УДК 550.388:533.951+573.868

# КОЛЕБАНИЯ ИНФРАЗВУКОВОГО ДИАПАЗОНА В ИОНОСФЕРЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕЁ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ

 $Л. \Phi. Черногор^{-1}, B. Л. Фролов^{-2}, B. \Phi. Пушин^{-1}$ 

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

 $^{2}$ Научно-исследовательский радио<br/>физический институт, г. Нижний Новгород, Россия

Приведены результаты фильтрации в диапазоне периодов 5,6÷6,7 мин временны́х вариаций доплеровского смещения частоты отражённых от ионосферы радиосигналов от расположенного вблизи г. Харькова высокочастотного радара вертикального зондирования ионосферы в период воздействия на ионосферную плазму мощным периодическим (с периодом 6 мин) радиоизлучением стенда «Сура». Обнаружено, что включение и выключение серии импульсов с длительностью 3 мин и паузой такой же продолжительности приводило к генерации затухающего волнового процесса с периодом 6 мин, временем запаздывания около 30÷50 мин и кажущейся скоростью распространения около 320÷530 м/с. Амплитуда квазипериодических вариаций доплеровского смещения частоты при этом составляла 10÷40 мГц. Ей соответствовала амплитуда относительных возмущений концентрации электронов около 0,1÷0,3%. Обнаруженные колебания свидетельствуют о возможности генерации затухающих волн плотности инфразвукового диапазона в верхней атмосфере.

#### ВВЕДЕНИЕ

Возможность генерации перемещающихся ионосферных возмущений мощным радиоизлучением наземного нагревного стенда теоретически изучалась в работах [1, 2]. Такие возмущения с периодами  $T \approx 10\div60$  мин были обнаружены экспериментально ещё в 1980-х годах [3–11]. Результаты современных исследований представлены в работах [12–14]. Установлено, что периодический нагрев ионосферной плазмы приводит к генерации перемещающихся ионосферных возмущений с периодами, лежащими в диапазоне периодов внутренних гравитационных волн  $T \approx 10\div120$  мин. Амплитуда относительных возмущений  $\delta_N$  концентрации электронов N при этом составляла единицы процентов на удалении от нагревного стенда  $R \approx 960$  км.

Известно, что минимальный период внутренних гравитационных волн равен периоду  $T_{\rm b} = 2\pi/\omega_{\rm b}$  (см., например, [13, 15, 16]). Здесь

$$\omega_{\rm b} = \sqrt{\frac{g}{H} \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} + \frac{H}{H_T}\right)}$$

есть частота Брента—Вяйсяля, g — ускорение свободного падения, H — приведённая высота нейтральной атмосферы,  $\gamma$  — показатель адиабаты,  $H_T = T_n/(dT_n/dz)$ ,  $T_n$  — температура нейтральных частиц, z — высота.

На высотах *D*-, *E*- и *F*-областей ионосферы  $T_{\rm b}$  примерно равняется 7,3, 5,0 и 5,0÷15,1 мин соответственно (см. табл. 1).

Представляет интерес поиск перемещающихся возмущений с периодом  $T < T_{\rm b}$ , а точнее  $T < T_{\rm a} = 2\pi/\omega_{\rm a}$ , где  $\omega_{\rm a}$  — частота отсечки акустических волн. Известно, что [13, 15, 16]

$$\omega_{\rm a} = \sqrt{\frac{\gamma g}{4H} \left( 1 + \frac{H}{H_T} \right)}$$

Л. Ф. Черногор, В. Л. Фролов, В. Ф. Пушин

Область	H,	$H_T,$	$\omega_{\mathrm{a}},$	$T_{\rm a},$	$\omega_{ m b},$	$T_{\rm b},$
ионосферы	KM	KM	$c^{-1}$	МИН	$c^{-1}$	МИН
D	7	-50	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$5,\!1$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$7,\!3$
E	10	60	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$^{5,2}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$^{5,0}$
F	$10 \div 70$	$50{\div}1000$	$(2,0{\div}0,7)\cdot 10^{-2}$	$5,2{\div}15,0$	$(2,1\div0,7)\cdot10^{-2}$	$5,0{\div}15,1$

Таблица 1. Параметры атмосферы и колебаний

В *D*-, *E*- и *F*-областях ионосферы значение  $T_{\rm a}$  близко к 5,1, 5,2 и 5,2÷15,0 мин соответственно (см. табл. 1). Периоды  $T < T_{\rm a}$  относятся к акустическим колебаниям инфразвукового диапазона частот.

Теоретическому исследованию возможности генерации звука в верхней атмосфере под действием периодического нагрева ионосферной плазмы мощным радиоизлучением посвящена работа [17]. В ней показана принципиальная возможность такой генерации.

Представляется целесообразным экспериментальное исследование возможности генерации колебаний в верхней атмосфере (ионосфере) под действием мощного радиоизлучения. Добавим, что в экспериментальных работах [12, 13] эпизодически наблюдались вариации сигнала с периодами низкочастотного инфразвука  $T \approx 5 \div 7$  мин. Поскольку такие вариации существуют в естественных условиях, однозначно связать наблюдаемые колебания с нагревом плазмы мощным периодическим излучением в работах [12, 13] не удалось.

Целью настоящей работы является экспериментальное доказательство возможности генерации колебаний инфразвукового диапазона в ионосфере под действием периодического нагрева плазмы мощным радиоизлучением.

# 1. СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Накануне активного эксперимента 21 марта 2010 года и в период его проведения 22–24 марта состояние космической погоды было спокойным [13]. Поэтому это время можно считать вполне благоприятным для выявления эффектов периодического воздействия мощным радиоизлучением на ионосферную плазму.

Активные эксперименты по модификации ионосферы мощными высокочастотными (ВЧ) радиоволнами, излучаемыми стендом «Сура», проводились в дневное и вечернее время. В работе для анализа были выбраны результаты измерений, выполненных 22–24 марта. В эти дни, наряду с другими режимами, стенд «Сура» работал в режиме 3 мин — нагрев, 3 мин — пауза. Особенностью проводимых в эти дни экспериментов являлось использование для нагрева ионосферной плазмы волны с обыкновенной поляризацией и различных режимов излучения волны накачки, в которых период и длительность воздействия варьировались в широких пределах от десятков секунд до десятков минут.

В качестве контрольного использовался день 26 марта, когда в отсутствие нагрева ионосферной плазмы мощными ВЧ радиоволнами были выполнены измерения фоновых характеристик регистрируемых ионосферных возмущений.

# 2. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

## 2.1. Нагревный стенд «Сура»

Стенд «Сура» [18] расположен в 100 км восточнее г. Нижний Новгород (Россия), его географические координаты равны 56°09′ с. ш., 46°06′ в. д.

Во время рассматриваемых в работе экспериментов три модуля стенда работали синфазно, формируя диаграмму направленности его излучения карандашного типа. При этом в проводимых исследованиях эффективная мощность излучения волны накачки PG составляла примерно 50, 80 и 100÷120 MBt соответственно для трёх используемых в экспериментах частот f = 4,3, 4,785 и порядка 5,5 МГц. Во всех экспериментах диаграмма направленности антенны стенда была наклонена к югу на 12°; при использовании волн с обыкновенной поляризацией это приводило к усилению генерации искусственной ионосферной турбулентности за счёт эффекта магнитного зенита [19]. При этом для  $f \approx 5$  МГц 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 волны накачки приведены ниже для каждого анализируемого в работе случая.

Критическая частота  $f_{0F_2}$  в дни проведения экспериментов, в среднем, сначала (примерно до 10:00 UT) увеличивалась от 5,5 до 6,8 МГц, а затем (с 10:00 до 20:00 UT) уменьшалась до 4,5 МГц. Заметим, что местное время измерений опережало на три часа мировое время.

## 2.2. Доплеровский радар

Радар вертикального зондирования 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 равны 49°38′ с. п. и 36°20′ в. д. Основные параметры радара: диапазон частот  $f = 1 \div 24$  МГц, импульсная мощность радиопередающего устройства 1 кВт, длительность зондирующего импульса  $\tau \approx 500$  мкс, частота повторения импульсов 100 Гц, полоса пропускания фильтра радиоприёмного устройства 10 Гц. Антенная система представляет собой вертикальный ромб с коэффициентом усиления  $G \approx 1 \div 10$  в зависимости от частоты зондирующей волны. При таком потенциале радара отношение сигнал/помеха q в ночное время может достигать  $10^5 \div 10^6$ . В дневное время q обычно на  $1 \div 2$  порядка меньше. Радар сопряжён с персональным компьютером и образует программно-аппаратный комплекс, осуществляющий измерения и предварительную обработку отражённого от ионосферы сигнала в реальном времени.

В настоящей работе рассматриваются результаты измерений, выполненных на частотах зондирования 3,2 и 4,2 МГц.

Протяжённость области отражения сигнала по высоте существенно превышала величину  $c\tau/2 \approx 75$  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. В основном канале амплитуда сигнала принимала максимальные значения, в других каналах она была заметно меньше.

#### 2.3. Методы обработки данных

Первичная обработка. Комплексная амплитуда биений колебаний опорного генератора и отражённого сигнала в цифровом виде (частота опроса 10 Гц) записывалась на носитель информации, а затем при помощи преобразования Фурье вычислялись доплеровские спектры в диапазоне возможных доплеровских сдвигов от -2,5 до +2,5 Гц на интервале времени 60 с.

Вторичная обработка. Анализ динамических спектров показал, что сигнал, как правило, имел одномодовую структуру, и эта мода соответствовала обыкновенной магнитоионной компоненте. Одномодовая структура сигнала позволила получить временные зависимости вариаций

доплеровского смещения частоты. Использовался 6-полюсный синусный полосовой фильтр Баттеруорта с каскадной схемой реализации [20]. Основным параметром фильтра является центральная частота. Для режима работы стенда 3 мин — излучение, 3 мин — пауза центральная частота определяется частотой основной гармоники огибающей сигнала нагревного стенда и равняется 10 ч<sup>-1</sup>, что соответствует периоду, равному 6 мин. Ширина полосы пропускания выбрана равной 2 ч<sup>-1</sup>, что соответствовало интервалу обработки, равному 30 мин. При этом времена нарастания и спада сигнала при обнаружении цуга колебаний на выходе полосового фильтра были близкими к 15 мин.

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

#### 3. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РЕЖИМА ИЗЛУЧЕНИЯ НАГРЕВНОГО СТЕНДА

Известно, что коэффициент поглощения инфразвукового излучения в верхней атмосфере обратно пропорционален квадрату его периода T. Поэтому для уменьшения поглощения инфразвука следует увеличивать T до значений, примерно равных  $T_{\rm a}$ . На высотах  $z \approx 120 \div 300$  км  $T_{\rm a} \approx 6 \div 15$  мин (см. табл. 1).

Увеличение T также целесообразно при обнаружении колебаний инфразвукового диапазона с помощью доплеровского радара. Интервал времени  $T_d$  для оценки доплеровских спектров должен удовлетворять очевидному условию  $T_d \ll T$ . Но значение  $T_d$  нельзя сильно уменьшать, т.к. при этом увеличивается погрешность оценки доплеровской частоты  $f_d$  и ухудшается разрешающая способность по частоте  $\delta f_d$ . Известно, что  $\delta f_d \approx T_d^{-1}$ . При  $T_d = 1$  мин имеем  $\delta f_d \approx 16,7$  мГц.

Потенциальная точность оценки доплеровской частоты ограничена среднеквадратическим отклонением [21]:

$$\sigma_{\rm d} = \sqrt{\frac{12}{qT_{\rm d}^2}}\,,$$

где q — отношение сигнал/помеха. Для рассматриваемых выше суток  $q \approx 10^2$  и  $10^3$  в дневное и ночное время соответственно. Тогда при  $T_{\rm d} = 1$  мин  $\sigma_{\rm d}$  равно 1,8 и 5,8 мГц для ночного и дневного времени. Реальная погрешность оценки  $f_{\rm d}$  равна  $1/(2T_{\rm d})$  и не превышает 8 мГц.

Таким образом, оптимальный период цикла излучения нагревного стенда близок к 6 мин. Именно такое значение *T* было реализовано в данной измерительной кампании.

Поскольку механизм генерации колебаний инфразвукового диапазона и высота расположения акустического источника достоверно не известны, частота волны накачки  $f_{\rm BH}$  выбиралась как меньше, так и больше критической частоты  $f_{{}_{0}F_{2}}$ . Измерения выполнялись как в светлое, так и тёмное время суток. Частота  $f_{{}_{0}F_{2}}$  контролировалась при помощи ионозонда, расположенного рядом со стендом «Сура».

# 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

#### 4.1. Инфразвуковые колебания 22 марта 2010 года

Рассмотрим сначала результаты фильтрации доплеровского смещения частот<br/>ы $f_{\rm d}$ на частоте $f_1=3,2~{\rm M}\Gamma$ ц.

Первый цуг колебаний с  $T \approx 6$  мин и амплитудой доплеровского смещения частоты  $f_{da} \approx \approx 50 \div 60$  мГц наблюдался в интервале времени 13:15÷13:45 UT (рис. 1*a*). Ему предшествовал нагрев плазмы в режиме несущей с 12:45 до 13:00 UT на частоте 5 435 кГц с PG = 100÷120 MBT.

Л. Ф. Черногор, В. Л. Фролов, В. Ф. Пушин



Рис. 1. Вариации доплеровского смещения частоты в полосе частот  $10\pm 1$  ч<sup>-1</sup> на частотах 3,2 МГц (*a*) и 4,2 МГц (*б*) 22 марта 2010 года. Здесь и далее затемнённые участки на временной оси показывают интервал времени работы стенда «Сура» в режиме 3 мин — излучение, 3 мин — пауза, вертикальная линия указывает на момент захода Солнца на уровне Земли в месте расположения доплеровского радара

В этот день с 13:35 до 14:05 UT нагрев ионосферы сначала осуществлялся радиоволной с частотой  $f_{\rm BH} = 5\,435$  кГц и с эффективной мощностью  $PG = 100\div120$  MBT в режиме 3 мин излучение, 3 мин — пауза. В указанном интервале времени  $f_{0F_2} \approx 5,5\div5,7$  МГц, т. е.  $f_{\rm BH} < f_{0F_2}$ . Амплитуда  $f_{\rm da}$  колебания с  $T \approx 6$  мин достигла максимального значения, равного 25÷35 мГц, через  $\Delta t \approx 36\div39$  мин после начала излучения стенда «Сура». Следующее увеличение амплитуды колебаний наблюдалось через  $\Delta t \approx 36\div39$  мин после окончания излучения стенда. При этом также  $f_{\rm da} \approx 25\div35$  мГц.

В интервале времени 14:05÷15:00 UT стенд не работал.

С 15:00 до 16:00 UT нагрев ионосферы осуществлялся на частоте  $f_{\rm BH} = 5\,785$  кГц с  $PG = 70\div80$  MBт в том же режиме 3 мин — излучение, 3 мин — пауза. Работали только два из трёх модулей стенда. Ни включение, ни выключение стенда к генерации колебания с периодом 6 мин не привело. Важно, что для этого сеанса  $f_{\rm BH} > f_{\rm oF_2} \approx 5.5\div5.7$  МГц.

В интервале времени 16:15÷16:30 UT имел место цуг колебаний с $T\approx 6$ мин и малой амплитудой около 10 мГц.

На частоте зондирования  $f_2 = 4,2$  МГц поведение сигнала на выходе полосового фильтра качественно было подобно тому, которое имело место на частоте 3,2 МГц (см. рис. 16).

В интервалах времени 13:15÷13:25 и 13:35÷13:55 UT наблюдались цуги колебаний с макси-

Л. Ф. Черногор, В. Л. Фролов, В. Ф. Пушин



Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для 23 марта 2010 года

мальной амплитудой 10÷15 мГц.

332

Через 50÷54 мин после первого включения стенда в режиме 3 мин — излучение, 3 мин — пауза был зарегистрирован цуг колебаний с  $f_{\rm da} \approx 15$ ÷22 мГц.

После выключения стенда через время запаздывания  $\Delta t \approx 48 \div 51$  мин появился второй цуг колебаний с  $f_{\rm da} \approx 20 \div 30$  мГц. Длительность этих цугов на уровне  $0.5 f_{\rm da\,max}$  была около 20 мин.

Последующие включение и выключение стенда соответственно в 15:00 и 16:00 UT не привели к заметному росту амплитуды колебаний. В интервалах времени 15:25÷15:50 UT и 16:15÷16:40 UT наблюдались цуги колебаний с незначительной (12÷18 мГц) амплитудой. Добавим, что это имело место во время прохождения вечернего терминатора примерно с 15:45 до 17:35 UT на высотах от 0 до 300 км соответственно.

#### 4.2. Инфразвуковые колебания 23 марта 2010 года

В этот день с 15:16 до 16:00 UT модификация и<br/>оносферной плазмы проводилась на частоте  $f = 4\,785$  кГц с<br/> PG = 80 MBт в режиме 3 мин — излучение, 3 мин — пауза в условиях<br/>  $f < f_{\rm oF2} \approx \approx 5.4$  МГц.

Указанному режиму излучения в интервале времени 13:30÷14:05 UT предшествовал следующий режим излучения стенда «Сура»:  $f = 5\,455$  кГц,  $PG \approx 100$ ÷120 MBt, 10 с — излучение, 10 с — пауза.



Рис. 3. То же, что и на рис. 1, для 24 марта 2010 года

Сначала рассмотрим колебания  $f_{\rm d}$  на частоте 3,2 МГц (рис. 2*a*). Через 35÷37 мин после начала нагрева в режиме 10 с — излучение, 10 с — пауза возник цуг колебаний с  $f_{\rm da} \approx 20 \div 25$  мГц с длительностью  $\Delta T \approx 35$  мин (продолжительность нагрева также равна 35 мин). После выключения стенда с временем запаздывания 35÷38 мин опять наблюдалось появление цуга колебаний с  $f_{\rm da} \approx 15\div 18$  мГц и  $\Delta T \approx 20$  мин.

Начало работы стенда в режиме 3 мин — излучение, 3 мин — пауза сопровождалось возникновением цуга колебаний с  $f_{\rm da} \approx 10 \div 15$  мГц и длительностью  $\Delta T \approx 40$  мин; время запаздывания составляло 28÷30 мин. Окончанию излучения стенда также сопутствовало появление цуга колебаний с временем запаздывания  $\Delta t \approx 33 \div 36$  мин, для которого  $f_{\rm da} \approx 10 \div 13$  мГц и  $\Delta T \approx 30$  мин.

Заметим, что оба цуга появлялись в моменты, близкие к моменту прохождения вечернего терминатора.

Временны́е вариации доплеровского смещения частоты на частоте 4,2 МГц качественно были подобными вариациям на частоте 3,2 МГц (см. рис. 26). В интервалах времени 15:05÷15:20, 16:00÷16:20 и 17:05÷17:30 UT  $f_{\rm da} \approx 3$ ÷4 мГц.

После начала работы стенда в режиме 3 мин — излучение, 3 мин — пауза с временем запаздывания 28÷30 мин наблюдалось некоторое увеличение  $f_{\rm da}$  от 5 до 10÷12 мГц, длительность цуга колебаний здесь составляла  $\Delta T \approx 20$  мин. Через 30÷34 мин после окончания излучения стенда значение  $f_{\rm da}$  увеличилось от 3÷6 до 7÷12 мГц при  $\Delta T \approx 30$  мин.

Л. Ф. Черногор, В. Л. Фролов, В. Ф. Пушин

## 4.3. Инфразвуковые колебания 24 марта 2010 года

Модификация ионосферы в интервале времени 17:55÷18:25 UT осуществлялась на частоте 4785 кГц с PG = 80 MBт в условиях  $f_{\rm BH} < f_{\rm oF_2} \approx 5$  МГц. Режим излучения был прежним: 3 мин — излучение, 3 мин — пауза. Особенностью этого эксперимента было то, что нагрев осуществлялся после захода Солнца как в месте расположения нагревного стенда «Сура», так и в месте дислокации доплеровского радара.

Добавим, что указанному режиму воздействия на плазму с 17:25 до 17:55 UT предшествовало излучение радиоволн в режиме несущей на частоте  $f_{\rm BH} = 4\,785~{\rm k}\Gamma{\rm q}$  с  $PG \approx 80~{\rm MBr}$ .

Опишем сначала эффекты, наблюдавшиеся на частоте 3,2 МГц (рис. 3*a*).

Первый сильный цуг колебаний с  $f_{\rm da} \approx 30 \div 40$  мГц возник в интервале времени 17:25÷  $\div 17:55$  UT, который совпал с временем излучения электромагнитного поля на несущей частоте.

Начало и окончание работы стенда в режиме 3 мин — излучение, 3 мин — пауза происходило в этот день в тёмное время суток и не сопровождалось существенным ростом амплитуды колебаний с  $T \approx 6$  мин.

Колебания на частотах 3,2 и 4,2 МГц качественно были подобными (см. рис. 36). С 17:25 до 17:55 UT значение  $f_{\rm da} \approx 40 \div 50$  мГц. В интервалах времени 18:30÷18:40 UT и 20:00÷20:30 UT наблюдалось незначительное увеличение амплитуды колебаний до 10 и 15÷20 мГц соответственно.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ

#### 5.1. Анализ результатов наблюдений

Наблюдения 22 марта 2010 года. Если наблюдаемый в интервале времени 13:15÷13:45 UT пуг колебаний вызван включением стенда в режиме несущей, время запаздывания реакции ионосферы над г. Харьков составило около 30 мин. Стенд излучал только в течение 15 мин, поэтому реакции на его включение и выключение наложились. Общая продолжительность реакции должна составлять около 30 мин, что и наблюдалось в действительности. В обоих случаях время запаздывания  $\Delta t$  было около 30 мин, чему, при расстоянии между нагревным стендом и доплеровским радаром  $R \approx 960$  км, соответствует кажущаяся скорость распространения возмущений  $v \approx 530$  м/с.

После включения стенда в режиме 3 мин — излучение, 3 мин — пауза времена запаздывания реакции среды над г. Харьков составили  $36\div39$  и  $50\div54$  мин на частотах 3,2 и 4,2 МГц соответственно (см. табл. 2). При этом соответствующие скорости распространения возмущений были  $427 \pm 17$  и  $308 \pm 12$  м/с. После выключения стенда времена запаздывания реакции равнялись  $38\div40$  и  $50\div54$  мин на частотах 3,2 и 4,2 МГц соответственно. Для них значения v составляли  $410 \pm 11$  и  $308 \pm 12$  м/с соответственно. Важно, что время между двумя этими реакциями на включение и выключение периодического нагрева было около 30 мин, т. е. близко к продолжительности нагрева плазмы. Этот факт свидетельствует в пользу того, что колебания с периодом 6 мин возникали как при включении, так и при выключении мощного периодического радиоизлучения.

Добавим, что при первом включении стенда в режиме 3 мин — нагрев, 3 мин — пауза частота  $f_{\rm BH}$  была меньше критической частоты  $f_{\rm oF_2}$ . Это означает, что генерации колебаний инфразвукового диапазона способствовал аномальный нагрев плазмы в области верхнего гибридного резонанса, усиленный за счёт эффекта магнитного зенита. Такой нагрев сопровождается ростом возмущений ионосферной плазмы на высотах, где имеет место резонанс на верхней гибридной

Л. Ф. Черногор, В. Л. Фролов, В. Ф. Пушин

Сведения о	22 марта	23 марта	24 марта					
возмущениях	2010 г.	2010 г.	2010 г.					
Наличие реакции на включение								
$f/f_{\mathrm{o}F_2}$	< 1	< 1	< 1					
$f_1 = 3,2$ МГц	Есть	Есть	Нет					
$\Delta t$ , мин	$36 \div 39$	$30 \div 33$	—					
v, м/с	$427\pm17$	$509\pm24$	—					
$f_{ m da}, $ мГц	$25 \div 35$	$10{\div}15$	—					
$\delta_N,\%$	$0,22 \div 0,32$	$0,09 \div 0,14$	—					
$f_2 = 4,2$ МГц	Есть	Есть	Нет					
$\Delta t$ , мин	$50 \div 54$	$30 \div 32$	—					
v, м/с	$308\pm12$	$517 \pm 17$	—					
$f_{\rm da},{ m M}\Gamma$ ц	$16{\div}22$	$10{\div}12$	—					
$\delta_N,\%$	$0,14 \div 0,20$	$0,07{\div}0,08$	—					
Наличие реакции на выключение								
$f/f_{\mathrm{o}F_2}$	< 1	< 1	< 1					
$f_1 = 3,2$ МГц	Есть	Есть	Нет					
$\Delta t$ , мин	$38 \div 40$	$30 \div 32$	—					
v, м/с	$410\pm11$	$516\pm32$	—					
$f_{ m da}, $ мГц	$30 \div 38$	$12 \div 13$	—					
$\delta_N,\%$	$0,27 \div 0,34$	$0,\!11 \div 0,\!12$	—					
$f_2 = 4,2$ МГц	Есть	Есть	Нет					
$\Delta t$ , мин	$50 \div 54$	$30 \div 34$	—					
v, м/с	$308\pm12$	$500\pm31$	—					
$f_{ m da}, $ мГц	$22 \div 30$	$10{\div}12$	—					
$\delta_N,\%$	$0,15{\div}0,21$	$0,07{\div}0,08$	—					
Наличие реакции на включение								
$f/f_{\mathrm{o}F_2}$	> 1		_					
$f_1 = 3,2$ МГц	Нет	- – –						
$f_2 = 4,2$ МГц	Нет	—	—					

Таблица 2. Сведения о колебаниях инфразвукового диапазона

частоте, т. е. несколько ниже высоты отражения волны накачки.

Кроме того, эффективная мощность волны накачки была близка к максимальной величине 100÷120 MBt, при этом все три модуля стенда работали в синхронном режиме. Воздействие на ионосферу осуществлялось за 2÷2,5 часа до захода Солнца на высотах ионосферы в месте расположения стенда.

При втором включении стенда «Сура» в интервале времени 15:00÷16:00 UT в аналогичном режиме 3 мин — излучение, 3 мин — пауза частота волны накачки  $f_{\rm BH} = 5,785$  МГц была больше частоты  $f_{\rm oF_2} \approx 5,5 \div 5,75$  МГц. Резонанс на верхней гибридной частоте возможен при условии, что плазменная частота

$$f_{\rm p} = (f^2 - f_B^2)^{1/2},\tag{1}$$

где  $f_B \approx 1,4$  МГц — гирочастота электронов [19]. Вычисления по формуле (1) для использованных частот волны накачки дают  $f_p \approx 5,6$  МГц, что попадает в интервал изменения  $f_{0F_2}$  для рассматриваемых измерений. При таком режиме верхнегибридная турбулентность возбуждается, но её интенсивность слабее, чем в случае отражения волны накачки.

Л. Ф. Черногор, В. Л. Фролов, В. Ф. Пушин

Добавим, что в интервале времени 15:00÷16:00 UT работали только два модуля стенда и эффективная мощность излучения PG равнялась 70÷80 MBт. Кроме того, воздействие на ионосферу осуществлялось вблизи момента захода Солнца на уровне Земли в месте расположения стенда. Видимо, эти факторы предопределили отсутствие реакции на включение и выключение мощного периодического радиоизлучения на зондирующей частоте 3,2 МГц. Наблюдавшийся рост амплитуды цугов колебаний  $f_{\rm da}$  на частоте 4,2 МГц, скорее всего, связан с движением вечернего терминатора. На частоте 3,2 МГц подобный эффект не наблюдался. Дело в том, что в нижней части F-области амплитуда колебаний, генерируемых солнечным терминатором, увеличивается с ростом высоты. Этим и объясняется отсутствие реакции в сигнале на меньшей частоте. Если бы эти цуги были обусловлены включением и выключением стенда, времена запаздывания реакции составляли бы 25 и 15 мин, что намного меньше времени запаздывания 30÷50 мин, наблюдаемого в других сеансах.

Наблюдения 23 марта 2010 года. Возникший через  $35 \div 37$  мин цуг колебаний  $f_d$  с периодом 6 мин на частоте 3,2 МГц после начала нагрева в режиме 10 с — излучение, 10 с — пауза, повидимому, вызван включением стенда (см. рис. 2a). Если это так,  $v \approx 444 \pm 13$  м/с. Следующий цуг колебаний с  $\Delta T \approx 20$  мин наблюдался через  $35 \div 38$  мин после окончания излучения стенда в указанном режиме. Ему соответствует примерно такое же значение v. Временной интервал между этими цугами близок к 35 мин, т. е. к длительности воздействия. Это подтверждает факт генерации цугов мощным радиоизлучением в режиме 10 с — излучение, 10 с — пауза.

Реакция среды на воздействие в режиме 10 с — излучение, 10 с — пауза на частоте 4,2 МГц наблюдалась менее уверенно. Времена запаздывания относительно начала и окончания излучения стенда были близки к 46÷50 и 44÷48 мин соответственно, при этом скорость  $v \approx 320$ ÷360 м/с.

После начала и окончания излучения стенда в режиме 3 мин — излучение, 3 мин — пауза моменты появления цугов колебаний на обеих частотах радара запаздывали на  $30\div34$  мин. Тогда  $v \approx 505\pm28$  м/с. Временной интервал между цугами, равный 50 мин, больше продолжительности циклов работы стенда, равной 45 мин. Длительность цугов составляла  $30\div40$  мин.

Наблюдения 24 марта 2010 года. В период воздействия излучения на несущей частоте амплитуда  $f_{da}$  увеличилась до 40 мГц на обеих частотах радара. Поскольку  $\Delta t \approx 0$  и реакция на выключение излучения отсутствовала, цуг колебаний в интервале времени 17:25÷17:55 UT был сгенерирован, скорее всего, вечерним терминатором.

Уверенная реакция на включение и выключение мощного радиоизлучения с T = 6 мин не обнаружена, хотя измерения выполнялись в условиях  $f_{\rm BH} < f_{\rm oF_2} \approx 5~{\rm M}$ Гц и, кроме того, имело место влияние эффекта магнитного зенита. Это утверждение относится к измерениям на обеих частотах радара. Причиной этого могло послужить наступление ночного времени. Действительно, заход Солнца в месте расположения нагревного стенда происходил примерно в 15:20 и 17:30 UT на высотах 0 и 400 км соответственно.

Обобщённый анализ. Генерация цугов колебаний с началом излучения стенда «Сура» возникала в дневное время, когда выполнялось условие резонанса на верхней гибридной частоте, а взаимодействие волны накачки с плазмой усиливалось за счёт эффекта магнитного зенита. При этом выключение мощного периодического радиоизлучения стенда приводило к появлению примерно таких же цугов колебаний. Длительность цугов обычно не превышала 40 мин, хотя продолжительность воздействия периодического излучения могла быть и больше. Похоже, что в процессе длительного нагрева, продолжающегося больше 40÷60 мин, условия генерации и распространения колебаний изменяются.

Периодический нагрев не всегда приводит к генерации колебаний точно с таким же периодом. Интересно отметить, что цуги колебаний возникали при включении и выключении нагревного стенда не только в режиме несущей, но и в режиме 10 с — излучение, 10 с — пауза. Это означает,

Л. Ф. Черногор, В. Л. Фролов, В. Ф. Пушин

что режим несущей и режим 10 с — излучение, 10 с — пауза примерно равноценны, т. е. за 10 с первичные возмущения, генерирующие цуги колебаний, не успевают релаксировать. Такие времена релаксации, бо́льшие 10 с, имеют возмущения температуры электронов в *F*-области ионосферы и связанные с нагревом ионосферной плазмы изменения концентрации электронов как в *E*-, так и *F*-областях ионосферы.

Механизм генерации затухающих колебаний инфразвукового частотного диапазона до конца не понятен. Он может быть связан с нагревом нейтральной компоненты атмосферы [1]. Её заметный нагрев может быть реализован только на высотах  $300\div400$  км, где ещё существенен нагрев электронов и ионов, и, с другой стороны, концентрация нейтральных частиц уже относительно невелика, так что  $N/N_{\rm n} \approx 10^{-3} \div 10^{-2}$ , где N — концентрация электронов,  $N_{\rm n}$  — концентрация нейтральных частиц. При таком механизме важную роль играет эффект магнитного зенита, усиливающий нагрев электронов, а значит и ионов с нейтралами. Например, при относительном изменении температуры электронов  $\Delta T_{\rm e}/T_{\rm e0} \approx 1$  относительные изменения температуры ионов и нейтралов близки к  $10^{-3}\div10^{-2}$ . Относительные изменения атмосферного давления и концентрации электронов на высотах  $300\div400$  км имеют тот же порядок величины.

Генерация инфразвука возможна и за счёт периодической модуляции ионосферных токов как на высотах динамо-области порядка 100÷150 км, так и вблизи высоты верхнего гибридного резонанса на высоте 250÷350 км [2]. Этот механизм может быть существенным только в дневное время при достаточно большой проводимости ионосферной плазмы при наличии сильных ионосферных токов.

Значительную роль в генерации инфразвука может играть взаимодействие подсистем в системе Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера [22–26]. Генерация цугов затухающих колебаний при различных режимах нагрева напоминает реакцию резонансной системы на ударное воздействие. Продолжительность  $\Delta T$  реакции на включение мощного радиоизлучения составляла около  $35 \div 40$  мин, а на выключение —  $20 \div 30$  мин. Добротность резонансной системы  $Q = \Delta T/T$ . При указанных значениях  $\Delta T$  и T добротность  $Q \approx 6 \div 7$  при включении мощного радиоизлучения и  $Q \approx 3 \div 5$  при его выключении. Такая интерпретация отклика плазмы на нагревное воздействие объясняет и то, почему длительное периодическое воздействие не приводит к колебаниям с точно таким же периодом и с такой же продолжительностью.

Существенная зависимость факта генерации цугов колебаний от времени суток может быть связана с изменением условий в нейтральной атмосфере и, в частности, с изменением на 180° направления термосферного ветра при переходе от дня к ночи. Известно, что генерация инфразвука различными источниками и его параметры существенно зависят от состояния нейтральной атмосферы (см., например, [16]).

Добавим, что период T = 6 мин близок к периодам собственных колебаний атмосферы  $T_{\rm a}$  и  $T_{\rm b}$  (см. табл. 1). Собственные колебания могут играть определяющую роль в усилении взаимодействия подсистем в системе Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера.

## 5.2. Скорость распространения возмущений

Время запаздывания обнаруженных цугов колебаний относительно момента включения/выключения излучения стенда составило 28÷54 мин. Кажущаяся скорость распространения даётся очевидным соотношением:

$$v = \frac{R}{\Delta t - \Delta t_0},\tag{2}$$

где  $\Delta t_0$  — время развития первичного возмущения или, по-другому, время развития атмосферного источника инфразвука. При  $\Delta t_0 \ll \Delta t$  из (2) имеем  $v \approx R/(\Delta t)$ . Тогда  $v \approx 300 \div 570$  м/с.

Такую скорость имеет инфразвук в верхней атмосфере.

Если бы инфразвук распространялся изотропно, его скорость давалась бы хорошо известной формулой

$$v_{\rm s} = \sqrt{\gamma \, \frac{kT_{\rm n}}{M_{\rm n}}} = \sqrt{\gamma g H} \,,$$

где k — постоянная Больцмана,  $M_{\rm n}$  — масса нейтральных частиц.

При увеличении высоты в термосфере (высоты  $z \ge 90$  км)  $T_n$ , а значит и  $v_s$  должны расти. В наших экспериментах высота отражения зондирующей радиоволны с частотой  $f_2 = 4,2$  МГц была примерно на 50÷80 км больше, чем высота отражения радиоволны с  $f_1 = 3,2$  МГц. Поэтому ожидалось, что цуги колебаний для большей частоты должны были приходить раньше. Этого, однако, не наблюдалось. Дело в том, что инфразвук захватывается атмосферным (термосферным) волноводом [27, 28]. Ось волновода располагается на высотах 150÷200 км, а его эффективная толщина составляет 50÷100 км. Групповая скорость цуга отличается, вообще говоря, от  $v_s$  и зависит от периода колебаний, однозначно связанного с длиной волны  $\lambda$ , и положения в волноводе. В нашем случае для T = 360 с и  $v \approx 300\div570$  м/с имеем  $\lambda \approx 100\div200$  км.

Заметим, что радиоволна с  $f_1 = 3,2$  МГц отражалась вблизи оси волновода, а радиоволна с  $f_2 = 4,2$  МГц — заметно выше оси. Этим же объясняются и бо́льшие значения  $f_{\rm da}$  для частоты 3,2 МГц.

#### 5.3. Амплитуда возмущений

Значения  $f_{da}$  в различных сеансах изменялись в пределах 10÷40 мГц (табл. 2). По ним можно оценить относительную амплитуду  $\delta_N$  возмущений концентрации электронов N. Для этого воспользуемся формулой из [29, 30]:

$$\delta_N = \frac{cT}{L} \frac{f_{\rm da}}{4\pi f_{1,2}},\tag{3}$$

где  $L = \min(L_N, 2H), L_N = N/(dN/dz)$  — характерный масштаб изменения N.

Результаты оценок  $\delta_N$  по формуле (3) для частот  $f_1$  и  $f_2$  приведены в табл. 2. Из них следует, что  $\delta_N \approx 0.1 \div 0.3 \%$ . Такие значения  $\delta_N$  на  $1 \div 1.5$  порядка меньше, чем  $\delta_N$  при распространении внутренних гравитационных волн, генерируемых мощным периодическим радиоизлучением (см., например, [12–14]).

Полученное значение  $\delta_N$  также на порядок меньше значений, приведённых в теоретической работе [17].

#### выводы

1) Обнаружены затухающие цуги колебаний инфразвукового частотного диапазона с длительностью 20÷40 мин, сопровождавшие включение и выключение мощного периодического (с периодом 6 мин) радиоизлучения.

2) Аналогичные затухающие цуги колебаний обнаруживались после начала и окончания излучения нагревного стенда в режиме несущей, а также при периодическом (с периодом 20 с) излучении мощной радиоволны.

3) Время запаздывания цугов колебаний составляло 28÷54 мин, а кажущаяся скорость распространения 300÷570 м/с. Данная скорость близка к скорости звука на высотах верхней атмосферы.

4) Амплитуда колебаний доплеровского смещения частоты равнялась 10÷40 мГц. Ей соответствовала амплитуда относительных возмущений концентрации электронов 0,1÷0,3% на высоте зондирования 150÷200 км.

5) Амплитуда колебаний инфразвукового частотного диапазона зависела от режима работы нагревного стенда и состояния верхней атмосферы и ионосферы, определявших параметры акустического источника и термосферного волновода. Генерация цугов колебаний с началом излучения стенда «Сура» возникала в дневное время, когда выполнялось условие резонанса на верхней гибридной частоте, а взаимодействие волны накачки с плазмой усиливалось за счёт эффекта магнитного зенита. Длительность цугов обычно не превышала 40 мин, хотя продолжительность воздействия периодического излучения могла быть и больше. В процессе длительного нагрева (больше 40÷60 мин) условия генерации и распространения колебаний изменяются. Периодический нагрев не всегда приводит к генерации колебаний с точно таким же периодом.

6) Для подтверждения обнаруженных закономерностей требуется продолжение экспериментальных и теоретических исследований. В частности, целесообразен поиск колебаний при нагреве ионосферы мощным периодическим радиоизлучением с периодом от 1 до 6 мин, а также при излучении моноимпульсов волны накачки с различными длительностями. Для установления природы инфразвукового источника имеет смысл провести измерения при разных соотношениях между частотой волны накачки и критической частотой слоя  $F_2$ , выполнив их в разное время суток в условиях как спокойной, так и магнитовозмущенной ионосферы.

Авторы выражают благодарность сотрудникам, обслуживающим стенд «Сура», за обеспечение его функционирования. Работа В. Л. Фролова проводилась при финансовой поддержке РФФИ (грант 11–02–00374-а) и Министерства образования и науки РФ (государственный контракт 16.518.11.7066).

## 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. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. // Вестник Харьковского ун-та. Сер. Радиофизика и электроника. 1988. № 318. С. 29.
- 4. Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29, № 3. С. 513.
- Мисюра В. А., Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. // Космическая наука и техника. 1989. Вып. 4. С. 72.
- Гармаш К. П., Гритчин А. И., Губарев А. А. и др. // Труды НИИР. М.: Радио и связь, 1989. № 9. С. 57.
- 7. Пахомова О.В., Черногор Л.Ф. // Космическая наука и техника. 1990. Вып. 5. С. 71.
- 8. Костров Л. С., Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30, № 1. С. 159.
- 9. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. // Успехи современной радиоэлектроники. 1998. № 6. С. 17.
- 10. Гармаш К.П., Черногор Л.Ф. // Электромагнитные явления. 1998. Т.1, № 1. С.90.
- 11. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2009. Т. 14, № 4. С. 377.
- Бурмака В. П., Домнин И. Ф., Урядов В. П., Черногор Л. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 11. С. 859.
- Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Комраков Г. П., Пушин В. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 2. С. 81.
- 14. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 14.
- 15. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. М.: Наука, 1974. 256 с.

- 16. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978. 532 с.
- 17. Караштин А. Н., Митяков Н. А., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20, № 5. С. 787.
- Караштин А. Н., Комраков Г. П., Токарев Ю. В., Шлюгаев Ю. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 24, № 8. С. 765.
- 19. Гуревич А.В. // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
- 20. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982. 428 с.
- Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2004. Т.9, № 1. С.5.
- 22. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2003. Т. 8, № 1. С. 59.
- 23. Черногор Л. Ф. // Нелинейный мир. 2006. Т. 4, № 12. С. 655.
- 24. Черногор Л. Ф. // Нелинейный мир. 2007. Т. 5, № 4. С. 198.
- 25. Черногор Л. Ф. Нелинейная радиофизика. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2004. 200 с.
- 26. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке. Харьков: XHУ им. В. Н. Каразина, 2008. 528 с.
- 27. Nalesso G.F., Jacobson A.R. // Ann. Geophys. 1993. V.11. P.372.
- 28. Nalesso G.F., Jacobson A.R. // J. Geophys. Res. A. 1995. V. 100, No. 6. P. 9741.
- 29. Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50, № 3. С. 361.
- 30. Панасенко С.В., Черногор Л.Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2010. Т. 15, № 1. С. 24.

Поступила в редакцию 8 июня 2012 г.; принята в печать 27 июня 2012 г.

## INFRASOUND OSCILLATIONS IN THE IONOSPHERE AFFECTED BY HIGH-POWER RADIO WAVES

L. F. Chernogor, V.L. Frolov, and V. F. Pushin

We present the results of filtering in the range of periods 5.6–6.7 min of temporal variations in the Doppler frequency shift of the ionosphere-reflected radio signals from the high-frequency vertical ionospheric-sounding radar located near the city of Kharkov during ionospheric plasma modification by high-power periodic (with 6-min period) radio waves of the Sura facility. It is found that switching on and off a series of pulses with 3-min duration and the same pause launched a damped wave process with 6-min period, a delay time of about 30–50 min, and an apparent propagation velocity of about 320–530 m/s. The quasi-periodic variation amplitude of the Doppler frequency shift was 10–40 MHz. The corresponding relative-perturbation amplitude of the electron number density was about 0.1–0.3%. Detected oscillations is evidence that damped infrasound density waves can be generated in the upper atmosphere.