 МГц во время старта КА "Space Shuttle" в 19:46 7 октября 2002 г.: а) – действующая высота  $315 \pm 390$  км, б) – действующая высота  $390 \pm 465$  км



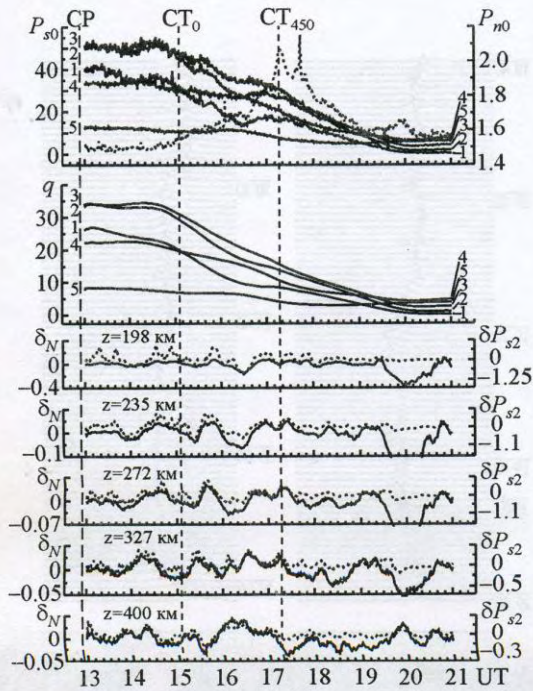


Рис. 5. Пример вариаций  $P_{s0}$ ,  $P_{n0}$ ,  $q$ ,  $\delta_N$  и  $\delta P_{s2}$  для высот 198, 235, 272, 327 и 400 км (кривые 1, 2, 3, 4, 5 соответственно) по данным радара НР при старте ракеты "Delta" в 12:51 7 октября 1999 г.

составляла  $1 \pm 2\%$ , что было больше  $\delta_{N \min} \approx 0.6\%$ . Важно, что день 7 октября 1999 г., как и предшествующий, были магнитоспокойными. В день наблюдений индекс  $K_p$  составлял  $1+2$ , а днем раньше он изменялся от 1 до 3.

**Наблюдения методом ДЗ.** В этот день зондирование производилось на частоте 3 МГц примерно с 12:00 до 15:00, ионосфера была практически невозмущенной.

Примерно за 1 ч до СР доплеровское смещение частоты составляло  $f_d \approx 0$ , временами возникал слабый квазипериодический процесс с  $f_d \leq 0.1$  Гц (рис. 6). В 13:00, т. е. через время  $\Delta t_1 \approx 9$  мин, в ионосфере усилилось квазипериодическое возмущение с периодом  $T \approx 5$  мин и  $f_{da} \approx 0.1$  Гц. После 13:15 его период увеличился до 10 мин. С 14:15 до 14:19, а также с 14:30 до 14:50 наблюдалось заметное уширение ДС, имел место слабо выраженный квазипериодический процесс.

### Обсуждение

**Старт ракеты "Союз".** Обратимся к результатам наблюдения методом НР. Примерно за 1 час до СР на хаотические вариации  $\delta P_{s2}$  и  $\delta_N$  наложился квазипериодический процесс с переменным периодом, в которых преобладали колебания с  $T \approx 12 \pm 20$  мин (см. рис. 1). Относительная амплитуда  $\delta_N$  не превышала 5%,

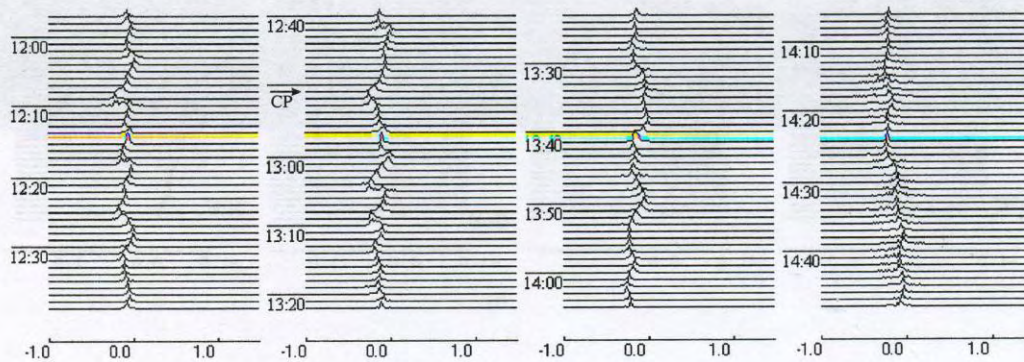


Рис. 6. Вариации ДС на частоте 3.5 МГц при старте ракеты "Delta" в 12:51 7 октября 1999 г. (действующая высота  $315 \pm 390$  км)



причем с ростом высоты она уменьшалась. Степень упорядоченности квазипериодических процессов несколько возрастала по мере приближения к моменту восхода Солнца на соответствующей высоте.

Первое изменение характера сигнала произошло почти одновременно на всех высотах около 03:13, или, с учетом интервала скользящего усреднения, равного 15 мин, около 03:21. Таким образом,  $\Delta t_1 \approx 10$  мин. При этом существенно усилился квазипериодический процесс. Его относительная амплитуда  $\delta_N$  достигала 16 % на высоте 186 км, с высотой она убывала и на высоте 250 км уже составляла 3 %, а выше  $\delta_N \approx 1$  % (см. рис. 1). Наряду с уменьшением  $\delta_N$  убывал период квазипериодических возмущений от 40 до 25 мин при увеличении высоты от 186 до 273 км.

Второе изменение характера сигнала наступило в интервале времени 03:55 ÷ 03:45 для высот 186 ÷ 273 км соответственно. С учетом интервала времени скользящего усреднения этому соответствовали задержки 51.5 ÷ 41.5 мин для тех же высот. При этом на меньших высотах (176 ÷ 210 км) относительная амплитуда колебаний  $N$  несколько уменьшилась, а на больших высотах (241 ÷ 273 км) – увеличилась до 6 %. В промежуточном диапазоне высот (210 ÷ 240 км) наложение возмущений второго типа на возмущения первого типа не привело к изменению амплитуды квазипериодических возмущений. Величина квазипериода слабо зависела от высоты и заметно – от

времени наблюдения: первыми регистрировались длиннопериодные (около 30 мин), а затем короткопериодные (около 20 мин) возмущения. Таким образом, для возмущений второго типа характерно запаздывание около 40 ÷ 50 мин и существенна дисперсия.

Третье изменение характера сигнала практически совпало по времени с восходом Солнца на уровне земли (около 04:20). Амплитуда колебаний при этом уменьшилась в несколько раз (до 1 ÷ 3 %). Изменилась величина периодов преобладающих колебаний. Если бы это было связано с CP, то величина задержки составила бы  $\Delta t_3 \approx 70$  мин.

Параметры ВВ первого и второго типа приведены в табл. 6.

Результаты сравнения расчетных и наблюдаемых значений скоростей ВВ второго типа представлены в табл. 7. Видно, что эти значения согласуются.

Можно полагать, что ВВ, следующие за CP, проявились лишь в диапазоне высот 155 ÷ 200 км.

Обратимся далее к результатам наблюдений методом ДЗ. До восхода Солнца радиоволна отражалась на высоте около 250 км, для которой восход имел место около 02:40. Начиная с этого момента времени величина  $f_d(t)$  изменялась по квазипериодическому закону. По-видимому, вариации  $f_d(t)$  обусловлены движением терминатора. После 03:30 в течение примерно 3 часов доплеровское смещение частоты положительно, причем в течение первого часа  $f_d$  достигает 0.4 ÷ 0.5 Гц. Скорее всего,

**Таблица 6.** Значения относительной амплитуды волновых возмущений первого типа ( $\delta_{N1}$ ) и второго типа ( $\delta_{N2}$ ) для соответствующих периодов, а также задержки возмущений второго типа ( $\Delta t_2$ ) в день CP "Союз"

$z$ , км	186	194	202	210	218	225	233	241	249	257	265	273
$\delta_{N1}$ , %	16	14	13	12	10	10.5	8	5	3	2.5	2.5	2
$T$ , мин	36	40	40	38	40	40	35	25	20	20	20	20
$\delta_{N2}$ , %	4	6	6.5	6	5	8	6	6	6	6	5	5
$T$ , мин	30	27	29	29	30	30	30	29	30	26	30	28
$\delta_{N2}$ , %	2.5	3	2.5	3	2.5	2	1	2	1	1	2	2
$T$ , мин	30	30	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
$\Delta t_2$ , мин	58	55	52	49	48	47	46	46	45	45	44	43



**Таблица 7.** Расчетные  $v_s$  и наблюдаемые  $v'_2$  значения скоростей волновых возмущений второго типа в день СР "Союз", а также параметры нейтральной атмосферы ( $M_n$  – средняя масса молекул атмосферы,  $T_m$  – температура молекул) и скорость звука в атмосфере ( $v_s$ ). В расчетах использовались значения  $T_m$ , даваемые моделью атмосферы MSIS для сходных геофизических условий

$z$ , км	186	194	202	210	218	225	233	241	249	257	265	273
$M_n \cdot 10^{26}$ , кг	3.5	3.5	3.4	3.4	3.4	3.3	3.3	3.3	3.2	3.2	3.2	3.2
$T_m$ , К	760	810	860	905	950	990	1025	1060	1080	1090	1095	1100
$v_s$ , м/с	652	673	704	722	740	769	780	793	813	817	819	821
$v'_2$ , м/с	603	636	673	714	729	745	761	761	778	778	795	814

оно вызвано утренним нисходящим движением области отражения радиоволны с примерно постоянной скоростью, которую можно оценить из известного соотношения:

$$v = \frac{c f_d}{2 f}$$

При  $f_d = 0.3$  Гц,  $f = 3.5$  МГц имеем  $v \approx 17$  м/с. Опускание области отражения продолжалось в течение примерно 100 мин. За это время высота отражения изменилась на 100 км и достигла значения около 150 км. Можно полагать, что примерно к 05:00 эффекты, вызванные утренней перестройкой, закончились. Последующие достаточно быстрые вариации ДС, по-видимому, обусловлены магнитной активностью; они продолжались, по крайней мере, до 10:00, т. е. до конца сеанса наблюдений.

Обнаружение эффектов от СР на фоне описанных возмущений сильно затруднено. Тем не менее можно предположить, что со стартом космического аппарата могут быть связаны изменения характера сигнала около 03:20, когда возникло квазипериодическое изменение  $f_d$  с периодом  $T \approx 20 \div 30$  мин и продолжительностью не менее 30 мин (ему соответствует запаздывание  $\Delta t_1 \approx 9$  мин) и около 04:00 (запаздывание  $\Delta t_2 \approx 49$  мин). В последнем случае в ДС наблюдалась вторая мода, сдвинутая в сторону меньших значений

$f_d$  примерно на  $0.1 \div 0.5$  Гц. Продолжительность ее существования – около 10 мин.

Указанным запаздываниям соответствуют скорректированные значения кажущейся скорости распространения возмущений  $v'_1 \approx 5.8$  км/с и  $v'_2 \approx 760$  м/с. Как и в работах [32, 37], использовалось скорректированное значение расстояния от ракеты до места наблюдения  $R' \approx 2100$  км, а время движения ракеты до области ионосферы, где имеет место эффективная генерация волн ( $100 \div 150$  км), принималось равным 3 мин. Очевидно, что  $v'_2$  соответствует средней скорости распространения ударной акустической либо акустико-гравитационной волны (АГВ), распространяющейся в атмосферном волноводе на высотах  $200 \div 250$  км. Именно на этих высотах отражалась зондирующая волна в интервале времени 03:00  $\div$  04:00. Скорость волн акустического типа, как известно, не превосходит скорость звука в атмосфере:

$$v_s = \sqrt{\gamma \frac{k T_m}{M_n}}$$

где  $T_m$  и  $M_n$  – температура и средняя масса молекул в атмосфере,  $\gamma$  – отношение удельных теплоемкостей газа.

Скорости, близкие к  $v_s$ , на харьковском радаре НР наблюдались и ранее [35]. В этой рабо-



те исследовалась реакция ионосферы на СР и мощный химический взрыв. Хорошо известно, что и взрывы, и СР сопровождаются генерацией мощной акустической волны (см., например, [32]). При упомянутом химическом взрыве мощность акустической волны на высоте  $\sim 100$  км  $P_a \approx 10^9$  Вт, а при старте тяжелых и сверхтяжелых ракет  $P_a \approx 10^9 + 10^{10}$  Вт. При таких значениях  $P_a$  АГВ распространяются на расстояния не менее 2000+3000 км [35].

Скорость, близкую к  $v'_1$ , имеют медленные магнитогидродинамические (ММГД) волны. Показатели преломления и поглощения таких волн, имеющих различные поляризации (знаки  $\pm$ ), вычисляются по формулам [18]:

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

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

где  $v_{as}$  – характерная скорость ММГД-волн, равная 1.6+2.5 км/с для высот 200+250 км (высоты отражения зондирующей радиоволны в дневное и ночное время соответственно);  $a_{1\pm} = (1 \pm \alpha + a_{2\pm})^{1/2}$ ,  $a_{2\pm} = ((1 \pm \alpha)^2 + \beta^2)^{1/2}$ ,  $\alpha = \omega/s\Omega_H$ ,  $\beta = \omega/v_1$ ,  $\omega$  – частота ММГД-волны,  $v_1 \approx 10^{-3}$  с<sup>-1</sup> для высот 200+250 км [6],  $s$  – степень ионизации плазмы,  $\Omega_H \approx 300$  с<sup>-1</sup> – гирочастота ионов. На указанных высотах часто  $\beta^2 \gg \alpha^2$ ,  $\beta^2 \gg 1$ ,  $a_{2\pm} \approx \beta$ ,  $a_{1\pm} \approx \beta^{1/2}$ , а

$$n_{\pm} \approx \kappa_{\pm} \approx \frac{c}{\sqrt{2}v_{as}\beta^{1/2}}.$$

Фазовая скорость и глубина затухания волны при этом равны

$$v_{ph} = \sqrt{2}v_{as}\beta^{1/2},$$

$$L = \frac{v_{ph}}{\omega}.$$

При  $v_1 = 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>,  $s = 3 \cdot 10^{-5}$ ,  $v_{as} \approx 2.5$  км/с,  $\omega = 3.5 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup> имеем  $v_{ph} \approx 5.9$  км/с для высоты 250 км. Наблюдаемое значение  $v'_1 \approx 5.8$  км/с близко к оцененному значению. При этом имеем  $L \approx 1700$  км. Таким образом, генерируемая в окрестности находящейся в ионосфере ракеты ММГД-волна способна дойти до места наблюдения. За счет поглощения ее амплитуда уменьшается в 3+3.5 раз. Амплитуда возмущений также убывает из-за расходимости волны. Для сферической волны  $\delta_N$  уменьшается в  $R/R_0$  раз, где  $R_0$  – характерный масштаб области генерации волны. При  $R_0 = 100$  км,  $R \approx 2000$  км значения  $\delta_N$  уменьшаются в 20 раз. Генерируемая волна, однако, является скорее цилиндрической, поскольку источник волн – реактивная струя движущейся ракеты. Тогда при  $R_0 \approx 200$  км и  $R = 2000$  км имеем  $(R/R_0)^{1/2} \approx 3$ .

*Старт космического аппарата "Space Shuttle".* Обратимся к результатам наблюдений методом НР. Как видно из рис. 3, первое заметное увеличение  $\delta P_{s2}$  и  $\delta_N$  имело место через  $\Delta t_1 \approx 10+20$  мин, а второе – через  $\Delta t_2 \approx 65$  мин (здесь учтено, что усреднение на интервале времени 15 мин привело к опережению увеличений  $\delta P_{s2}$  и  $\delta_N$  на 7.5 мин). Впрочем, увеличение  $\delta P_{s2}$  и  $\delta_N$  в этом наблюдении, как отмечалось выше, еще не свидетельствует о реакции на СР. О ней, по-видимому, свидетельствует изменение периода ВВ. Длительность перехода к прежнему периоду составила около 2 часов. Можно полагать, что реакция на СР продолжалась около 2 часов и что состояла она из двух типов возмущений с запаздываниями около 10+20 мин и 65 мин и с периодами  $\sim 35$  и 45 мин соответственно. Этим запаздываниям соответствовали скорректированные значения скоростей около 20+10 и 2.4 км/с. Поскольку большую часть пути от места генерации (вблизи космодрома) до места наблюдения ВВ распространялись в дневной ионосфере, значению  $v'_1$  соответствует скорость гиротропных волн, движущихся в волноводе на высотах  $E$ -области ионосферы при  $N \approx 10^{11}$  м<sup>-3</sup> и  $\alpha = 60^\circ$ .

Покажем это. Для периодов волны более 1 мин [32]

$$v_{ph} \approx v_{gt} \cos^2 \alpha,$$



где  $v_{gt} = \frac{c^2 f_B}{2\pi f_p^2 \sqrt{l z_0}}$  – характерная скорость гиротропных волн,  $z_0$  – высота волновода с эффективной толщиной  $l$ . При  $f_B \approx 1.5$  МГц,  $f_p \approx 2.7$  МГц,  $z_0 \approx 100$  км и  $l \approx 30$  км имеем  $v_{gt} \approx 53$  км/с. Тогда при  $\alpha = 60^\circ$  получим  $v_{ph} \approx 13$  км/с.

Добавим, что гиротропные волны достаточно хорошо локализованы по высоте в  $E$ -области ионосферы, и поэтому их наблюдение на высотах  $F$ -области существенно затруднено.

Значению  $v_2 \approx 2.4$  км/с соответствует скорость ММГД-волн на высотах  $150 + 200$  км при  $\omega \sim 10^{-3}$  с $^{-1}$  [32]. Для последних глубина затухания не менее 5000 км [32].

Обсуждаемые ВВ наблюдались, по крайней мере, в диапазоне высот  $270 + 330$  км.

Таким образом, возможная реакция на СР в этот день проявлялась слабо. Причиной этого были низкое отношение сигнал/шум и совпадение интервала времени прихода ВВ, вызванных стартом, с интервалом времени заметного убывания  $P_{s0}$ . Добавим, что второе возмущение идентифицировалось несколько более уверенно, чем первое. Физически оправданные значения оценок скоростей распространения ВВ как будто свидетельствуют в пользу их искусственного происхождения.

Сравним далее обсуждаемые результаты с данными наблюдений методом ДЗ. День 7 октября 2002 г. относился к магнитовозмущенным. Как уже упоминалось, индекс  $K_p$  составлял  $3 + 6$ . В этот день, согласно классификации [10], имела место сильная магнитная буря, которая, как правило, сопровождается генерацией в высоких широтах ( $65 + 75^\circ$ ) волновых процессов, движущихся к экватору со скоростью  $0.1 + 1$  км/с. Такие волны достигли пункта наблюдения через  $1 + 2$  часа после их генерации. По-видимому, этим и объясняется сильная возмущенность ионосферы в интервале времени  $16:00 + 18:40$ . Примерно за 1 час до СР ионосфера была относительно спокойной. Первое существенное изменение характера сигнала началось примерно в  $19:56$ , т. е. через время  $\Delta t_1 \approx 10$  мин после СР, и продолжалось почти 30 мин. ДС были преимущественно диффузными. Следующее значитель-

ное изменение характера сигнала наступило около  $20:50$ , т. е. с задержкой  $\Delta t_2 \approx 64$  мин после СР. Этим задержкам соответствуют скорости  $v_1' \approx 21$  км/с и  $v_2' \approx 2.5$  км/с. Первая скорость близка к скорости гиротропных волн при электронной концентрации в  $E$ -области ионосферы  $5 \cdot 10^{10}$  м $^{-3}$  и среднем угле между волновым вектором и вектором магнитного поля  $\alpha \approx 60^\circ$  [32]. Вторая скорость примерно соответствует скорости ММГД-волн в темное время суток с частотой  $\omega \sim 10^{-3}$  с $^{-1}$ , для которых  $L \sim 10000$  км.

Сравним результаты, полученные методами НР и ДЗ. Для второго типа возмущений скорости распространения оказались очень близкими ( $2.4$  и  $2.5$  км/с), т. е. различие между ними не превышало погрешности. Для первого типа возмущений скорости были существенно различающимися, что может быть вызвано субъективностью определения моментов начала возмущений. При небольших временах задержки ошибка в  $5 + 10$  мин приводит к значительным отличиям в скорости  $v_1'$ . Не исключено также, что первый тип возмущений вообще не связан со СР и имеет естественное происхождение.

*Старт ракеты "Delta"*. Снова обратимся к результатам наблюдений методом НР. Значительное изменение характера сигнала имело место примерно в  $13:45 + 13:20$  для высот  $\sim 200 + 400$  км соответственно (см. рис. 5). При этом на существовавший волновой процесс накладывалось ВВ с большой амплитудой, и вообще говоря, другими периодами. Если это возмущение связано со СР, то ему соответствовало запаздывание (с учетом интервала усреднения  $15$  мин)  $62 + 37$  мин и  $v_2' \approx 2.5 + 4.4$  км/с для  $z \approx 200 + 400$  км. Важно, что с ростом высоты скорость растет. Примерно такие скорости имеют ММГД-волны с частотой  $\sim 10^{-3}$  с $^{-1}$  [18]. Продолжительность обсуждаемого типа возмущений составила  $1.5 + 2$  часа. Ему на смену приходило ВВ с  $\delta_N \approx 1.5 + 2\%$ , существенно большим периодом (до  $1$  ч) и продолжительностью более  $2$  часов. Его относительная амплитуда и период медленно убывали с ростом высоты (от  $2$  до  $1\%$  и от  $60$  до  $40$  мин при увеличении  $z$  от  $200$  до  $400$  км). Эти ВВ вызваны движением через атмосферу вечернего тер-



минатора. После 16:30 (т. е. после прохождения терминатора) ВВ не исчезали, хотя амплитуда их несколько уменьшалась, постепенно уменьшался и их период (до 20 + 25 мин). На высотах более 350 км ВВ были слабо выражены ( $\delta_N \leq 0.6\%$ ), и их выделение стало невозможным.

Обратимся вновь к данным наблюдений методом ДЗ. День 7 октября 1999 г., как уже отмечалось, относился к магнитоспокойным, значения индекса  $K_p$  составляли 1 + 2. После СР характер сигнала изменялся дважды: в 13:00 и 14:15 (см. рис. 6). Этим временам соответствуют задержки  $\Delta t_1 \approx 9$  мин и  $\Delta t_2 \approx 84$  мин. Если изменения характера сигнала вызваны СР, то возмущения распространялись со скорректированными значениями скоростей около 25 и 2 км/с. Первое значение скорости близко к скорости гиротропных волн (в  $E$ -области ионосферы  $N \approx 4 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ ,  $\alpha \approx 60^\circ$ ), а второе – к скорости ММГД волн в дневное время ( $\omega \leq 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ,  $L \geq 4000$  км). Впрочем  $v_2'$  близка также к скорости волн Хантадзе, распространяющихся в  $E$ -области ионосферы в широтном направлении ( $N \approx 2 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ ,  $\alpha \approx 90^\circ$ ).

Ракета "Delta" относится к ракетам средней тяжести. Поэтому эффекты в ионосфере существенно меньше, чем при старте космического аппарата "Space Shuttle". Не исключено, что описанные возмущения могут иметь естественное происхождение. В пользу их искусственного происхождения, однако, свидетельствуют значения скоростей, близкие к тем, что идентифицированы нами ранее [32].

Поскольку заход Солнца на уровне земли имел место в 15:03, эффекты, связанные с ним, скорее всего, методом ДЗ не наблюдались.

Сравним теперь результаты, полученные методами НР и ДЗ. Возмущения второго типа имели сопоставимые задержки, а значит, и скорости распространения. Поскольку вклад в наблюдаемое значение доплеровского смещения частоты дал в основном диапазон высот 120 + 150 км, то и скорость  $v_2'$  в методе ДЗ несколько ниже, чем в измерениях методом НР на больших высотах (200 + 400 км).

Отдельно остановимся на роли солнечного терминатора, поскольку все три СР имели место в переходное время суток. Прохождение терми-

натора обычно сопровождается генерацией ВВ с периодами 5 + 100 мин и  $\Delta N/N \approx 1 + 10\%$ . Их продолжительность достигает 2 + 2.5 часов. ВВ, сопутствующие СР, имеют близкие характеристики. Это обстоятельство серьезно препятствует разделению реакций в ионосфере на движение терминатора и СР, а в ряде случаев делает их идентификацию невозможной. Более того, реакция, обусловленная терминатором, интерпретируется исследователями как реакция на СР. Скорее всего, так поступили авторы работы [34], давно ставшей классической. По их мнению, при помощи ионозондов (точнее, только одного из них) удалось обнаружить глобальные возмущения, сопутствовавшие СР, на удалении  $\sim 10000$  км. К сожалению, время ожидаемой реакции совпало с прохождением вечернего терминатора (около 23:00 + 24:00 московского декретного времени (МДВ) на высотах 200 + 300 км). Волновые процессы на одной из станций наблюдались в интервале времени 23:00 + 01:00 МДВ. Величина  $\Delta N/N$  составляла 7 + 11%. Время наступления и продолжительность реакции, величины  $\Delta N/N$  и периода колебания свидетельствуют о том, что авторами, вероятнее всего, наблюдалась реакция на прохождение терминатора.

Что же касается эффектов, сопутствовавших СР "Союз" ( $R \approx 2000$  км), их существование сомнений не вызывает. Заслугой авторов [34] явилось то, что их работа стимулировала поиск реакции на СР в "дальней зоне" другими исследователями (см., например, статьи [32, 37] и ссылки в них).

Остановимся кратко на погрешности оценки значений  $\delta_N = \Delta N/N$ . Она, как правило, не превышала 10%. Увеличение  $\delta_N$  в ночное время связано не только с ростом амплитуды колебаний  $\Delta N_m$ , но и с уменьшением мощности  $P_{s1}$  и увеличением ее дисперсии. Это приводит при  $q < 1$  к заметному увеличению дисперсии  $\sigma_N^2$ , описывающей разброс значений  $\delta_N$ . По-видимому, абсолютные значения  $\Delta N_m$  в течение суток изменяются меньше, чем  $N$ .

Подводя итог обсуждению, отметим, что нам удалось продемонстрировать перспективность метода НР для исследования ВВ малой интенсивности ( $\delta_N \sim 1\%$ ), имеющих периоды более 10 мин. Достоверность полученных результа-



тов подтверждена методом ДЗ. Существует принципиальная возможность выделения ВВ от заданного источника на фоне естественных возмущений. Заметим, что в спокойное время суток ВВ в ионосфере, вызванные СР, наблюдались уверенно (например, в работе [32], из 43 СР в 43 случаях). В переходное время суток, при сильной возмущенности среды, принятие решения о наличии ВВ, вызванных СР, затруднено, на что неоднократно указывается в настоящей работе. Однако соответствие временных задержек, скоростей ожидаемых волн (которые наблюдались авторами ранее и хорошо известны специалистам), их периодов и декрементов затухания теоретическим расчетам [32] позволило авторам с определенной долей уверенности утверждать, что и в описываемых случаях наблюдались ВВ, связанные со СР.

### Основные результаты

1. Разработана близкая к оптимальной методика выявления волновых возмущений по измерениям мощности НР-сигнала. Показано, что методика позволяет обнаружить ВВ с относительной амплитудой от нескольких долей процентов и более при отношении сигнал/шум  $q = 3 \div 0.1$ . Дальнейшее увеличение  $q$  (больше  $3 \div 5$ ) к значительному повышению чувствительности методики не приводит.

При параметрах 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 оказывается возможным выделение ВВ с  $\delta_{N \min} \approx 0.5 \div 0.06$  % при  $q \approx 0.1 \div 3$ . По потенциальной чувствительности метод НР может превзойти метод ДЗ и, тем более, метод ВЗ. Методу НР нет равных в высокой информативности. К сожалению, его разрешающая способность по времени обычно уступает аналогичному показателю методов ДЗ и ВЗ, который составляет около 1 мин.

2. При помощи методов НР и ДЗ проведены комплексные наблюдения в периоды, близкие к временам старта трех ракет с космодромов, расстояние до которых различалось примерно в пять

раз. Массы и мощности ракет отличались существенно (до порядка величины). Энергетические характеристики (средняя мощность) радара НР также в различных наблюдениях отличались больше, чем на порядок. Существенно разной была геофизическая обстановка.

3. Наблюдения за стартом ракеты “Союз” совпали по времени с прохождением утреннего терминатора, что серьезно затруднило идентификацию эффектов, вызванных СР. По-видимому, старт сопровождался генерацией возмущений двух типов, скорости которых составляли примерно 5.8 км/с и  $700 \div 800$  м/с. Эти значения скорости близки к скоростям ММГД-волн с частотой порядка  $10^{-3}$  с<sup>-1</sup> и волн акустического типа. Это позволяет с определенной степенью уверенности утверждать, что нами наблюдались ВВ, связанные со СР.

4. Наблюдения за стартом космического аппарата “Space Shuttle” выполнены в переходное время суток, когда отношение сигнал/шум в методе НР постепенно уменьшалось в пределах порядка величины. Это обстоятельство наряду с низким отношением сигнал/шум серьезно затруднило выявление ВВ в ионосфере. Более уверенно наблюдалось возмущение второго типа, имевшее среднюю по трассе распространения ВВ скорость около  $2.4 \div 2.5$  км/с. Такая скорость свойственна ММГД-волнам. Возмущения, кажущаяся скорость которых составляла  $10 \div 20$  км/с, могли иметь естественное происхождение.

5. Наблюдения за стартом ракеты “Delta” пришлось на интервал времени, предшествующий вечернему терминатору, и интервал времени, совпадающий с его движением. Методами НР и ДЗ зарегистрированы возмущения, которые, по-видимому, вызваны стартом ракеты. Их скорость близка к скорости ММГД-волн. Кроме того, методом ДЗ зафиксированы возмущения, кажущаяся скорость которых была около 25 км/с. Не исключено, что эти ВВ обусловлены генерацией гиротропных волн при СР.

Четко наблюдались ВВ, вызванные движением вечернего терминатора. Их относительная амплитуда составляла  $1.5 \div 2$  %, период основного колебания – около 1 ч, время существования – более 2 ч.



6. В целом нами продемонстрирована возможность наблюдения при помощи радара НР достаточно слабых ( $\delta_N \sim 1\%$ ) ВВ с периодами от 10 мин и больше. Погрешность оценки  $\delta_N$  при этом обычно не превышала 10%. Результаты измерений методами НР и ДЗ соответствовали друг другу.

7. Полученные значения скоростей распространения ВВ, сопутствовавших СР, хорошо согласуются с результатами других авторов (см., например, [6, 39]) и наших более ранних исследований (см., например, [31, 32, 36, 37]).

Авторы благодарны Л. Я. Емельянову, В. Н. Лысенко и И. Б. Склярору за проведение измерений на радаре НР, Л. С. Кострову – за предоставление в распоряжение авторов результатов измерений на радаре ДЗ, а также С. Н. Ярошенко – за помощь в вычислениях.

### Литература

1. А. А. Дикий. Теория колебаний земной атмосферы. Москва, Гидрометеоздат, 1969, 196 с.
2. Т. Веер. Atmospheric waves. New York, Toronto, 1974, 384 pp.
3. Э. Э. Госсард, У. Х. Хук. Волны в атмосфере. Москва, Мир, 1978, 532 с.
4. Э. С. Казимировский, В. Д. Кожуров. Движения в ионосфере. Новосибирск, Наука, 1979, 344 с.
5. С. В. Авакян, В. И. Дробжев, В. М. Краснов, Г. С. Кудряшев, А. И. Лазарев, А. Г. Николаев, Л. Д. Рязанова, В. И. Севастьянов, А. Ф. Яковец. Волны и излучение верхней атмосферы. Алма-Ата, Наука, 1981, 168 с.
6. В. М. Сорокин, Г. В. Федорович. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. Москва, Энергоиздат, 1982, 136 с.
7. Волновые возмущения в ионосфере. Алма-Ата, Наука, 1987, 172 с.
8. А. Д. Данилов, Э. С. Казимировский, Г. В. Вергасова, Г. Я. Хачикян. Метеорологические эффекты в ионосфере. Ленинград, Гидрометеоздат, 1987, 272 с.
9. Л. С. Костров, В. Т. Розуменко, Л. Ф. Черногор. Радиофизика и радиоастрономия. 1999, 4, № 3, с. 209-226.
10. Л. Ф. Черногор. Радиофизика и радиоастрономия. 2003, 8, № 1, с. 59-106.
11. Дж. Эванс. ТИИЭР. 1969, 57, № 4, с. 139-175.
12. Дж. Эванс. ТИИЭР. 1975, 63, № 12, с. 5-20.
13. Б. Е. Брюнелли, М. И. Кочкин, И. Н. Пресняков, Е. Д. Терещенко, В. Д. Терещенко. Метод некогерентного рассеяния радиоволн. Ленинград, Наука, 1979, 188 с.
14. И. Н. Амиантов. Избранные вопросы статистической теории связи. Москва, Советское радио, 1971, 416 с.
15. Н. G. Booker. J. Geophys. Res. 1961, 66, № 4, pp. 1073-1079.
16. P. R. Arendt. Nature. 1971, 231, № 5301, pp. 438-439.
17. P. R. Arendt. Nature. 1972, 236, № 62, pp. 8-9.
18. M. Mendillo, G. S. Hawkins, J. A. Klobuchar. J. Geophys. Res. 1975, 80, № 16, pp. 2217-2228.
19. M. Mendillo. Adv. Space. Res. 1981, 1, № 2, pp. 275-279.
20. M. Mendillo. Adv. Space. Res. 1982, 2, pp. 150-156.
21. M. Mendillo. Adv. Space. Res. 1988, 8, № 1, pp. 51-62.
22. П. М. Нагорский, Ю. Е. Тарашук. Изв. вузов. Физика. 1993, № 10, с. 98-106.
23. К. И. Горелый, В. К. Лампей, А. В. Никольский. Геомагнетизм и аэрономия. 1994, 4, № 3, с. 158-161.
24. П. М. Нагорский. Геомагнетизм и аэрономия. 1998, 38, № 2, с. 100-106.
25. М. Г. Деминов, В. Н. Ораевский, Ю. Я. Ружин. Геомагнетизм и аэрономия. 2001, 41, № 6, с. 772-781.
26. Э. Л. Афраймович, В. В. Чернухов, В. В. Кирюшкин. Радиотехника и электроника. 2001, 46, № 11, с. 1299-1307.
27. Э. Л. Афраймович, Н. П. Перевалова, А. В. Плотников. Геомагнетизм и аэрономия. 2002, 42, № 6, с. 790-797.
28. Экологические проблемы и риски возмущений ракетно-космической техники на окружающую природную среду. Под общей редакцией В. В. Адушкина, С. И. Козлова, А. В. Петрова. Москва, Анкил, 2000, 640 с.
29. В. Д. Карлов, С. И. Козлов, Г. Н. Ткачев. Космические исследования. 1980, 18, вып. 2, с. 266-277.
30. S. T. Noble. J. Geophys. Res. 1990, 95, № 11, pp. 19037-19044.
31. К. П. Гармаш, В. Т. Розуменко, О. Ф. Тырнов, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор. ЗР. Успехи современной радиоэлектроники. 1999, № 7, с. 3-15.
32. В. П. Бурмака, Л. С. Костров, Л. Ф. Черногор. Радиофизика и радиоастрономия. 2003, 8, № 2, с. 143-162.
33. О. И. Соколова, В. М. Краснов, Н. Ф. Николаевский. Геомагнетизм и аэрономия. 2003, 43, № 4, с. 561-565.
34. Г. Ф. Засов, В. Д. Карлов, Т. Е. Романчук, Г. К. Солодовников, Г. Н. Ткачев, М. Г. Трухан. Геомагнетизм и аэрономия, 1977, 17, № 2, с. 346-348.



- 35 В. И. Таран, Ю. И. Подъячий, В. И. Головин, В. И. Ващенко, И. Д. Аркадьев. Ионосферные исследования. 1979, № 27, с. 102-110.
- 36 В. И. Таран, Ю. И. Подъячий, А. А. Максимов. Ионосфера. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. 1991, вып. 1, с. 32-41.
- 37 Л. С. Костров, В. Т. Розуменко, Л. Ф. Черногор. Радиофизика и радиоастрономия. 1999, 4, № 3, с. 227-246.
- 38 В. И. Таран. Геомагнетизм и аэрономия. 2001, 41, № 5, с. 659-666.
- 39 A. R. Jacobson, R. C. Carlos. J. Atmos. Terr. Phys. 1994, 56, № 4, pp. 525-528.

**Clustered-Instrument Studies of Ionospheric Wave Disturbances Accompanying Rocket Launches against the Background of Nonstationary Natural Processes**

**V. P. Burmaka, V. I. Taran,  
and L. F. Chernogor**

The observations of wave disturbances in the ionosphere at altitudes of  $180 \pm 500$  km accompanying rocket launches at distances of  $2000 \pm 10000$  km are analyzed. The measurements have been taken by the incoherent scatter (ISR) and HF Doppler radars. The relative amplitudes and periods of wave disturbances caused by the sources of different origin are estimated. The theoretical sensitivity of the ISR and Doppler techniques for detecting such wave disturbances has been studied. The measurements taken by both techniques are found to be in good agreement. The observed velocities of wave disturbances accompanying rocket launches are found to be approximately equal to those obtained in our earlier studies. They correspond to the velocities of acoustic-gravity, slow magnetohydrodynamic, and possibly gyrotropic waves in the ionosphere.