

УДК 550.388:533.951+573.868

ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ ПЛАЗМЫ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ СТЕНДА «СУРА»

*Л. Ф. Черногор*¹, *В. Л. Фролов*²

¹ Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, г. Харьков, Украина

² Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

Приведены результаты наблюдений за вариациями доплеровских спектров и доплеровского смещения частоты отражённых от ионосферы радиосигналов высокочастотного радара вертикального зондирования в период воздействия на ионосферную плазму мощного периодического радиоизлучения нагревного стенда «Сура». Расстояние от стенда до доплеровского радара составляет около 960 км. Подтверждено, что мощное радиоизлучение приводит к генерации (или усилению) волновых возмущений в диапазоне параметров внутренних гравитационных волн (периоды 10÷30 мин, скорости 360÷460 м/с). Обнаружены уединённые пакеты волн типа солитонов с периодом 10÷15 мин, длительностью 20÷30 мин и относительной амплитудой возмущений концентрации электронов от 3 до 8%. Этот же параметр для других волновых возмущений составлял 1÷3%. Подтверждено, что эффективность генерации периодических возмущений в диапазоне параметров внутренних гравитационных волн существенно зависит от режима работы нагревного стенда.

ВВЕДЕНИЕ

Впервые возможность генерации перемещающихся ионосферных возмущений в диапазоне внутренних гравитационных волн была теоретически обоснована ещё в 1970-х годах в работах [1, 2]. В работе [3] описан ещё один механизм генерации таких волн.

Первые экспериментальные исследования перемещающихся ионосферных возмущений были выполнены нами в 80-х годах прошлого века [4–13].

Результаты современных экспериментальных исследований проявлений акустико-гравитационных волн в ионосфере при её нагреве мощным периодическим радиоизлучением стенда «Сура» представлены в работах [14–18].

Краткое сообщение [19] в целом подтверждает наши результаты, хотя в нём представлены первые результаты наблюдения возмущений в диапазоне внутренних гравитационных волн в США и кратко описан один из возможных механизмов генерации этих возмущений.

В работе [20] детально проанализированы механизмы генерации ионосферных возмущений под действием мощного периодического радиоизлучения.

Данная работа является продолжением исследований [15–18]; в ней представлены результаты наблюдений, выполненных 28–30 августа 2012 года.

1. СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Состояние космической погоды оценивалось при помощи ряда индексов (см. табл. 1). Индекс АЕ, характеризующий приток энергии солнечного ветра в высоких широтах, в дни измерений и в контрольные дни (26 и 27 августа 2012 года) не превышал 110 нТл. Значения индекса D_{st} , описывающего силу кольцевого тока в экваториальной области, колебались в пределах ± 10 нТл. При этом максимальное значение планетарного индекса K_p составляло 2. Во все дни проведения

Таблица 1. Параметры, описывающие состояние космической погоды

| дата | AE_{\max} , нТл | K_p max | ΣK_p | a_p max | A_p | D_{st} , нТл |
|------------|-------------------|-----------|--------------|-----------|-------|----------------|
| 26.08.2012 | 527 | 3,7 | 18,7 | 22 | 11 | $-6 \div +4$ |
| 27.08.2012 | 297 | 3,0 | 10,7 | 15 | 6 | $-8 \div +1$ |
| 28.08.2012 | 100 | 1,3 | 5,3 | 5 | 3 | $-8 \div 0$ |
| 29.08.2012 | 110 | 1,3 | 6,0 | 5 | 3 | $-4 \div +3$ |
| 30.08.2012 | 88 | 1,0 | 5,0 | 4 | 3 | $-1 \div +10$ |

измерений состояние космической погоды было спокойным. Наиболее спокойным оно было 30 августа. При этом максимальное значение индекса K_p составляло 1, суммарный за сутки индекс K_p равнялся 3,3.

В течение эксперимента (утреннее и околополуденное время) присутствовал полупрозрачный слой E_s с критической частотой $f_{0E_s} \approx 3,5 \div 7$ МГц.

Поведение временных вариаций критической частоты f_{0F_2} ионосферного слоя F_2 над г. Харьков (Украина) в среднем было следующим. В утреннее и дневное время она постепенно увеличивалась от 6 до 7 МГц. Примерно с 11:00 до 24:00 UT эта частота уменьшалась от $6 \div 7$ до 4 МГц.

Заметим, что локальное время в месте измерения опережало на три часа мировое время.

Таким образом, состояние космической погоды было благоприятным для наблюдения волновых возмущений, вызванным периодическим нагревом ионосферы мощным высокочастотным радиоизлучением.

2. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

Нагревный стенд «Сура» расположен в 100 км восточнее г. Нижний Новгород (Россия), его географические координаты $56^{\circ}09'$ с. ш., $46^{\circ}06'$ в. д.

Во время рассматриваемых в работе экспериментов в большинстве случаев работали три модуля стенда, редко — два. При работе двух модулей стенда эффективная мощность излучения волны накачки PG составляла примерно $45 \div 70$ МВт в зависимости от частоты излучения, при работе трёх модулей $PG \approx 75 \div 150$ МВт. Диаграмма направленности антенны стенда была наклонена к югу на 12° . В случае использования радиоволн с обыкновенной поляризацией это обеспечивало усиление генерации искусственной ионосферной турбулентности за счёт эффекта магнитного зенита, когда радиоволна (с учётом её рефракции в ионосфере) распространяется вдоль силовых линий геомагнитного поля на уровне верхнего гибридного резонанса, что вызывает усиление её взаимодействия с плазмой. Конкретные режимы излучения мощной радиоволны приведены ниже для каждого анализируемого в работе сеанса измерений.

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 следующие: 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 отношение сигнал/помеха обычно на $1 \div 2$ порядка меньше. Радар вместе с персональным компьютером образует программно-аппаратный комплекс, ведущий измерения и предварительную обработку отражённого от ионосферы сигнала в реальном масштабе времени.

Измерения выполнены на частотах зондирования 3,2 и 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 истинные высоты $75 \div 300$ км). В основном канале амплитуда сигнала принимала максимальные значения, в других каналах она была заметно меньше.

Для общего контроля состояния ионосферы использовался цифровой ионозонд, расположенный рядом с доплеровским радаром. Кроме того, привлекалась информация, полученная на ионозондах из ИЗМИРАН (вблизи г. Москва) и НИРФИ (вблизи г. Нижний Новгород).

Методика обработки сигнала заключалась в следующем. 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 16,667 мГц). Потенциальная погрешность оценки доплеровского смещения частоты при $q = 10^3 \div 10^2$ составляла $1,8 \div 5,8$ мГц, а реальная не превышала 8 мГц.

Максимальное значение амплитуды в доплеровском спектре принималось за значение доплеровского смещения частоты f_d . Совокупность этих значений описывала временные вариации $f_d(t)$. Далее зависимости $f_d(t)$ подвергались системному спектральному анализу на интервале времени $T_t = 70$ мин (см., например, [21]). Определялся спектральный состав в интервале периодов $T = 2 \div 70$ мин.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

3.1. Временные вариации доплеровских спектров 28 августа 2012 года

28 августа 2012 года с момента начала наблюдений, т. е. с 06:00 UT, в ионосфере большую часть суток присутствовал слой E_s с критической частотой $f_{0E_s} \approx 3 \div 3,5$ МГц. Это сделало неэффективными наблюдения на частоте радиоволны 3,2 МГц. Кроме того, практически в течение всего дневного времени критическая частота слоя E_s была около $3,0 \div 3,2$ МГц. Поэтому радиоволна на частоте 3,2 МГц сильно затухала в результате отклоняющего поглощения.

Временные вариации доплеровских спектров 28 августа приведены на рис. 1. Амплитуда спектральных составляющих на рис. 1–3 показана в относительных единицах. При построении рисунков проводилась нормировка на максимальное значение амплитуды в каждом одноминутном спектре. Видно, что на частоте 4,2 МГц в интервале времени 06:00–06:50 UT имели место квазипериодические вариации доплеровского смещения частоты f_d с периодом $T = 10 \div 12$ мин и амплитудой $f_{da} \approx 0,4 \div 0,5$ Гц. Радиоволна при этом отражалась на высоте $z \approx 140 \div 160$ км.

С 06:50 до 09:00 UT имел место почти полный «развал» доплеровских спектров (потеря доплеровскими спектрами регулярной структуры). В интервале времени 09:00–11:20 UT вариации доплеровских спектров были более или менее регулярными. После 11:20 UT они стали полностью регулярными и квазипериодическими с $T = 6 \div 10$ мин. Это продолжалось до 13:40 UT. С 13:40 и до 14:05 UT постоянная составляющая доплеровского смещения частоты f_{d0} уменьшалась от $-0,1$ до $-0,2$ Гц. При этом увеличивалось значение f_{da} от 0,1 до 0,2 Гц. В интервале

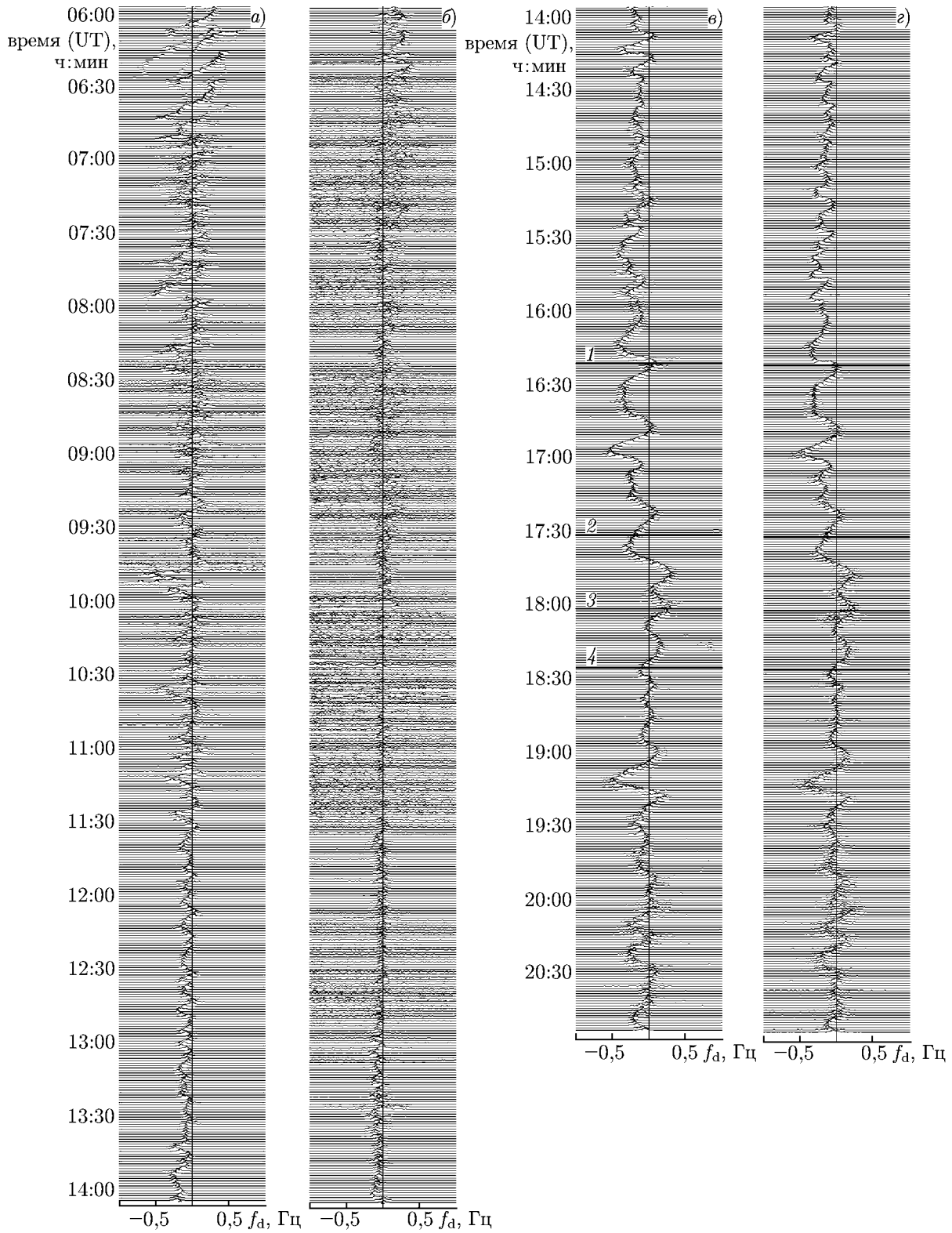


Рис. 1. Временные вариации доплеровских спектров 28 августа 2012 года на частотах 4,2 МГц (а, в) и 3,2 МГц (б, г). Панели (а) и (в) соответствуют диапазону действующих высот 300÷375 км, панели (б) и (г) — высотам 225÷300 км. Линиями 1, 2, 3, 4 отмечены моменты захода Солнца на высотах 0; 100; 200 и 300 км соответственно

времени 14:05÷14:25 UT наблюдался уединённый пуг колебаний с периодом $T \approx 10$ мин, длительностью $\Delta T \approx 20$ мин и амплитудой около 0,25 Гц. Важно, что уединённый пуг колебаний наблюдался также и в радиосигнале с $f = 3,2$ МГц, но на 4 мин раньше. Его амплитуда была меньше примерно в 1,2 раза.

В интервале времени 14:25÷15:10 UT также наблюдался квазипериодический процесс с $f_{da} \approx 0,08$ Гц. С 15:10 до 15:55 UT амплитуда колебаний увеличилась до 0,15 Гц.

Значительное увеличение амплитуды f_{da} до 0,5 Гц наблюдалось в интервале времени 16:00÷17:45 UT. При этом постоянная составляющая f_{d0} всё ещё оставалась отрицательной и достигала $-0,3$ Гц. С 17:45 до 18:20 UT значения f_{d0} становятся положительными и приближаются к 0,1 Гц. Амплитуда f_{da} составляла 0,15 Гц, период T составлял около 15 мин. В интервале времени 18:20÷19:00 UT амплитуда равнялась примерно 0,10 Гц. С 19:00 до 19:30 UT амплитуда уединённого пуга колебаний резко увеличилась и достигла 0,4 Гц, при этом $T \approx 15$ мин.

Аналогичный процесс в том же интервале времени наблюдался и для радиосигнала с частотой $f = 3,2$ МГц, амплитуда которого не превышала 0,3 Гц.

Далее наблюдался квазипериодический процесс с $T = 10\div 15$ мин и $f_{da} \approx 0,1\div 0,2$ Гц.

3.2. Временные вариации доплеровских спектров 29 августа 2012 года

В этот день с момента начала наблюдений, т. е. с 06:00, и до 11:30 UT наблюдался полупрозрачный слой E_s , критическая частота которого доходила до 6,0÷6,7 МГц. Его наличие сильно затрудняло диагностику процессов в ионосфере при помощи доплеровского радиозондирования. На частоте 4,2 МГц наблюдалось исчезновение доплеровских спектров в интервалах времени 06:00÷06:50 и 07:45÷11:00 UT, а на частоте 3,2 МГц — в интервале времени 07:50÷13:00 UT (см. рис. 2). По этой причине в указанных интервалах времени наблюдение за вариациями доплеровского смещения частоты оказалось невозможным.

С 11:00 до 14:30 UT на частоте 4,2 МГц имели место квазипериодические вариации f_d с периодом 6÷10 мин и амплитудой около 0,1 Гц.

В интервале времени 14:30÷15:00 UT амплитуда колебаний увеличилась до 0,25 Гц, период T составлял 15 мин. Имел место уединённый пуг колебаний. Подобное возмущение наблюдалось в интервале времени 14:45÷15:05 UT и на частоте 3,2 МГц ($f_{da} \approx 0,17$ Гц, $T \approx 10$ мин).

Далее отмечались квазипериодические вариации доплеровского смещения частоты с $f_{da} \approx 0,10\div 0,15$ Гц, $T \approx 10$ мин. Постоянная составляющая доплеровского смещения частоты f_{d0} начиная с 11:00 UT постепенно уменьшалась от 0 до $-0,3$ Гц. После 16:00 UT составляющая f_{d0} резко увеличилась от $-0,3$ до 0 Гц. Значение $|f_{d0}| \lesssim 0,1$ Гц оставалось таковым до 21:00 UT.

В интервале времени 17:00÷18:40 UT амплитуда квазипериодических вариаций f_d увеличилась до 0,25 Гц. После 18:40 UT также наблюдались квазипериодические вариации $f_d(t)$, их амплитуда не превышала 0,1 Гц, а период составлял около 15 мин.

После 15:00 UT вариации $f_d(t)$ на частотах 3,2 и 4,2 МГц были практически синхронными. Амплитуда колебаний на более высокой частоте была больше примерно в 1,3 раза.

3.3. Временные вариации доплеровских спектров 30 августа 2012 года

С 06:00 до 08:45 UT наблюдался полупрозрачный слой E_s , критическая частота которого достигала 6 МГц. Его наличие затруднило измерения доплеровских спектров на частоте 4,2 МГц (см. рис. 3). Измерения этих спектров на частоте 3,2 МГц не давали полезной информации до 13:15 UT из-за влияния слоя E_s и сильного поглощения в отклоняющей области, где $f \approx f_{0E_s} \approx$

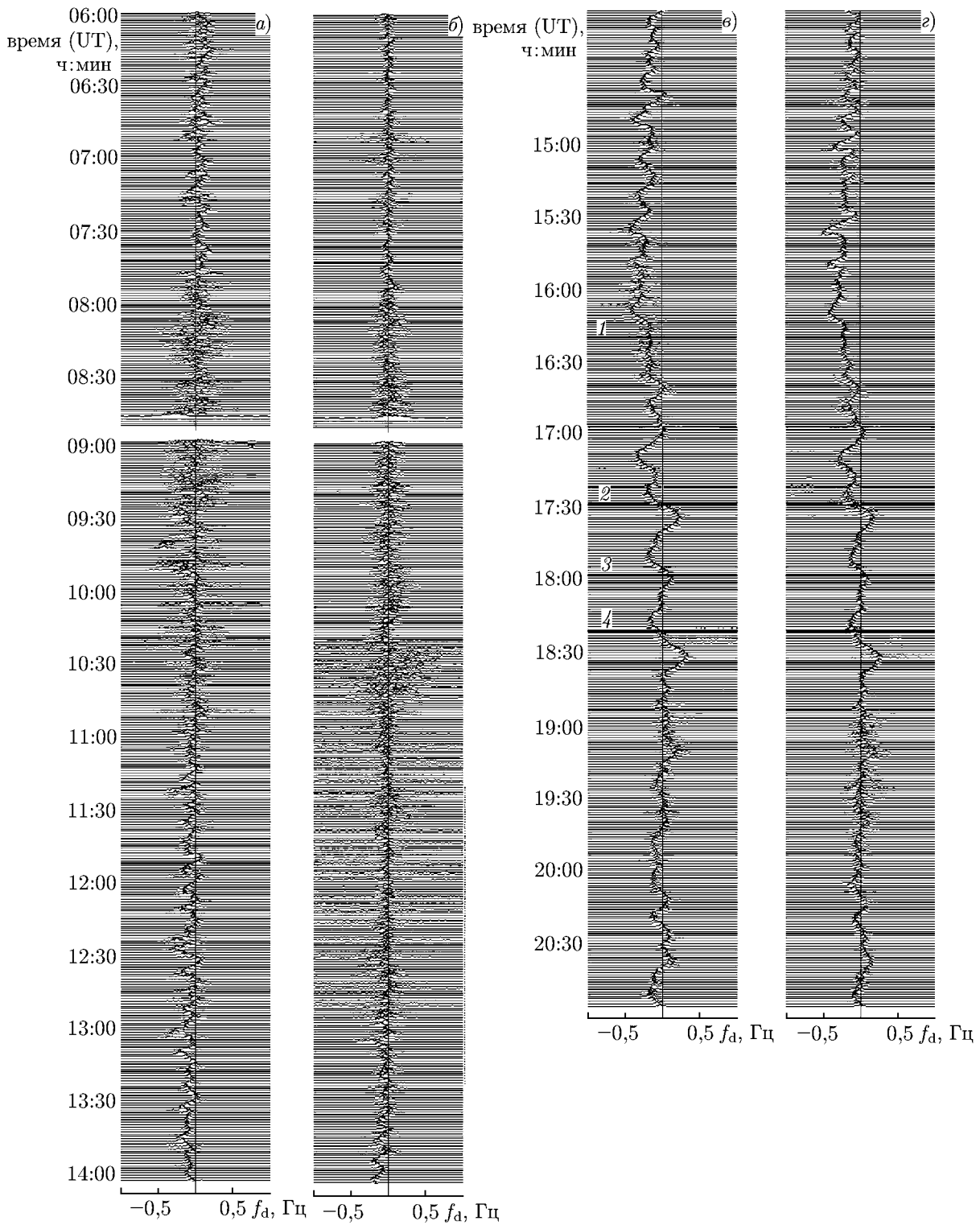


Рис. 2. Временные вариации доплеровских спектров 29 августа 2012 года на частотах 4,2 МГц (а, в) и 3,2 МГц (б, г). Панели (а) и (в) соответствуют диапазону действующих высот 300÷375 км, панели (б) и (г) — высотам 225÷300 км. Линиями 1, 2, 3, 4 отмечены моменты захода Солнца на высотах 0; 100; 200 и 300 км соответственно

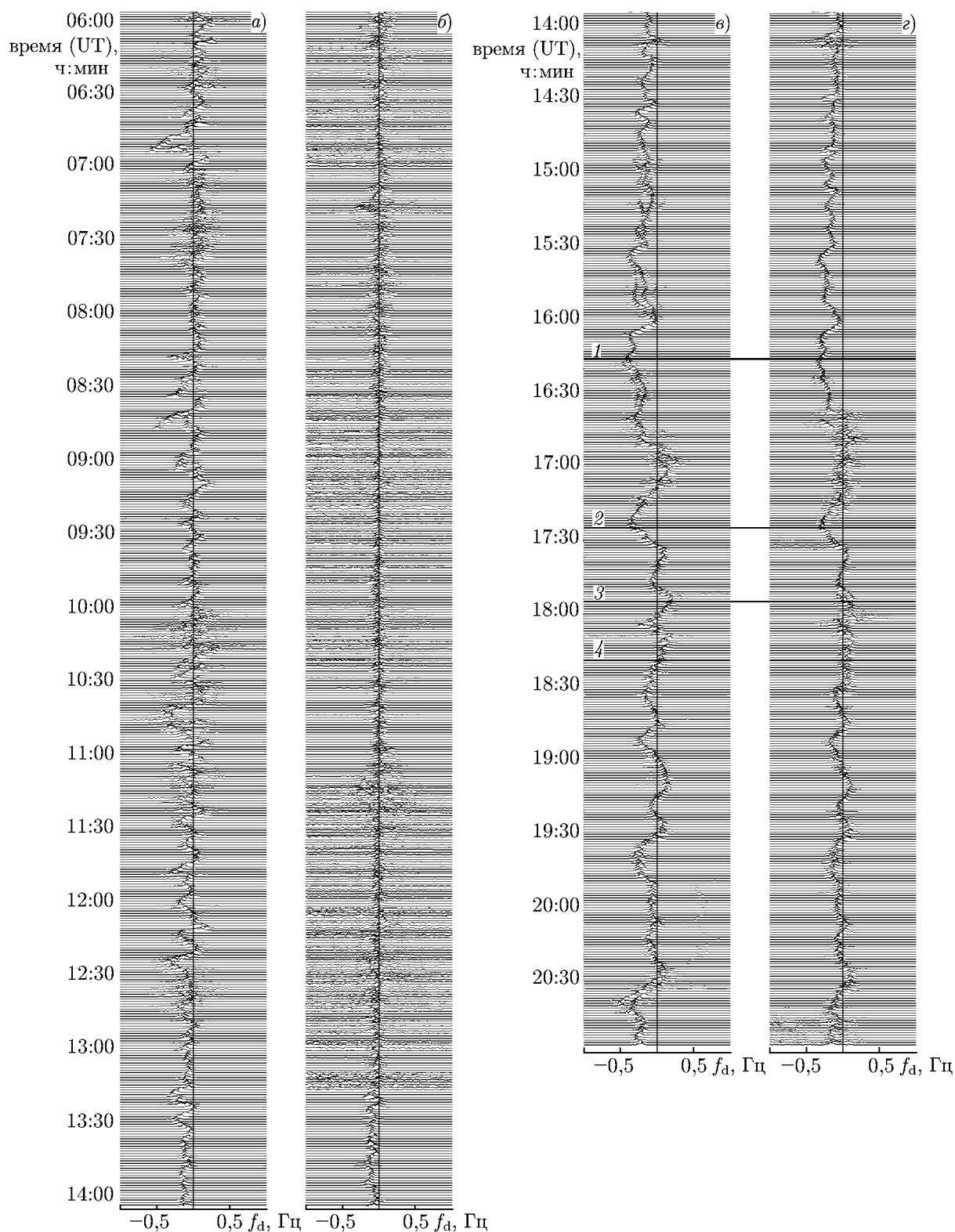


Рис. 3. Временные вариации доплеровских спектров 30 августа 2012 года на частотах 4,2 МГц (*а, в*) и 3,2 МГц (*б, г*). Панели (*а*) и (*в*) соответствуют диапазону действующих высот 300÷375 км, панели (*б*) и (*г*) — высотам 225÷300 км. Линиями 1, 2, 3, 4 отмечены моменты захода Солнца на высотах 0; 100; 200 и 300 км соответственно

$\approx 3,0 \div 3,2$ МГц. Лишь после того, как частота f_{0E_s} уменьшилась до 2,7 МГц, измерения доплеровских спектров на частоте 3,2 МГц стали эффективными и информативными.

Поведение доплеровских спектров на частоте 4,2 МГц было следующим. С 06:00 до 06:45 UT наблюдались слабые колебания доплеровского смещения частоты, спектры были в основном одномодовыми, значение $f_d > 0$. В интервале времени 06:45÷06:55 UT наблюдался резкий всплеск f_d в сторону отрицательных значений, оно уменьшилось на 0,8 Гц. Далее в течение 40 мин имело место исчезновение доплеровских спектров. В последующие 30 мин наблюдались слабые флуктуации f_d .

В интервале времени 08:05÷09:35 UT амплитуда колебаний f_d была значительной. В момент времени 08:45 UT она достигла 0,3 Гц. Период колебаний был близок к 12 мин.

С 10:00 до 11:20 UT опять отмечалось исчезновение доплеровских спектров. В интервале времени 11:20÷12:30 UT наблюдались квазипериодические вариации доплеровского смещения частоты с амплитудой до 0,2 Гц и квазипериодом около 12 мин.

С 13:15 до 13:35 UT регистрировался уединённый пук колебаний с $f_{da} \approx 0,15$ Гц, $T \approx 8$ мин. До и после этого возмущения флуктуации доплеровского смещения частоты были незначительными. Амплитуда колебаний несколько увеличилась в интервале времени 14:10÷15:30 UT.

Добавим, с 14:00 до 21:00 UT вариации доплеровского смещения на частотах 3,2 и 4,2 МГц были практически синхронными. Поэтому далее продолжим описание вариаций $f_d(t)$ на частоте 4,2 МГц. В интервале времени 14:55÷16:05 UT наблюдалось редкое явление — доплеровские спектры эпизодически становились двухмодовыми. Это свидетельствовало о сильной искривлённости отражающей области ионосферы. Высота отражения радиоволны была близка к 180÷200 км.

Примерно с 16:00 до 21:00 UT амплитуда колебаний доплеровского смещения частоты существенно увеличилась. В интервале времени 16:50÷17:35 UT она достигала 0,3 Гц, в остальные интервалы времени она была около 0,15÷0,20 Гц.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Вариации доплеровского смещения частоты 28 августа 2012 года

С 06:15 до 09:45 UT нагрев ионосферы осуществлялся на частоте 4 785 кГц в режиме 30 мин нагрев, 30 мин пауза ([+30 мин; -30 мин]) с эффективной мощностью $PG \approx 75$ МВт. Критическая частота f_{0F_2} слоя F_2 при этом увеличивалась от 6,3 до 7,5 МГц. Высота отражения греющей радиоволны z_r при этом изменялась от 180 до 150 км. При таких условиях эффективно нагревались D - и E -области ионосферы. В верхней части D -области, в E -области и в нижней части F -области существенно увеличивалась концентрация электронов из-за уменьшения коэффициента рекомбинации электронов с молекулярными ионами. Из-за эффектов самовоздействия радиоволны и её дефокусировки на высотах от 100 до 150÷180 км нагрев ионосферы в области верхнего гибридного резонанса был выражен слабо. Такие условия не благоприятствовали генерации акустико-гравитационных волн в атмосфере. По этой причине мы не обнаружили волновые возмущения с периодом 60 мин. Вместе с тем метод доплеровского зондирования нецелесообразно использовать для обнаружения волн с такими периодами, поскольку $f_{da} \approx T^{-1}$. Например, при относительной амплитуде возмущений концентрации электронов $\delta_N = 1\%$ и $f \approx 4,2$ МГц имеем $f_{da} \approx 1,4 \div 10^{-2}$ Гц. Метод более эффективен для обнаружения возмущений концентрации электронов N с периодами $T \approx 1 \div 30$ мин.

В интервале времени 13:00÷16:00 UT частота нагревного стэнда составляла 5 828 кГц, $f_{0F_2} \approx 6,2$ МГц. Нагревная радиоволна при этом отражалась на высотах 240÷270 км. Эффекты самовоздействия и дефокусировки заметно уменьшились. Эффективность нагрева плазмы в области

верхнего гибридного резонанса существенно увеличилась. Вместе с тем была увеличена и эффективная мощность радиоизлучения до $PG \approx 110$ МВт. Всё это привело к улучшению условий генерации акустико-гравитационных волн. В интервале времени 13:00÷13:30 UT стенд излучал непрерывно, а в интервале 13:45÷16:00 UT — в режиме [+10 мин; -10 мин]. В 13:40 UT наблюдалось усиление спектральных амплитуд $f_d(t)$ с периодами 10 и 20 мин (см. рис. 1). Если это усиление связано с включением мощного стенда в 13:00 UT, то время распространения волнового возмущения Δt составляет порядка 40 мин. При расстоянии между нагревным стендом и доплеровским радаром $R \approx 960$ км скорость распространения возмущения v составляла 400 м/с. Такая скорость близка к скорости акустико-гравитационных волн на высотах 150÷200 км. Добавим, что радиоволна на частоте 4,2 МГц отражалась на высоте около 170 км.

Описанное волновое возмущение отсутствовало в вариациях доплеровского смещения частоты для радиоволны на частоте $f = 3,2$ МГц. Эта радиоволна отражалась на высоте около 150 км. Этот факт, по-видимому, свидетельствует о волноводном характере распространения возмущений от нагревного стенда. Ось этого волновода, как показали наши более ранние наблюдения, находится на высоте около 200 км [20–23].

Более интересным является уединённый цуг колебаний, наблюдавшийся в сигнале на частоте 4,2 Гц в интервале времени 14:05÷14:25 UT (см. рис. 1). Рассмотрим его подробнее.

В сигнале на частоте 3,2 МГц уединённое возмущение обнаруживалось на 4 мин раньше. Скорее всего, оно двигалось снизу вверх. Высоты отражения радиоволн отличались на 20 км. Это обстоятельство позволяет оценить вертикальную составляющую скорости. Она была близка к 80 м/с.

Зная амплитуду f_{da} и период волнового возмущения T , можно оценить δ_N по формуле из [15, 16, 18]:

$$\delta_N = \frac{cT}{4\pi L} \frac{f_{da}}{f}, \quad (1)$$

где c — скорость света в вакууме, L — эффективный масштаб изменения δ_N , учитывающей зависимость показателя преломления от высоты (он отличается от истинного масштаба множителем порядка единицы). Полагая $f_{da} \approx 0,25$ Гц, $f \approx 4,2$ МГц, $L \approx 30$ км и $T \approx 10$ мин, из (1) получим, что $\delta_N \approx 3\%$. При $f \approx 3,2$ МГц и $f_{da} \approx 0,2$ Гц имеем $\delta_N \approx 3\%$.

Если уединённое волновое возмущение возникло при выключении мощного стенда в 13:30 UT, то время его запаздывания Δt составляет примерно 35 мин, а скорость распространения возмущения v — 460 м/с. Если это возмущение появилось в результате периодического включения мощного радиоизлучения в режиме [+10 мин; -10 мин], то $\Delta t = 20$ мин, а $v \approx 800$ м/с. Во втором случае значение v заметно превышает скорость звука $v_s \approx 780$ м/с (на высоте 200 км). Это возможно, если уединённое волновое возмущение является солитоном огибающей для акустико-гравитационных волн. Как известно, скорость такого солитона превышает скорость звука [24–28]. Покажем это.

Будем считать, что для скорости одномерного солитона справедливо соотношение из работы [26]

$$v = v_s \left(1 + \frac{2\gamma - 1}{6\gamma(\gamma - 1)} \delta_p \right), \quad (2)$$

где γ — показатель адиабаты, δ_p — амплитуда относительного возмущения давления газа. Полагая, что на высоте $z = 200$ км параметры среды $v_s = 780$ м/с, $\gamma \approx 1,5$ и $\delta_p \approx 0,05 \div 0,1$, получим, что $v \approx 800 \div 815$ м/с. С учётом приближённого характера соотношения (2), это значение хорошо соответствует наблюдаемому значению (около 800 м/с).

Таким образом, волновое возмущение, наблюдаемое в интервале времени 14:05÷14:35 UT, скорее всего, относится к солитонам огибающей. Под солитоном здесь понимается уединённое

волновое возмущение, скорость v которого зависит от его амплитуды, причём $v > v_s$. Огибающая $A(t)$ такого солитона должна быть достаточно быстро убывающей функцией времени. Например, решение нелинейного уравнения Шрёдингера имеет огибающую в виде [28, 29]

$$A(x) = \frac{1}{\text{ch}(x)}.$$

Экспериментальная зависимость $f_d(t)$ хорошо аппроксимируется функцией

$$f_d(t) \approx \frac{f_{d \max}}{\text{ch}^4(t/\tau)} \cos \frac{2\pi t}{T},$$

где $f_{d \max} \approx 0,33$ Гц, $\tau \approx 1,5T$ — «длительность» огибающей солитона, $T = 10$ мин.

Как известно, стационарная волна, именуемая солитоном, обязана своим существованием точной компенсации эффектов дисперсии нелинейными эффектами [28, 29]. В реальном случае квазистационарность волны поддерживается благодаря примерному равенству дисперсионных искажений профиля волны, приводящих к размытию волнового пакета, и нелинейных искажений, противодействующих дисперсионному расплыванию. Очевидно, такая ситуация имела место для пакета акустико-гравитационных волн, обнаруженного 28 августа 2012 года в интервале времени 14:05÷14:25 UT.

Возникновение солитона относится к редким событиям. В работах [14–18] оно не описывалось.

Продолжим обсуждение поведения доплеровских спектров.

После 14:25 UT произошло изменение характера временных вариаций доплеровских спектров (см. рис. 1). При этом время распространения возмущения Δt составляет порядка 40 мин, а его скорость $v \approx 400$ м/с. Скорее всего, это было связано с включением нагревного стенда в 13:45 UT.

Значительное увеличение амплитуды колебаний в интервале времени 16:00÷17:50 UT обусловлено прохождением вечернего солнечного терминатора. Оно имело место в 16:30, 17:30, 18:00, 18:30 и 19:00 UT на высотах 0; 100; 200; 300 и 400 км соответственно.

С 16:40 до 18:30 UT стенд излучал на частоте 4785 кГц, $PG \approx 80$ МВт. При этом выполнены соотношения $f_{0F_2} \approx 6,4 \div 6,5$ МГц и $z_r \approx 230 \div 270$ км. Эффект нагрева в окрестности высоты верхнего гибридного резонанса был достаточно хорошо выражен. Сильные волновые возмущения не позволили наблюдать волновые процессы с периодами 10 или 20 мин. Вместо них после 17:45 UT в ионосфере существовало колебание с $T \approx 15$ мин, по-видимому, созданное движением солнечного терминатора (см. рис. 1).

В интервале времени 18:30÷20:30 UT стенд излучал в режиме [+15 мин; –15 мин], $PG \approx 80$ МВт. Примерно с 19:00 до 19:30 UT наблюдалось значительное увеличение амплитуды колебания с $T \approx 15$ мин (см. рис. 1). При этом амплитуда f_{da} на частоте 4,2 МГц увеличилась от 0,1 до 0,4 Гц. На частоте 3,2 МГц она выросла от 0,08 до 0,3 Гц. Если это увеличение связано с включением стенда в 18:30 UT, то время распространения возмущения Δt составляет порядка 30 мин, а его скорость $v \approx 530$ м/с. Радиоволны с частотами 3,2; 4,2 и 4,785 МГц при этом отражались на высотах около 230; 240 и 250 км соответственно. На этих высотах в ночное время $v_s \approx 780$ м/с. Поэтому наблюдаемое значение v меньше скорости звука v_s , и волновой процесс с такой скоростью к нелинейным волнам типа солитона отнести нельзя. Скорее всего, в фазе сложились два колебания: от солнечного терминатора и от нагревного стенда. Оценим значение δ_N . При $f \approx 4,2$ МГц, $f_{da} \approx 0,4$ Гц, $L \approx 50$ км и $T \approx 15$ мин имеем $\delta_N \approx 8,6\%$. Для $f \approx 3,2$ МГц, $f_{da} \approx 0,3$ Гц имеем такой же результат.

Следующее увеличение амплитуды f_{da} с $T \approx 15$ мин имело место в интервале времени с 20:00 до 20:35 UT (см. рис. 1). При этом $f_{da} \approx 0,2$ Гц, а $\delta_N \approx 4,2\%$.

Таким образом, 28 августа, по крайней мере, в трёх случаях наблюдалась генерация волновых возмущений, вызванная воздействием мощного радиоизлучения на ионосферную плазму.

4.2. Вариации доплеровского смещения частоты 29 августа 2012 года

В интервале времени 06:00÷09:30 UT стэнд излучал на низкой частоте (4785 кГц) в режиме [+30 мин; -30 мин]. Как уже отмечалось в подразделе 4.1, такой режим был неэффективным для генерации волновых возмущений. Их наблюдение было затруднено и даже невозможно из-за экранирующего действия слоя E_s . Этот слой препятствовал наблюдениям на частотах 4,2 и 3,2 МГц примерно до 11:00 и 13:00 UT соответственно.

С 10:45 до 13:00 UT стэнд излучал на частоте 6720 кГц, $PG \approx 150$ МВт, в режиме [+15 мин; -15 мин] при параметрах $f_{0F_2} \approx 6,5\div 7,5$ МГц и $z_T \approx 220$ км. Зондирующие радиоволны с частотой 3,2 и 4,2 МГц при этом отражались на высотах около 100÷130 и 140÷150 км соответственно.

Заметное увеличение амплитуды колебаний от 0,10 до 0,15 Гц имело место в интервале времени 11:45÷13:15 UT (см. рис. 2). Если это увеличение вызвано включением мощного стэнда в 10:45 UT, то время распространения возмущения Δt составляет порядка 60 мин, а его скорость $v \approx 270$ м/с. Эта скорость не сильно отличается от скорости звука на высотах 100÷150 км. Если длительность включения источника волновых возмущений $\Delta t_0 \approx 10$ мин, то $\Delta t \approx 50$ мин, а $v \approx 320$ м/с.

Интересно, что в интервале времени 11:10÷11:25 UT частота нагревной радиоволны f была близка к $f_{0F_2} \approx 6,7$ МГц. Это обстоятельство могло привести к усилению колебаний в интервале времени 12:20÷12:40 UT (см. рис. 2).

Второй раз условие $f \approx f_{0F_2} \approx 6,7$ МГц имело место с 12:40 до 13:00 UT. Заметные изменения характера временных вариаций доплеровского смещения частоты не обнаружено.

Значительное увеличение f_{da} на частоте 4,2 МГц наблюдалось в интервале времени 14:30÷15:00 UT — возникло уединённое волновое возмущение (см. рис. 2). Если оно связано с включением нагревного стэнда в 13:45 UT, то время распространения возмущения Δt составляет порядка 45 мин, а его скорость $v \approx 360$ м/с. Если уединённое возмущение вызвано включением нагревного стэнда в 14:15 UT, то $\Delta t \approx 15$ мин, а $v \approx 1000$ м/с. Добавим, что радиоволны с частотами 3,2; 4,2 и 5,8 МГц отражались на высотах около 150, 170 и 220 км соответственно. Для этого возмущения отклонение концентрации δ_N равно 4,5 %.

На частоте 3,2 МГц уединённое волновое возмущение наблюдалось в интервале времени 14:45÷15:05 UT (см. рис. 2). Для него время Δt составляет 60 или 30 мин, которым соответствуют значения v около 270 и 540 м/с соответственно.

Колебание, которое наблюдалось в интервале времени 15:00÷15:50 UT, могло быть вызвано воздействием мощного радиоизлучения стэнда, который включился в 14:15 UT. При этом для параметров возмущения выполнены соотношения $\Delta t \approx 45$ мин, $v \approx 360$ м/с, а $\delta_N \approx 1,8$ %.

В интервале времени 16:20÷18:40 UT определяющую роль в вариациях $f_d(t)$ играло движение солнечного терминатора. Период основного колебания достигал 30 мин, а $f_{da} \approx 0,25$ Гц (см. рис. 2). При $f \approx 4,2$ МГц и $L \approx 50$ км имеем $\delta_N \approx 5,3$ %.

С 18:30 до 20:30 UT нагревный стэнд излучал в режиме [+15 мин; -15 мин] на частоте 5828 кГц, $PG \approx 130$ МВт. Радиоволна при этом отражалась на высотах около 270 км, а после 18:55 UT стало выполняться условие $f > f_{0F_2}$, где $f_{0F_2} \leq 5,7$ МГц. Характер колебаний $f_d(t)$ на обеих частотах существенно изменился в интервале времени 19:35÷20:45 UT. При этом преобладало колебание с $T \approx 15$ мин. Скорее всего, оно создано мощным радиоизлучением. Если момент прихода волнового возмущения отсчитывать от момента включения стэнда, то время распространения возмущения Δt составляет порядка 65 мин. Однако более разумно его отсчитывать от момента, когда частота нагревной радиоволны приблизилась к $f_{0F_2} \approx 5,7$ МГц, тогда $\Delta t \approx 40$ мин, а $v \approx 400$ м/с. Добавим, что радиоволны с частотами 3,2 и 4,2 МГц при этом отражались на высотах 240÷250 и 260÷270 км соответственно. Для радиоволны с $f \approx 3,2$ МГц имеем

$\Delta t \approx 45$ мин и $v \approx 360$ м/с. Амплитуда f_{da} для частоты 4,2 МГц составляла около $0,11 \div 0,12$ Гц. При $T \approx 15$ мин и $L \approx 50$ км это даёт $\delta_N \approx 1,2 \div 1,3$ %.

Таким образом, 29 августа в ряде случаев также обнаружено усиление волновых возмущений, последовавших за включением мощного радиоизлучения нагревного стенда.

4.3. Вариации доплеровского смещения частоты 30 августа 2012 года

С 07:00 до 09:30 UT нагрев ионосферы осуществлялся на частоте 4785 кГц в режиме $[+30$ мин; -30 мин], $PG \approx 70$ МВт. При этом $f_{0F_2} \approx 7,1 \div 4,4$ МГц, а $z_r \approx 160 \div 150$ км соответственно.

Заметное увеличение амплитуды колебаний f_d , имевшее место в интервале времени 08:05 \div 09:15 UT, вряд ли вызвано воздействием мощного радиоизлучения. Как отмечалось в подразделе 4.1, этот режим не относился к эффективным. Кроме того, время запаздывания реакции на включение стенда Δt составляло 65 мин, что заметно превышало время запаздывания в других наших наблюдениях.

С 10:00 до 18:25 UT излучали только два радиопередающих устройства из трёх, так что диаграмма направленности в этом случае была многолепестковой; также уменьшился и коэффициент усиления антенной системы.

В интервале времени 10:00 \div 11:15 UT стенд излучал в режиме $[+5$ мин; -5 мин] на частоте 6720 кГц, $PG \approx 65$ МВт. Значение f_{0F_2} изменялось в пределах $6,9 \div 7,3$ МГц, а высота отражения z_r составляла примерно 220 км. В этот период времени спектры были диффузными, отмечались слабые колебания с квазипериодом $T \approx 6 \div 8$ мин. Скорее всего, эти колебания не были связаны с воздействием мощного радиоизлучения.

Заметим, что примерно в 11:10 UT частота нагревной волны оказалась близкой к $f_{0F_2} \approx 6,7$ МГц. По-видимому, в результате этого в интервале времени 11:50 \div 12:30 UT имело место увеличение амплитуды колебаний до 0,2 Гц (см. рис. 3).

Появление уединённого волнового возмущения в интервале времени 13:15 \div 13:35 UT не связано с его генерацией мощным радиоизлучением: нагревный стенд в это время не функционировал.

Следующее включение нагревного стенда с 13:35 до 14:02 UT на частоте 6500 кГц происходило в режиме непрерывного излучения, $PG \approx 65$ МВт. В интервале времени 14:05 \div 14:45 UT наблюдалось увеличение амплитуды вариаций $f_d(t)$. Если оно было вызвано воздействием мощного радиоизлучения, то время распространения возмущения Δt составляет порядка 35 мин, а его скорость $v \approx 460$ м/с.

С 14:20 до 14:40 UT стенд работал также в непрерывном режиме на той же частоте и с той же эффективной мощностью. Особенностью стало то, что в интервале времени 14:00 \div 14:30 UT частота нагревной радиоволны была близка к $f_{0F_2} \approx 6,65 \div 6,70$ МГц, а около 15:00 UT она стала равной f_{0F_2} . Примерно через 40 мин после включения стенда доплеровские спектры стали двухмодовыми, а отражающая зондирующие радиоволны ионосферная поверхность — сильно искривлённой (см. рис. 3). Это продолжалось около 30 мин. Две аналогичные моды в спектрах наблюдались также в интервале времени 15:45 \div 16:05 UT. Скорее всего, такое поведение было вызвано выполнением условия $f \approx f_{0F_2}$. Время запаздывания при этом составило около 40 \div 45 мин, а $v \approx 360 \div 400$ м/с.

Добавим, что на частоте 3,2 МГц подобный эффект не наблюдался. Высоты отражения радиоволн с частотами 3,2; 4,2 и 6,5 МГц составляли около 160; 180 и 230 км соответственно.

Судя по всему, при приближении частоты волны накачки к критической частоте слоя F_2 в случае многолепестковой диаграммы направленности антенны происходила генерация волн плотности, распространяющихся от нагревного стенда со скоростью около 400 м/с.

Следующее включение нагревного стенда происходило на частоте 5 828 кГц в режиме [+20 мин; -10 мин], $PG \approx 45$ МВт. Критическая частота f_{0F_2} составляла 6,5÷6,6 МГц. Волна накачки отражалась на высотах 215÷240 км, а зондирующие волны с частотами 3,2 и 4,2 МГц — на высотах 160÷210 и 180÷220 км соответственно. В предзаходное время высоты отражения радиоволн постепенно увеличивались и сдвигались вверх на 30÷50 км.

В интервале времени 16:00÷17:00 UT преобладало колебание с параметрами $T \approx 30$ мин и $f_{da} \approx 0,15 \div 0,20$ Гц (см. рис. 3). Именно таким был период цикла нагревного стенда. Скорее всего, колебание с периодом $T \approx 30$ мин, обычно возникающее при движении солнечного терминатора, было усилено мощным периодическим радиоизлучением, т. к. оно возникло со временем запаздывания $\Delta t \approx 40$ мин, чему соответствует скорость распространения $v \approx 400$ м/с и возмущение концентрации $\delta_N \approx 3,2 \div 4,3$ %.

С 17:00 до 17:35 UT наблюдалось одиночное колебание с квазипериодом $T \approx 30$ мин и амплитудой около 0,3 Гц (см. рис. 3). Оно явилось продолжением квазипериодического процесса, наблюдаемого после 16:00 UT. Нет сомнений, что оно вызвано движением солнечного терминатора. Свой вклад в увеличение его амплитуды мог внести волновой процесс, порождённый мощным радиоизлучением. Усиление колебания закончилось примерно в 17:35 UT.

Последнее включение нагревного стенда на частоте 5 828 кГц в режиме [+5 мин; -5 мин] имело место в интервале времени 17:00÷18:25 UT, $PG \approx 45$ МВт. Частота f_{0F_2} составляла 6,65÷6,7 МГц. Волна накачки отражалась на высотах 240÷270 км, а зондирующие радиоволны с частотами 3,2 и 4,2 МГц отражались на высотах 210÷240 и 230÷250 км соответственно.

С 17:35 до 20:30 UT в вариациях $f_d(t)$ преобладало колебание с $T \approx 20$ мин и $f_{da} \approx 0,1 \div 0,2$ Гц (см. рис. 3). В основном это колебание имело естественное происхождение, но могло «подпитываться» мощным периодическим радиоизлучением. Об этом свидетельствует момент появления колебания (17:35 UT), который отстоял на 35 мин от момента включения нагревного стенда. При этом скорость волнового процесса, пришедшего от нагревного стенда, составляла около 460 м/с. Предположение о возможном усилении колебания представляется оправданным также потому, что из-за значительного уменьшения поглощения радиоволны накачки в нижней ионосфере и её дефокусировки в средней ионосфере в ночное время эффективность возмущения ионосферной плазмы в области верхнего гибридного резонанса увеличилась.

ВЫВОДЫ

1) Подтверждено, что мощное радиоизлучение приводит к генерации (или усилению) волновых процессов в ионосфере в диапазоне периодов внутренних гравитационных волн (10÷30 мин). Скорость распространения волновых процессов составляла 360÷460 м/с. Относительная амплитуда возмущений концентрации электронов при этом равнялась 2÷3 %.

2) Обнаружены уединённые волновые возмущения с периодами 10÷15 мин, длительностью 20÷30 мин и относительной амплитудой возмущений концентрации электронов, равной 3÷8 %. Амплитуда таких возмущений была примерно в 3 раза больше подобных, но не локализованных возмущений, а их скорость превышала скорость звука на соответствующих высотах. Оба признака свидетельствуют о нелинейности волнового процесса, т. е. о солитонной природе возмущения.

3) Подтверждено, что эффективность генерации периодических возмущений в ионосфере с периодами 10÷60 мин существенно зависит от режима излучения нагревного стенда. В частности, использование низких (4785 кГц) частот в дневное время оказывается неэффективным из-за значительного самовоздействия волны накачки в нижней ионосфере и её дефокусировки в средней ионосфере.

4) Эффективность генерации волновых возмущений увеличивается при приближении частоты волны накачки к критической частоте слоя F_2 .

5) Мощное периодическое радиоизлучение способно, в зависимости от фазы включения стэнда, усиливать или ослаблять волновые возмущения, генерируемые вечерним солнечным терминатором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев Г. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 12. С. 1801.
2. Григорьев Г. И., Трахтенгерц В. Ю. // Геомагнетизм и аэрономия. 1999. Т. 39, № 6. С. 90.
3. Караштин А. Н., Митяков Н. А., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20, № 5. С. 787.
4. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шварцбург А. Б. // Компьютерная оптика. 1989. Вып. 6. С. 62.
5. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. // Вестник Харьковского университета. Радиофизика и электроника. 1988. № 318. С. 29.
6. Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29, № 3. С. 513.
7. Мисюра В. А., Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. // Космическая наука и техника. 1989. Вып. 4. С. 72.
8. Гармаш К. П., Гритчин А. И., Губарев А. А. и др. // Труды НИИР. М.: Радио и связь, 1989. № 9. С. 57.
9. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. // Космическая наука и техника. 1990. Вып. 5. С. 71.
10. Костров Л. С., Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30, № 1. С. 159.
11. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. // Успехи современной радиоэлектроники. 1998. № 6. С. 17.
12. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. // Электромагнитные явления. 1998. Т. 1, № 1. С. 90.
13. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2009. Т. 14, № 4. С. 377.
14. Бурмака В. П., Домнин И. Ф., Урядов В. П., Черногор Л. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 11. С. 859.
15. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Комраков Г. П., Пушин В. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 2. С. 81.
16. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 14.
17. Домнин И. Ф., Панасенко С. В., Урядов В. П., Черногор Л. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 4. С. 280.
18. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Пушин В. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 5. С. 327.
19. Mishin E., Sutton E., Milikh G., et al. // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. P. L11101.
20. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2012. Т. 17, № 3. С. 240.
21. Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48, № 5. С. 681.
22. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46, № 2. С. 193.
23. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46, № 2. С. 209.
24. Савина О. Н., Ерухимов Л. М. // Геомагнетизм и аэрономия. 1981. Т. 21, № 4. С. 679.
25. Деминова Г. Ф., Деминов М. Г., Ерухимов Л. М. и др. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 22, № 2. С. 211.
26. Данов К. Д. // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29, № 2. С. 343.
27. Пушин В. Ф., Черногор Л. Ф. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. Т. 12, № 11. С. 33.

28. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке. Харьков: Харьков. нац. ун-т им. В. Н. Каразина, 2008. 528 с.
29. Островский Л. А., Потапов А. И. Введение в теорию модулированных волн. М.: Физматлит, 2003. 400 с.

Поступила в редакцию 6 мая 2013 г.; принята в печать 14 июня 2013 г.

FEATURES OF THE WAVE DISTURBANCES IN THE IONOSPHERE DURING PERIODIC HEATING OF THE PLASMA BY THE “SURA” RADIATION

L. F. Chernogor and V. L. Frolov

We present the results of observations of the Doppler-spectrum and Doppler-frequency shift variations of the ionosphere-reflected radio signals from a high-frequency vertical-sounding radar when the ionospheric plasma is affected by the high-power periodic radiation of the “Sura” heating facility. The distance from the heater to the Doppler radar is about 960 km. It has been confirmed that high-power radiation leads to the generation (amplification) of wave disturbances in the parameter range of internal gravity waves (periods 10–30 min and velocities 360–460 m/s). Solitary packets of soliton-like waves with a period of 10–15 min, a duration of 20–30 min, and a relative amplitude of electron-density perturbations from 3 to 8% have been detected. The same parameter for other wave disturbances was 1–3%. It has been confirmed that the generation efficiency of periodic disturbances in the parameter range of internal gravity waves depends significantly on the heater operation regime.