

УДАРНО-АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ ПРИ ЗАПУСКАХ РАКЕТ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

© 2002 г. Э. Л. Афраймович, Е. А. Косоголов, А. В. Плотников

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 31.05.2000 г.

С помощью разработанного ранее метода обработки данных глобальной сети приемников навигационной системы GPS исследуются ударно-акустические волны, генерируемые при запусках ракет и землетрясениях. Анализ возмущений полного электронного содержания в ионосфере, сопровождающих запуски ракет-носителей *Протон*, *Союз* и *Space Shuttle* с космодромов Байконур и Kennedy Space Center в 1998–2000 гг., а также землетрясений в Турции 17.VIII. и 12.XI.1999 г., показал, что независимо от типа источника импульсное возмущение носит характер N-волны с периодом 200–360 с, амплитудой, превышающей уровень фоновых флуктуаций в умеренных геомагнитных условиях как минимум в 2–5 раз. Угол места волнового вектора возмущения меняется в пределах 25–65°, а фазовая скорость (900–1200 м/с) близка к скорости звука на высотах максимума F-области ионосферы. Положение источника соответствует участку траектории ракет-носителей на расстоянии не менее 500–1000 км от стартовой площадки и высоте полета не менее 100 км. При землетрясениях положение источника приблизительно совпадает с эпицентром.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследованию ионосферного отклика ударной волны, возникающей при запусках ракет и землетрясениях, посвящено много работ [1–4]. Научный интерес к этой проблеме обусловлен тем, что такие случаи можно трактовать как активные эксперименты в атмосфере Земли и использовать их для решения целого ряда задач физики ионосферы, ионосферного распространения радиоволн, физики атмосферных волн и т.д. Эти исследования имеют также и важный прикладной аспект, поскольку они позволяют обосновать надежные сигнальные признаки как естественных так и техногенных воздействий (запуски ракет, несанкционированные взрывы и подземные ядерные испытания, землетрясения), что необходимо для построения эффективной глобальной радиофизической системы обнаружения и локализации этих воздействий. Существующие глобальные системы подобного назначения в основном используют различные методы обработки инфразвуковых и сейсмических сигналов. Однако в связи с расширением географии, типов и непредсказуемости техногенных воздействий на окружающую среду до сих пор весьма актуальными остаются задачи повышения чувствительности обнаружения и достоверности определения параметров источников возмущений, в том числе и за счет независимых измерений всего спектра сигналов, генерируемых при воздействии. Кроме того, эти исследования могут оказаться полезными для оценки возможных экологических последствий

воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду [5].

Для решения указанных проблем необходимы достоверные сведения об основных параметрах ионосферного отклика ударной волны, таких как амплитуда и форма, период, фазовая и групповая скорость перемещения волнового пакета, а также угловые характеристики волнового вектора. Отметим, что в литературе для обозначения ионосферного отклика ударной волны используют термины, отличающиеся различной физической интерпретацией, в том числе термин ударно-акустическая волна (УАВ) [6]. В нашей работе для удобства обозначения мы будем использовать этот термин, несмотря на то, что он не отражает в полной мере физическую природу явления.

В литературе не раз отмечалось удивительное сходство детектируемых при ионосферном зондировании УАВ, генерируемых при запуске ракет, промышленных взрывах и землетрясениях. Однако имеется большой разброс данных об основных параметрах УАВ для всех этих событий. Период колебаний ионосферного отклика УАВ варьировался от 30 до 300 с, а скорость распространения – от 700 до 1200 м/с [6–10].

Отсутствие полных и достоверных данных о параметрах УАВ обусловлено в основном недостатками существующих экспериментальных методов и средств детектирования. Основной объем данных был получен путем измерения доплеровского смещения частоты при вертикальном и наклонном радиозондировании ионосферы в КВ ди-

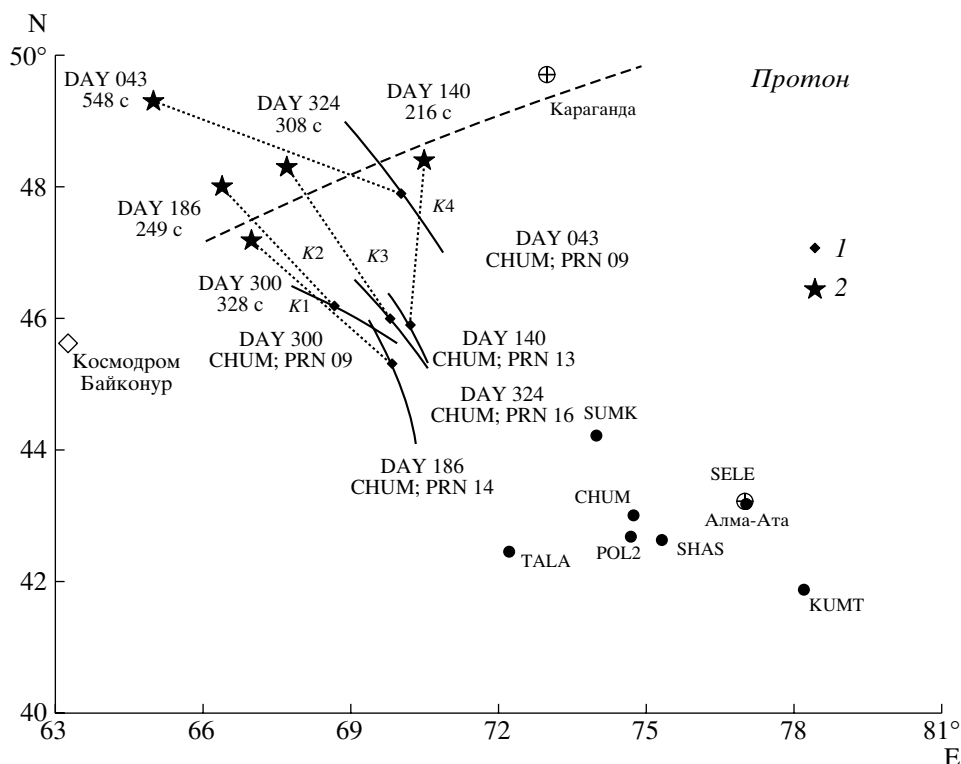


Рис. 1. Геометрия экспериментов при запусках ракет-носителей *Протон* с космодрома Байконур.

Штрих-пунктирная линия приблизительно соответствует горизонтальной проекции траектории полета ракеты с наклоном орбиты 51.6° .

Сплошные кривые – траектории движения подионосферных точек для каждого ИСЗ GPS на высоте $h_{\max} = 400$ км. 1 – положение подионосферных точек в момент t_p максимального отклонения ПЭС. 2 – отмечены определенное по данным GPS-решеток положение источника на высоте 100 км. Цифрами у звездочек обозначены соответствующие номера дней и запаздывание “включения” источника относительно момента старта. Прямые пунктирные линии, соединяющие предполагаемый источник и подионосферную точку, обозначают горизонтальную проекцию волнового вектора K . Жирными точками и крупным шрифтом отмечены положение и названия станций GPS, а мелким шрифтом рядом с траекториями – названия станции и номер PRN спутников GPS.

апазоне [6, 9, 11]. Чувствительность этого метода в ряде случаев оказывается достаточной для уверенного детектирования УАВ, однако возникают трудности с локализацией области генерации УАВ, обусловленные многоскачковым характером распространения КВ-сигнала.

Ряд экспериментальных данных о параметрах УАВ с использованием методов трансionoсферного зондирования УКВ радиосигналами геостационарных ИСЗ был получен при измерениях Фарадеевского вращения плоскости поляризации сигнала, которое пропорционально полному электронному содержанию (ПЭС) вдоль линии, соединяющей передатчик на спутнике и приемник [12–14].

Общим недостатком описанных методов при определении фазовой скорости УАВ является необходимость знания момента самого события, будь то промышленный взрыв, землетрясение или запуск ракеты, так как эта скорость вычисляется по задержке УАВ относительно момента

времени самого события, в предположении постоянства скорости вдоль трассы распространения, что далеко не соответствует действительности.

Для определения указанного выше более или менее полного набора параметров УАВ необходимо соответствующее пространственно-временное разрешение, которое не могут обеспечить существующие весьма редкие сети ионозондов, радиотрасс наклонного зондирования и радаров некогерентного рассеяния.

Новую эру в дистанционной диагностике ионосферы открывает развитие глобальной навигационной системы GPS (Global Positioning System) и создание на ее основе широко разветвленных сетей станций GPS, насчитывающих к февралю 2001 г. не менее 800 пунктов, данные которых поставляются в INTERNET. В ближайшее время эта сеть будет существенно расширена за счет интеграции с навигационной системой GLONASS [15]. В последнее время начата интенсивная разработ-

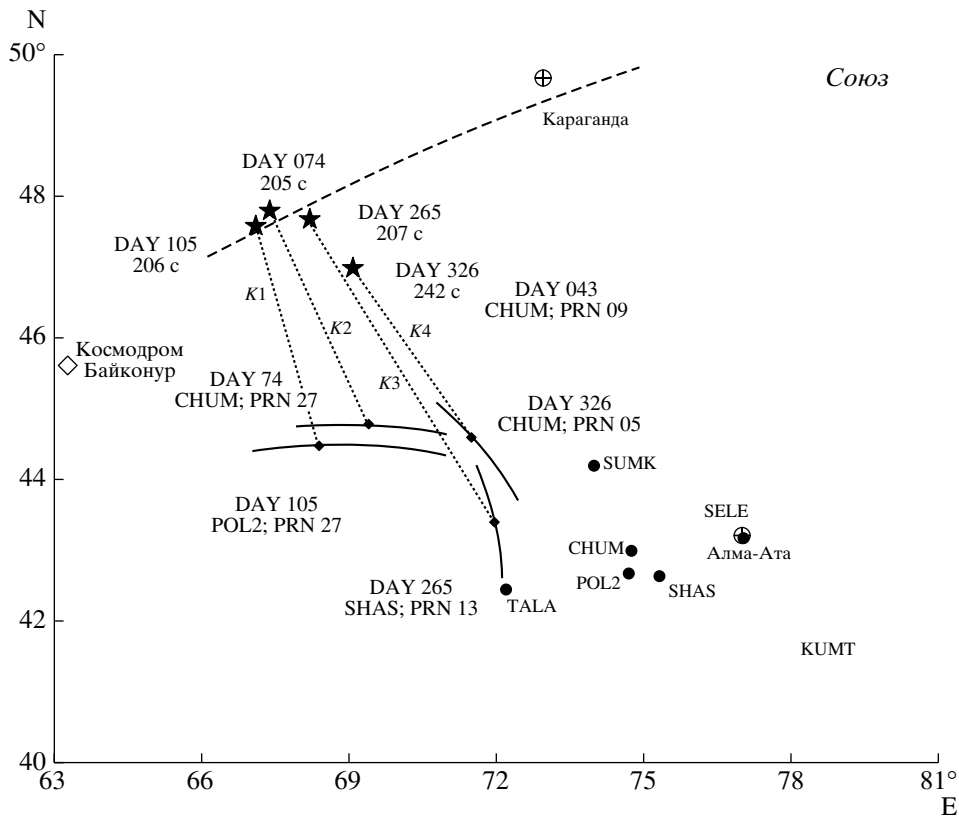


Рис. 2. Геометрия экспериментов при запусках ракет-носителей *Союз* с космодрома Байконур. Обозначения те же, что на рис. 1.

ка методов GPS детектирования ионосферного отклика мощных землетрясений [1], запусков ракет [16], наземных промышленных взрывов [7, 8]. В этих работах фазовую скорость УАВ определяли методом “кроссирования”, оценивая задержку времени прохода УАВ на подионосферные точки, соответствующие различным наблюдаемым в данный момент времени спутникам GPS. Однако точность такого метода невелика вследствие приблизительности определения высоты, на которой задаются подионосферные точки.

В работах [17, 18] разработан метод определения параметров УАВ (включая фазовую скорость, угловые характеристики волнового вектора УАВ, направление на источник и его положение) с помощью GPS-решеток, элементы которой могут быть выбраны из большого набора станций глобальной сети GPS. В отличие от известных радиофизических методов этот метод дает оценку параметров УАВ без априорных сведений о месте и времени события (запуски ракет, взрывы, землетрясения).

Целью настоящей работы является исследование ударно-акустических волн, генерируемых при запусках ракет и землетрясениях. В разделе 2 представлено описание геометрии экспериментов. Краткое изложение используемого метода

[17, 18] дано в разделе 3. Результаты измерений параметров УАВ на различных GPS-решетках при запусках ракет и во время землетрясений представлены в разделе 4. Раздел 5 посвящен обсуждению результатов эксперимента.

2. ГЕОМЕТРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В настоящей работе приводятся результаты определения основных параметров УАВ во время запуска ракет-носителей (РН) *Протон* и *Союз* с космодрома Байконур (45.6°N, 63.3°E), а также *Space Shuttle* с космодрома Kennedy Space Center (KSC – 28.5°N, 279.3°E в 1998–1000 г. (всего 11 запусков). Кроме того, аналогичные исследования проведены для двух землетрясений в Турции 17.VIII. и 12.XI. в 1999 г.

Несмотря на большое количество станций GPS-решеток для детектирования УАВ, генерируемых при запусках ракет, затрудняется тем, что трассы полета РН для обеих космодромов проходят или над Атлантическим океаном (РН *Space Shuttle*), или в малонаселенных районах Казахстана (РН *Протон* и *Союз*). Низкая плотность станций GPS характерна также для Турции. Тем не менее, удалось использовать достаточное для ре-

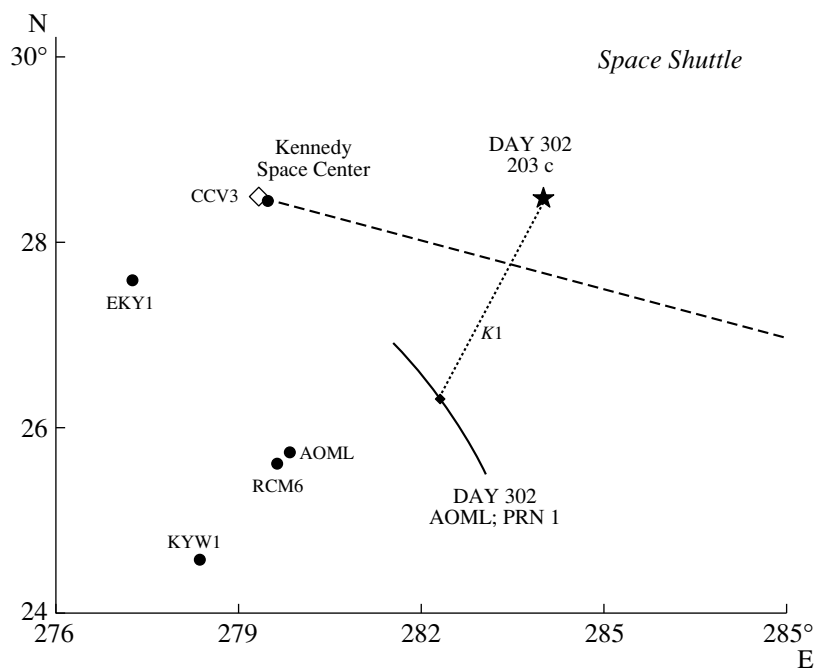


Рис. 3. Геометрия экспериментов при запусках ракет-носителей *Space Shuttle* (STS-95) с космодрома Kennedy Space Center.

ализации предложенного метода количество станций GPS.

На рис. 1 и рис. 2 представлена геометрия экспериментов при запусках РН *Протон* и *Союз* с космодрома Байконур. Штриховая линия приблизительно соответствует горизонтальной проекции траектории полета ракеты с наклоном орбиты $\psi = 51.6^\circ$ (<http://www.islaunch.com>). За недостатком места мы не приводим здесь координаты

станций, которые можно найти по адресу INTERNET: <http://lox.ucsd.edu>. Масштабирование осей координат выбрано из соображений примерного равенства линейных размеров вдоль широты и долготы.

На рис. 3 представлена геометрия эксперимента при запуске РН *Space Shuttle* с космодрома KSC (обозначения те же, что на рис. 1). 29.X.1998 (Day 302) со стартовой площадки KSC был запущен космический корабль *Space Shuttle Columbia* (STS-95).

Приведенные ниже сведения о запусках ракет с космодрома Байконур и KSC получены через INTERNET по адресам: <http://www.flatiday.com>; <http://www.spacelaunchnews.com>. Общие сведения об этих запусках приводятся в табл. 1 (включая момент старта t_0 по мировому времени UT, номер дня года, наклонение орбиты и уровень геомагнитной возмущенности по данным D_{st} -вариаций). Оказалось, что отклонение D_{st} для выбранных дней было вполне умеренным, что позволило надежно идентифицировать УАВ.

Геометрия экспериментов для землетрясений в Турции, которые произошли 17.VIII.1999 г. и 12.XI.1999 г., дана на рис. 4. Приведенные ниже сведения о землетрясениях получены через INTERNET по адресу (<http://earthquake.usgs.gov>). Общие сведения об этих землетрясениях приводятся в табл. 2 (включая момент основного толчка t_0 по мировому времени UT, положение эпицентра, глубина, магнитуда, а также уровень геомагнитной возмущенности по данным D_{st} -вариаций).

Таблица 1. Общие сведения о запусках ракет-носителей

Тип	Дата	t_0 UT	$\psi, ^\circ$	D_{st} нТ
<i>Протон</i>	20.XI.1988 (DAY 324)	06.40	51.6	-9
<i>Протон</i>	20.V.1999 (DAY 140)	22.30	51.6	-3
<i>Протон</i>	5.VII.199 (DAY 186)	13.32	51.6	+11
<i>Протон</i>	27.X.1999 (DAY 300)	16.16	51.6	-80
<i>Протон</i>	12.II.2000 (DAY 43)	09.10	51.6	-108
<i>Союз</i>	15.III.1999 (DAY 74)	03.06	51.6	-16
<i>Союз</i>	15.IV.1999 (DAY 105)	00.46	51.6	-3
<i>Союз</i>	22.IX.1999 (DAY 265)	14.33	51.6	+22
<i>Союз</i>	22.XI.1999 (DAY 326)	16.20	51.6	-25
<i>Chuttle</i>	17.IV.1998 (DAY 107)	18.19	39	-37
<i>Chuttle</i>	29.X.1998 (DAY 302)	19.19	28.5	-15

Таблица 2. Общие сведения о землетрясениях в Турции

Эпицентр	Дата	t_0 UT	Глубина, км	Магнитуда, mb Ms Mw	D_{st} , нТ
40.70°N, 29.99°E	17.VIII.1999 (DAY 229)	00:00:39	17	6.3 7.8 7.4	-14
40.79°N, 31.11°E	10.XI.1999 (DAY 316)	16:57:20	10	6.5 7.5 7.1	-44

Оказалось, что как и для запусков ракет, отклонение D_{st} вариаций для данных дней было вполне умеренным, что позволило надежно идентифицировать УАВ.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УДАРНО-АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Технология GPS предоставляет возможность детектирования волновых возмущений в ионосфере на основе фазовых измерений ПЭС I [1, 7, 16, 19]:

$$I = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + \text{const} + nL], \quad (1)$$

где $L_1 \lambda_1$ и $L_2 \lambda_2$ – приращения фазового пути радиосигнала, вызванные задержкой фазы в ионосфере (м); L_1, L_2 – число полных оборотов фазы, а λ_1, λ_2 – длины волн (м) для частот f_1 и f_2 ; const – некоторый неизвестный начальный фазовый путь (м); nL – ошибка в определении фазового пути (м).

Измерения фазы в системе GPS производятся с высокой степенью точности, при которой ошибка в определении ПЭС при 30-с интервалах усреднения не превышает 10^{14} м², хотя начальное значение ПЭС и остается неизвестным [19]. Это позволяет детектировать неоднородности ионизации и волновые процессы в ионосфере в широком диапазоне значений амплитуд (до 10^{-4} от суточного изменения ПЭС) и периодов (от суток до 5 мин). Ниже мы будем использовать общепринятую в литературе единицу ПЭС TECU, равную 10^{16} м⁻².

В ряде случаев более удобным для детектирования и определения задержки ионосферного отклика ударной волны оказывается вычисление из полученных по формуле (1) рядов ПЭС доплеровского смещения частоты F . Такой подход полезен также для сравнения характеристик отклика ПЭС по данным GPS с соответствующими данными, полученными при анализе сигналов геостационарных ИСЗ в УКВ диапазоне, а также при детектировании ударной волны в КВ диапазоне. В достаточном для цели нашего исследования приближении соответствующая зависимость получена [20]:

$$F = 13.5 \times 10^{-8} I'_t / f, \quad (2)$$

где I'_t означает производную ПЭС по времени. Соответствующие результаты анализа вариаций $F(t)$, вычисленных для “приведенной” частоты 136 МГц, обсуждаются в разделе 4.

Соответствие полученных при трансionoсферном зондировании пространственно-временных характеристик фазы в плоскости антенной системы локальным характеристикам возмущений в ионосфере детально рассматривалось в целом ряде публикаций [9, 21–23] и не затрагивается в данной работе. Наиболее важным выводом этих работ является то, что как и для широко используемой модели “плоского фазового экрана” детектируемые при трансionoсферном зондировании возмущения ПЭС $\Delta I(x, y, t)$ полностью повторяют горизонтальную часть соответствующе-

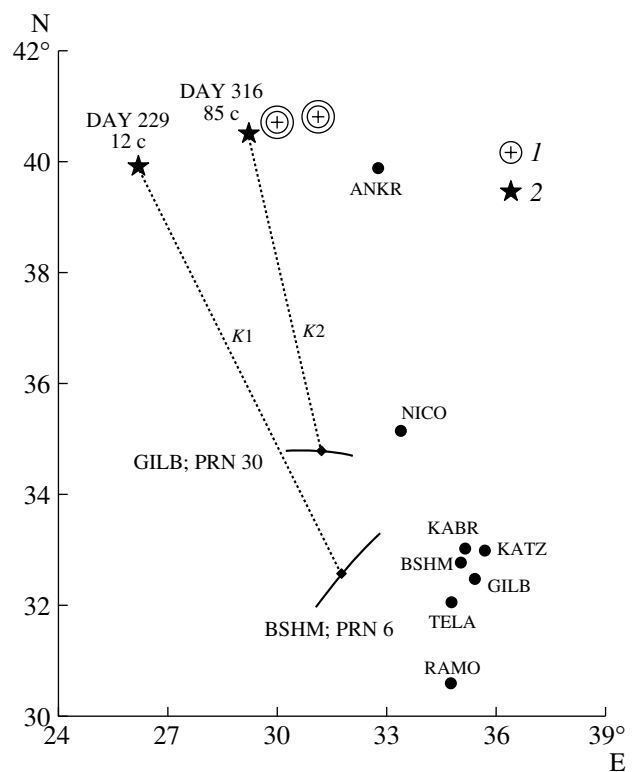


Рис. 4. Геометрия эксперимента во время землетрясения 17.VIII. и 12.XI.1999 г. в Турции. 1 – положения эпицентров землетрясений, 2 – отмечено определенное по данным GPS-решеток положение источника на уровне Земли (0 км).

го локального возмущения электронной концентрации $\Delta N(x, y, z, t)$ и могут быть использованы в экспериментах по измерению азимута перемещения волнового возмущения ПЭС.

Однако амплитуда отклика ПЭС подвержена сильной ракурсной зависимости, обусловленной интегральным характером трансионосферного зондирования. Максимальный отклик соответствует волновым возмущениям, волновой вектор \mathbf{K}_t которых перпендикулярен направлению \mathbf{r} на ИСЗ GPS. Условие для угла места θ и азимута α произвольного вектора \mathbf{K}_t , перпендикулярного направлению \mathbf{r} , имеет вид:

$$\theta = \arctg(-\cos(\alpha_s - \alpha)/\tg\theta_s), \quad (3)$$

где θ_s и α_s – угол места и азимут вектора \mathbf{r} . Формула (3) используется нами для определения угла места θ волнового вектора возмущения \mathbf{K}_t по известному азимуту α .

Мы определяем скорость и направление перемещения фазового фронта в рамках какой-либо модели этой картины, адекватный выбор которой имеет решающее значение. В простейшей форме пространственно-временные вариации ПЭС в каждый данный момент времени t можно представить в виде единичной плоской бегущей волны [24]:

$$\Delta I(t, x, y) = \delta \sin(\Omega t - K_x x - K_y y - \varphi_0), \quad (4)$$

где δ , K_x , K_y , Ω – амплитуда, x - и y -проекции волнового вектора \mathbf{K} и угловая частота возмущения, соответственно; $T = 2\pi/\Omega$ и $\Lambda = 2\pi/|K|$ – его период и длина волны; φ_0 – начальная фаза возмущения. Вектор \mathbf{K} является горизонтальной проекцией полного вектора \mathbf{K}_t .

Здесь предполагается, что при малых пространственно-временных приращениях (расстояния между пунктами GPS-решетки меньше характерного пространственного масштаба изменений ПЭС, а интервал времени между отсчетами меньше соответствующего временного масштаба) влиянием вторых производных можно пренебречь. Этим требованиям удовлетворяют все приведенные ниже варианты выбора GPS-решетки.

Изложим кратко последовательность процедур обработки данных. Из большого числа станций GPS выбираются три (A, B, C) пункта, расстояния между которыми не превышают величины порядка половины ожидаемой длины волны Λ возмущения. Пункт B принимается за центр топосферической системы отсчета, ось x которой направлена на восток, ось y – на север. Приемные пункты в данной системе отсчета имеют координаты $S(x_A, y_A)$, $b(0, 0)$, $C(x_C, y_C)$. Такая конфигурация приемников GPS представляет собой GPS-ре-

шетку с минимально необходимым количеством элементов. В районах с густой сетью GPS-пунктов мы можем получить целый набор GPS-решеток различной конфигурации, что дает возможность проверить достоверность получаемых данных; в настоящей работе мы использовали такую возможность.

Первичными данными являются ряды “наклонного” значения ПЭС $I_A(t)$, $I_B(t)$, $I_C(t)$, а также соответствующие им ряды значений угла места $\theta_s(t)$ и азимута $\alpha_s(t)$ луча на ИСЗ, рассчитанные по разработанной нами программе CONVTEC, которая преобразует полученные по сети INTERNET стандартные для системы GPS RINEX-файлы. Для определения характеристик УАВ выбираются непрерывные ряды измерений $I_A(t)$, $I_B(t)$, $I_C(t)$ длиной не менее одного часового интервала, включающего в себя время события.

С целью исключения вариаций регулярной ионосферы, а также трендов, внесенных движением спутника, используется процедура удаления тренда с предварительным сглаживанием исходного ряда с выбранным временным окном. Эта процедура более приемлема для выделения сигнала типа одиночного импульса (N -волны), чем часто используемый полосовой фильтр [1, 7, 8, 14, 16]. Недостатком полосового фильтра являются запаздывание и колебательный характер отклика, не позволяющий точно воспроизвести форму N -волны.

Ряды значений угла места $\theta_s(t)$ и азимута $\alpha_s(t)$ луча на ИСЗ используются для определения координат подионосферной точки, а также для вычисления угла места θ волнового вектора возмущения \mathbf{K}_t по известному азимуту α (формула (3)).

Наиболее достоверные результаты определения параметров УАВ соответствуют высоким значениям углов места $\theta_s(t)$ луча на ИСЗ, поскольку при этом эффекты сферичности становятся достаточно малыми. Кроме того, нет необходимости в пересчете “наклонного” значения ПЭС $I(t)$ в “вертикальное” значение. В нашем случае все результаты получены для углов места $\theta_s(t)$ больше 30° .

Поскольку расстояние между элементами GPS-решетки (десятки и единицы сотен км) много меньше расстояния до ИСЗ GPS (более 20000 км), геометрия решетки на высоте подионосферной точки h_{\max} (порядка 400 км) подобна геометрии решетки на уровне земной поверхности.

На рис. 5 приведены типичные временные зависимости “наклонного” ПЭС $I(t)$ на одном из трех пунктов GPS-решетки в районе космодрома Байконур в дни стартов РН *Протон* (жирная кривая), за день до и после старта (тонкие кривые) 5.VII.1999 г. – (а), и *Союз* 15.IV.1999 г. – (г); для

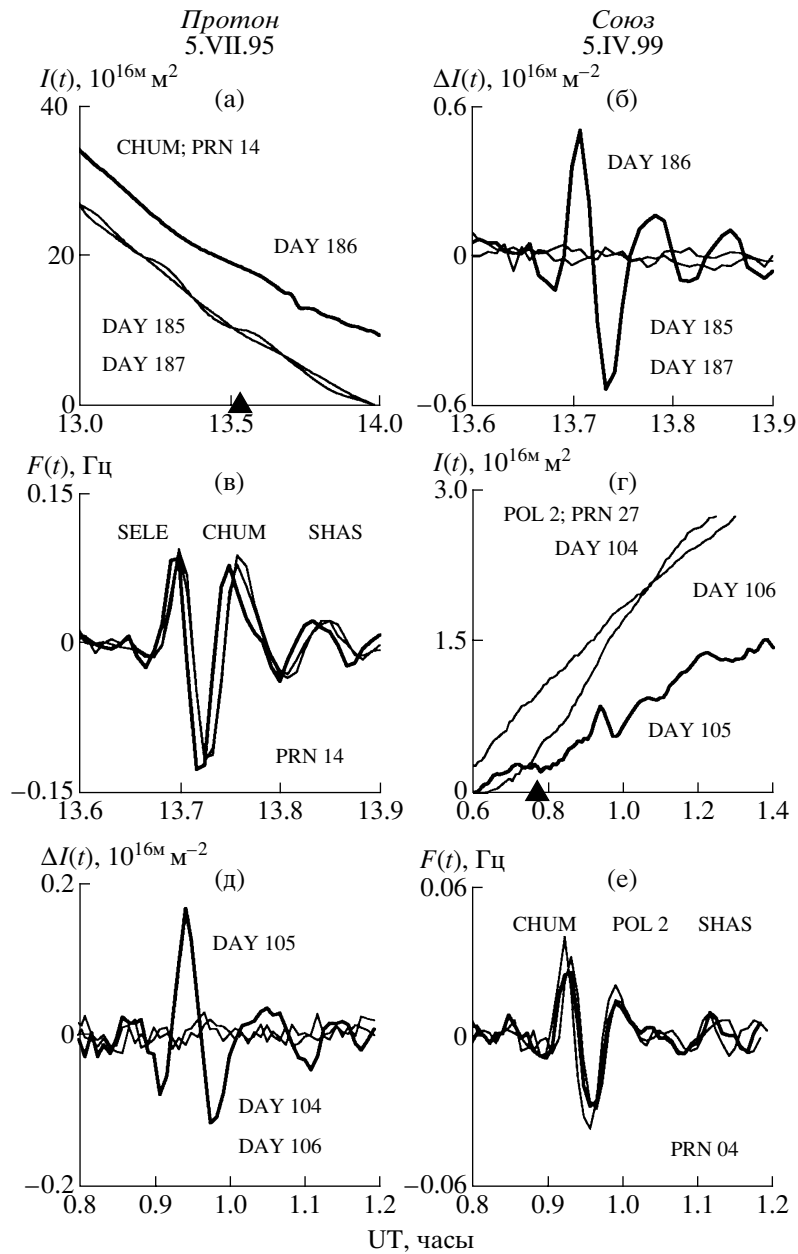


Рис. 5. Временные зависимости “наклонного” ПЭС $I(t)$.

тех же дней, но вариации ПЭС $\Delta I(t)$ со снятым линейным трендом и сглаживанием с временным окном 5 мин – (б, д); вариации доплеровского смещения частоты $F(t)$, “приведенные” к частоте зондирующего сигнала 136 мГц, для трех пунктов решетки в дни старта – (в, е). На всех панелях обозначены номера дней, названия станций GPS и номера PRN спутников GPS. Стрелочки у оси абсцисс отмечают момент t_0 времени старта.

Из рис. 5б видно, что на фоне медленных изменений ПЭС уверенно выделяются обусловленные распространением УАВ быстрые колебания N -

образной формы с характерным периодом T около 300 с. Амплитуда колебаний (порядка 0.5 TECU) существенно превышает интенсивность флуктуаций ПЭС в “фоновые” дни. Вариации доплеровского смещения частоты $F(t)$ (рис. 5в) для разнесенных пунктов (SELE, CHUM, SHAS) хорошо коррелированы.

С учетом хорошего отношения “сигнал/шум” (больше 1) горизонтальная проекция фазовой скорости V_h определяется нами при известных координатах пунктов A, B, C решетки по относительным временным сдвигам момента времени t_p

максимального отклонения ПЭС. Предварительно измеренные сдвиги подвергаются линейному преобразованию с целью вычисления сдвигов для пунктов, разнесенных относительно центрального пункта на север N и на восток E . Затем вычисляются E - и N -компоненты V_x и V_y , а также направление α в диапазоне углов 0° – 360° и модуль V_h горизонтальной компоненты фазовой скорости УАВ:

$$\alpha = \arctg(V_y/V_x) \quad (5)$$

$$V_h = |V_x V_y| (V_x^2 + V_y^2)^{-1/2},$$

где V_y, V_x – скорости пересечения фазовым фронтом осей x и y . Ориентация α волнового вектора \mathbf{K} , совпадающая с азимутом перемещения фазового фронта УАВ, вычисляется однозначно в диапазоне 0° – 360° при условии, что $\arctg(V_y/V_x)$ вычисляется с учетом знака числителя и знаменателя.

Изложенный метод определения фазовой скорости УАВ не учитывает поправку на перемещение ИСЗ на орбите, поскольку полученные ниже оценки V_h как минимум на порядок превышают скорость движения подионосферной точки на высоте h_{\max} для углов места $\theta_s > 30^\circ$ [24].

Для того, чтобы сравнить полученные нами оценки фазовой скорости УАВ с обычно применяемым методом измерения этой величины, по запаздыванию $\Delta t = t_p - t_0$ и известной длине пути между стартовой площадкой и подионосферной точкой мы рассчитали также среднюю скорость УАВ V_a .

В работе [22] было показано, что для гауссовой модели распределения ионизации амплитуда M возмущения ПЭС определяется ракурсным углом γ между векторами \mathbf{K} , и \mathbf{r} , а также отношением длины волны возмущения Λ к полутолщине максимума ионизации h_d :

$$M \propto \exp\left(-\frac{\pi^2 h_d^2 \cos^2 \gamma}{\Lambda^2 \cos^2 \theta_s}\right). \quad (6)$$

В нашем случае (см. ниже) для фазовой скорости порядка 1 км/с и периода порядка 200 с длина волны Λ оказывается сравнимой со значением полутолщины максимума ионизации h_d . При значениях углов места θ_s , равных $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$, ширина “диаграммы направленности” $M(\gamma)$ на уровне 0.5 равна соответственно $25^\circ, 22^\circ$ и 15° . Если h_d превышает длину волны Λ в 2 раза, то ширина диаграммы направленности сужается до величин соответственно $14^\circ, 10^\circ$ и 8° .

Ширина диаграммы направленности достаточно мала, поэтому ракурсное условие (3) ограничивает число траекторий луча на ИСЗ, для кото-

рых возможно уверенное детектирование отклика УАВ на фоне шумов (вблизи значений углов $\gamma = 90^\circ$). С другой стороны, с использованием формулы (3) можно определить угол места θ волнового вектора \mathbf{K} , ударной волны при известном значении азимута α [24]. Тогда модуль фазовой скорости V_t можно определить как

$$V_t = V_h \cos(\theta). \quad (7)$$

Приведенные выше значения ширины $M(\gamma)$ определяют ошибку вычисления углов места θ (при указанных условиях порядка 20°), и как следствие, координат предполагаемого источника (см. ниже).

Область ионосферы, формирующая основной вклад в вариации ПЭС, расположена в окрестности максимума F -области ионосферы, что и определяет высоту h_{\max} подионосферной точки. При выборе h_{\max} следует учесть, что уменьшение с высотой концентрации электронов выше главного максимума слоя F_2 происходит существенно медленнее, чем ниже максимума. Поскольку распределение концентрации с высотой является по существу “весовой функцией” отклика ПЭС на волновое возмущение [22], в качестве h_{\max} имеет смысл использовать величину, превышающую истинную высоту максимума слоя h_{F_2} на величину порядка 100 км. Значение h_{F_2} меняется в достаточно широком диапазоне (250–350 км) в зависимости от времени суток и ряда геофизических факторов, которые при необходимости могут быть учтены при использовании соответствующих дополнительных экспериментальных данных и современных моделей ионосферы. Ниже во всех расчетах мы принимали $h_{\max} = 400$ км.

В первом приближении можно считать, что именно на этой высоте расположен воображаемый детектор, регистрирующий ионосферный отклик УАВ в вариациях ПЭС. “Горизонтальный размер” области детектирования, который можно оценить из скорости перемещения подионосферной точки вследствие движения ИСЗ GPS (порядка 70–150 м/с) и периода УАВ (порядка 200 с – см. раздел 4) не превышает 20–40 км, что существенно меньше “вертикального размера”.

Из данных GPS мы можем определить координаты X_s и Y_s подионосферной точки в горизонтальной плоскости XOY топоцентрической системы координат с центром в пункте $B(0, 0)$ в момент максимального отклонения ПЭС, вызванного приходом в эту точку УАВ. Поскольку нам известны угловые координаты θ и α волнового вектора \mathbf{K}_t , то можно определить координаты точки пересечения этого вектора с горизонтальной плоскостью $X'OY'$ на высоте h_ω предполагаемого источника. В предположении прямолинейного распространения УАВ от источника до подионо-

Таблица 3. Запуски РН Протон и Союз с космодрома Байконур

T, c	$A_J, TECU$	$A_F, Гц$	$\theta, ^\circ$	$\alpha, ^\circ$	$V_h, м/с$	$V_l, м/с$	$V_\alpha, м/с$	$\lambda_\omega, ^\circ$	$\Phi_\omega, ^\circ$	$\Delta t_\omega, c$
<i>Протон, 20.XI.1998</i>										
300	0.09	0.022	52.8	163	1338	809	890	48.3	67.7	308
<i>Протон, 20.V.1999</i>										
340	0.05	0.01	35.4	166	1556	1261	740	48.4	70.5	216
<i>Протон, 5.VII.1999</i>										
305	0.5	0.13	57.3	157	1882	1005	966	48.0	66.4	249
<i>Протон, 27.X.1999</i>										
285	0.08	0.02	47.8	158	1673	1125	791	47.2	67.0	328
<i>Протон, 12.II.2000</i>										
260	0.034	0.012	65.0	158	1461	616	616	49.3	65.0	548
<i>Союз, 15.III.1999</i>										
306	0.2	0.04	41.5	160	1733	1251	1017	47.8	67.4	205
<i>Союз, 15.IV.1999</i>										
295	0.2	0.043	41.7	166	1627	1200	818	47.6	67.1	206
<i>Союз, 22.IX.1999</i>										
275	0.05	0.01	28.6	150	1078	945	880	47.7	68.2	207
<i>Союз, 22.XI.1999</i>										
276	0.03	0.008	38.3	140	1240	972	966	47.0	69.1	242

Таблица 4. Запуски РН Shuttle и землетрясения в Турции

T, c	$A_J, TECU$	$A_F, Гц$	$\theta, ^\circ$	$\alpha, ^\circ$	$V_h, м/с$	$V_l, м/с$	$V_\alpha, м/с$	$\lambda_\omega, ^\circ$	$\Phi_\omega, ^\circ$	$\Delta t_\omega, c$
<i>Shuttle, 17. IV.1998</i>										
263	0.57	0.16	30.5	140	3590	3094	1255	36.9	284	–
<i>Shuttle, 29.X.1999</i>										
218	0.27	0.05	34.4	214	1529	1263	734	28.6	284	203
<i>Турция, 17.VIII.1999</i>										
354	0.14	0.04	24.1	156	1286	1173	870	39.9	26.2	12
<i>Турция, 12.XI.1999</i>										
195	0.079	0.023	37.6	186	1478	1157	812	40.5	29.2	85

сферной точки и без учета сферичности координаты X_ω и Y_ω источника в топоцентрической системе координат можно определить как

$$X_\omega = X_p - (h_{\max} - h_\omega) \frac{\cos \theta \sin \theta}{\sin \theta}, \quad (8)$$

$$Y_\omega = Y_p - (h_{\max} - h_\omega) \frac{\cos \theta \cos \theta}{\sin \theta}. \quad (9)$$

Полученные таким образом координаты X_ω и Y_ω легко пересчитываются в значения широты и долготы (Φ_ω и λ_ω) источника.

Для УАВ, генерируемых при землетрясениях, промышленных взрывах и подземных испытаниях ядерных устройств, h_ω выбирается равной 0 (источник на уровне земной поверхности). При регистра-

ции УАВ, возникающих при запусках мощных ракет, область генерации УАВ может находиться на высотах h_ω порядка 100 км и выше [14, 25].

В этом приближении мы не учитываем возможную рефракцию при распространении УАВ от источника до высоты h_{\max} . В некоторых работах [8] эта проблема решается путем проведения траекторных расчетов с использованием стандартных процедур “ray tracing” и моделей нейтральной атмосферы. При этом расчет траекторий лучей производился от источника. В нашем случае также возможно проведение таких расчетов, но не от источника, а от подионосферной точки (обратная траектория).

Если известны координаты подионосферной точки и источника возмущения, среднее значение

скорости распространения УАВ на пути между источником и подионосферной точкой и момент прихода УАВ в эту точку, то в предположении прямолинейного распространения легко оценить запаздывание Δt_ω “включения” предполагаемого источника УАВ относительно времени события. В приведенных ниже оценках Δt_ω средняя скорость распространения принята равной 700 м/с [7, 14]. Отметим, что под моментом “включения” источника мы понимаем момент времени максимального возмущения фонового состояния среды при генерации УАВ.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Таким образом, в результате использования описанных в разделе 3 преобразований мы получаем следующие параметры, определенные по вариациям ПЭС и характеризующие УАВ: t_p – момент времени максимального отклонения ПЭС; Δt – запаздывание t_p относительно t_0 ; T – период УАВ; A_I – амплитуда возмущения ПЭС; A_F – амплитуда максимального доплеровского смещения частоты на “приведенной” частоте 136 МГц; α и θ – азимут и угол места волнового вектора \mathbf{K}_i ; V_h и V_t – горизонтальная компонента и модуль фазовой скорости; V_a – средняя скорость волны, вычисленная по задержке Δt и известной длине пути между эпицентром землетрясения или местом запуска и подионосферной точкой; ϕ_ω и λ_ω – широта и долгота источника на уровне земли для землетрясения и на высоте 100 км для запусков ракет; Δt_ω – запаздывание “включения” предполагаемого источника УАВ относительно момента времени самого события.

Следует заметить, что оценки A_I и A_F получены после фильтрации рядов “наклонного” ПЭС, поэтому эквивалентные оценки для “вертикального” ПЭС меньше с фактором, меняющимся от 1 до 2 в зависимости от угла места θ_s луча на ИСЗ.

Для того, чтобы убедиться в достоверности определения основных параметров формы и динамики УАВ для анализируемых событий, мы выбрали различные комбинации трех пунктов из доступных нам наборов станций GPS и обработали эти данные с одними и теми же параметрами обработки. Соответствующие средние значения всех величин приведены в табл. 3 и 4 и на рис. 1–4 (положение источника УАВ).

Сплошными кривыми на рис. 1–4 обозначены траектории движения подионосферных точек для каждого ИСЗ GPS на высоте $h_{\max} = 400$ км. Зачерненные ромбики на траекториях отмечают координаты подионосферных точек в моменты t_p максимального отклонения ПЭС. Звездочками отмечены определенные по данным GPS-решеток положение источников УАВ. Цифрами у звездочек

обозначены соответствующие номера дней. Прямые пунктирные линии, соединяющие предполагаемый источник и подионосферную точку, обозначают горизонтальную проекцию соответствующих волновых векторов \mathbf{K}_i .

Рассмотрим результаты анализа ионосферного эффекта УАВ во время запуска РН *Протон* 5.VII.1999 г., полученные на решетке (SELE, CHUM, SHAS) для PRN14 (рис. 5 слева).

Запаздывание отклика УАВ относительно времени старта равно в данном случае 12 мин. УАВ имеет вид N -волны с периодом T около 300 с и амплитудой $A_I = 0.5$ TECU, что на порядок превышает флуктуации ПЭС для фоновых дней. Для данного интервала времени характерен весьма низкий уровень геомагнитной активности (11 нТ).

Амплитуда максимального доплеровского смещения частоты A_F на “приведенной” частоте 136 МГц оказалась равной 0.12 Гц. С учетом того, что смещение F обратно пропорционально квадрату частоты зондирования [20], это соответствует доплеровскому смещению на рабочей частоте 13.6 МГц эквивалентной трассы наклонного зондирования около $A_F = 12$ Гц.

Азимут и угол места α и θ волнового вектора \mathbf{K}_i , горизонтальная проекция которого отмечена на рис. 1 пунктирной линией с пометкой \mathbf{K}_1 , равны соответственно 153° и 59° . Горизонтальная компонента и модуль фазовой скорости оказались равными $V_h = 1808$ м/с и $V_t = 931$ м/с. Координаты источника на высоте 100 км определены как $\phi_\omega = 48^\circ$ и $\lambda_\omega = 66^\circ$. Запаздывание “включения” источника УАВ Δt_ω относительно момента старта составило 264 с.

Аналогичные результаты для решетки (CHUM, POL2, SHAS) и PRN27 получены и для запуска РН *Союз* 15.IV.1999 г. Они соответствуют проекции вектора \mathbf{K}_1 на рис. 2, временным зависимостям рис. 5.

Сравнение данных для других штатных запусков РН *Протон* и *Союз* (табл. 3; приведены средние значения), показало достаточную близость параметров УАВ независимо от типа ракет, уровня геомагнитной возмущенности, сезона и местного времени. Показательным является также небольшой разброс определенных нами координат источников УАВ (см. табл. 3 и рис. 1, 2). Следует отметить, что для запусков РН с космодрома Байконур волновой вектор УАВ \mathbf{K} оказался практически перпендикулярным к направлению горизонтальной проекции траектории РН.

Рассмотрим результаты анализа ионосферного эффекта УАВ во время запуска РН *Space Shuttle* 29.X.1998 г. (табл. 4), полученные на решетке (AOML, KYW1, EKY1) для PRN01 (рис. 6).

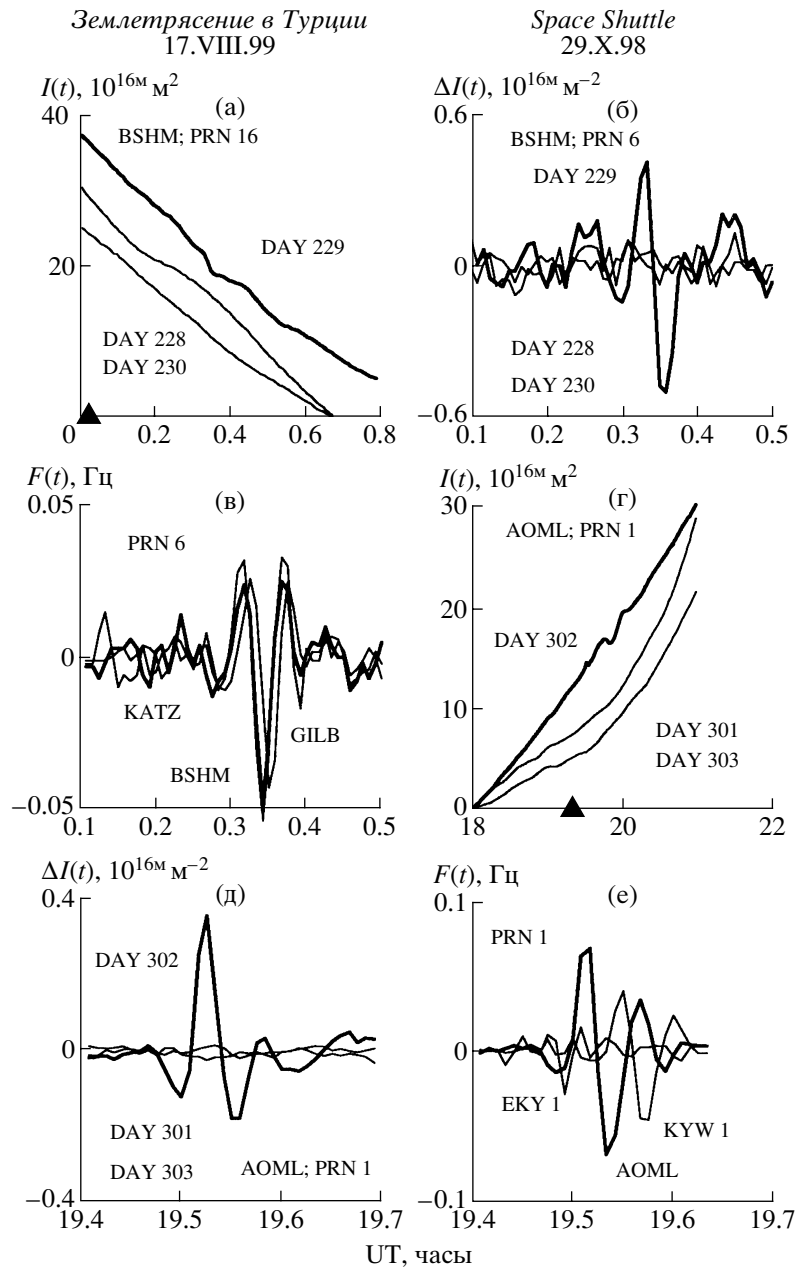


Рис. 6

Так же, как и для запусков РН *Протон*, запаздывание отклика УАВ относительно времени старта составляет 12 мин. УАВ имеет вид *N*-волны с периодом *T* около 210 с и амплитудой $A_I = 0.3$ ТЕСУ, что на порядок превышает флуктуации ПЭС для фоновых дней. Амплитуда максимального доплеровского смещения частоты A_F на “приведенной” частоте 136 МГц оказалась равной 0.07 Гц.

Азимут и угол места α и θ волнового вектора \mathbf{K}_r , горизонтальная проекция которого отмечена на рис. 3 пунктирной линией с пометкой \mathbf{K}_1 , рав-

ны соответственно 214° и 34.6° . Горизонтальная компонента и модуль фазовой скорости оказались равными $V_h = 1502$ м/с и $V_f = 1235$ м/с. Эти величины близки к аналогичным значениям для РН *Протон* и *Союз*. Координаты источника на высоте 100 км определены как $\phi_\omega = 27.4^\circ$ и $\lambda_\omega = 283^\circ$. Запаздывание “включения” источника УАВ Δt_ω относительно момента старта составляет 200 с.

Аналогичные результаты для решетки (CCV1, RYW2, AOML) и PRN15 получены и для запуска 17.IV.1998 г. (табл. 4). Можно отметить только,

что амплитуда УАВ была в 3 раза больше, чем для запуска 29.X.1998 г.

рассмотрим результаты анализа ионосферного эффекта УАВ во время землетрясения 17.VI.II.1999 г., полученные на решетке (GULB, BSHM, KATZ) для PRN 06 (рис. 6). Средние значения приведены в табл. 4.

Запаздывание отклика УАВ относительно времени землетрясения равно в данном случае 20 мин. УАВ имеет вид N -волны с периодом T около 360 с и амплитудой $A_I = 0.12$ TECU, что на порядок превышает флуктуации ПЭС для фоновых дней. Следует отметить, однако, что и для данного интервала времени характерен весьма низкий уровень геомагнитной активности (-14 нТ).

Амплитуда максимального доплеровского смещения частоты A_F на “приведенной” частоте 136 МГц оказалась равной 0.04 Гц. Это соответствует доплеровскому смещению на рабочей частоте 13.6 МГц эквивалентной трассы наклонного зондирования около $A_F = 4$ Гц.

Азимут и угол места α и θ волнового вектора \mathbf{K}_r , горизонтальная проекция которого отмечена на рис. 4 пунктирной линией с пометкой \mathbf{K}_1 , равны соответственно 154° и 26° . Горизонтальная компонента и модуль фазовой скорости оказались равными $V_h = 1307$ м/с и $V_t = 1174$ м/с. Координаты источника на высоте 0 км определены как $\phi_\omega = 39.1^\circ$ и $\lambda_\omega = 25.9^\circ$. Запаздывание “включения” источника УАВ Δt_ω относительно момента начала землетрясения составило 12 с.

Аналогичные результаты получены и для землетрясения 12.XI.1999 г. Они соответствуют проекции векторов \mathbf{K}_2 на рис. 4 и средним данным, приведенным в табл. 4. Можно отметить только, что амплитуда УАВ была несколько меньше, чем для землетрясения 17.VIII.1999 г. При повышенном уровне геомагнитной активности (-44 нТ) это привело к меньшему, чем для 17.VII.1999 г., отношению “сигнал/шум”, что не помешало, однако, получить надежные оценки параметров УАВ.

Сравнение данных для обеих землетрясений показало достаточную близость параметров УАВ независимо от уровня геомагнитной возмущенности, сезона и местного времени.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Остановимся теперь на кратком обсуждении основных результатов и сравнении их с данными других авторов. В рамках данной работы мы сознательно избегаем физической интерпретации полученных результатов, поскольку не обладаем информацией о динамике и энергетике запусков РН *Протон*, *Союз* и *Space Shuttle*, а также о моде-

ли излучения УАВ во время землетрясения. Наша задача – получение более достоверных и надежных данных, реализующее новые возможности глобального мониторинга GPS.

Особо следует отметить большое сходство детектируемых при ионосферном зондировании УАВ, генерируемых при запуске ракет и землетрясениях. Оказалось, что несмотря на различие характеристик и динамики воздействий на ионосферу во время запусков ракет и землетрясениях, местного времени, сезона и уровня геомагнитной возмущенности, для всех событий ионосферный отклик носит характер N -волны. Период УАВ T равен 270–360 с, а амплитуда превышает с.к.о. фоновых флуктуаций ПЭС в этом диапазоне периодов в спокойный и умеренных геомагнитных условиях как минимум в 2–5 раз.

Наши измерения периода и амплитуды отклика УАВ хорошо согласуются с результатами измерений доплеровского смещения частоты в КВ диапазоне во время запусков РН *Space Shuttle* 28.II.1990 г. и 28.IV.1991 г. [11], а также с аналогичными оценками максимального смещения F , полученными [25, 26] на наклонных КВ радиотрассах во время запусков РН с космодрома Байконур. Они близки и к оценкам [14], полученным при радиопросвечивании ионосферы УКВ сигналом геостационарного ИСЗ MARECS-B2 во время запусков РН *Space Shuttle* 18.X.1993 г. (STS-58) и 3.II.1994 г. (STS-60).

По измерениям [16] во время запуска *Space Shuttle* (STS-58) 18.X.1993 г. регистрировались две серии колебаний ПЭС, первая из которых также имела форму N -волны с максимальной амплитудой 0.25 TECU, что также согласуется с нашими данными.

В литературе отмечалось, что УАВ подобной формы и близкой амплитуды детектировались во время мощных промышленных взрывов [7–10, 25, 27].

Как уже отмечалось во Введении, отдельные исследования приводят заметно отличающиеся значения скорости перемещения УАВ – вплоть до тысяч м/с, что выходит за пределы значений скорости звука на высотах распространения УАВ в атмосфере. По данным обзора [28] скорость распространения ионосферного отклика УАВ, зарегистрированного при запуске ракет миссии *Apollo*, варьировалась от 600 до 1670 м/с.

В [29] высказано предположение, что возникающая при полете ракеты ударная волна разделяется в ионосфере на высоте порядка 160 км на ионно-акустическую (со скоростью до 1.3 км/с) и нормальную акустическую моду (скорость до 500 м/с). Различие в скоростях распространения первого и второго возмущения, наблюдавшееся во

время запусков *Apollo-14* и *Apollo-15* на одном и том же расстоянии 1440 км от места старта, объясняется различием атмосферных условий и путей распространения волн из-за сезонных вариаций ионосферы.

Описаны результаты наблюдения долго-периодных волн [30] над станцией некогерентного рассеяния в Агесибо во время запуска *Space Shuttle* (STS-4) 27.VI.1982 г. На большом расстоянии от трассы (до 1000 км) групповая скорость распространения волны оказалась равной 600–700 м/с. По данным GPS измерений [16] фазовая скорость УАВ на высотах ионосферы оказывается порядка 1000–1300 м/с.

Общим недостатком известных методов при определении фазовой скорости УАВ является необходимость знания момента запуска ракеты, так как эта скорость вычисляется по задержке УАВ относительно времени старта в предположении постоянства скорости вдоль трассы распространения, что далеко не соответствует действительности. Кроме того, в этих работах по существу определялась только горизонтальная компонента фазовой скорости V_h . При различных значениях угла места волнового вектора \mathbf{K}_t скорость V_h соответствует заметно отличающимся значениям модуля фазовой скорости V_t .

С использованием предложенного в настоящей работе метода появилась возможность определения угловых характеристик волнового вектора \mathbf{K}_t и соответственно, оценки V_t . По нашим данным (табл. 3 и 4) угол места волнового вектора УАВ менялся в пределах 30–60°, а фазовая скорость УАВ от 90 до 1200 м/с. Мы определяем фазовую скорость перемещения линии равного ПЭС на высоте максимума F -области ионосферы, которая вносит основной вклад в изменения полного электронного содержания (ПЭС) между приемником и ИСЗ GPS и соответствует области максимальной чувствительности метода. Поскольку V_t близка к скорости звука на этих высотах [7, 14], это позволяет идентифицировать звуковую природу возмущения ПЭС.

Вычисленное без учета рефракционных поправок положение источника УАВ соответствует участку траектории РН на расстоянии не менее 700–900 км от стартовой площадки для РН Протон или Союз (рис. 1, 2) и не менее 200–500 км для РН *Space Shuttle* (рис. 3). Это согласуется с величиной запаздывания Δt_{ω} “включения” источника, которое составляет 195–300 с для РН *Протон* и *Союз* и 195–230 с для *Space Shuttle*. Как видно из наших данных, вычисленное положение источника УАВ для запусков ракет не совпадает с положением стартовой площадки. В то же время координаты источника вполне согласуются с коор-

динатами горизонтальных проекций траекторий РН (рис. 1, 2, 3).

В [31] проанализированы данные расположенных на северо-восточном побережье США инфразвукометрических решеток, на которых наблюдались сильные акустические сигналы от районов запуска и возвращения ракет *Saturn-5*. Авторы выделили три типа сигналов: к первому относятся ранние сигналы, время прибытия которых соответствовали сверхзвуковым значениям их скорости, равным 500–1000 м/с; второй тип представляет собой нормальные сигналы с групповой скоростью, приблизительно равной нормальной скорости распространения звука в воздухе; последний – поздние сигналы с дозвуковой скоростью, лежащей в интервале 190–240 м/с. В [31] выдвинуто предположение, что т.н. “ранние” сигналы при запуске ракет обусловлены УАВ, которые генерируются при возвращении первой ступени на расстояниях от стартовой площадки, превышающих 500 км.

Однако наши данные, полученные из сопоставления оценок скоростей V_h , V_t и V_a , а также азимута α волнового вектора УАВ \mathbf{K} , лучше согласуются с механизмом, обоснованным в работах [6, 14, 16, 26]. Эти авторы считают, что генерация УАВ производится во время почти горизонтального движения ракеты с работающим двигателем на разгонном участке траектории на высотах нижней атмосферы 100–130 км. Этот участок проходит ракетой со сверхзвуковой скоростью на 100–300 с полета на расстоянии не менее 500 км от стартовой площадки. По достижению высоты порядка 100 км “включается” источник УАВ.

Вычисленное без учета рефракционных поправок положение источника приблизительно соответствует эпицентру землетрясения. Наши данные согласуются с существующими представлениями о том, что генерация ударно-акустических волн обусловлена поршнеподобным движением земной поверхности в эпицентральной зоне землетрясений [3, 32].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы надеются, что проведенное исследование будет способствовать лучшему пониманию физических процессов, протекающих в атмосфере Земли при полете ракет на начальном участке траектории, а также во время землетрясений. Кроме того, это позволит найти более достоверные сигнальные признаки техногенных воздействий, необходимых для построения эффективной глобальной радиофизической системы обнаружения и локализации подобных воздействий на основе обработки данных международной сети

двухчастотных приемников навигационных систем GPS-GLONASS.

Авторы благодарят Пономарева Е.А., Евстафьева В.В., Нагорского П.М., Климова Н.Н., Уралова А.М. и Калихмана А.Д. за интерес к данной работе, полезные советы и активное участие в дискуссиях. Эта работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 99-05-64753), гранта ведущих научных школ Российской Федерации № 00-15-98509, а также Гранта Минвуза РФ 1999; рук. Вугмейстер Б.О.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Calais E., Minster J.B. GPS detection of ionospheric perturbations following the January 1994, Morthridge earthquake // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 1045.
2. Голицын Г.С., Кляцкин В.И. Колебания в атмосфере, вызываемые движениями земной поверхности // *Изв. Академии наук СССР. Физика атмосферы и океана.* 1967. Т. 111. № 10. С. 1044.
3. Орлов В.В., Уралов А.М. Реакция атмосферы на волну Релея, порожденную землетрясением // *Исследования по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца.* М.: Наука, 1987. № 78. С. 28.
4. Row R.V. Acoustic-gravity waves in the upper atmosphere due to a nuclear detonation and an earthquake // *J. Geophys. Res.* 1967. V. 72. - 5. P. 1599.
5. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду. Справочное пособие. М.: Изд-во "Анкил", 2000. С. 640.
6. Нагорский П.М. Неоднородная структура области F ионосферы, образованная ракетами // *Геомагнетизм и аэронамия.* 1998. Т. 38. С. 100.
7. Fitzgerald T.J. Observations of total electron content perturbations on GPS signals caused by a ground level explosion // *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 1997. V. 59. P. 829.
8. Calais E., Minster B.J., Hofton M.A., Hedlin M.A.H. Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements // *Geophys. J. Int.* 1998. V. 132. P. 191.
9. Афраймович Э.Л., Варшавский И.И., Вугмейстер Б.О. и др. Влияние наземных промышленных взрывов на доплеровские и угловые характеристики отраженного от ионосферы радиосигнала // *Геомагнетизм и аэронамия.* 1984. Т. 24. С. 322.
10. Blanc E., Jacobson A.R. Observation of ionospheric disturbances following a 5-kt chemical explosion. 2. Prolonged anomalies and stratifications in the lower thermosphere after shock passage // *Radio Science.* 1989. V. 24. P. 739.
11. Jacobson A.R., Carlos R.C. Observations of acoustic-gravity waves in the thermosphere following *Space Shuttle* ascents // *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 1994. V. 56. P. 525.
12. Mendilli M. The effects of rocket launches of the ionosphere // *Adv. Space Res.* 1981. V. 1. P. 275.
13. Mendillo M. Modification of the ionosphere by large space vehicles // *Adv. Space Res.* 1982. V. 2. P. 150.
14. Li Y.Q., Jacobson A.R., Carlos R.C. et al. The blast wave of the Shuttle plume at ionospheric heights // *Geophys. Res. Lett.* 1994. V. 21. P. 2737.
15. Klobuchar J.A. Real-time ionospheric science: The new reality // *Radio Science.* 1997. V. 32. P. 1943.
16. Calais E., Minster J.B. GPS detection of ionospheric perturbations following a *Space Shuttle* ascent // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. P. 1897.
17. Афраймович Э.Л., Козогоров Е.А., Плотников А.В. Детектирование с помощью GPR-решеток ударно-акустических волн, генерируемых при запуске ракет // *Труды VI международной научно-технической конференции "радиолокация, навигация, связь". Воронеж, 25–27 апреля 2000 г.* Т. 1. С. 462.
18. Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Palamarchouk K.S. et al. The use of GPS arrays in detecting the ionospheric response during rocket launchings // *Earth, Planets and Space.* 2000. V. 52. P. 1061.
19. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. *Global Positioning System: Theory and Practice.* N.-Y.: Springer-Verlag Wien, 1992. P. 327.
20. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. С. 502.
21. Bertel L., Bertin F., Testud J. Testud De la mesure du contenu electronique integre appliquee a l'observation des ondes de gravite de moyenne echelle // *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 1976. V. 38. P. 261.
22. Afraimovich E.L., Terechov A.I., Udodov M.Yu., Fridman S.V. Refraction disturtions of transionospheric radio signals caused by changes in a regular ionosphere and by travelling ionospheric disturbances // *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 1992. V. 54. P. 1013.
23. Mercier C., Jacobson A.R. Observations of atmospheric gravgity waves by radio interferometry: are results biased by the observational technique? // *Ann. Geophys.* 1997. V. 15. P. 430.
24. Afraimovich E.L., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P. GPS radio interferometry of travelling ionospheric disturbances // *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 1998. V. 60. P. 1205.
25. Нагорский П.М. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. Томский государственный университет. Томск, 1998.
26. Нагорский П.М. Анализ отклика КВ-радиосигнала на возмущения ионосферной плазмы, вызванные ударно-акустическими волнами // *Изв. ВУЗов. Радиофизика.* 1999. Т. XLII. С. 36.
27. Jacobson A.R., Carlos R.C., Blanc E. Observation of ionospheric disturbances following a 5-kt chemical explosion. 1. Persistent oscillation in the lower thermosphere after shock passage // *Radio Science.* 1988. V. 23. P. 820.
28. Карлов В.Д., Козлов С.И., Ткачев Г.Н. Крупномасштабные возмущения в ионосфере, возникающие

- при полете ракеты с работающим двигателем // Космич. исслед. 1980. Т. 18. С. 266.
29. *Arendt P.R.* Ionospheric undulations following "Appolo-14" launching // *Nature*. 1971. V. 231. P. 438.
30. *Noble S.T.* A large-amplitude traveling ionospheric disturbance excited by the *Space Shuttle* during launch // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. P. 19037.
31. *Kaschak G., Donn W.L., Fehr U.* Long-range infrasound from rockets // *J. of the Acoust. Society of America*. 1970. V. 48. № 1 (part 1). P. 12.
32. *Rudenko G.V., Uralov A.M.* Calculation of ionospheric effects due to acoustic radiation from an underground nuclear explosion // *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1995. V. 57. P. 225.