

УДК 550.388:533.951+573.868

## ВАРИАЦИИ СПЕКТРА ИОНОСФЕРНЫХ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ ПЛАЗМЫ МОЩНЫМ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ

*Л. Ф. Черногор*<sup>1</sup>, *В. Л. Фролов*<sup>2</sup>, *Г. П. Комраков*<sup>2</sup>, *В. Ф. Пушкин*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, г. Харьков, Украина

<sup>2</sup> Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

Приведены результаты спектрального анализа временных вариаций доплеровского смещения частоты отражённых от ионосферы сигналов расположенного вблизи г. Харькова высокочастотного радара вертикального зондирования ионосферы в дни воздействия на ионосферную плазму мощным радиоизлучением стенда «Сура» (Нижний Новгород) и в контрольный день в отсутствие такого воздействия. Установлено, что спектральные характеристики квазипериодических вариаций доплеровского смещения частоты в интервале периодов 10÷60 мин в дни работы стенда и в контрольный день существенно различались. Это рассматривается как свидетельство в пользу генерации (усиления) мощным периодическим высокочастотным радиоизлучением стенда акустико-гравитационных волн, распространяющихся на ионосферных высотах.

### ВВЕДЕНИЕ

Системный подход к природному объекту, состоящему из Земли, атмосферы, ионосферы и магнитосферы, оказывается весьма плодотворным [1–5]. Он позволяет более точно описать процессы в околоземной среде и учесть взаимодействие подсистем объекта, которое осуществляется посредством волн различной природы, потоков частиц, токов и т. п.

Волны генерируются как в естественных условиях, так и при воздействии на среду ряда техногенных источников. Среди низкочастотных волн с периодами  $T = 1\div 180$  мин видное место занимают акустико-гравитационные волны [6–8]. Возможность их генерации с помощью мощного радиоизлучения наземных передатчиков изучалась как теоретически [9–11], так и экспериментально [12–21]. По результатам измерений амплитуда этих волн на удалении около 1000 км от места расположения мощного радиостенда оказывается достаточно слабой: относительное возмущение концентрации электронов на высотах ионосферы не превышает единиц процентов. Поэтому большой интерес представляет поиск возможностей увеличения эффективности их генерации. Кроме тривиального способа — увеличения мощности воздействующего на ионосферу радиоизлучения — можно также пытаться изменять условия генерации акустико-гравитационных волн за счёт изменения периода и длительности циклического режима излучения волны накачки, её поляризации, несущей частоты и изменения формы диаграммы направленности пучка мощных радиоволн. В случае, если механизм генерации акустико-гравитационных волн связан с нагревом плазмы  $F$ -области ионосферы, можно ожидать усиления их интенсивности за счёт использования эффекта магнитного зенита [22], когда мощная радиоволна обыкновенной поляризации, распространяющаяся вдоль силовых линий геомагнитного поля в области резонансного взаимодействия с плазмой, вызывает возбуждение наиболее интенсивной искусственной ионосферной турбулентности.

В настоящей работе изучаются особенности генерации (усиления) акустико-гравитационных волн при различных режимах излучения мощной высокочастотной радиоволны. Общая схема эксперимента такая же, как и в экспериментах [21], в которых была обнаружена генерация акустико-гравитационных волн при работе стенда «Сура». В отличие от [21], где для диагностики искус-

ственных плазменных возмущений использовался харьковский радар некогерентного рассеяния, диагностика возмущений осуществлялась с помощью доплеровского высокочастотного радара вертикального зондирования ионосферы.

## 1. СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Накануне активного эксперимента (21 марта 2010 года), в период его проведения (22–25 марта) и после него (26–27 марта) состояние космической погоды было достаточно спокойным. Некоторое исключение составили сутки 25 марта, когда днём началось магнитное возмущение. При этом концентрация и давление солнечного ветра в течение примерно шести часов увеличились на порядок; скорость и температура частиц увеличились от 270 до 430 км/с и от  $2 \cdot 10^4$  до  $(1,5 \div 2,0) \cdot 10^5$  К соответственно. В несколько раз увеличился уровень флуктуаций компонент межпланетного магнитного поля. Испытывала флуктуации и энергетическая функция Акасофу (до  $3 \div 7$  ГДж/с). Индексы  $A_E$ ,  $D_{st}$  и  $K_p$  увеличились до  $250 \div 350$  нТл, 20 нТл и 3 соответственно. Плотность потока электронов заметно уменьшилась ещё 24 марта и оставалась на таком же уровне 25 и 26 марта. Плотность потока протонов оставалась практически неизменной. Всё это свидетельствует о том, что 24–26 марта 2010 года показатели возмущённости космической погоды на ионосферных высотах были слабыми и достаточно близкими по своим характеристикам, поэтому этот период можно считать вполне благоприятным для выявления эффектов периодического воздействия мощным радиоизлучением на ионосферную плазму.

Активные эксперименты по модификации ионосферы мощными высокочастотными радиоволнами, излучаемыми стендом «Сура», проводились в дневное и вечернее время с 22 по 25 марта 2010 года. В работе для анализа были выбраны результаты измерений, выполненные 24 и 25 марта. Особенностью проводимых в эти дни экспериментов являлось использование для нагрева ионосферной плазмы волн обеих (обыкновенной и необыкновенной) поляризации и различных режимов излучения волны накачки, в которых период и длительность воздействия варьировались в широких пределах — от десятков секунд до десятков минут. В качестве контрольного использовался день 26 марта, когда в отсутствие нагрева ионосферной плазмы мощными высокочастотными радиоволнами были выполнены измерения фоновых характеристик регистрируемых ионосферных возмущений. Как отмечено выше, все эти три дня были близки по уровню естественной возмущённости ионосферы.

## 2. СРЕДСТВА ВОЗДЕЙСТВИЯ И ДИАГНОСТИКИ

Нагревный стенд «Сура» [23] расположен в 100 км восточнее г. Нижнего Новгорода (Россия) и имеет географические координаты  $56^\circ 09'$  с. ш.,  $46^\circ 06'$  в. д.

Во время рассматриваемых в работе экспериментов три модуля стенда всегда работали синфазно, формируя диаграмму направленности карандашного типа. При этом в проводимых исследованиях эффективная мощность излучения волны накачки составляла  $PG \approx 50; 80$  и  $100 \div 120$  МВт соответственно для трёх используемых в экспериментах частот  $f_{ВН} = 4,3, 4,785$  и  $5,5$  МГц. Во всех экспериментах диаграмма направленности антенны стенда была наклонена к югу на  $12^\circ$ ; в случае использования волн обыкновенной поляризации это приводило к усилению генерации искусственной ионосферной турбулентности за счёт эффекта магнитного зенита [22]. При этом для  $f_{ВН} \approx 5$  МГц радиоволна с учётом её рефракции в ионосфере распространяется вдоль силовых линий геомагнитного поля на уровне верхнегибридного резонанса, что вызывает усиление её взаимодействия с плазмой. Конкретные режимы излучения волны накачки приведены ниже для каждого анализируемого в работе случая.

Критическая частота  $f_{oF_2}$  в дни проведения экспериментов в среднем сначала (примерно до 10:00 UT) увеличивалась от 5,5 до 6,8 МГц, а затем (с 10:00 до 20:00 UT) уменьшалась до 4,5 МГц. Заметим, что локальное время в месте измерения опережало на два часа мировое время.

Доплеровский радар для вертикального зондирования ионосферы использовался для регистрации ионосферных возмущений, вызванных периодическим нагревом ионосферы мощным радиоизлучением стенда «Сура», находящимся на расстоянии 960 км от радара. Радар расположен вблизи г. Харьков (Украина) на территории Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина, её координаты:  $49^{\circ}38'$  с. ш.,  $36^{\circ}20'$  в. д. Основные параметры радара: диапазон частот  $f = 1 \div 24$  МГц, импульсная мощность радиопередающего устройства 1 кВт, длительность зондирующего импульса  $\tau \approx 500$  мкс, частота повторения импульсов 100 Гц, полоса пропускания фильтра радиоприёмного устройства 10 Гц. Антенная система представляет собой вертикальный ромб с коэффициентом усиления  $G \approx 1 \div 10$  в зависимости от частоты зондирующей волны. При таком потенциале радара отношение сигнал/помеха  $q$  в ночное время достигает  $10^5 \div 10^6$ . В дневное время  $q$  обычно на  $1 \div 2$  порядка меньше. Радар сопряжён с персональным компьютером, образуя программно-аппаратный комплекс, ведущий измерения и предварительную обработку отражённого от ионосферы сигнала в реальном масштабе времени.

В настоящей работе рассматриваются результаты измерений, выполненные на частоте зондирования 4,2 МГц.

Высотная протяжённость отражённого сигнала существенно превышала величину  $ct/2 \approx 75$  км, где  $c$  — скорость света в вакууме. Поэтому использовалось стробирование по высоте с дискретностью  $\Delta z = 75$  км в диапазоне действующих высот  $z' = 75 \div 450$  км (им соответствовали каналы 1–5 приёмно-регистрирующей аппаратуры). В основном канале амплитуда сигнала принимала максимальные значения, в других каналах она была заметно меньше.

### 3. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

#### 3.1. Первичная обработка

Комплексная амплитуда биений колебаний опорного генератора и отражённого сигнала в цифровом виде (частота опроса 10 Гц) записывалась на носитель информации, а затем при помощи преобразования Фурье вычислялись доплеровские спектры в диапазоне возможных доплеровских сдвигов от  $-2,5$  до  $+2,5$  Гц на интервале времени 60 с (разрешение по частоте порядка 0,02 Гц). Погрешность оценки доплеровского смещения частоты, например, при  $q = 10^2 \div 10^3$  и  $T = 60$  с составляла  $(0,3 \div 0,9) \cdot 10^{-3}$  Гц. При больших значениях  $q$  она была ещё меньше.

#### 3.2. Вторичная обработка

При отсутствии внутримодовой многолучевости и при учёте того, что обычно амплитуда принимаемой О-моды зеркально отражённого сигнала заметно больше, чем амплитуда Х-моды, выделялись вариации доплеровского смещения частоты главного максимума доплеровских спектров. Считалось, что эти вариации относятся к О-моду.

При сравнительно малых значениях амплитуды сигнала в отдельных (неосновных) каналах возможны резкие скачки доплеровского смещения частоты главного максимума доплеровских спектров. Такие скачки доплеровского смещения частоты имеют неправдоподобные значения; они вызываются шумами аппаратуры измерительного комплекса и в измерениях проявлялись

на определённых частотах излучаемого сигнала. До вычисления спектра мощности вариаций доплеровского смещения частоты эти неправдоподобные значения удалялись из временного ряда регистрируемых значений, после чего быстрые вариации доплеровского смещения частоты сглаживались методом скользящего среднего с использованием гауссовского окна. Ширина полосы сглаживания была равна  $3 \div 5$  мин.

На интервале наблюдения продолжительностью до 12 часов вычислялись временные последовательности спектров мощности вариаций доплеровского смещения частоты. Спектральные составляющие в диапазоне периодов  $6 \div 60$  мин вычислялись на двухчасовом интервале со сдвигом 30 мин. Предварительно из каждого временного ряда удалялся низкочастотный полиномиальный тренд 4-го порядка.

При анализе полученных данных в качестве дополнительной информации привлекались временные зависимости нормированной амплитуды сигнала.

## 4. ХАРАКТЕРИСТИКА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

### 4.1. Вариации характеристик радиосигналов 24 марта 2010 года

В этот день с 05:00 до 05:30 UT модификация ионосферы осуществлялась радиоволной обыкновенной поляризации на частоте  $f_{\text{ВН}} = 4785$  кГц с временной цикличностью  $\tau_1 = 3$  мин — нагрев,  $\tau_2 = 12$  мин — пауза (далее  $[+3$  мин;  $-12$  мин]), затем с 05:30 до 07:00 UT в режиме  $[+4$  мин;  $-11$  мин] с сохранением общего 15-минутного цикла излучения. С 07:20 до 10:50 UT воздействие осуществлялось на частоте  $f_{\text{ВН}} = 4300$  кГц в режиме  $\tau_1 = \tau_2 = 30$  мин (или  $[\pm 30$  мин]). На интервале времени 11:15–12:59 UT режим излучения был  $[\pm 10$  с], частота волны накачки от цикла к циклу воздействия изменялась в пределах  $5455 \div 5495$  кГц (вблизи четвёртой гармоники гирочастоты электронов в области взаимодействия волны накачки с плазмой). С 13:22 до 16:00 UT режим излучения был  $[\pm 1$  мин],  $f_{\text{ВН}} = 5495 \div 5455$  кГц. На интервале времени 17:25–17:55 UT стенд излучал немодулированную волну с  $f_{\text{ВН}} = 4785$  кГц. Наконец, с 17:55 до 18:25 UT излучение стенда было на  $f_{\text{ВН}} = 4785$  кГц в режиме  $[\pm 3$  мин].

Временные вариации доплеровского смещения частоты  $f_d$  и нормированной амплитуды  $A$  сигнала показаны на рис. 1. В интервале времени 07:00–11:30 UT среднее значение доплеровского смещения частоты было близко к  $0,05 \div 0,10$  Гц. Затем оно постепенно уменьшалось до  $-(0,20 \div 0,30)$  Гц. После 15:30 UT наблюдалось увеличение доплеровского смещения частоты от  $-0,30$  до  $+0,10$  Гц. Особенно резкий его рост имел место в интервале времени 17:30–18:30 UT. После 19:25 UT отмечалось уменьшение доплеровского смещения частоты от  $+0,02$  до  $-0,66$  Гц.

На усреднённую временную зависимость доплеровского смещения частоты накладывались его квазипериодические вариации с периодами  $T \approx 10 \div 60$  мин. Чаще всего, амплитуда доплеровского смещения частоты была  $f_{\text{да}} \approx 0,1$  Гц, но с 16:30 до 17:30 UT она достигала значений  $0,30 \div 0,35$  Гц (см. рис. 1).

Среднее значение нормированной амплитуды сигнала в утренние часы уменьшалось примерно от 0,4 до 0,1 (здесь и далее отн. ед.). Её минимальное значение достигалось в интервале времени 08:30–10:15 UT. После этого она медленно увеличивалась от 0,1 до 0,5. Примерно с 16:45 и до 18:25 UT нормированная амплитуда сигнала в среднем была близка к 0,6. В интервале времени 18:10–18:45 UT она уменьшалась примерно от 0,7 до 0,2. Минимальное значение нормированной амплитуды сигнала наблюдалось около 19:30 UT, где она составляла 0,1. Затем она достаточно быстро увеличивалась от 0,1 до 0,4. На регулярный временной ход нормированной амплитуды сигнала накладывались квазипериодические изменения с периодами  $10 \div 60$  мин.

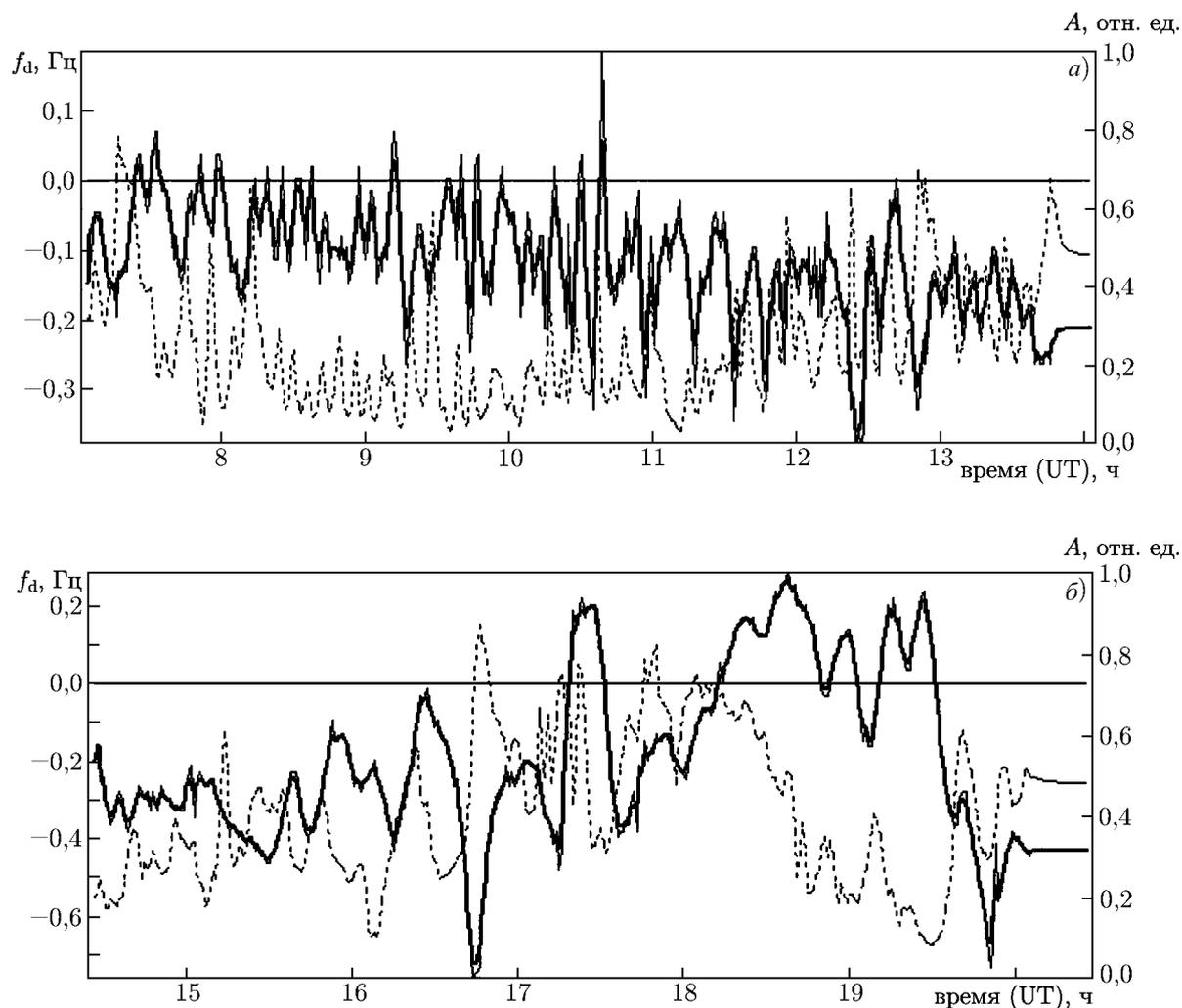


Рис. 1. Временные вариации доплеровского смещения частоты  $f_d$  (сплошная линия) и нормированной амплитуды сигнала  $A$  (штриховая линия) на частоте 4,2 МГц 24 марта 2010 года: 07:00÷14:00 UT (а); 14:27÷20:30 UT (б)

#### 4.2. Вариации характеристик радиосигнала 25 марта 2010 года

В этот день с 06:30 до 10:00 UT нагрев ионосферы осуществлялся при помощи радиоволны необыкновенной поляризации на частоте  $f_{\text{ВН}} = 4300$  кГц в режиме  $[\pm 30 \text{ мин}]$ . Далее для возмущения ионосферы использовалась радиоволна обыкновенной поляризации. С 11:26 до 12:20 UT использовался режим  $[\pm 30 \text{ с}]$ , от цикла к циклу излучения частота волны накачки изменялась в диапазоне  $5475 \div 5495$  кГц. В интервале времени 12:45÷14:15 UT использовался режим  $f_{\text{ВН}} = 4300$  кГц,  $[\pm 30 \text{ мин}]$ . Затем стенд излучал короткими циклами: с 14:41 до 15:07 UT —  $f_{\text{ВН}} = 5455 \div 5415$  кГц,  $[\pm 10 \text{ с}]$ , а с 15:07 до 16:00 UT —  $f_{\text{ВН}} = 4395 \div 4355$  кГц,  $[\pm 30 \text{ с}]$ . С 17:20 до 18:15 UT использовался режим  $f_{\text{ВН}} = 4785$  кГц,  $[\pm 5 \text{ мин}]$ .

С 07:40 до 08:00 UT доплеровское смещение частоты в среднем было близко к 0 (рис. 2). Затем в течение двух часов оно равнялось  $-0,1$  Гц. После 10:00 UT доплеровское смещение частоты в среднем уменьшалось от  $-0,1$  до  $-0,4$  Гц. Наименьшее значение доплеровского смещения частоты

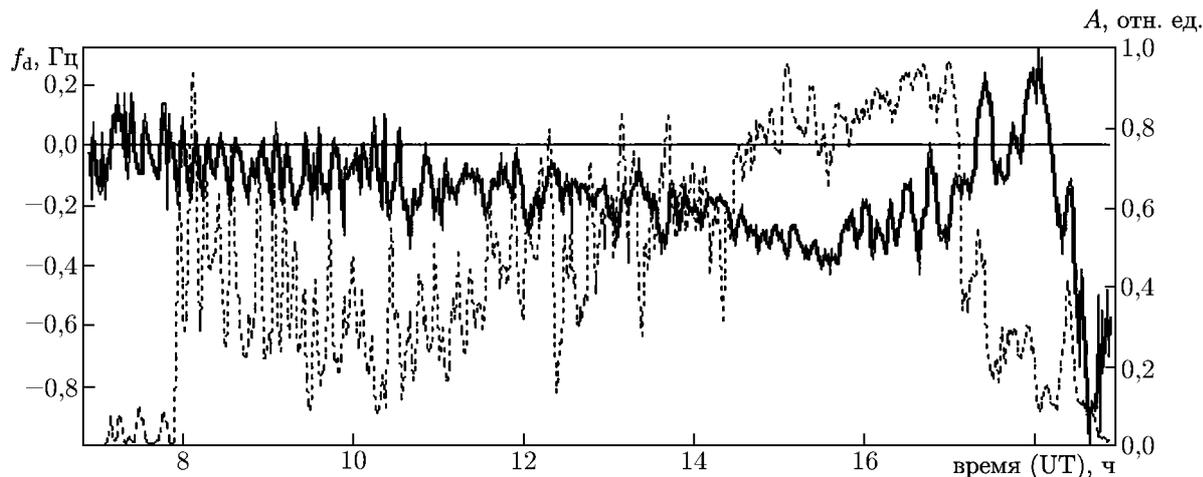


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для 25 марта 2010 года

имело место примерно в 15:30 UT, после чего в течение 2,5 часов оно увеличивалось от  $-0,4$  до  $+0,1$  Гц. Примерно с 18:00 до 19:00 UT наблюдалось резкое уменьшение доплеровского смещения частоты от  $+0,1$  до  $-0,8$  Гц.

На медленные изменения значений доплеровского смещения частоты накладывались его квазипериодические вариации с  $T \approx 7 \div 60$  мин. Обычно их амплитуда была  $f_{da} \approx 0,1$  Гц. С 16:30 до 18:30 UT она увеличивалась до  $0,15 \div 0,20$  Гц.

Поведение нормированной амплитуды сигнала было следующим. С 08:00 до 09:30 UT она в среднем уменьшалась от 0,6 до 0,2. На интервале времени 09:30  $\div$  11:00 UT она была около 0,2. Затем она относительно быстро увеличивалась от 0,2 до 0,6. После 17:20 UT примерно в течение одного часа значение нормированной амплитуды сигнала продолжало увеличиваться до  $0,80 \div 0,85$ , далее она оставалась примерно такой же до 17:00 UT. Примерно с 17:00 до 17:30 её величина уменьшилась в 4 раза. Далее в течение двух часов её среднее значение было близко к 0,2.

На усреднённый временной ход нормированной амплитуды сигнала накладывались квазипериодические вариации с  $T \approx 10 \div 50$  мин.

#### 4.3. Вариации характеристик радиосигнала 26 марта 2010 года

В этот день станция «Сура» не излучала, и выполненные измерения использовались в качестве контрольных.

С 07:00 до 08:00 UT среднее значение доплеровского смещения частоты было близко к 0 (рис. 3). После 08:00 UT оно стало отрицательным и постепенно уменьшалось от 0 до  $-(0,15 \div 0,20)$  Гц. На его регулярный ход накладывались квазипериодические вариации с  $T \approx 7 \div 60$  мин с амплитудами  $f_{da} \approx 0,10 \div 0,15$  Гц.

В интервале времени 07:00  $\div$  09:20 UT значения нормированной амплитуды сигнала в среднем были близки к 0,1. После 09:20 UT они резко увеличились и стали близки к  $0,6 \div 0,8$ , а затем резко уменьшались и в интервале времени 13:20  $\div$  14:10 UT составляли около 0,4. Как и в другие дни, на достаточно регулярные вариации нормированной амплитуды сигнала накладывались её квазипериодические изменения с  $T \approx 10 \div 40$  мин.

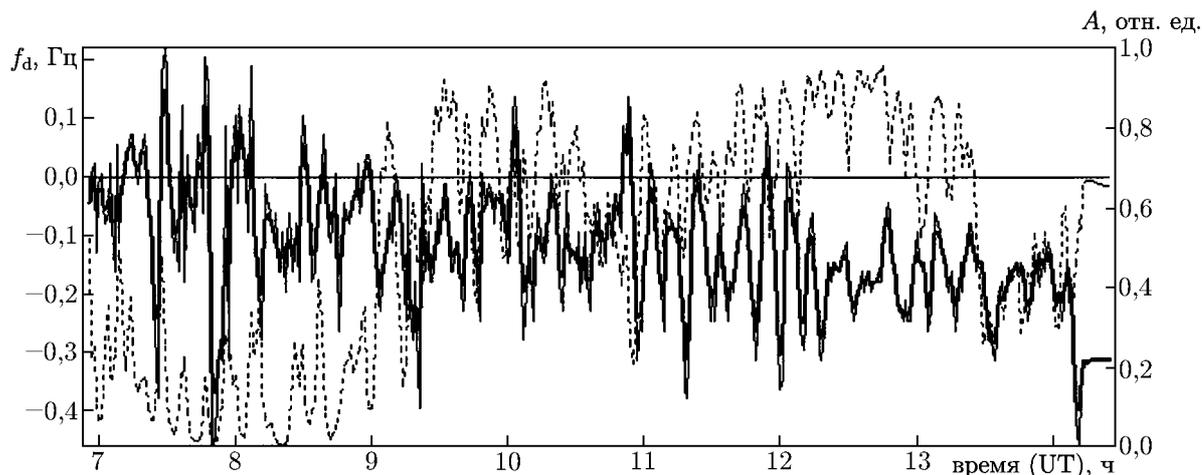


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, для 26 марта 2010 года

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

### 5.1. Вариации спектральных составляющих доплеровского смещения частоты 24 марта 2010 года

Вблизи 08:00 UT в спектре вариаций доплеровского смещения частоты преобладали составляющие с  $T \approx 20 \div 30$  мин (рис. 4). Наблюдались также вариации с  $T \approx 12 \div 13$  мин. В течение следующего часа главными стали составляющие с периодами 30 и 12 мин. Примерно с 10:00 до 11:00 UT наиболее интенсивными были вариации с  $T \approx 10 \div 12$  мин. После 11:00 UT спектр видоизменялся и постепенно наиболее интенсивными становились составляющие с периодами  $T \approx 15 \div 20$  мин. На интервале времени 12:00–13:00 UT преобладающими стали вариации с  $T \approx 20 \div 30$  мин. С 15:00 до 16:30 UT наиболее интенсивными были составляющие с периодами  $T \approx 25 \div 60$  мин. Затем их сменили вариации с  $T \approx 25 \div 35$  мин. Примерно с 19:00 и до 20:00 UT преобладающими стали спектральные составляющие с  $T \approx 40 \div 60$  мин.

### 5.2. Вариации спектральных составляющих доплеровского смещения частоты 25 марта 2010 года

В начале модификации ионосферы волнами X-поляризации частотный спектр квазипериодических вариаций доплеровского смещения частоты был достаточно широк (рис. 5). В нём преобладали составляющие с  $T \approx 7 \div 13$  мин и  $T \approx 30 \div 50$  мин. Постепенно вариации с периодом  $T \approx 10 \div 12$  мин стали преобладающими. Это продолжалось примерно до 10:00 UT. В течение следующего часа наиболее интенсивными были спектральные составляющие с  $T \approx 15 \div 20$  мин.

На интервале времени с 11:30 до 14:00 UT наиболее интенсивными были вариации с периодом  $T \approx 30$  мин. После 14:30 UT основными стали возмущения с  $T \approx 60$  мин, также здесь были заметно выражены вариации с  $T \approx 12$  мин. С 15:30 до 16:10 UT интенсивности этих составляющих были близки. Примерно с 16:00 и до 17:00 UT наибольшую интенсивность имели составляющие с  $T \approx 10 \div 20$  мин, а позднее, с 17:00 до 18:00 UT, постепенно более интенсивными становились вариации с периодами  $T \approx 30 \div 60$  мин.

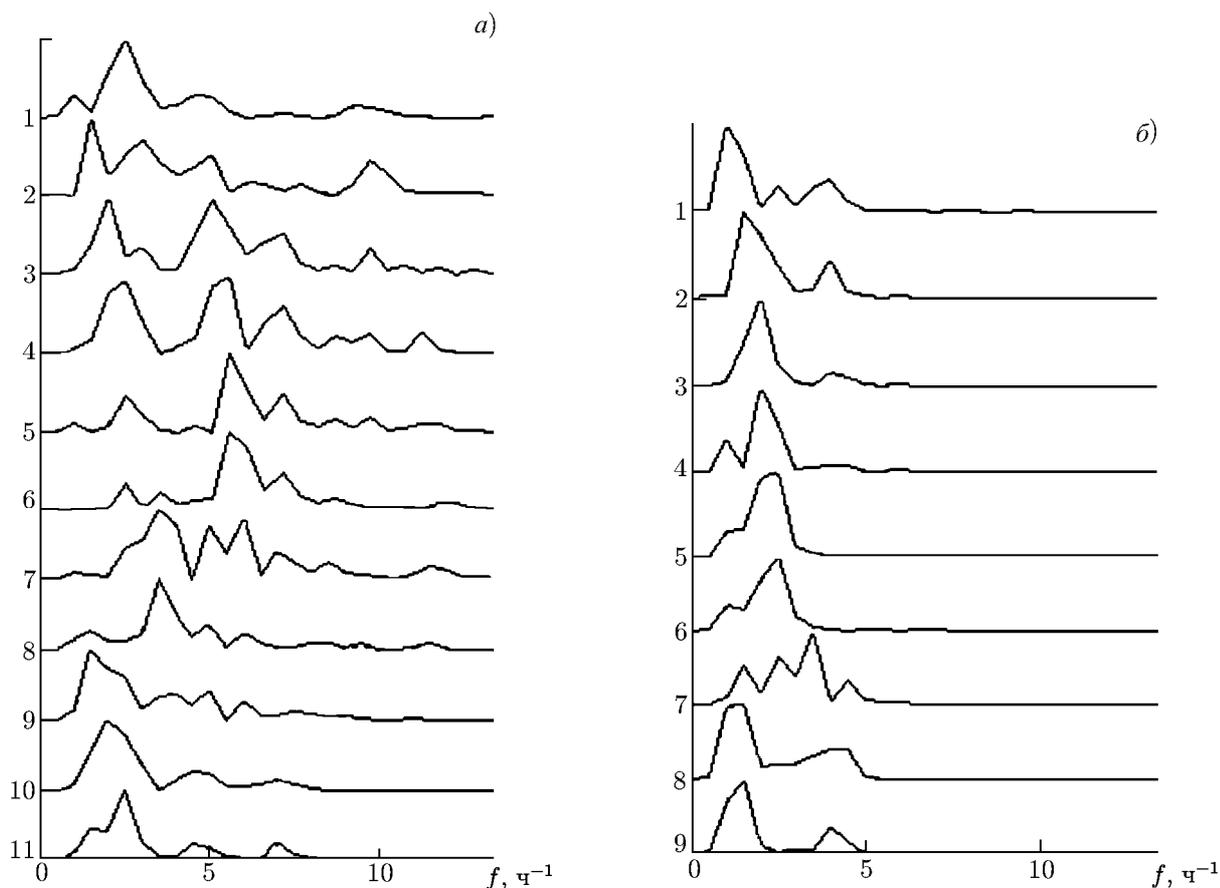


Рис. 4. Нормированные динамические спектры мощности вариаций доплеровского смещения частоты в окрестности 4,2 МГц 24 марта 2010 года (цифры слева соответствуют номеру спектра). Середина двухчасового интервала обработки на панели (а) соответствует 08:04 UT, на панели (б) — 15:27 UT; каждый последующий спектр получен со сдвигом на 0,5 часа

### 5.3. Вариации спектральных составляющих доплеровского смещения частоты 26 марта 2010 года

В контрольный день спектр вариаций доплеровского смещения частоты с 08:00 до 12:00 UT был достаточно широким и захватывал диапазон периодов  $T \approx 10 \div 60$  мин (см. рис. 6). Примерно с 12:00 и до 14:00 в спектре стали преобладать вариации с  $T \approx 10$  мин. В течение следующего часа постепенно возрастала интенсивность более медленных спектральных составляющих с периодами  $T \approx 20$  и 40 мин.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ

### 6.1. Характер квазипериодических возмущений в ионосфере 24 марта 2010 года

В этот день для нагрева ионосферы использовались волны О-поляризации. С 05:00 до 07:00 UT нагрев осуществлялся импульсами длительностью 3 или 4 мин при периоде их следования 15 мин. Каких-либо значимых вариаций доплеровского смещения частоты с такими периодами здесь об-

наружено не было. Поэтому такой режим следует признать неэффективным для генерации квазипериодических ионосферных возмущений.

С 07:20 до 10:50 UT нагрев ионосферы осуществлялся в режиме  $[\pm 30 \text{ мин}]$ . Первое существенное изменение характера временных вариаций доплеровского смещения частоты наблюдалось около 08:15 UT, т. е. с запаздыванием появления возмущений  $\Delta t \approx 55 \text{ мин}$  (см. рис. 1а). При времени развития  $\Delta t_0$  возмущений в месте их генерации для кажущейся скорости их распространения справедливо простое соотношение

$$v = \frac{R}{\Delta t - \Delta t_0}.$$

Здесь  $R$  — расстояние от места генерации возмущений до места их регистрации. При  $R \approx 960 \text{ км}$  и  $\Delta t_0 = 0$  имеем  $v \approx 290 \text{ м/с}$ . Однако более вероятно (см. [21]), что  $\Delta t_0 \approx 10 \text{ мин}$ , это даёт оценку  $v \approx 355 \text{ м/с}$ .

Как видно из результатов спектрального анализа, с 09:00 до 13:00 UT в основном преобладали квазипериодические вариации доплеровского смещения частоты с  $T \approx 30 \text{ мин}$ ; здесь также были выражены спектральные составляющие с  $T \approx 10 \div 12 \text{ мин}$ , а примерно с 08:00 до 11:00 UT заметную амплитуду имели и вариации с  $T \approx 5 \div 7 \text{ мин}$ .

Заметим, что на интервале времени 11:15÷12:59 UT, несмотря на переход к короткоимпульсному ( $[\pm 10 \text{ с}]$ ) режиму излучения стенда «Сура», основные составляющие в спектре вариаций доплеровского смещения частоты остались неизменными. Скорее всего, это связано с тем, что за время 10-секундной паузы крупномасштабные ( $l_{\perp} \geq 100 \text{ м}$ ) ионосферные возмущения не успевали релаксировать и режим таких коротких импульсов и коротких пауз по эффективности их возбуждения был близок к режиму непрерывного излучения, но с меньшей эффективной мощностью нагрева ионосферной плазмы.

Спектральный состав был существенно иным на интервале времени 15:45÷18:00 UT (см. рис. 1б). Причиной этого послужило наложение квазипериодических вариаций, вызванных заходом Солнца (заход Солнца имел место около 16:00 на уровне поверхности Земли и около 18:00 UT на высоте  $z \approx 400 \text{ км}$ .) Здесь преобладали спектральные составляющие с  $T \approx 30 \div 60 \text{ мин}$ . К концу этого интервала спектр вариаций доплеровского смещения частоты расширился в сторону более коротких периодов: в нём регистрировались составляющие с периодами от 15 до 60 мин. В течение

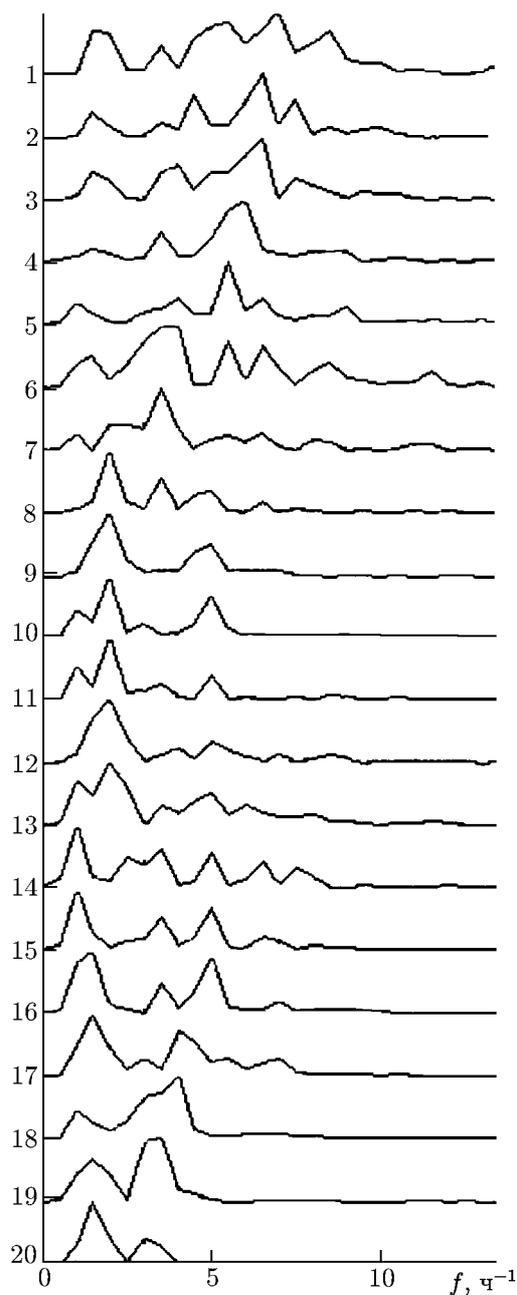


Рис. 5. То же, что и на рис.4, для 07:54 UT 25 марта 2010 года

ние последующих полутора часов (до 20:00 UT) основными квазипериодическими возмущениями были вариации с  $T \approx 40 \div 60$  мин.

### 6.2. Характер квазипериодических возмущений в ионосфере 25 марта 2010 года

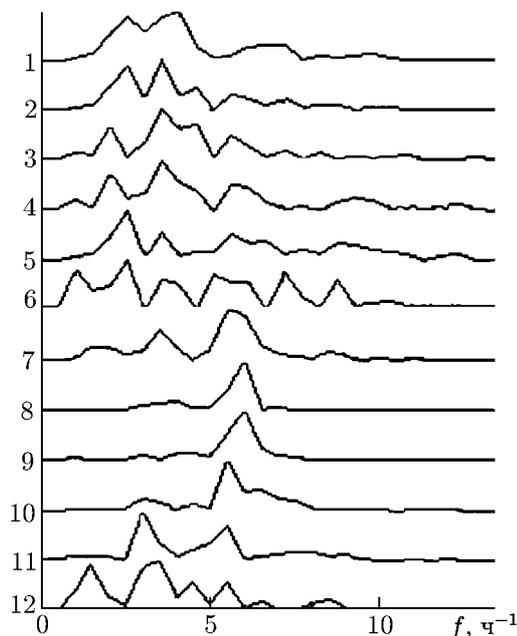


Рис. 6. То же, что и на рис. 4, для 07:56 UT 26 марта 2010 года

более соответствовало режиму непрерывного нагрева ионосферы. В течение этого цикла измерений в спектре регистрировались квазипериодические составляющие с периодом  $T$ , равным  $10 \div 12$  и приблизительно 60 мин.

С 16:30 и до 19:00 UT спектр становится более узким, в нём стали преобладать спектральные составляющие с  $T \approx 15 \div 20$  мин и  $T \approx 30 \div 60$  мин, хотя периодический нагрев при этом осуществлялся достаточно короткими импульсами в режиме  $[\pm 5]$  мин. Это означает, что в данном случае квазипериодические процессы, скорее всего, были вызваны движением вечернего терминатора.

### 6.3. Характеристики квазипериодических вариаций доплеровского смещения частоты по отношению к их свойствам в контрольный день

Форма спектров и спектральный состав полученных 24 и 25 марта вариаций доплеровского смещения частоты отличались от аналогичных характеристик в контрольный день 26 марта. Режимы воздействия мощного радиоизлучения для 24 и 25 марта также отличались, поэтому различались и параметры квазипериодических вариаций. Полученные результаты позволяют заключить, что для генерации волнообразных возмущений оказались неэффективными режимы с короткими импульсами ( $\tau_1$  — единицы минут) и длинными паузами ( $\tau_2 \gg \tau_1$ ), с короткоимпульсными воздействиями (режимы типа  $[\pm 10]$  с] и  $[\pm 30]$  с]). Как и следовало ожидать, менее эффективными были режимы, когда для нагрева ионосферы использовались мощные радиоволны необыкновенной поляризации, для которых, как известно, отсутствуют механизмы их резонансного взаимодействия

Во время первой серии проводимых в этот день экспериментов с использованием для нагрева ионосферы мощной радиоволны Х-поляризации в спектре выделялась составляющая с  $T \approx 10 \div 12$  мин (см. рис. 2). Но на интервале времени с 11:30 до 14:00 UT в спектре стали преобладать квазипериодические вариации доплеровского смещения частоты с  $T \approx 30$  мин и с амплитудой  $0,10 \div 0,13$  Гц. Время запаздывания их появления оценивается как  $50 \div 60$  мин и при  $t_0 = 10$  мин оно соответствует значению  $v \approx 320 \div 400$  м/с.

С 12:45 до 14:15 UT нагрев ионосферы осуществлялся мощной радиоволной О-поляризации в режиме её излучения  $[\pm 30]$  мин. Примерно с 13:30 и до 15:30 UT в спектре чётко наблюдалась составляющая с  $T \approx 60$  мин. Амплитуда доплеровского смещения частоты на частоте 4,2 МГц не превышала 0,1 Гц.

Позднее с 14:40 до 16:00 UT воздействие осуществлялось короткими импульсами в режимах  $[\pm 10]$  с] и  $[\pm 30]$  с], что, как отмечалось выше, более соответствовало режиму непрерывного нагрева ионосферы.

с магнитоактивной плазмой и поэтому они вызывают гораздо более слабые возмущения, чем радиоволны О-поляризации. Так, изменения температуры и концентрации электронов в случае волн Х-поляризации в  $F$ -области ионосферы в дневное время не превышают нескольких процентов, в то время как для радиоволн О-поляризации относительные возмущения параметров плазмы вблизи высоты верхнегибридного резонанса (особенно в области, где существенно влияние эффекта магнитного зенита) составляют десятки процентов [22]. Тем не менее, заметного увеличения амплитуд квазипериодических возмущений при короткопериодическом воздействии на ионосферу радиоволнами О-поляризации обнаружить не удалось.

В случае нагрева ионосферы волнами О-поляризации при достаточно длительных временах воздействия периоды квазипериодических возмущений доплеровского смещения частоты были при этом близки к длительности нагрева  $\tau_1$  (или к длительности паузы  $\tau_2$ , поскольку в этой измерительной кампании, как правило,  $\tau_1 = \tau_2$ ).

Амплитуда доплеровского смещения частоты  $f_{da}$  на частоте 4,2 МГц в течение нагрева ионосферной плазмы обычно составляла 0,1 Гц и редко достигала 0,15÷0,20 Гц. Оценки по соотношениям из [24, 25] приводят к значению относительной амплитуды квазипериодических возмущений  $\delta N = \Delta N/N \approx 1\%$  для  $f_{da} = 0,1$  Гц и  $T = 30$  мин. Для  $f_{da} = 0,2$  Гц и  $T = 60$  мин величина  $\delta N \approx 4\%$ .

Похоже, что усиление процессов в ионосфере, обуславливающих появление квазипериодических вариаций доплеровского смещения частоты, могло стимулироваться как включением мощного радиоизлучения, так и его выключением. Это объясняет появление его 30-минутных вариаций при режиме модификации [ $\pm 30$  мин].

Время запаздывания начала регистрации возмущений относительно начала модификации ионосферной плазмы составляло 50÷60 мин. Как было показано выше, при  $\Delta t_0 \approx 10$  мин это соответствует кажущейся скорости распространения ионосферных возмущений около 320÷400 м/с.

Указанные выше периоды и амплитуды относительных возмущений  $N$ , а также времена запаздывания прихода сигнала, хорошо соответствуют характеристикам перемещающихся ионосферных возмущений, вызываемых генерацией (усилением) внутренних гравитационных волн в нейтральной атмосфере [6–8].

Полученные экспериментальные данные показывают, что в измерениях эпизодически наблюдалось также появление квазипериодических вариаций с  $T \approx 5\div 7$  мин, которые на высотах  $F$ -области ионосферы соответствуют акустической ветви (инфразвуку) акустико-гравитационных волн. Их амплитуда была в 3÷4 раза меньше амплитуды волн с  $T \approx 10\div 60$  мин. Поскольку такие вариации наблюдались и в контрольный день, нельзя утверждать, что 24 и 25 марта 2010 года они были вызваны (или усилены) нагревом ионосферной плазмы мощным радиоизлучением.

Следует отметить, что и в контрольный день и в дни работы стенда «Сура» в спектре доплеровского смещения частоты часто присутствовали составляющие с периодом 10÷12 мин. Скорее всего, они связаны с колебаниями на собственных частотах атмосферы. Выражения для этих частот хорошо известны (см., например, [26]):

$$\omega_a = \sqrt{\frac{\gamma g}{4H} \left(1 + \frac{H}{H_T}\right)}; \quad \omega_b = \sqrt{\frac{g}{H} \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} + \frac{H}{H_T}\right)},$$

где  $g$  — ускорение свободного падения,  $\gamma$  — показатель адиабаты,  $H$  — приведённая высота нейтральной атмосферы,  $H_T = T_n/(dT_n/dz)$ ,  $T_n$  — температура нейтральных частиц. Частоты  $\omega_a$  и  $\omega_b$  именуется частотой отсечки акустических волн и частотой Брента—Вяйсяля соответственно.

На высоте отражения зондирующей волны с частотой 4,2 МГц (около 200 км вблизи полудня)  $T_n \approx 1000$  К,  $H_T \approx 250$  км,  $H \approx 30$  км,  $\gamma \approx 1,3$ . Тогда  $\omega_a \approx 1,04 \cdot 10^{-2}$  с<sup>-1</sup>,  $\omega_b \approx 0,89 \cdot 10^{-2}$  с<sup>-1</sup>. Этим

частотам соответствуют периоды  $T_a \approx 10,1$  мин и  $T_b \approx 11,8$  мин. Заметим также, что в спектре доплеровского смещения частоты нередко присутствовали составляющие с периодами  $20 \div 25$  мин и  $40 \div 50$  мин. Возможно, при этом наблюдались вариации с удвоенным и учетверённым периодами основного колебания с  $T \approx T_a \approx T_b$ . Этот факт, однако, требует проведения дополнительных исследований.

Волны с  $T \approx T_b$  имеют скорость распространения намного меньшую скорости звука. Кроме того, они сильно затухают. Поэтому квазипериодические процессы с  $T \approx 10 \div 12$  мин, скорее всего, связаны с колебаниями параметров атмосферы и ионосферы над местом их регистрации.

#### 6.4. Вариации нормированной амплитуды сигнала

Опишем временные вариации нормированной амплитуды отражённого радиосигнала. Они были обусловлены аperiodическими и квазипериодическими процессами в ионосфере. В дневное время амплитуда сигнала уменьшалась в несколько раз из-за увеличения поглощения радиоволн в нижних слоях ионосферы. После местного полудня амплитуда сигнала постепенно увеличивалась к её ночному значению. Однако, имела место аномалия в таком суточном ходе амплитуды сигнала. Около 18:00 UT и 17:15 UT соответственно 24 и 25 марта амплитуда сигнала в канале, настроенном на диапазон действующих высот  $300 \div 375$  км (диапазон высот около  $200 \div 250$  км), резко уменьшилась в 3–4 раза. Важно, что доплеровское смещение частоты при этом увеличилось примерно на 0,3 Гц. В канале, настроенном на диапазон действующих высот  $225 \div 300$  км (диапазон истинных высот около  $150 \div 200$  км), амплитуда сигнала выросла в 6 и 2 раза 24 и 25 марта соответственно. Продолжительность этого эффекта составляла около 90 мин. Заметим, что 22 и 23 марта подобный эффект не наблюдался.

Уменьшение высоты отражения и одновременное увеличение доплеровского смещения частоты свидетельствует о значительном ( $40 \div 60\%$ ) увеличении концентрации электронов, по крайней мере, в диапазоне высот  $150 \div 200$  км. Это произошло после включения мощного радиоизлучения обыкновенной поляризации на частоте 4785 кГц (в 17:55 UT 24 марта и в 17:20 UT 25 марта). Добавим, что в Васильсурске, где расположен стенд «Сура», в это время критическая частота составляла  $f_{oF_2} \approx 5$  МГц, волна О-поляризации отражалась на высоте около 275 км.

Интересно, что 25 марта в интервале времени 17:13–17:24 UT ионограммы имели непривычный вид (см. рис. 7): кроме основного следа, связанного с отражением радиосигналов от  $F$ -области ионосферы, на ионограммах наблюдались аномальные следы в диапазоне частот  $2,5 \div 4$  МГц с нетипично резкой высотно-частотной зависимостью. Действующая высота отражения, соответствующая аномальным следам, изменялась от 50 до 300 км и от 200 до 320 км. Выше наблюдались повторные псевдоотражения этих аномальных следов.

Обнаруженный эффект значительного увеличения концентрации электронов, скорее всего, связан с активизацией взаимодействия подсистем в системе, состоящей из Земли, атмосферы, ионосферы и магнитосферы [1–5].

Что касается квазипериодических изменений амплитуды отражённого сигнала, то, как уже отмечалось, в спектре присутствовали составляющие с периодами  $10 \div 60$  мин. Эти периоды близки к периодам, наблюдаемым по доплеровскому смещению частоты.

#### 6.5. Скорость распространения возмущений

Выше оценена кажущаяся скорость распространения возмущений. В разных сеансах она изменялась в пределах  $300 \div 400$  м/с при  $\Delta t_0 = 0 \div 10$  мин соответственно. При этом не совсем ясно,

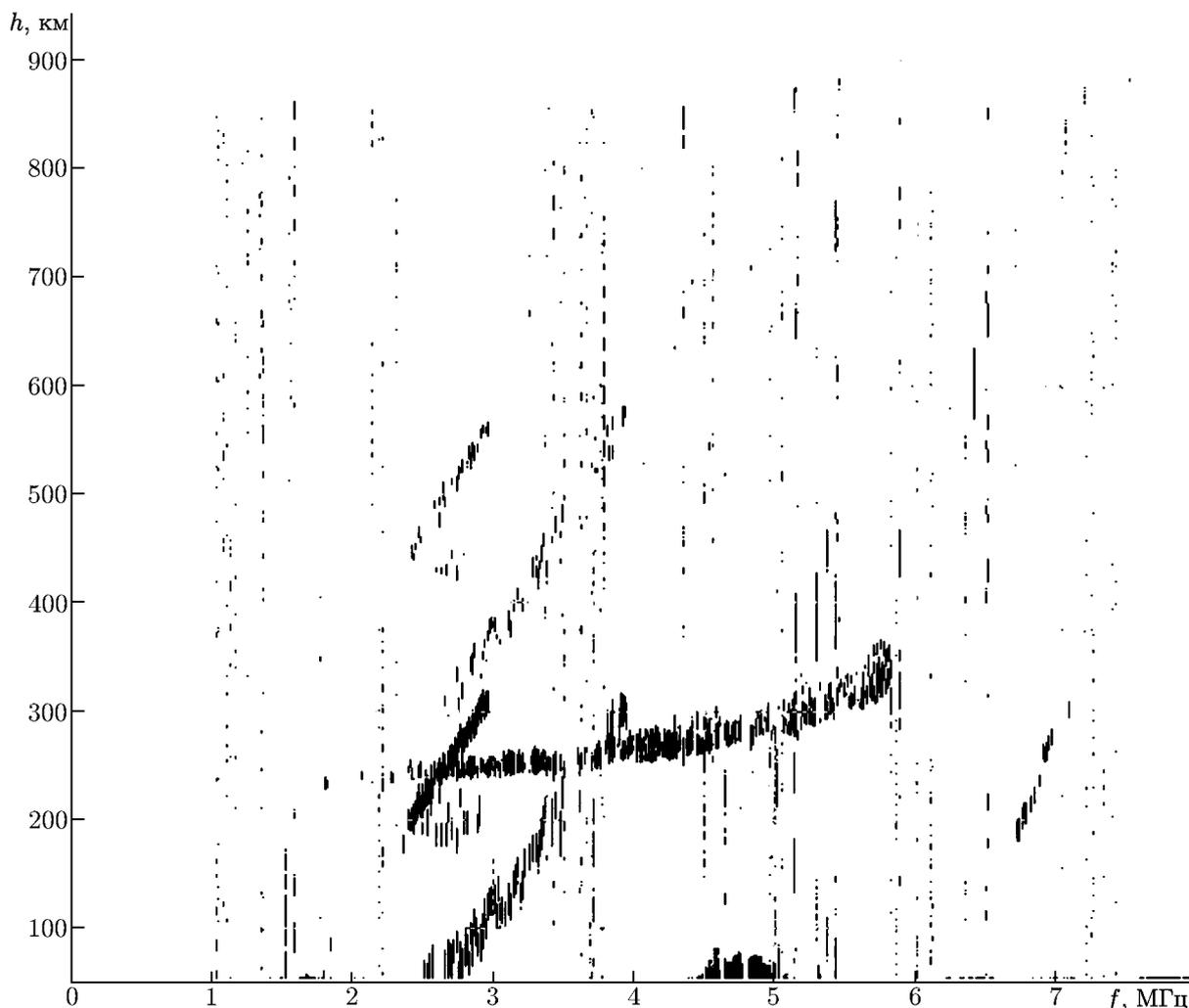


Рис. 7. Пример ионограммы, сопровождающей необычное поведение доплеровского смещения частоты и амплитуды отражённого сигнала 25 марта 2010 года в интервале времени 17:15÷18:45 UT. Ионограмма получена в 17:24 UT

с какой скоростью её отождествлять: фазовой  $v_{ph}$  или групповой  $v_g$ . Ответ на этот вопрос может дать обращение к дисперсионному соотношению для внутренних гравитационных волн. Оно хорошо известно (см., например, [6–8]):

$$\omega^4 - \omega^2 v_s^2 \left( k_x^2 + k_z^2 + \frac{1}{4H^2} \right) + (\gamma - 1) g^2 k_x^2 = 0, \quad (1)$$

где  $\omega = 2\pi/T$  — частота внутренних гравитационных волн,  $v_s = \sqrt{\gamma \kappa T_n / M}$  — скорость звука,  $\kappa$  — постоянная Больцмана,  $M$  — масса нейтральных частиц,  $k_x$  и  $k_z$  — горизонтальная и вертикальная компоненты волнового вектора внутренней гравитационной волны. Из уравнения (1) следует выражение для показателя преломления внутренней гравитационной волны:

$$n^2 = \frac{\beta_0^2 Y - 1}{Y \cos \alpha - 1}, \quad (2)$$

где  $\beta_0 = \omega_a/\omega_b$ ,  $Y = (\omega_b/\omega)^2$ ,  $\alpha$  — угол между осью  $x$  и волновым вектором. Для внутренней гравитационной волны  $\omega < \omega_b \cos \alpha$ , для инфразвука  $\omega > \omega_a$ . Если  $H_T \gg H$ , то

$$\beta_0 \approx \frac{\gamma}{2\sqrt{\gamma-1}} \approx 1,107.$$

Для внутренних гравитационных волн, распространяющихся от стенда «Сура» до Харькова, наибольший интерес представляет ситуация, когда  $\alpha \ll 1$ . При этом

$$n^2 \approx \frac{\beta_0 Y - 1}{Y - 1}, \quad (3)$$

$$v_{\text{ph}} = v_s/n, \quad (4)$$

$$v_g = v_{gx} = v_s \frac{n(Y-1)}{n^2 + \beta_0^2 Y - 2}, \quad (5)$$

где  $v_{gx}$  — горизонтальная проекция групповой скорости.

В эксперименте наблюдались колебания преимущественно с периодами 10; 30 и 60 мин. Для периодов 30 и 60 мин при  $T_b \approx 11,8$  мин имеем  $Y \approx 6,5 \div 25,9$ . При  $Y \gg 1$  из соотношения (3) следует, что  $n \approx \beta_0$ . Тогда из выражений (4) и (5) получаем

$$v_{\text{ph}} \approx v_g \approx v_s/\beta_0 \approx 0,9v_s.$$

Следовательно, оценённая из экспериментальных данных скорость волн с периодами 30 и 60 мин является и фазовой, и групповой скоростями одновременно.

Совсем иная ситуация имеет место для колебаний с  $T \approx 10$  мин. Этот период близок к  $T_b$ . При этом  $Y \approx 1 + y_0$ , где  $y_0 = (T/T_b)^2 - 1 \ll 1$ . Тогда

$$n \approx \sqrt{\beta_0^2 - 1/y_0} \approx 0,5/\sqrt{y_0}, \quad v_{\text{ph}} \approx 2v_s \sqrt{y_0}, \quad v_g \approx v_s y_0/n \approx 2v_s y_0 \sqrt{y_0}.$$

Очевидно, что  $v_g \ll v_{\text{ph}} \ll v_s$ . Эти неравенства дополнительно свидетельствуют о том, что возмущения с периодом  $T \approx 10$  мин, скорее всего, генерируются над местом наблюдения.

## ВЫВОДЫ

Выполненные исследования, наряду с [21], продемонстрировали, что периодический нагрев верхней ионосферы Земли мощными радиоволнами наземных радиостендов приводит к возбуждению (усилению) внутренних гравитационных волн, которые могут заметным образом модифицировать ионосферу и атмосферу Земли на значительных расстояниях от стенда. Результаты проведённых исследований позволили сделать следующие заключения.

1) Модификация ионосферы мощным периодическим радиоизлучением стенда «Сура», удалённого примерно на 1000 км от пункта зондирования ионосферы, приводила к появлению вариаций как доплеровского смещения частоты, так и амплитуды отражённого сигнала высокочастотного радара с периодами, близкими к длительности нагрева или продолжительности цикла нагрева, что связывается с генерацией (усилением) ионосферных волновых возмущений.

2) Значения периодов и амплитуд вызванных нагревом ионосферы квазипериодических вариаций существенно зависели от продолжительности цикла «нагрев—пауза». Наиболее эффективными следует признать режимы излучения волны накачки, в которых для модификации ионосферы использовались волны О-поляризации с длительными (порядка 30 мин) интервалами нагрева и паузы.

3) По своим периодам, относительным амплитудам и скорости распространения зарегистрированные квазипериодические возмущения, стимулированные нагревом ионосферы мощными радиоволнами, близки к параметрам перемещающихся ионосферных возмущений, связанных с генерацией внутренних гравитационных волн.

4) Влияние на эффективность генерации волновых возмущений близости частоты волны накачки к критической частоте  $F_2$ -слоя ионосферы или к гармонике гирочастоты электронов в области взаимодействия волны накачки с плазмой требует дополнительных исследований. Следует также выполнить эксперименты по определению степени влияния эффекта магнитного зенита на уровень возбуждаемых волновых возмущений.

5) В спектре регистрируемых вариаций также хорошо выделяются периоды около 10÷12 мин, близкие к периодам собственных колебаний нейтральной атмосферы на высотах 250÷300 км, и эпизодически наблюдаются вариации с периодами низкочастотного инфразвука с  $T \approx 5\div 7$  мин. Связаны ли последние с нагревом ионосферной плазмы мощным радиоизлучением, ещё предстоит выяснить.

Авторы выражают свою благодарность сотрудникам стенда «Сура» за помощь в проведении экспериментов. Работа Г. П. Комракова и В. Л. Фролова выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 08-02-00171 и 11-02-00374).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2003. Т. 8, № 1. С. 59.
2. Черногор Л. Ф. // Нелинейный мир. 2006. Т. 4, № 12. С. 655.
3. Черногор Л. Ф. // Нелинейный мир. 2007. Т. 5, № 4. С. 198.
4. Черногор Л. Ф. // Нелинейная радиофизика. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2004. 200 с.
5. Черногор Л. Ф. // Нелинейность в природе и науке. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2008. 258 с.
6. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. М.: Наука, 1974. 256 с.
7. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978. 532 с.
8. Григорьев Г. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 1. С. 3.
9. Григорьев Г. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 12. С. 1801.
10. Григорьев Г. И., Трахтенгерц В. Ю. // Геомагнетизм и аэрономия. 1999. Т. 39, № 6. С. 90.
11. Караштин А. Н., Митяков Н. А., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20, № 5. С. 787.
12. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. // Вестник Харьковского университета. Радиофизика и электроника. 1988. № 318. С. 29.
13. Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29, № 3. С. 513.
14. Мисюра В. А., Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. // Космическая наука и техника. 1989. Вып. 4. С. 72.
15. Гармаш К. П., Гритчин А. И., Губарев А. А. и др. // Труды НИИР. М.: Радио и связь, 1989. № 9. С. 57.
16. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. // Космическая наука и техника. 1990. Вып. 5. С. 71.
17. Костров Л. С., Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30, № 1. С. 159.
18. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. // Успехи современной радиоэлектроники. 1998. № 6. С. 17.
19. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. // Электромагнитные явления. 1998. Т. 1, № 1. С. 90.
20. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2009. Т. 14, № 4. С. 377.

21. Бурмака В. П., Домнин И. Ф., Урядов В. П., Черногор Л. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 11. С. 859.
22. Гуревич А. В. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
23. Караштин А. Н., Комраков Г. П., Токарев Ю. В., Шлюгаев Ю. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 8. С. 765.
24. Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2010. Т. 15, № 1. С. 24.
25. Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50, № 3. С. 361.
26. Черногор Л. Ф. // Космічна наука і технологія. 2003. Т. 9, № 2–3. С. 13.

Поступила в редакцію 1 февраля 2011 г.; принята в печать 25 февраля 2011 г.

**VARIATIONS IN THE IONOSPHERIC WAVE PERTURBATION SPECTRUM  
DURING PERIODIC HEATING OF THE PLASMA BY HIGH-POWER  
HIGH-FREQUENCY RADIO EMISSION**

*L. F. Chernogor, V. L. Frolov, G. P. Komrakov, and V. F. Pushin*

We present the results of spectral analysis of temporal variations in the Doppler frequency shift of the ionosphere-reflected signals from a high-frequency vertical ionospheric sounding radar located near the city of Kharkov in the days of exposure of the ionospheric plasma to the high-power radio emission of the Sura facility (Nizhny Novgorod) and in the reference day in the absence of such an exposure. It was established that the spectral characteristics of quasi-periodic variations in the Doppler frequency shift in the range of periods 10–60 min in the days of work of the facility and in the reference day differed significantly. It is considered as evidence in favor of the generation (amplification) of acoustic-gravity waves propagating at the ionospheric altitudes by high-power periodic high-frequency radiation of the Sura facility.