

УДК 550.388:533.951+573.868

ПЕРЕМЕЩАЮЩИЕСЯ ИОНОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИМ НАГРЕВОМ ПЛАЗМЫ МОЩНЫМ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ

Л. Ф. Черногор¹, В. Л. Фролов²

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 доплеровского смещения частоты отражённого от ионосферы электромагнитного излучения декаметрового диапазона длин волн в период воздействия на плазму мощным радиоизлучением стенда «Сура» и в контрольные дни. Расстояние от стенда до средства диагностики (доплеровского радара) составляло около 1 000 км. Обнаружены перемещающиеся ионосферные возмущения, которым соответствовали время запаздывания по отношению к моменту включения мощного периодического излучения около 50 мин и скорость распространения $300 \div 400$ м/с. Относительная амплитуда возмущений концентрации электронов составляла $1 \div 4$ %, а период их колебаний — десятки минут. Параметры перемещающихся ионосферных возмущений существенно зависели от режима излучения стенда «Сура».

ВВЕДЕНИЕ

Возможность генерации акустико-гравитационных волн в верхней атмосфере с помощью мощного радиоизлучения наземных станций была теоретически предсказана авторами [1–3].

Систематические экспериментальные исследования крупномасштабных (т. е. имеющих размеры порядка 1 000 км) возмущений в околоземной плазме, включая перемещающиеся ионосферные возмущения, начаты Харьковским университетом весной 1983 года после ввода в эксплуатацию стенда «Сура» в ФГБНУ «Научно-исследовательский радиофизический институт», г. Нижний Новгород. Диагностика крупномасштабных возмущений осуществлялась при помощи излучающих вертикально вверх среднечастотного радара частичных отражений, доплеровского радара высокочастотного диапазона, ионозондов и ряда пассивных средств [4–12]. Основным результатом этих работ явилось установление существенной зависимости самого факта генерации крупномасштабных возмущений и их параметров от состояния космической погоды, времени суток, сезона и режима работы стенда.

К новым работам на эту тему относятся статьи [13–15]. В [13] показано, что перемещающиеся ионосферные возмущения возникают не только в F -области, но и в нижней ионосфере на высотах $z \leq 100$ км. В [14] описаны результаты наблюдений за перемещающимися ионосферными возмущениями в F -области ионосферы при помощи радара некогерентного рассеяния, находящегося в г. Харьков. Показано, что периодический нагрев плазмы приводил к генерации перемещающихся ионосферных возмущений, которые характеризовались относительными вариациями концентрации электронов с амплитудой $\delta_N = 2 \div 10$ %, периодами 30; 60; 120 и $150 \div 180$ мин и движением со скоростями $330 \div 560$ м/с. В работе [15] представлены результаты наблюдений за перемещающимися ионосферными возмущениями при помощи доплеровского радара. Установлено, что спектральные характеристики квазипериодических вариаций доплеровского смещения частоты в дни излучения стенда «Сура» и в контрольные дни существенно различались. Это рассматривалось как свидетельство в пользу генерации или усиления мощным периодическим радиоизлучением стенда перемещающихся ионосферных возмущений с амплитудой изменения электронной концентрации $\delta_N = 1 \div 4$ %.

Настоящая работа является продолжением [15]. Общая схема выполненных в период 15–23 августа 2011 года экспериментов такая же, как и в [15]; отличаются только режимы излучения стенда «Сура». По результатам этой серии измерений можно заключить, что эффективность генерации перемещающихся ионосферных возмущений здесь, в целом, была выше, чем в экспериментах, описанных в [15].

1. СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Состояние космической погоды оценивалось при помощи ряда индексов (табл. 1). Индекс АЕ, характеризующий приток энергии солнечного ветра в высоких широтах, в дни измерений и в контрольные дни не превышал 550 нТл. Лишь 15 августа 2011 года он достиг 700 нТл. В этот день индекс D_{st} , характеризующий интенсивность кольцевого тока в экваториальной области, приблизился к -20 нТл. При этом максимальное значение планетарного индекса K_p равнялось 4. Наблюдалась слабая магнитная буря. Ей соответствовали индексы $A_p = 11$ и $a_{p\max} = 27$. В остальные дни проведения измерений состояние космической погоды было спокойным. Наиболее спокойным оно было 18 августа 2011 года. При этом индекс $K_{p\max} = 1$, а суммарный за сутки индекс K_p равнялся 4^- , значения других индексов были следующими: $a_{p\max} = 4$, $A_p = 2$, $|D_{st}| \leq 9$ нТл и $AE_{\max} \approx 136$ нТл.

16 августа 2011 года в течение эксперимента (до 17:00 UT) присутствовал полупрозрачный слой E_s с критической частотой $f_{oE_s} \approx 3,5 \div 4$ МГц. Этот слой с критической частотой $f_{oE_s} \approx 3 \div 3,5$ МГц эпизодически наблюдался и в другие дни.

Временные вариации критической частоты f_{oF_2} в ионосфере над г. Харьковом в среднем были следующими. Примерно с 14:00 до 16:00 UT частота f_{oF_2} уменьшалась от 6 до 5,3 МГц. В интервале времени 16:00–17:00 UT она флуктуировала в пределах 5,3–5,5 МГц. С 17:00 до 19:00 частота f_{oF_2} увеличивалась от 5,3–5,5 до 6,4–6,8 МГц. Заметим, что локальное время в месте измерения опережало на три часа мировое время.

Таким образом, состояние космической погоды было благоприятным для наблюдения эффектов модификации ионосферы мощным высокочастотным радиоизлучением.

Таблица 1. Параметры, характеризующие состояние космической погоды в августе 2011 года

сутки	АЕ, нТл	$K_{p\max}$	ΣK_p	$a_{p\max}$	A_p	D_{st} , нТл
14.08.2011	41–537	3	17	18	9	–15–14
15.08.2011	57–692	4	19 [–]	27	11	–20–7
16.08.2011	27–390	3	15 [–]	12	7	–21–1
17.08.2011	33–453	3	12 [–]	15	6	–16–2
18.08.2011	27–136	1	4 [–]	4	2	–6–9
19.08.2011	15–60	1 ⁺	4 [–]	5	2	–7–1
20.08.2011	36–216	3 [–]	10	12	5	–6–13
21.08.2011	15–74	1 ⁺	6 [–]	5	3	–2–8
22.08.2011	26–550	3 [–]	12 ⁺	12	6	–13–4
23.08.2011	30–448	3 ⁺	16 [–]	18	9	–5–6

2. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

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

Во время рассматриваемых в работе экспериментов в большинстве случаев работали два модуля стенда, редко — один. При работе двух модулей эффективная мощность излучения волны накачки составляла $PG \approx 35 \div 70$ МВт в зависимости от частоты. Диаграмма направленности антенны стенда была наклонена к югу на 12° . В случае использования радиоволн обыкновенной поляризации это обеспечивало усиление 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 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. Харькова, Украина, на территории Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина, её координаты равны $49^\circ 38'$ с. ш. и $36^\circ 20'$ 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. Отношение сигнал/помеха радара q в ночное время достигает $10^5 \div 10^6$. В дневное время параметр q 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, их результаты представлены на рис. 1–7 для каждого из дней наблюдений. Поскольку временные вариации доплеровских спектров оказались подобными, ниже приводится описание только результатов измерений, выполненных на частоте 4,2 МГц. Радиоволна на этой частоте проникала в ионосферу на большее расстояние, и, кроме того, значения q для неё заметно выше, чем для радиоволны на частоте 3,2 МГц.

Высотная протяжённость области отражения 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 с выделением 5 каналов приёма в диапазоне действующих высот $z' = 75 \div 450$ км, которым соответствовали истинные высоты $75 \div 300$ км. В основном приёмном 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.

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 с разрешением по частоте порядка 0,02 Гц. Погрешность оценки доплеровского смещения частоты, например при $q = 10^3 \div 10^2$, составляла $(1,8 \div 5,8) \cdot 10^{-3}$ Гц. При больших значениях q она была ещё меньше.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

3.1. Временные вариации доплеровского смещения частоты в контрольный день 15 августа 2011 года

15 августа 2011 года можно рассматривать как контрольный день. В этот день включался только один передатчик на половинной мощности (эффективная мощность $PG = 4$ МВт) с 18:07 до 19:17 UT в режиме 10 мин — излучение, 10 мин — пауза. При этом создаваемые вследствие нагрева ионосферы возмущения параметров плазмы в её F -области не превышали 1 %, оставаясь меньше их естественных флуктуаций.

До захода Солнца в районе г. Харькова (около 17:00 UT) регистрировалась постоянная составляющая доплеровского смещения частоты $\bar{f}_d \approx -0,3$ Гц в интервале времени 14:00÷17:00 UT (рис. 1). Амплитуда f_{da} квазипериодических вариаций доплеровского смещения частоты f_d составляла $0,2 \div 0,3$ Гц. Преобладало колебание с периодом $T \approx 10$ мин.

В интервале времени 17:05÷17:45 UT наблюдалось резкое увеличение сдвига частоты f_d от $-0,5$ до $0,1$ Гц, а затем его уменьшение от $0,1$ до $-0,9$ Гц, а потом снова его увеличение от $-0,9$ до $-0,3$ Гц. Через 15 мин после этого последовал рост сдвига частоты f_d от $-0,3$ до $0,2$ Гц, затем его падение до $-0,5$ Гц. В 18:35 UT наблюдался новый минимум сдвига частоты f_d со значением $-0,75$ Гц.

Не вызывает сомнений, что такое поведение сдвига частоты $f_d(t)$ вызвано прохождением солнечного терминатора через область зондирования. Заметим, что заход Солнца в месте наблюдения на высотах 100, 200 и 300 км имел место примерно в 18:06, 18:40 и 19:09 UT соответственно.

3.2. Временные вариации доплеровского смещения частоты в контрольный день 16 августа 2011 года

Как и в предыдущий день, доплеровское смещение частоты в интервале времени 14:00÷18:00 UT оставалось отрицательным (рис. 2). Наблюдались квазипериодические процессы с переменным периодом $T \approx 10 \div 20$ мин. Примерно после 16:50 UT произошло изменение характера вариаций доплеровского сдвига частоты $f_d(t)$. Квазипериодические процессы оказались подавленными, и сдвиг частоты составил $f_d \approx -(0,6 \div 0,5)$ Гц в интервале времени 16:55÷17:25 UT.

3.3. Временные вариации доплеровского смещения частоты 17 августа 2011 года

В этот день с 13:51 до 16:41 UT модификация ионосферной плазмы осуществлялась радиоволной необыкновенной поляризации на частоте $f_{BH} = 4785$ кГц с эффективной мощностью $PG = 50$ МВт в режиме 10 мин — излучение, 10 мин — пауза; в паузу каждые 2 мин дополнительно излучались импульсы с длительностями 15 с. С 16:41 до 18:52 UT режим излучения был следующим: $f_{BH} = 4785$ кГц, $PG = 50$ МВт, 5 мин — излучение, 5 мин — пауза, а с 19:06 до 20:00 UT: $f_{BH} = 4300$ кГц, $PG = 35$ МВт, 5 мин — излучение, 5 мин — пауза.

Как и в контрольные дни, в интервале времени 14:00÷19:00 UT сдвиг частоты $f_d < 0$. Средняя величина $\bar{f}_d \approx -(0,3 \div 0,2)$ Гц (рис. 3). С 15:30 до 16:10 UT наблюдались квазипериодические вариации сдвига частоты f_d с периодом $T \approx 10$ мин и $f_{da} \approx 0,2$ Гц.

Характер поведения доплеровских спектров существенно изменился после 16:10 UT. Они уширились, стали «диффузными», в них не было чётко выделенной центральной частоты. Ширина спектров достигала 0,5 Гц, тогда как в «спокойных» условиях ширина одномодового спектра была порядка 0,1 Гц. Диффузный характер спектров имел место во всех высотных каналах.

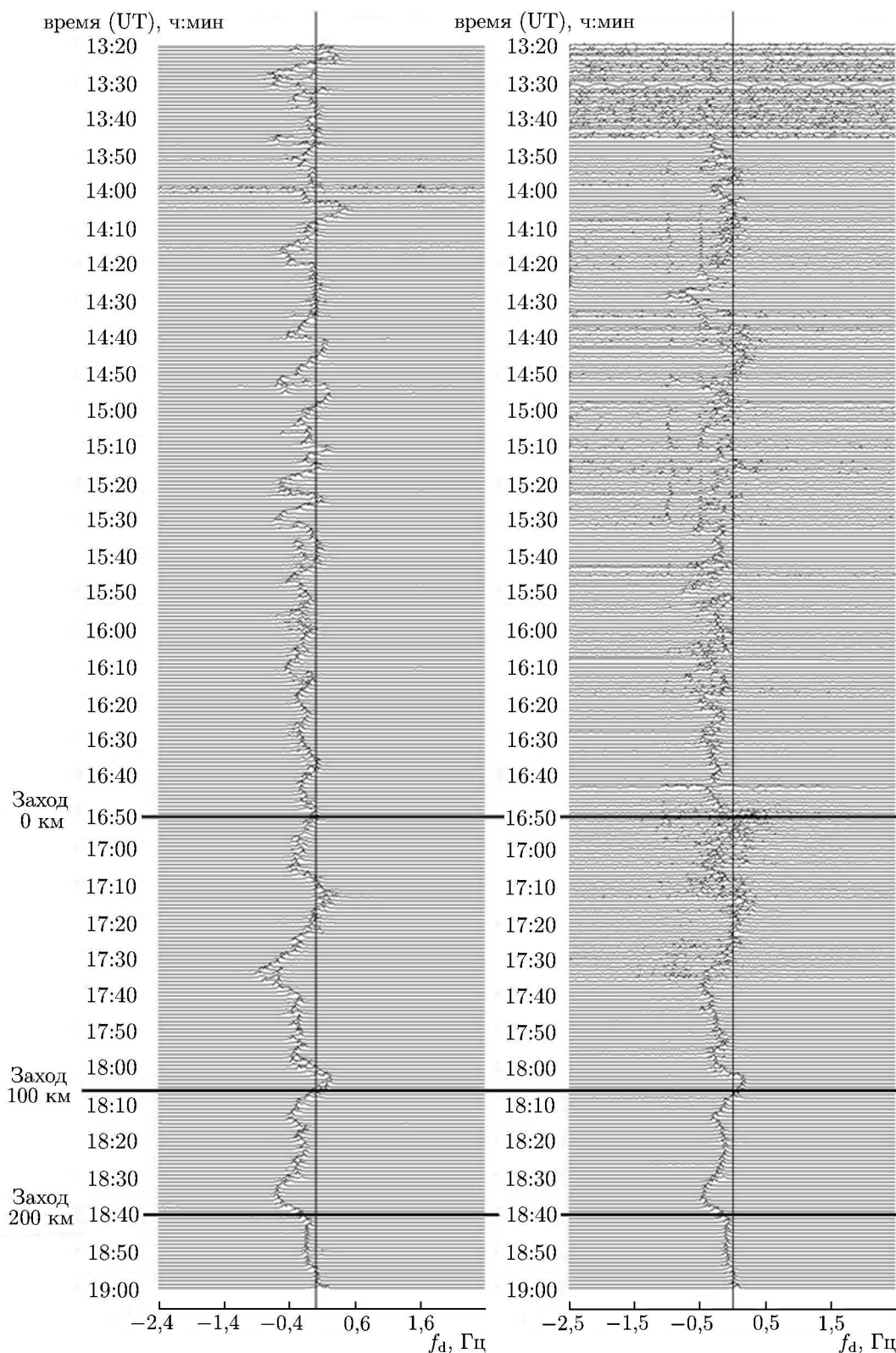


Рис. 1. Временные вариации доплеровских спектров 15 августа 2011 года на частоте 4 201 кГц (панель слева) и на частоте 3 200 кГц (панель справа) в диапазоне действующих высот 300÷375 км

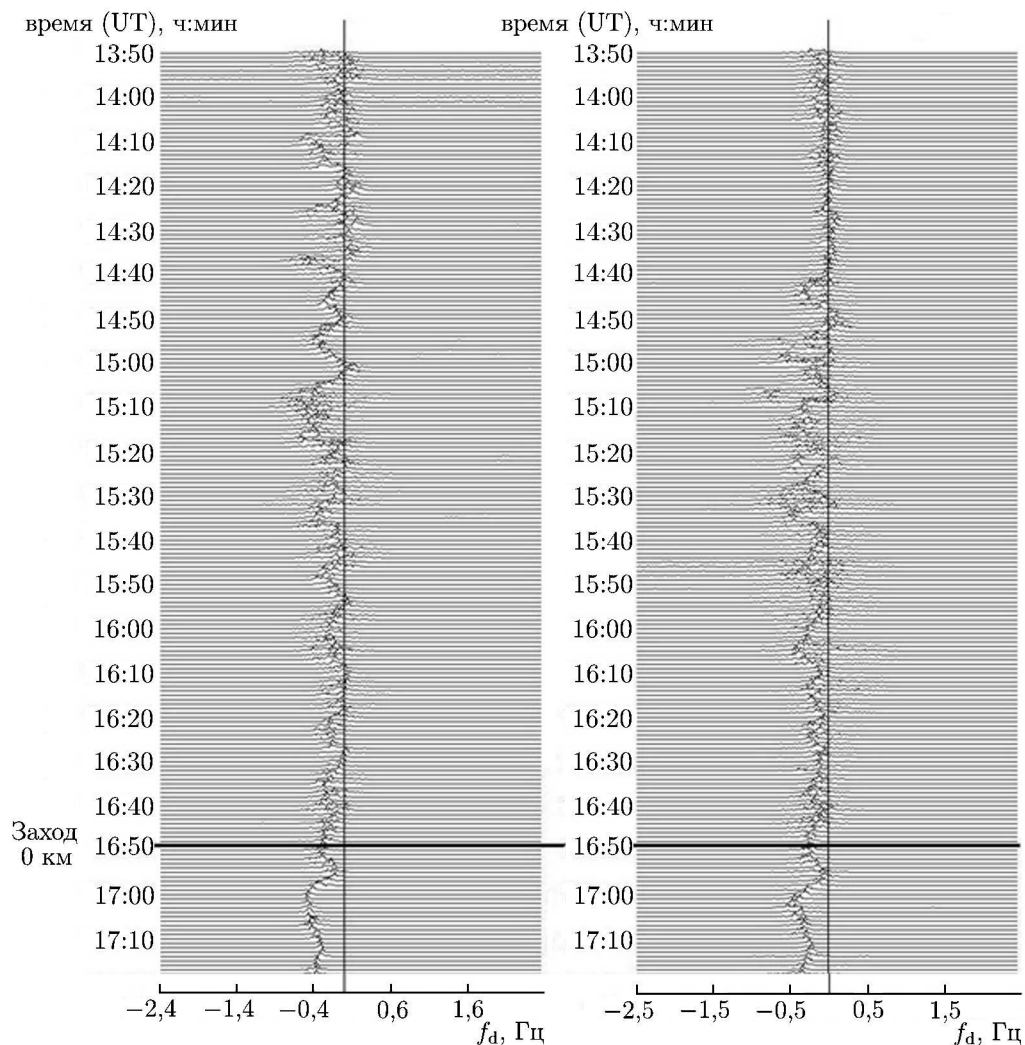


Рис. 2. Временные вариации доплеровских спектров 16 августа 2011 года на частоте 4201 кГц в диапазоне действующих высот 300÷375 км (панель слева) и на частоте 3200 кГц в диапазоне действующих высот 225÷300 км (панель справа)

В интервале времени 16:50÷17:50 UT, несмотря на диффузный характер доплеровских спектров, на фоне постоянной составляющей прослеживались знакопеременные вариации сдвига частоты $f_d(t)$. Их амплитуда достигала 0,5 Гц. После 18:00 UT амплитуда квазипериодических возмущений уменьшилась до 0,2 Гц.

3.4. Временные вариации доплеровского смещения частоты 18 августа 2011 года

С 07:30 до 12:00 UT модификация ионосферы осуществлялась радиоволной необыкновенной поляризации на частоте $f_{ВН} = 4785$ кГц с эффективной мощностью излучения $PG = 50$ МВт в режиме 30 мин — излучение, 30 мин — пауза.

В интервале времени 12:16÷18:50 UT нагрев ионосферы проводился радиоволной обыкновенной поляризации на частоте $f_{ВН} = 4785$ кГц с эффективной мощностью $PG = 50$ МВт в режиме 10 мин — излучение, 10 мин — пауза. В паузах каждые 2 мин дополнительно излучались импульсы с длительностями 15 с.

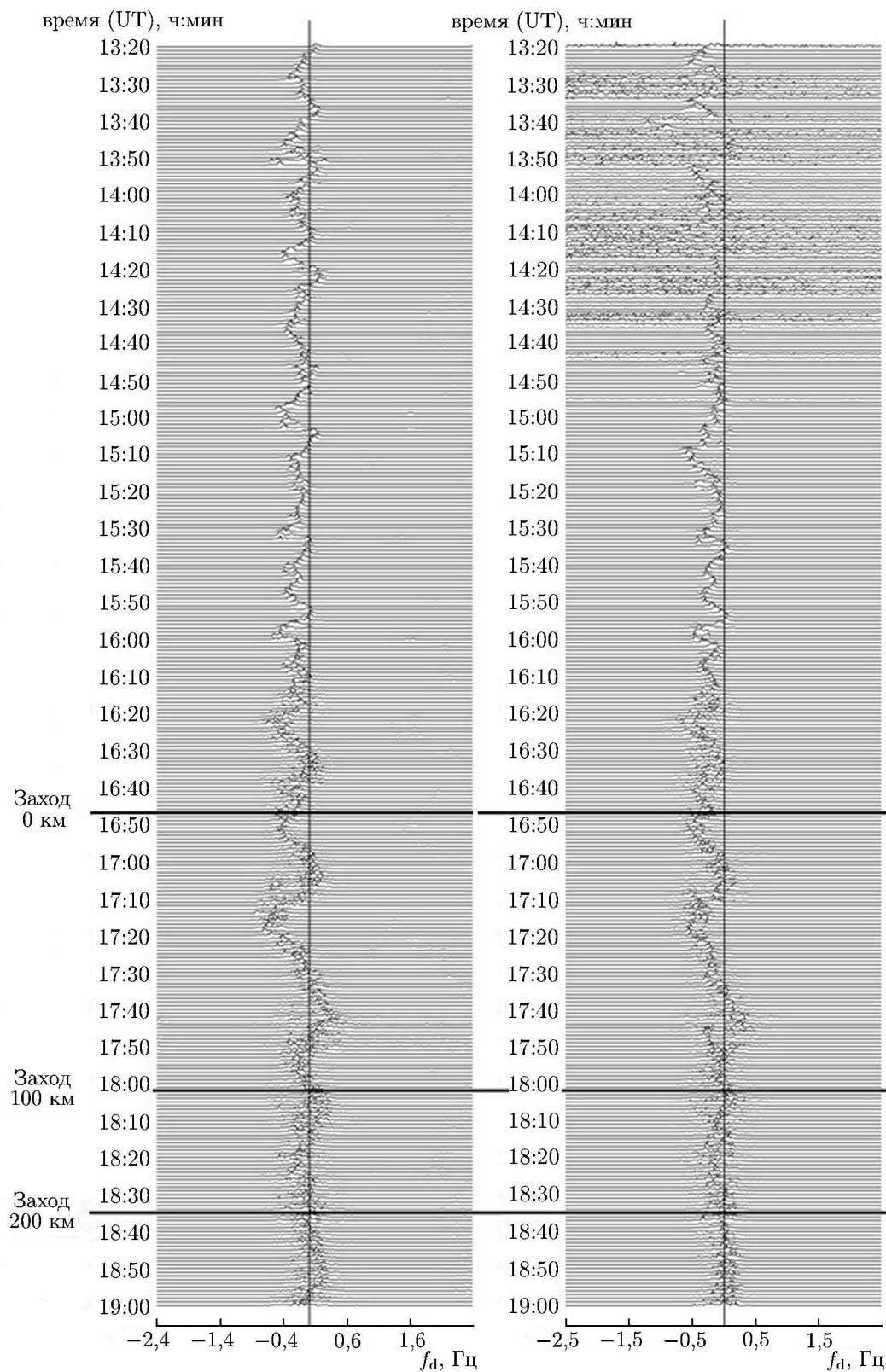


Рис. 3. Временные вариации доплеровских спектров 17 августа 2011 года на частоте 4 201 кГц (панель слева) и на частоте 3 200 кГц (панель справа) в диапазоне действующих высот 300÷375 км

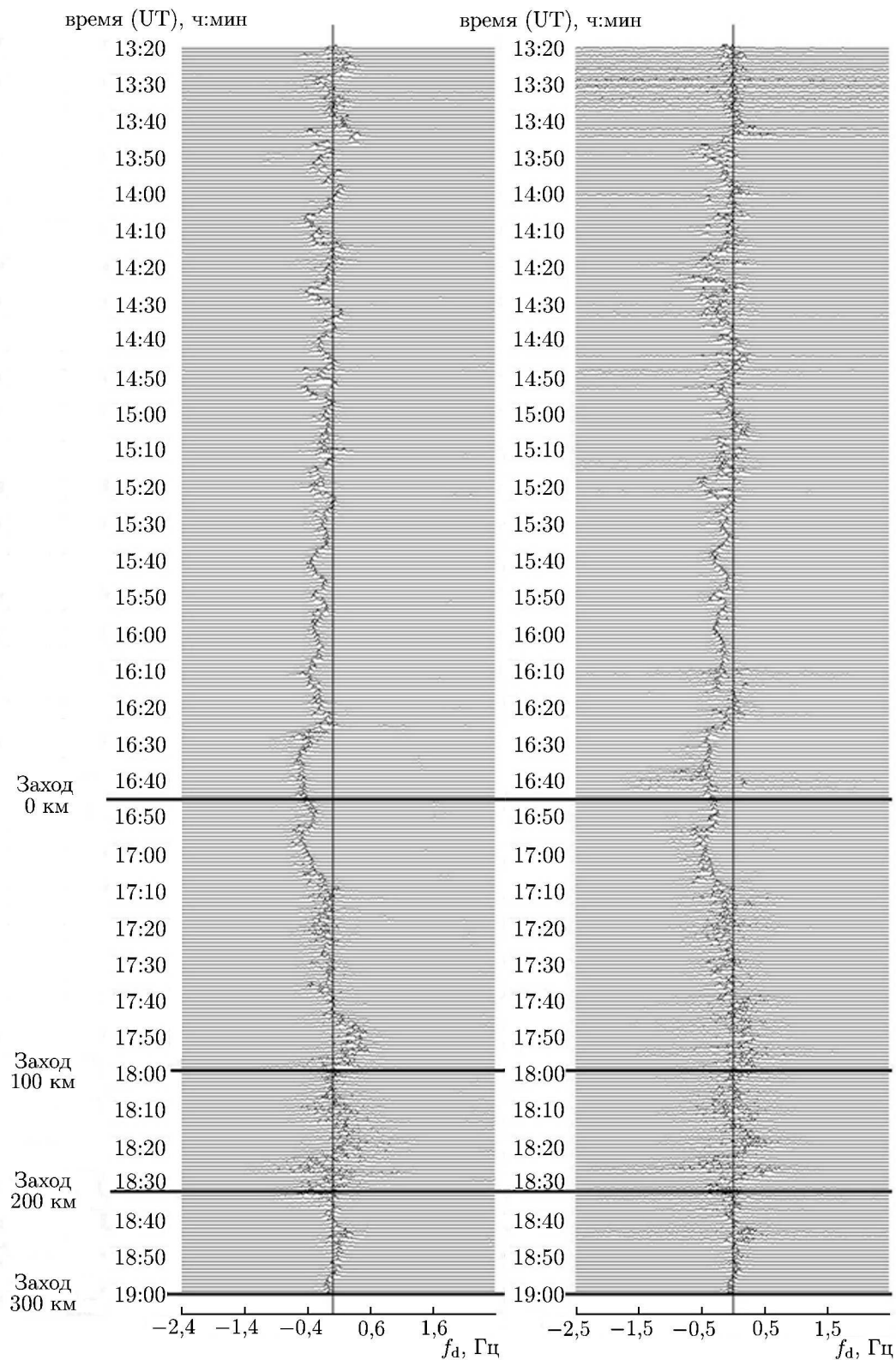


Рис. 4. Временные вариации доплеровских спектров 18 августа 2011 года на частоте 4201 кГц (панель слева) и на частоте 3200 кГц (панель справа) в диапазоне действующих высот 300÷375 км

Опишем поведение доплеровского сдвига частоты $f_d(t)$ в этот день. Примерно с 14:00 до 17:40 UT доплеровское смещение частоты было практически всегда отрицательным (рис. 4). При этом средний сдвиг составлял величину $\bar{f}_d \approx -0,2$ Гц. На медленные изменения $\bar{f}_d$ накладывались квазипериодические вариации. В частности, после 15:20 UT наблюдалось колебание с периодом $T \approx 10$ мин, амплитудой $f_{da} \approx 0,15 \div 0,20$ Гц и продолжительностью $\Delta T \approx 50$ мин. Затем ему на смену пришло колебание с периодом $T \approx 20 \div 25$ мин и примерно с такой же амплитудой.

В интервале времени 17:10÷18:40 UT доплеровские спектры становятся диффузными. Реакция на прохождение солнечного терминатора подавлена. С 17:40 и до 18:40 UT, несмотря на диффузный вид спектров, просматривается квазипериодический процесс с периодом $T \approx 30$ мин, амплитудой $f_{da} \approx 0,2 \div 0,3$ Гц. В отличие от контрольного дня 15 августа 2011 года, средняя величина $\bar{f}_d \approx 0,1$ Гц положительна. При этом переход от дневной к ночной ионосфере закончился раньше, чем в контрольные сутки 15 августа 2011 года.

3.5. Временные вариации доплеровского смещения частоты 19 августа 2011 года

В этот день модификация околоземной среды осуществлялась радиоволной обыкновенной поляризации. Режимы излучения стенда «Сура» были следующими. В интервале времени 09:00÷11:30 UT частота $f_{BH} = 4785$ кГц, мощность $PG = 50$ МВт, использовался режим 30 мин — излучение, 30 мин — пауза; с 11:50 до 12:45 UT использовался режим 5 мин — излучение, 5 мин — пауза. В интервале времени 14:15÷16:21 UT частота $f_{BH} = 5455$ кГц, мощность $PG = 70$ МВт, использовался режим 5 мин — излучение, 10 мин — пауза; с 16:21 до 17:05 UT использовался режим 3 мин — излучение, 3 мин — пауза. С 18:11 до 19:45 работал только один передатчик, частота $f_{BH} = 4785$ кГц, мощность $PG = 15$ МВт, использовался режим 5 мин — излучение, 5 мин — пауза.

С 14:00 и до 19:00 UT доплеровское смещение частоты практически всё время оставалось отрицательным (рис. 5). При этом среднее значение $\bar{f}_d \approx -(0,4 \div 0,3)$ Гц. На медленные вариации среднего сдвига частоты $\bar{f}_d(t)$ накладывались квазипериодические изменения f_d . В интервале времени 15:05÷16:10 UT характер вариаций сдвига частоты f_d изменился, стало преобладать колебание с периодом $T \approx 15$ мин. Его амплитуда достигала 0,2 Гц.

Интересным эффектом является возникновение упорядоченного и продолжительного (длительность не менее 2,5 часов) колебания с периодом $T \approx 30$ мин и амплитудой $f_{da} \approx 0,30 \div 0,35$ Гц. Оно наблюдалось с 16:10 до 19:00 UT. Достаточно строгая периодичность, которая в условиях ионосферы бывает редко, несколько искажалась движением солнечного терминатора. Это искажение имело место в интервале времени 16:50÷17:40 UT. В течение этого интервала доплеровский сдвиг частоты составлял $f_d \approx 1,1 \div 1,2$ Гц.

3.6. Временные вариации доплеровского смещения частоты 22 августа 2011 года

Модификация ионосферы 22 августа 2011 года проводилась волной обыкновенной поляризации. В интервале времени 14:31÷15:26 UT режим излучения волны накачки был следующим: $f_{BH} = 5455$ кГц, $PG = 70$ МВт, 5 мин — излучение, 5 мин — пауза. Далее при той же эффективной мощности излучения выполнялся проход по частоте излучения: с 15:30 UT — 5415 кГц; с 15:32 UT — 5425 кГц; с 15:34 UT — 5435 кГц; с 15:36 UT — 5445 кГц; с 15:38 UT — 5455 кГц.

На интервале времени 15:41÷15:56 UT снова осуществлялся периодический нагрев ионосферы в режиме: $f_{BH} = 5455$ кГц, $PG = 70$ МВт, 5 мин — излучение, 5 мин — пауза. С 16:00 до 16:08 UT опять выполнялся проход по частоте при той же эффективной мощности волны накачки:

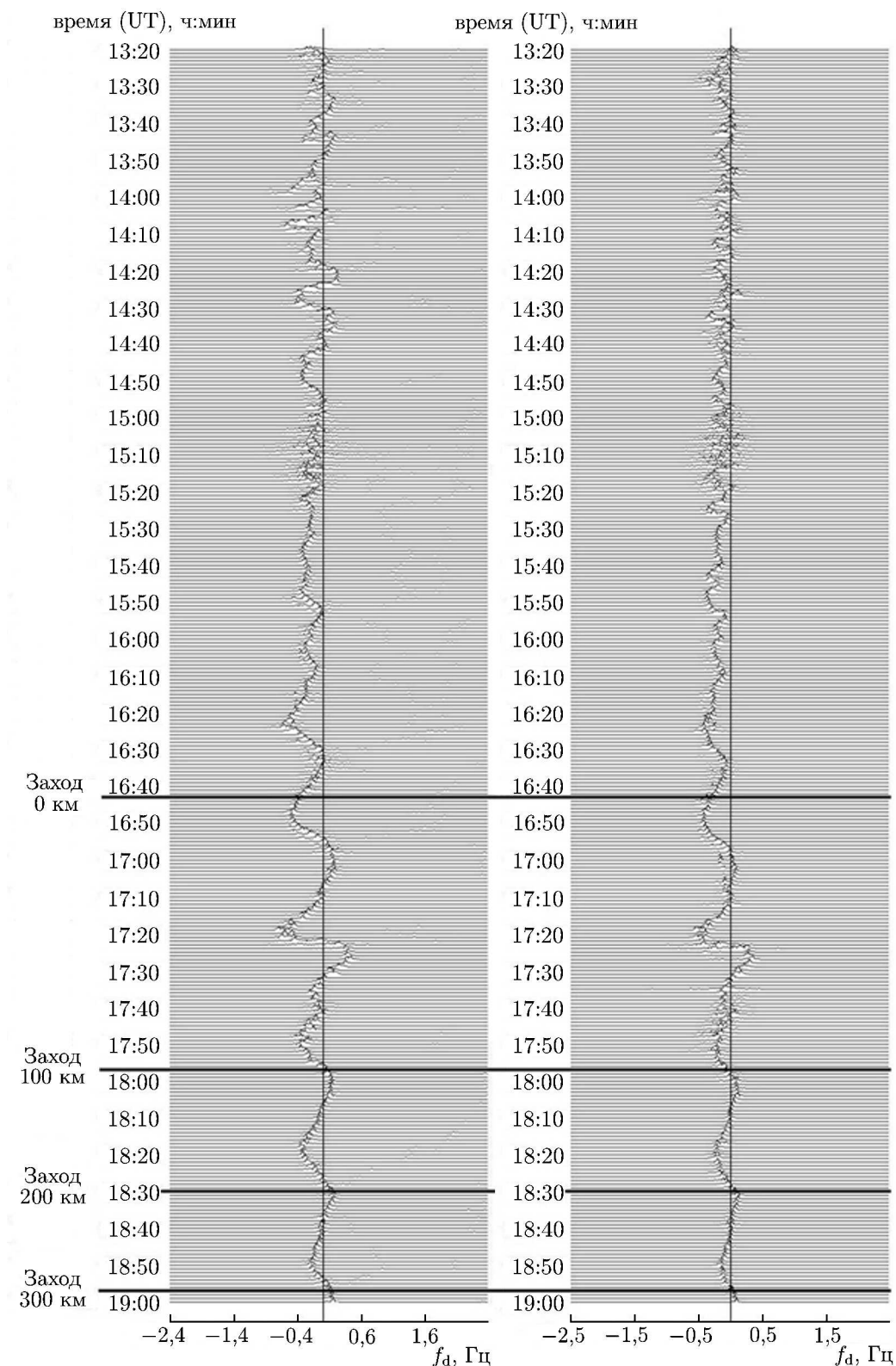


Рис. 5. Временные вариации доплеровских спектров 19 августа 2011 года на частоте 4201 кГц в диапазоне действующих высот 300÷375 км (панель слева) и на частоте 3200 кГц в диапазоне действующих высот 225÷300 км (панель справа)

с 16:00 UT — 5 455 кГц; с 16:02 UT — 5 465 кГц; с 16:04 UT — 5 475 кГц; с 16:06 UT — 5 485 кГц; с 16:08 UT — 5 495 кГц.

В интервале времени 16:10÷16:20 UT проводилась настройка частоты мощной радиоволны на гармонику гирочастоты электронов.

Далее стенд «Сура» работал на частоте 5 415 кГц с мощностью $PG = 70$ МВт в следующих режимах: 16:21÷16:53 UT — 10 с — излучение, 10 с — пауза; 16:53÷16:57 UT — несущая; 17:01÷17:26 UT — 5 мин — излучение, 5 мин — пауза.

С 17:35 до 20:00 UT волна накачки излучалась на частоте $f_{\text{ВН}} = 5\,380$ кГц с мощностью $PG = 70$ МВт в режиме 10 мин — излучение, 5 мин — пауза. Для нагрева ионосферы попеременно через цикл использовались либо непрерывное излучение, либо импульсы с длительностями 30 с и периодом их повторения 1 мин.

Опишем временные вариации доплеровских спектров. В интервале времени 13:20÷15:20 UT доплеровское смещение частоты оставалось отрицательным и изменялось по квазипериодическому закону (рис. 6). Преобладало колебание с периодом $T \approx 10$ мин и амплитудой $f_{\text{да}} \approx 0,2 \div 0,3$ Гц. При этом средний сдвиг частоты составлял величину $\bar{f}_{\text{д}}(t) \approx -(0,3 \div 0,2)$ Гц. В интервале времени 15:25÷16:10 UT период основного колебания составлял 20 мин. При этом амплитуда $f_{\text{да}} \approx 0,15 \div 0,20$ Гц, среднее значение $\bar{f}_{\text{д}}(t) = -0,4$ Гц. С 16:10 до 17:10 UT наблюдалось сильное колебание с амплитудой $f_{\text{да}} \approx 0,3$ Гц и переменным периодом 15÷25 мин.

В интервале времени 17:15÷17:50 UT имело место изменение сдвига частоты $f_{\text{д}}$ от $-0,4$ до $0,5$ Гц, а затем от $0,5$ до $-0,3$ Гц. Далее в течение 20 мин доплеровские спектры были диффузными. С 18:10 до 18:50 UT наблюдался чётко выраженный квазипериодический процесс с периодом $T \approx 20$ мин, амплитудой $f_{\text{да}} \approx 0,4$ Гц и средним сдвигом $\bar{f}_{\text{д}}(t) = -0,4$ Гц.

3.7. Временные вариации доплеровского смещения частоты 23 августа 2011 года

Нагрев плазмы осуществлялся радиоволной обыкновенной поляризации. Режим излучения волны накачки был следующим: $f_{\text{ВН}} = 5\,828$ кГц, $PG = 70$ МВт, 10 мин — излучение, 10 мин — пауза на интервале времени 15:10÷17:00 UT и $f_{\text{ВН}} = 4\,785$ кГц, $PG = 50$ МВт, 10 мин — излучение, 20 мин — пауза на интервале времени 17:30÷19:10 UT.

С 14:00 до 18:20 UT доплеровские сдвиги частоты были отрицательными, средний сдвиг $\bar{f}_{\text{д}}(t) = -(0,3 \div 0,2)$ Гц. До 14:45 UT, а также с 16:20 до 18:00 UT доплеровские спектры были одномодовыми. В интервале времени 14:45÷16:05 UT спектры становились диффузными. С 16:05 до 17:40 UT смещение частоты $f_{\text{д}}(t)$ квазипериодически изменялось с периодом $T \approx 20$ мин при амплитуде $f_{\text{да}} \approx 0,2 \div 0,3$ Гц. В интервале времени 17:55÷18:20 UT сдвиг частоты $f_{\text{д}}$ варьировался незначительно. После 18:20 UT наблюдался сильно выраженный квазипериодический процесс с периодом $T \approx 30$ мин при амплитуде $f_{\text{да}} \approx 0,3$ Гц и среднем значении $\bar{f}_{\text{д}}(t) = 0,1$ Гц.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Характер возмущений в ионосфере 15 августа 2011 года

В этот контрольный день в интервале времени 14:00÷17:00 UT доплеровское смещение частоты, оставаясь отрицательным, изменялось по квазипериодическому закону. Были чётко выражены колебания с периодом $T \approx 10$ мин. Как отмечалось в [15], этот период близок к периодам, соответствующим собственным частотам атмосферы на высотах F -области ионосферы. По оценкам [15] эти периоды составляют 10,1 и 11,8 мин. Меньший период соответствует частоте отсечки акустических колебаний, а больший — максимальной частоте внутренних гравитационных волн,

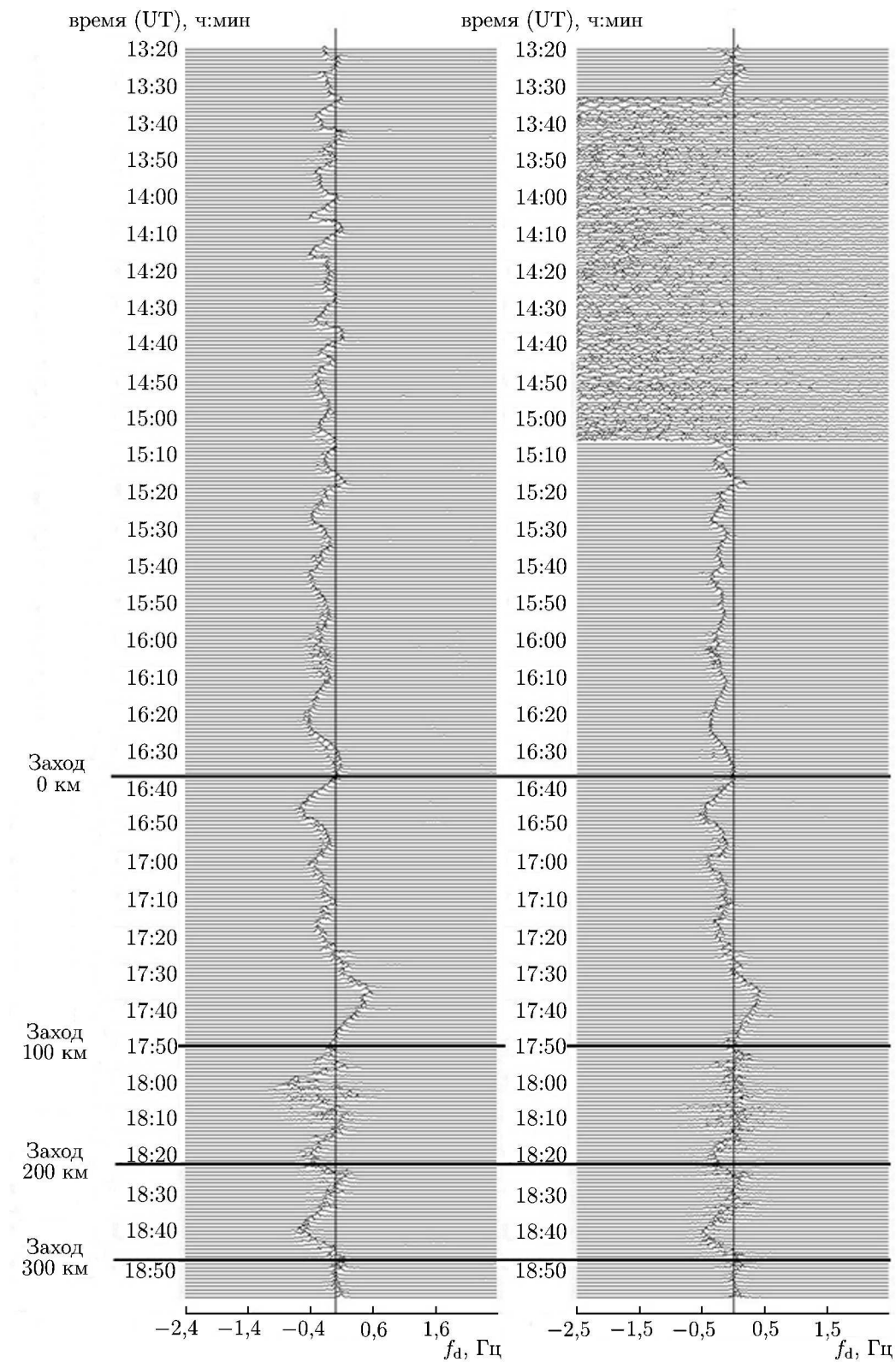


Рис. 6. Временные вариации доплеровских спектров 22 августа 2011 года на частоте 4201 кГц в диапазоне действующих высот 300÷375 км (панель слева) и на частоте 3200 кГц в диапазоне действующих высот 225÷300 км (панель справа)

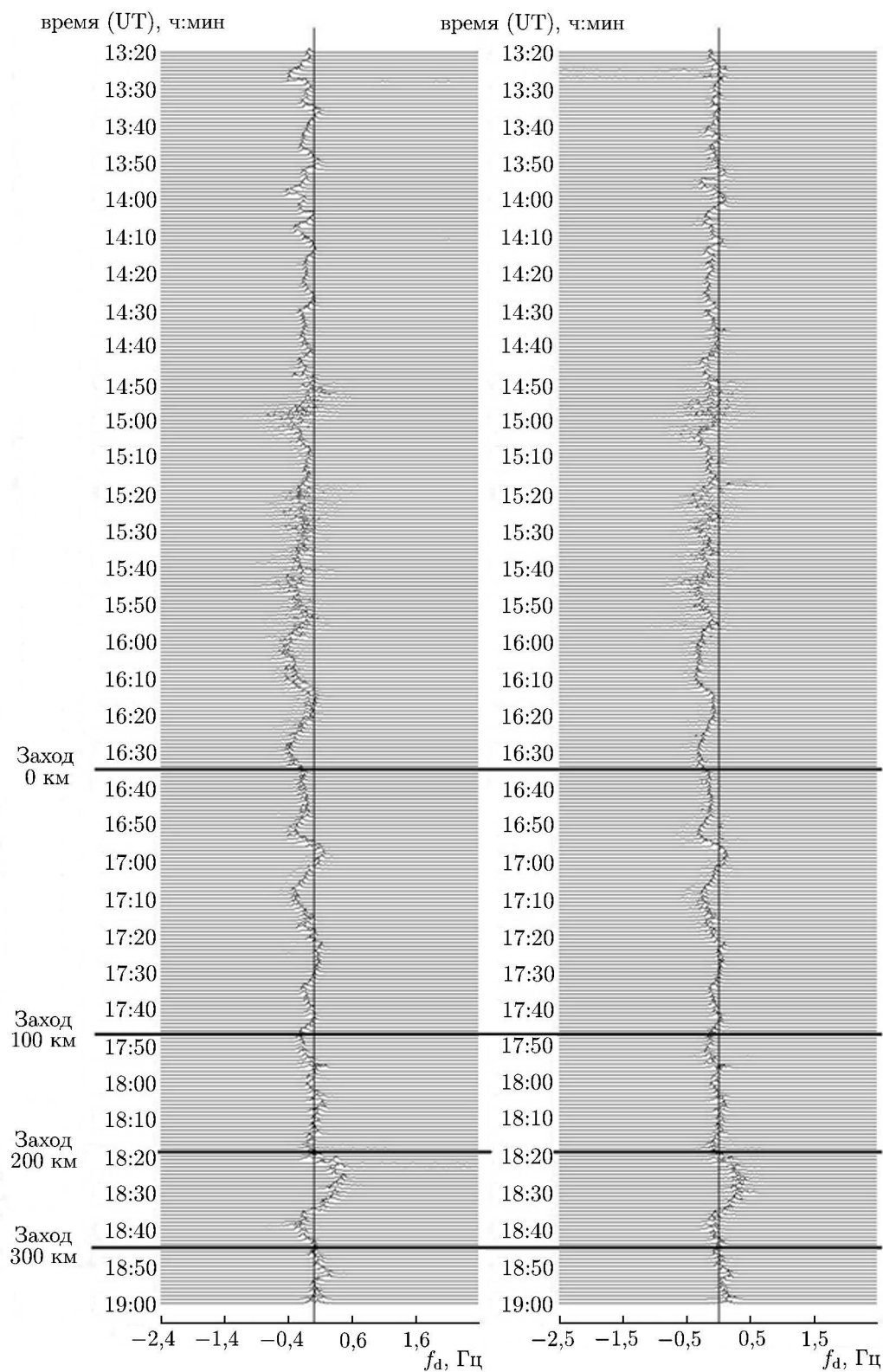


Рис. 7. Временные вариации доплеровских спектров 23 августа 2011 года на частоте 4201 кГц в диапазоне действующих высот 300÷375 км (панель слева) и на частоте 3200 кГц в диапазоне действующих высот 225÷300 км (панель справа)

т. е. частоте Брента–Вайсяля. Групповая и фазовая скорости волн с периодом $T \approx 10$ мин крайне незначительны, поэтому эти волны скорее напоминают колебания атмосферы над местом их регистрации [15].

Амплитуда вариаций f_{da} составляла $0,2 \div 0,3$ Гц для колебаний с периодом $T \approx 10$ мин. Оценим относительную амплитуду δ_N возмущений концентрации электронов N . В [16] показано, что амплитуда доплеровского сдвига частоты

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

где f — частота зондирующей радиоволны, L — меньший из высотных масштабов изменения δ_N или N . В нижней части F -области ионосферы, где отражалась радиоволна с частотой $f = 4,2$ МГц, расстояние изменения концентрации N определялась из ионограмм и была близка к $40 \div 50$ км. Для δ_N характерное расстояние L равно $2H$, где H — приведённая высота нейтральной атмосферы. Для высоты $z \approx 200 \div 220$ км имеем $2H \approx 60$ км. Полагая в формуле (1) $L \approx 50$ км, $T \approx 10$ мин, $f = 4,2$ МГц, $f_{da} \approx 0,2 \div 0,3$ Гц, получим, что относительное изменение электронной концентрации $\delta_N \approx 1,4 \div 2,1$ %.

Остановимся отдельно на значительных вариациях сдвига частоты f_d в интервале времени $17:05 \div 17:45$ UT. Здесь период $T \approx 40$ мин, амплитуда $f_{da} \approx 0,65$ Гц. При этом величина $\delta_N \approx 18$ %. Такие большие возмущения в ионосфере естественно связывать с прохождением вечернего солнечного терминатора. Последовавшее за этим колебание сдвига частоты $f_d(t)$ имело период $T \approx 20$ мин, амплитуду $f_{da} \approx 0,3 \div 0,4$ Гц и характеризовалось относительным изменением концентрации плазмы $\delta_N \approx 4,1 \div 5,5$ %. Скорее всего, и это возмущение также связано с движением солнечного терминатора.

Постоянная составляющая доплеровского смещения частоты в предвечернее, вечернее и ночное время составляла $\bar{f}_d(t) \approx -0,3$ Гц. Зная величину $\bar{f}_d$, можно оценить вертикальную скорость v_z движения области отражения радиоволны:

$$v_z = -\frac{c}{2} \frac{\bar{f}_d}{f}. \quad (2)$$

Она оказалась близкой к 11 м/с.

4.2. Характер возмущений в ионосфере 16 августа 2011 года

Характер возмущений в ионосфере 15 и 16 августа 2011 года, в целом, был подобен. Отличие состояло в реакции среды на движение солнечного терминатора: 16 августа волновые возмущения, сопутствующие терминатору, были выражены слабо. В дневное время 16 августа также эпизодически наблюдалось колебание доплеровского смещения частоты с периодом $T \approx 10$ мин.

4.3. Характер возмущений в ионосфере 17 августа 2011 года

Вариации доплеровского смещения частоты 15 и 17 августа 2011 года в целом были подобными, подобной была и реакция околосредной среды на движение солнечного терминатора. Отличие заключалось в том, что 17 августа после 16:10 UT доплеровские спектры стали диффузными. Диффузность, по-видимому, была обусловлена либо уменьшением амплитуды отражённого радиосигнала, либо усилением плазменной турбулентности в ионосфере. Диффузность возникла примерно через 140 мин после включения станда «Сура». Если бы возмущение, индуцирующее появление такой диффузности, распространялось от места модификации ионосферы, его

скорость составила бы $110 \div 120$ м/с. Такую скорость может иметь ветер на высотах F -области ионосферы. Однако остаётся непонятным, что приводило к увеличению ослабления уровня сигнала, а также что поддерживало плазменную турбулентность в процессе её движения (и именно в направлении диагностического пункта). Поэтому более реальным является предположение, что усиление диффузности доплеровских спектров связано с процессами в месте расположения средства наблюдения, например с появлением спорадического слоя E_s , частично экранирующего F -область ионосферы. Слой E_s в вечернее время действительно наблюдался в интервале времени $15:45 \div 17:30$ UT. Критическая частота $f_{0E_s} \approx 2 \div 3$ МГц. После $17:30$ UT этот слой над Харьковом не регистрировался. Таким образом, сигнал доплеровского радара на частоте 4,2 МГц не мог экранироваться слоем E_s .

Нельзя также исключать, что ослабление сигнала было связано с увеличением концентрации электронов, которое было вызвано стимулированным мощным радиоизлучением высыпанием энергичных частиц из магнитосферы, которое становится возможным в результате нарушения сложившегося взаимодействия подсистем в системе Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера [17, 18].

Действительно, 17 августа 2011 года модификация ионосферы осуществлялась радиоволной необыкновенной поляризации. Эффективная мощность составляла 50 и 35 МВт. Как показали расчёты, при мощности $PG = 50$ МВт в нижней ионосфере температура электронов T_e увеличивалась в $3 \div 4$ раза, а увеличение концентрации электронов не превышало $1,5 \div 2$ раза. На высотах E -области ионосферы увеличение температуры T_e и концентрации N составляло несколько десятков процентов. Именно здесь расположена токовая струя, ответственная за взаимодействие подсистем в системе Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера [17, 18].

Увеличение параметров T_e и N приводило к самовоздействию радиоволны, в результате чего около $80 \div 90\%$ её мощности поглощалось в нижней ионосфере. Возмущения T_e и N на высотах F -области ионосферы составляли величину порядка 1%. По этой причине эффективность генерации перемещающихся ионосферных возмущений под действием мощного радиоизлучения необыкновенной поляризации оказалась невысокой.

4.4. Характер возмущений в ионосфере 18 августа 2011 года

В интервале времени $15:10 \div 16:30$ UT имели место квазипериодические вариации доплеровского сдвига частоты f_d с периодом $T \approx 10$ мин и амплитудой $f_{da} \approx 0,15 \div 0,20$ Гц. При этом, как следует из (1), относительное изменение электронной концентрации $\delta_N \approx 1,1 \div 1,4\%$. Эти вариации ничем не отличались от естественных.

После $17:00$ UT наблюдалась диффузность доплеровских спектров, которая была обусловлена либо ослаблением сигнала, либо усилением плазменной турбулентности.

Добавим, что во время эксперимента на высотах порядка 100 км эпизодически возникал полупрозрачный слой ионизации, подобный слою E_s с критической частотой $f_{0E_s} \approx 3,0 \div 3,3$ МГц. Он существовал $30 \div 40$ мин.

Как уже отмечалось, реакция характеристик зондирующего сигнала на прохождение вечернего терминатора оказалась подавленной. В интервале времени $17:40 \div 18:40$ UT наблюдался квазипериодический процесс с периодом $T \approx 30$ мин и амплитудой $f_{da} \approx 0,2 \div 0,3$ Гц. Оценки по формуле (1) дают относительное изменение электронной концентрации $\delta_N \approx 4,2 \div 6,1\%$.

Существенно также то, что средний доплеровский сдвиг частоты составлял $\bar{f}_d(t) = 0,1$ Гц с $17:40$ до $18:40$ UT. Это означает, что, в соответствии с формулой (2), область отражения радиоволны смещалась вниз со скоростью примерно 3 м/с. В контрольный день движение происходило вверх, как это и должно быть при переходе от дневных условий к ночным. При этом скорость

перемещения была близка к 11 м/с.

Преждевременное прекращение этого перехода может быть вызвано увеличением концентрации электронов под воздействием мощного радиоизлучения. Оценим это увеличение. Положим, что в контрольный день средний доплеровский сдвиг частоты $\bar{f}_d(t) \approx -0,3$ Гц, а 18 августа 2011 года величина $\bar{f}_d(t) = 0,1$ Гц. Тогда увеличение $\bar{f}_d$ составило 0,4 Гц. Для оценки $\Delta N/N$ по среднему сдвигу частоты $\bar{f}_d$ воспользуемся соотношением из [19, 20]:

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{3}{8} \frac{\bar{f}_d}{f} \frac{c \Delta t}{L_N}, \quad (3)$$

где L_N — характерный высотный масштаб изменения электронной концентрации N , Δt — промежуток времени, в течение которого доплеровское смещение частоты изменилось на величину $\bar{f}_d$. Полагая в формуле (3) средний сдвиг частоты $\bar{f}_d(t) = 0,4$ Гц, $L_N \approx 50$ км, $\Delta t \approx 20$ мин, получим, что относительное изменение концентрации $\Delta N/N \approx 0,26$.

4.5. Характер возмущений в ионосфере 19 августа 2011 года

После включения мощного радиоизлучения в режиме 5 мин — излучение, 10 мин — пауза с запаздыванием на время $\Delta t \approx 50$ мин в ионосфере возник квазипериодический процесс с периодом $T \approx 15$ мин и амплитудой $f_{da} \approx 0,2$ Гц, которому соответствовало относительное изменение электронной концентрации $\delta_N \approx 2,1\%$. Процесс продолжался около 60 мин. Период колебаний совпал с продолжительностью цикла нагрев/пауза.

Если процесс вызван воздействием мощного радиоизлучения, скорость распространения возмущения от места модификации ионосферы до места наблюдения может быть оценена из очевидной формулы

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

где R — расстояние между облучаемой и диагностируемой областями ионосферы, примерно равное расстоянию между обсерваториями, Δt_0 — время развития перемещающихся ионосферных возмущений. При $R \approx 960$ км, $\Delta t_0 \rightarrow 0$ и $\Delta t \approx 50$ мин имеем скорость $v' = R/\Delta t \approx 320$ м/с. Если же $\Delta t_0 \approx 10$ мин [14, 15], скорость $v \approx 400$ м/с. Такие скорости и периоды вариаций имеют перемещающиеся ионосферные возмущения, связанные с генерацией и распространением в атмосфере внутренних гравитационных волн.

Таким образом, волновой процесс, зарегистрированный с помощью радара через 50 мин после начала модификации ионосферы, скорее всего, был вызван воздействием мощного радиоизлучения.

Отдельно необходимо обсудить волновой процесс, наблюдавшийся в интервале времени 16:10÷19:00 UT. При этом было ярко выражено квазипериодическое возмущение с периодом $T \approx 30$ мин, амплитудой вариации сдвига частоты $f_{da} \approx 0,30 \div 0,35$ Гц и относительным изменением электронной концентрации $\delta_N \approx 6,3 \div 7,3\%$ (см. рис. 5).

Детальный анализ ионограмм (рис. 8), полученных расположенным в г. Харьков ионозондом, показал, что в интервале времени 15:20÷16:50 UT частота f_{oF_2} флуктуировала около частоты волны накачки $f_{BH} = 5455$ кГц. При этом волна обыкновенной поляризации отражалась на высоте, где $f_{BH} = f_{oF_2}$. На высоте, где плазменная частота

$$f_p = (f_{BH}^2 - f_B^2)^{1/2}$$

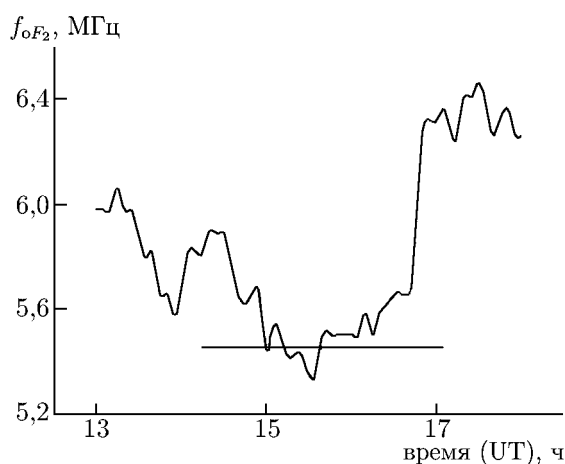


Рис. 8. Временные вариации критической частоты f_{oF_2} 19 августа 2011 г. Горизонтальной линией показано значение частоты волны накачки, а её длина соответствует интервалу работы стенда «Сура» на этой частоте

оценка следует из соображений, изложенных в [14].

Есть ещё один фактор, который мог приводить к существенному росту δ_N . Дело в том, что в интервале времени 15:20÷16:50 UT частота волны накачки была близка к четвёртой гармонике гирочастоты электронов, т. е. в области взаимодействия мощной радиоволны с плазмой выполнялось условие

$$f_{\text{ВН}} \approx 4f_B \approx f_{oF_2}. \quad (4)$$

Укажем, что в работе [21] установлено, что при условии $f_{\text{ВН}} \approx 3f_B \approx f_{oF_2}$ наблюдается экстремально сильное возрастание температуры и концентрации электронов вдоль направления геомагнитного поля. Можно предположить, что выполнение условия (4) также способствует увеличению возмущений регулярных параметров плазмы вдоль магнитных силовых линий, и в конечном итоге росту параметра δ_N в месте наблюдения.

Оценим запаздывание появления квазипериодического процесса, наблюдавшегося в интервале времени 16:10÷19:00 UT. Условие $f_{\text{ВН}} \approx f_{oF_2}$ вблизи Харькова выполнялось в интервале времени 16:00÷17:30 UT. Следует ожидать, что вблизи стенда «Сура» оно имело место примерно на 40 мин раньше, т. е. с 15:20 до 16:50 UT. Если считать, что квазипериодический процесс был инициирован в 15:20 UT, время запаздывания его обнаружения над Харьковом составило около 50 мин. Именно такие времена запаздывания наблюдались и в других циклах измерений, а также в работах [14, 15]. Это обстоятельство также свидетельствует в пользу того, что возмущение было вызвано воздействием на ионосферную плазму радиоизлучения стенда «Сура».

Добавим, что в другие дни этой измерительной кампании условие $f_{\text{ВН}} \approx f_{oF_2}$ не выполнялось и такие сильные возмущения больше не наблюдались.

Обсуждаемое возмущение наложилось на возмущение, связанное с движением солнечного терминатора. В результате такого наложения размах доплеровского смещения частоты достигал 1,1÷1,2 Гц (см. рис. 5). В это время стенд «Сура» излучал радиоволны обыкновенной поляризации с $PG = 70$ МВт в режиме 3 мин — излучение, 3 мин — пауза. Как показали расчёты, за счёт эффекта магнитного зенита вблизи высоты верхнего гибридного резонанса температура электронов T_e увеличивалась на 30÷50 %. В результате нагрева электронов в ионосфере появлялся дополнительный источник тепла. Его энергии, по оценкам [14], было достаточно для усиления

приблизительно равна 5270 кГц, выполнялось условие верхнего гибридного резонанса. Здесь f_B — гирочастота электронов. В результате почти вся дошедшая до этого уровня энергия радиоволны диссипировала в его окрестности. За счёт эффекта магнитного зенита возмущение ионосферы усиливалось. Этому также способствовало уменьшение потерь энергии в нижней ионосфере вследствие уменьшения концентрации электронов в предзаходное время, увеличение частоты волны накачки $f_{\text{ВН}}$ от 4785 до 5455 кГц и увеличение эффективной мощности PG от 50 до 70 МВт. Все четыре фактора способствовали росту относительного изменения электронной концентрации δ_N от 2,1 до 6,3÷7,3 % в месте наблюдения. В месте генерации возмущений величина δ_N , по-видимому, была примерно в три раза больше, т. е. достигала примерно 20÷22 %. Такая

и генерации внутренних гравитационных волн и связанных с ними перемещающихся ионосферных возмущений. Тот факт, что период воздействия на плазму радиоизлучения, равный сначала 15 мин, а затем 6 мин, отличался от наблюдаемого периода $T \approx 30$ мин, может свидетельствовать не о генерации, а об усилении существовавшего в ионосфере квазипериодического процесса. Заметим, что период $T \approx 30$ мин кратен как 15, так и 6 мин. Добавим, что волновое возмущение с периодом $T \approx 30$ мин относится к типу возмущений, наиболее часто наблюдаемых в естественных условиях, см., например, [22, 23].

4.6. Характер возмущений в ионосфере 22 августа 2011 года

В этот день в интервале времени 13:20÷15:20 UT в ионосфере существовали квазипериодические процессы, вызывающие вариации ионосферных параметров с периодом $T \approx 10$ мин, амплитудой доплеровского смещения частоты $f_{da} \approx 0,2 \div 0,3$ Гц и относительным изменением электронной концентрации $\delta_N \approx 1,4 \div 2,1$ %, которые имели естественное происхождение.

После включения стенда «Сура» в 14:31 UT в режиме 5 мин — излучение, 5 мин — пауза с запаздыванием по времени $\Delta t \approx 50$ мин наблюдалось появление колебания с периодом $T \approx 20$ мин и амплитудой $f_{da} \approx 0,15 \div 0,20$ Гц. Скорее всего, оно было вызвано воздействием на ионосферу мощного радиоизлучения. В этом случае можно найти, что скорости перемещения $v' \approx 320$ м/с, $v \approx 400$ м/с и относительное изменение электронной концентрации $\delta_N \approx 2,1 \div 2,8$ %.

В 16:10 UT характер вариаций доплеровского сдвига частоты $f_d(t)$ изменился. Это могла быть реакция на окончание в 15:26 UT работы стенда «Сура» в режиме 5 мин — излучение, 5 мин — пауза. В этом случае задержка $\Delta t \approx 44$ мин.

В интервале времени 17:10÷17:50 UT наблюдалась реакция на движение солнечного терминатора, подобная реакции в контрольный день 15 августа 2011 года. Примерно в 17:50 UT реакция на терминатор прекратилась. Возможно, это связано с очередным началом работы стенда в режиме 5 мин — излучение, 5 мин — пауза с 17:01 UT. Время запаздывания реакции на включение мощного радиоизлучения тогда составило бы 49 мин.

Следующее изменение характера вариаций сдвига частоты $f_d(t)$ наблюдалось после 18:25 UT, т. е. через 50 мин после включения стенда в режиме 10 мин — излучение, 5 мин — пауза. Период колебаний был близок к 20 мин. Для амплитуды сдвига частоты $f_{da} \approx 0,4$ Гц получаем относительное изменение электронной концентрации $\delta_N \approx 5,6$ %.

Таким образом, близость к 50 мин времени запаздывания реакции ионосферы на воздействие мощного радиоизлучения свидетельствует в пользу того, что 22 августа 2011 года также наблюдались перемещающиеся ионосферные возмущения, вызванные модификацией околоземной плазмы. Именно такое время запаздывания наблюдалось нами и ранее, см., например, [14, 15].

4.7. Характер возмущений в ионосфере 23 августа 2011 года

После включения стенда «Сура» в 15:10 UT в режиме 10 мин — излучение, 10 мин — пауза с эффективной мощностью $PG = 70$ МВт через 45 мин наблюдалось изменение характера вариаций доплеровского сдвига частоты $f_d(t)$ в сигнале радара. Они стали квазипериодическими с периодом $T \approx 20$ мин и амплитудой $f_{da} \approx 0,2 \div 0,3$ Гц. Таким вариациям соответствуют относительные изменения электронной концентрации $\delta_N \approx 2,8 \div 4,2$ %. Важно отметить, что период колебаний сдвига частоты f_d здесь точно совпадал с длительностью цикла нагрев/пауза. Кроме этих колебаний, наблюдались также колебания с периодом $T \approx 40$ мин и примерно такими же амплитудами.

Следующее изменение характера вариаций сдвига частоты $f_d(t)$ имело место около 17:57 UT, т. е. примерно через 57 мин после окончания излучения стенда в режиме 10 мин — излучение, 10 мин — пауза.

Новое изменение характера вариаций доплеровского смещения частоты наблюдалось примерно в 18:20 UT, т. е. через 50 мин после начала излучения стенда в режиме 10 мин — излучение, 20 мин — пауза. В этом цикле период квазипериодических возмущений был близок к 30 мин. При этом амплитуда $f_{da} \approx 0,3$ Гц и относительное изменение электронной концентрации $\delta_N \approx 6,3\%$. Поскольку средний сдвиг частоты $\bar{f}_d(t) = 0,1$ Гц был положительным, в этот день, как и 18 августа 2011 года, переход от дневных условий к ночным закончился раньше, чем в контрольные сутки 15 августа 2011 года.

Добавим, что 23 августа 2011 года реакция ионосферы на движение солнечного терминатора, хорошо наблюдавшаяся в контрольный день 15 августа 2011 года, была фактически подавлена.

4.8. Сведения о характере возмущений в ионосфере

Результаты обобщения сведений о характере возникавших в ионосфере возмущений приведены в табл. 2. Из неё видно, что воздействие радиоволной необыкновенной поляризации (X-волной) не приводит к эффективной генерации перемещающихся ионосферных возмущений. При этом нельзя исключать, что воздействие X-волнами могло приводить к усилению диффузности доплеровских спектров.

Воздействие на ионосферу радиоволнами обыкновенной поляризации с эффективной мощностью $PG = 50 \div 70$ МВт может приводить не только к генерации перемещающихся ионосферных возмущений, но и к подавлению или усилению влияния солнечного терминатора на ионосферные эффекты. Если волновые возмущения, вызванные движением терминатора и воздействием мощного радиоизлучения, находились в фазе, возникал эффект усиления возмущений. Именно такая ситуация наблюдалась 19 августа 2011 года. Если же волновые возмущения находились в противофазе, возникал эффект подавления, что и наблюдалось 18, 22 и 23 августа 2011 года.

Относительная амплитуда возмущений концентрации электронов, генерируемых мощным радиоизлучением, обычно составляла $1,1 \div 4,2\%$, однако 19 августа 2011 года она достигла $6,3 \div 7,3\%$. Этот же параметр для естественных волновых возмущений в контрольные дни равнялся $1,4 \div 2,1\%$.

Продолжительность цуга генерируемых перемещающихся возмущений составляла около 60 мин, для естественных возмущений она была существенно больше и равнялась $100 \div 140$ мин.

Скорости v' и v изменялись в пределах $290 \div 355$ м/с и $355 \div 460$ м/с соответственно.

Все приведённые выше параметры волновых процессов близки к параметрам перемещающихся ионосферных возмущений. Это позволяет утверждать, что обнаруженные 18, 19, 22 и 23 августа 2011 года квазипериодические процессы были вызваны циклическим воздействием на ионосферную плазму мощного радиоизлучения.

Необходимо отметить, что окончание каждого импульса в циклическом воздействии также могло сопровождаться генерацией или усилением квазипериодических возмущений.

Важно и то, что период генерируемых или усиливаемых волновых возмущений мог или совпадать, или не совпадать с периодом цикла нагрев/пауза. В случае несовпадения периодов могли усиливаться волны с периодом кратным периоду модификации ионосферы. Такая ситуация наблюдалась, например, 19 августа 2011 года. Следует подчеркнуть, что в этот день усилению возмущений способствовало выполнение условия $f_{ВН} \approx 4f_B \approx f_{oF_2}$.

Таблица 2. Сведения о характере возмущений в ионосфере

Дата	Наличие реакции на мощное радиоизлучение	Тип возмущений	T , мин	Δt , мин	f_{da} , Гц	δ_N , %	ΔT , мин	v' , м/с	v , м/с
15.08.2011	Нет, контр. день	Колебания	10	—	$0,2 \div 0,3$	$1,4 \div 2,1$	$12 \div 140$	—	—
16.08.2011	Нет, контр. день	Колебания	10	—	$0,2 \div 0,3$	$1,4 \div 2,1$	$100 \div 120$	—	—
17.08.2011	Скорее нет, воздействие X-волной	Колебания, доплеровские спектры диффузные	10	—	$0,2 \div 0,3$	$1,4 \div 2,1$	40	—	—
18.08.2011	Скорее есть	Подавлена реакция на терминатор. Изменение направления движения области отражения	10	55	$0,15 \div 0,20$	$1,1 \div 1,4$	60	290	355
19.08.2011	Есть	Колебания. Усиление реакции на терминатор	15; 30	50	0,2; $0,30 \div 0,35$	2,1; $6,3 \div 7,3$	60	320	400
22.08.2011	Есть	Колебания. Частично подавлена реакция на терминатор	20	50	$0,15 \div 0,20$	$2,1 \div 2,8$	50	320	400
23.08.2011	Есть	Колебания. Подавлена реакция на терминатор. Изменение направления движения области отражения	20; 30; 40	45; 50	$0,2 \div 0,3$ 0,3	$2,8 \div 4,2$ 6,3	60	355; 320	460; 420

ВЫВОДЫ

1) Подтверждено, что периодический нагрев ионосферной плазмы высокочастотным радиоизлучением с эффективной мощностью $50 \div 70$ МВт приводит к генерации или усилению перемещающихся ионосферных возмущений.

2) Периоды наиболее интенсивно возбуждаемых перемещающихся ионосферных возмущений составляли $15 \div 30$ мин.

3) Относительная амплитуда квазипериодических возмущений концентрации электронов обычно не превышала $1 \div 4$ %.

4) Обнаружено увеличение примерно в три раза до уровня $6,3 \div 7,3$ % относительной амплитуды возмущений концентрации электронов при приближении частоты мощной радиоволны к критической частоте ионосферы.

5) Скорость распространения квазипериодических возмущений равнялась $300 \div 400$ м/с.

6) Отклики ионосферной плазмы на движение солнечного терминатора и воздействие мощного радиоизлучения могли как усиливать, так и ослаблять друг друга.

7) Требуется дальнейшие исследования того, как эффективность генерации перемещающихся ионосферных возмущений зависит от режима работы нагревного стенда и, в частности, от близости частоты волны накачки к критической частоте ионосферы, а также к гармонике гирочастоты электронов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 11–02–00374) и Министерства образования и науки РФ (гос. контракт 16.518.11.7066). Авторы благодарят сотрудников стенда «Сура» за помощь в проведении исследований.

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. Сер. 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. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44, № 4. С. 518.
17. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2003. Т. 8, № 1. С. 59.
18. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке. Харьков: Харьковский нац. ун-т им. В. Н. Каразина, 2008. 528 с.
19. Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2010. Т. 1, № 3. С. 197.
20. Гармаш К. П., Леус С. Г., Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2011. Т. 2, № 4. С. 325.
21. Благовещенская Н. Ф., Борисова Т. Д., Йоман Т. К., Ритвелд М. Т. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 9–10. С. 571.
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.

Поступила в редакцию 7 декабря 2011 г.; принята в печать 28 января 2012 г.

TRAVELING IONOSPHERIC DISTURBANCES GENERATED BY PERIODIC PLASMA HEATING BY POWERFUL HIGH-FREQUENCY RADIO EMISSION

L. F. Chernogor and V. L. Frolov

The results of observations of variations in the Doppler-frequency shift of electromagnetic radiation of decameter waves reflected from the ionosphere in the period of the plasma modification by powerful radio emission from the “Sura” facility and in check days are presented. The distance from the facility to the diagnostics means (Doppler radar) was about 1000 km. The traveling ionospheric disturbances corresponding to a delay time of about 50 min. with respect to the time of switching powerful periodic radiation and a propagation velocity of 300–400 m/s were observed. The relative amplitude of the electron-density perturbations was 1–4%, while their oscillation period amounted to tens of minutes. The parameters of the traveling ionospheric disturbances significantly depended on the “Sura” facility radiation mode.