

УДК 550.388:533.951+573.868

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ МОЩНЫМ ПЕРИОДИЧЕСКИМ 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 полосовой пропускающей фильтрации временных вариаций доплеровского смещения частоты радиосигналов расположенного вблизи г. Харьков доплеровского радара вертикального зондирования в период воздействия на ионосферу мощным периодическим (с периодами 10 и 15 мин) радиоизлучением стенда «Сура». Фильтрация выполнена в диапазонах периодов, близких к периоду акустической отсечки и периоду Брента–Вайсяля (4÷6, 8÷12 и 13÷17 мин). Колебания с периодами 4÷6 мин и амплитудой 50÷100 мГц фактически не регистрировались. Колебания с периодами 8÷12 и 13÷17 мин и амплитудами 60÷100 мГц обнаруживались почти во всех сеансах. Первые имели время запаздывания по отношению к моменту включения стенда «Сура», близкое к 100 мин, вторые — около 40÷50 мин. Им соответствуют групповые скорости распространения около 160 и 320÷400 м/с. Колебания доплеровского смещения частоты вызывались акустико-гравитационными волнами, которые приводили к периодическим вариациям концентрации электронов с относительной амплитудой порядка 0,1÷1,0 %. Продемонстрировано, что при эффективной мощности стенда, равной 50 МВт, акустико-гравитационные волны не регистрировались, в то время как при увеличении этой мощности до 130 МВт они уверенно наблюдались. Показано, что период волновых процессов определялся периодом циклов нагрев—пауза, а продолжительность цугов не зависела от продолжительности серии циклов нагрев—пауза. Полученные данные позволяют заключить, что механизм генерации зарегистрированных волновых возмущений отличается от механизма, предложенного в 1970–1990 гг.

ВВЕДЕНИЕ

Модификация ионосферы мощным высокочастотным радиоизлучением занимает важное место среди активных экспериментов в околоземном космическом пространстве. Одним из результатов выполненных в последнее время исследований является экспериментальное доказательство возможности воздействия мощным радиоизлучением на нейтральную атмосферу, в результате чего в ней генерируются акустико-гравитационные волны. Проявления этих волн в виде перемещающихся ионосферных возмущений наблюдались радиофизическими методами [1–8]. Результаты последних исследований таких возмущений представлены в работах [9–14]. В них продемонстрировано, что эффективность генерации волновых возмущений существенно зависит от режимов работы нагревного стенда и состояния атмосферы и ионосферы.

Известно, что у атмосферы есть две собственные частоты: частота акустической отсечки ω_a и частота Брента–Вайсяля ω_b (см., например, [11, 14]):

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

где γ — показатель адиабаты, g — ускорение свободного падения, H — приведённая высота нейтральной атмосферы, $H_T = T_n / (dT_n/dz)$, T_n — температура нейтральных частиц, z — высота.

Недиспергирующие акустические волны в атмосфере могут распространяться, если их период $T < T_a = 2\pi/\omega_a$. В D -, E - и F -областях ионосферы значения T_a близки к 5,1; 5,2 и 5,2÷15,0 мин

Л. Ф. Черногор, В. Л. Фролов

219

соответственно [14]. В то же время в этих же областях значения $T_b = 2\pi/\omega_b$ близки к 7,3; 5,0 и 5,0÷15,1 мин соответственно [14]. Волны с периодами от T_a до T_b распространяться не могут. В атмосфере также могут распространяться внутренние гравитационные волны с периодами $T > T_b$. Они обладают ярко выраженной дисперсией. Ожидается, что вблизи собственных частот атмосферы ω_a и ω_b условия распространения волн существенно меняются. Не исключается возможность развития неустойчивостей вблизи частот ω_a и ω_b или вырождение волнового процесса в колебательный. Причиной этого служит стремление к нулю групповой и фазовой скоростей при $T \rightarrow T_b$ [11]. Не вполне ясно, как поведут себя акустические волны при $T \rightarrow T_a$. Наблюдаемые колебания с периодами вблизи T_a и T_b могут возбуждаться не вблизи места расположения нагревного стенда, а в окрестности места их наблюдения. Это возможно в том случае, если под действием мощного периодического радиоизлучения возбуждаются колебательные и волновые процессы в системе атмосфера—ионосфера—магнитосфера.

Изучение колебательно-волновых процессов с периодами, близкими к T_a и T_b , в естественных условиях затруднено, т. к. неизвестно время и место их возбуждения. Активные эксперименты, использующие воздействие мощного периодического радиоизлучения на ионосферную плазму, позволяют исследовать особенности возникновения и распространения процессов с такими периодами.

Целью настоящей работы является анализ вариаций доплеровского смещения частоты с периодами, близкими к периодам собственных колебаний атмосферы, при воздействии на ионосферу мощным периодическим радиоизлучением в режиме (5 мин — нагрев, 5 или 10 мин — пауза).

1. СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ ВО ВРЕМЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Особенностью этих исследований было то, что, в отличие от исследований [10–14], наблюдения выполнялись на фоне магнитной бури.

Состояние космической погоды удобно описывать при помощи параметров солнечного ветра (концентрации n_{sw} , скорости V_{sw} , температуры T_{sw} и давления p_{sw}), компонент B_y и B_z межпланетного магнитного поля, энергии ϵ_A , поступающей в магнитосферу от солнечного ветра (функции Акасофу), и индексов геомагнитной активности (K_p и D_{st}). Все эти параметры, а также поведение критической частоты слоя F_2 над станцией «Москва» взяты на сайтах [15–17] и приведены на рис. 1. Из рис. 1 видно, что утром 20 мая 2012 года заметно увеличились параметры солнечного ветра. Это вызвало слабую магнитную бурю с $K_{p\max} = 4$.

Сутки 21 мая 2012 года в основном были спокойными. При переходе с 21 на 22 мая наблюдалось внезапное начало магнитной бури, индекс D_{st} увеличился от 0 до +40 нТл.

В начале суток 22 мая примерно в три раза увеличилась температура солнечного ветра, а в течение суток существенно увеличились и его остальные параметры. Компонента B_z резко уменьшилась от 0 до –13 нТл. Функция Акасофу увеличилась более чем на порядок и превысила 20 ГДж/с. Началась магнитная буря: индекс K_p достигал 4, а индекс D_{st} стал отрицательным.

23 мая рост V_{sw} , T_{sw} и частично p_{sw} продолжался. Компонента B_z увеличилась от своего минимального значения практически до 0. Наступила сначала главная фаза умеренной магнитной бури ($K_{p\max} = 5$, $D_{st\min} \approx 40$ нТл), а затем фаза восстановления. Критическая частота f_{oF_2} в течение суток была примерно на 2 МГц меньше, чем в предыдущие сутки.

24 мая геомагнитная обстановка была практически невозмущённой ($K_p = 2$, $D_{st} \approx \pm 2$ нТл). Спокойной она оставалась и 25 мая. Частота f_{oF_2} в дневное время 24 и 25 мая была примерно на 2 МГц ниже, чем 20 и 21 мая.

Добавим, что восход Солнца в Харькове наблюдался в 22:40 UT на высоте 300 км и в 00:40 UT на поверхности Земли, а заход — в 20:00 и 17:20 UT соответственно. Эти же времена в месте

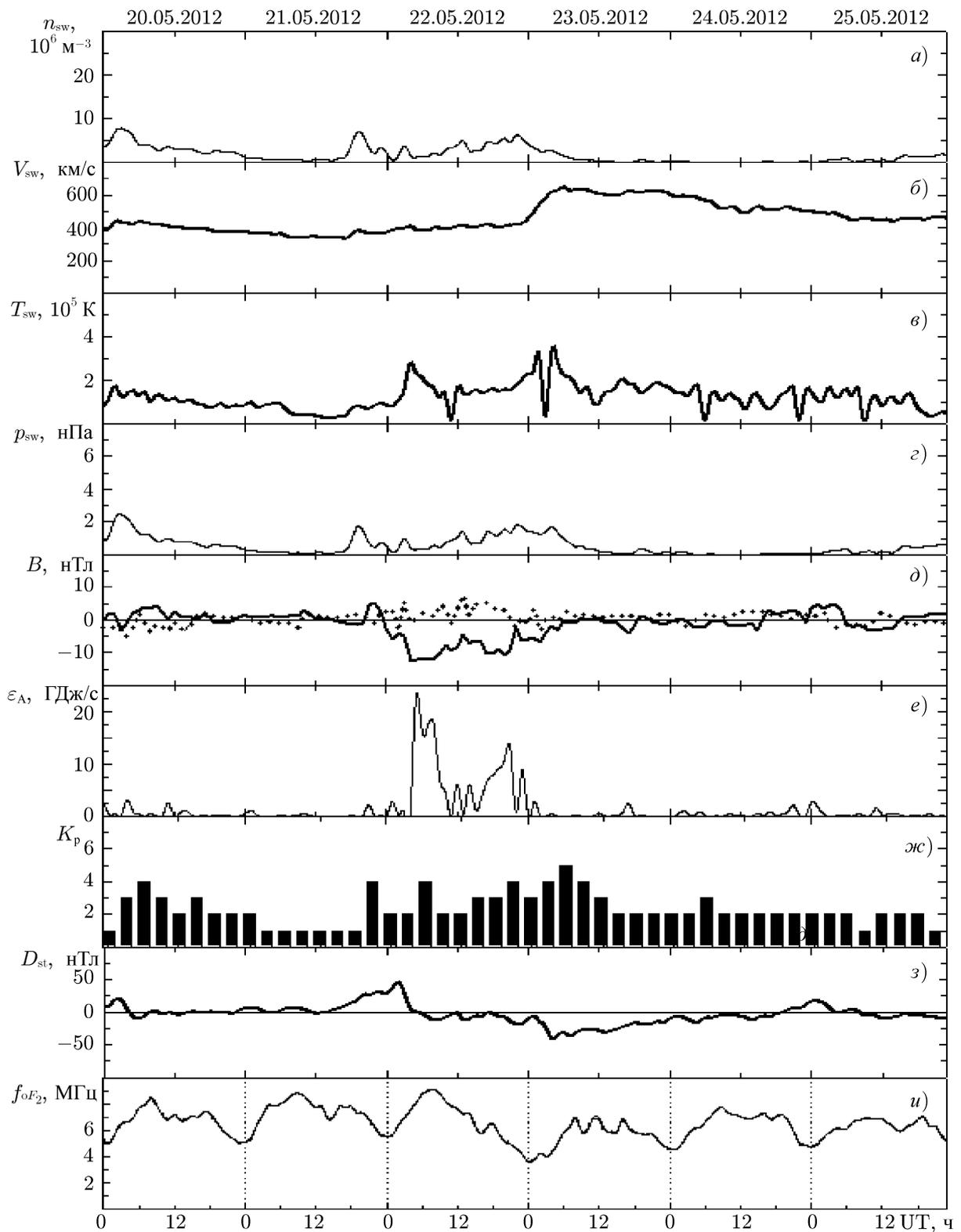


Рис. 1. Параметры, характеризующие состояние космической погоды с 20 по 25 мая 2012 года

расположения стенда «Сура» были примерно на 35 мин раньше, чем в Харькове.

2. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

2.1. Нагревный стенд «Сура»

Стенд «Сура» [18] расположен в 100 км к востоку от г. Нижний Новгород (Россия), его географические координаты $56^{\circ}09'$ с. ш., $46^{\circ}06'$ в. д.

Во время рассматриваемых в работе экспериментов три модуля стенда работали синфазно, и только 24 мая с 11:21 до 11:51 UT излучали два модуля. При этом в проводимых исследованиях максимальная эффективная мощность PG излучения волны накачки при излучении всех трёх модулей стенда составляла 120 и 150 МВт для двух используемых в экспериментах частот 4,785 и 5,828 МГц соответственно; при использовании двух модулей стенда эффективная мощность была приблизительно в два раза меньше. Во всех экспериментах диаграмма направленности антенны стенда была наклонена к югу на 12° . При использовании в измерениях волн обыкновенной поляризации это приводило к усилению 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 волны накачки приведены ниже для каждого анализируемого в работе случая.

Критическая частота f_{oF_2} 22 мая в среднем сначала (примерно до 10:00 UT) увеличивалась от 5 до 9 МГц, а затем (с 10:00 до 24:00 UT) уменьшалась до 4 МГц. 23 мая частота f_{oF_2} увеличивалась от 4 до 7 МГц, а затем, флуктуируя, уменьшалась до 5 МГц. 24 мая она сначала увеличивалась от 5 МГц до 7 МГц, далее, флуктуируя, уменьшалась до 5 МГц. Заметим, что местное (московское) время в месте расположения ионозонда опережало на четыре часа всемирное время.

2.2. Обоснование выбора режима излучения стенда «Сура»

Периоды собственных колебаний атмосферы в зависимости от высоты изменяются в широких пределах — от 5 до 15 мин. Этим и определялся режим излучения нагревного стенда в измерительной кампании 22–24 мая 2012 года. В утреннее время (примерно с 8 до 10 MSK) стенд излучал в режиме 5 мин нагрев, 5 мин пауза ([+5 мин; –5 мин]). В околополуденное и послеполуденное время стенд работал в режимах [+5 мин; –10 мин] или [+5 мин; –5 мин] (см. табл. 1).

При выборе режима излучения нагревного стенда мы исходили из того, что период $T \approx 5$ мин близок к собственному периоду T_a или T_b в D - и E -областях ионосферы. Если система атмосфера—ионосфера—магнитосфера реагировала на включения и выключения стенда, то в вариациях доплеровского смещения частоты $f_d(t)$ радара, используемого для диагностики волновых (колебательных) процессов в ионосфере, должны наблюдаться гармоники с $T \approx 5$ мин.

Если же указанная система реагировала на периодический нагрев, в вариациях $f_d(t)$ должны были наблюдаться гармоники с $T \approx 10$ мин.

Режим [+5 мин; –10 мин] позволяет исследовать влияние несимметричного цикла нагрева, отличного от симметричного цикла [+5 мин; –5 мин], а также обнаруживать акустико-гравитационные волны вдали от собственных частот D - и E -областей ионосферы.

В одном сеансе предусматривалось также значительное изменение эффективной мощности излучения волны накачки PG (от 50 до 150 МВт).

Таблица 1. Режимы излучения стенда «Сура»

Дата	Время, УТ	Частота, кГц	PG , МВт	Режим излучения
22 мая 2012 года	03:51–06:46	4 785	100	[+5 мин; –5 мин]
	11:30–12:45	5 828	150	[+5 мин; –10 мин]
	16:01–17:21	4 785	120	[+5 мин; –10 мин]
23 мая 2012 года	03:51–06:16	4 785	110	[+5 мин; –5 мин]
	11:30–11:45	4 785	110	[+5 мин; –10 мин]
	11:45–12:40	4 785	110	[+5 мин; –5 мин]
	15:11–16:06	4 785	110	[+5 мин; –5 мин]
	16:06–16:31	4 785	110	[+5 мин; –10 мин]
24 мая 2012 года	03:41–06:06	5 828	100	[+5 мин; –5 мин]
	12:21–11:51	5 828	50	[+5 мин; –10 мин]
	11:51–12:26	5 828	130	[+5 мин; –10 мин]
	16:01–17:06	5 828	150	[+5 мин; –10 мин]

2.3. 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 (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/шум q в ночное время может достигать $10^5 \div 10^6$. В дневное время величина q обычно на $1 \div 2$ порядка меньше. Радар соединён с персональным компьютером, образуя программно-аппаратный комплекс, ведущий измерения и предварительную обработку отражённого от ионосферы сигнала в реальном времени.

Во время экспериментов измерения выполнялись на частотах зондирования 3,2 и 4,2 МГц. Однако, поскольку радиоволна на частоте 3,2 МГц часто экранировалась слоем E_s , в работе приводятся результаты измерений лишь для радиоволны с $f = 4,2$ МГц.

Высотная протяжённость отражённого сигнала существенно превышала величину $c\tau/2 \approx 75$ км (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. При этом выделялся основной канал, в котором амплитуда сигнала принимала максимальные значения: в других каналах она была заметно меньше.

2.4. Методы обработки данных

Первичная обработка заключалась в следующем. Комплексная амплитуда биений колебаний опорного генератора и отражённого сигнала в цифровом виде (частота дискретизации 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.

На втором этапе проводился анализ динамических спектров. Анализ показал, что сигнал, как правило, имел одномодовую структуру, и эта мода соответствовала обыкновенной магнитоионной компоненте. Одномодовая структура сигнала позволила получить временные зависимости вариации доплеровского смещения частоты $f_d(t)$. Для выделения заданных гармоник использовался пропускающий полосовой фильтр. Основными параметрами фильтра являются центральная частота и полоса пропускания. Обнаружению подлежали гармоники $f_d(t)$ с периодами, лежащими в пределах $4 \div 6$, $8 \div 12$ и $13 \div 17$ мин.

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

2.5. Обоснование методики фильтрации временных вариаций доплеровского смещения частоты

Вариации доплеровского смещения частоты вызываются изменениями (флуктуациями) концентрации электронов N в ионосфере. Флуктуации N с дисперсией σ_N^2 ограничивают чувствительность метода вертикального доплеровского зондирования, использующего для выделения колебаний с заданным периодом T полосовую фильтрацию в диапазоне периодов ΔT .

Оценим дисперсию флуктуаций доплеровского смещения частоты в диапазоне периодов от T_1 до T_2 , вызванную флуктуациями N в диапазоне периодов от $T_{\min} = f_{\max}^{-1}$ до $T_{\max} = f_{\min}^{-1}$.

Будем исходить из следующего соотношения:

$$\sigma_N^2 = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_N(f) df = \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} S_N(T)/T^2 dT, \quad (1)$$

где $S_N(f)$ — частотный спектр флуктуаций N , T — период флуктуаций. При $S_N(T) = \text{const}$ из (1) имеем

$$\sigma_N^2 = S_N \left(\frac{1}{T_{\min}} - \frac{1}{T_{\max}} \right) = S_N \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\min} T_{\max}} \equiv \frac{S_N}{T_{\text{ef}}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{ef}} = T_{\min} T_{\max} / (T_{\max} - T_{\min})$. В узкой полосе периодов ΔT с заданным средним значением периода T дисперсия флуктуаций N , как видно из (1), даётся соотношением

$$\tilde{\sigma}_N^2 = S_N \frac{\Delta T}{T^2}. \quad (3)$$

Используя (2) и (3), получим следующее выражение:

$$\tilde{\sigma}_N^2 = \sigma_N^2 \frac{T_{\text{ef}} \Delta T}{T^2}. \quad (4)$$

Эксперименты показывают, что не всегда выполняется условие $S_N(T) = \text{const}$. В ряде случаев наблюдается тенденция роста уровня флуктуаций при увеличении T примерно по линейному закону. Предположим, что

$$S_N(T) = S_{N_m} T / T_{\min}, \quad (5)$$

где $S_{N_m} = S_N(T_{\min})$. Подставляя соотношение (5) в (1) и интегрируя, получим

$$\sigma_N^2 = \frac{S_{N_m}}{T_{\min}} \ln \tau, \quad \tau = T_{\max} / T_{\min}. \quad (6)$$

При условии (5) из соотношения (1) следует, что в узкой полосе периодов

$$\tilde{\sigma}_N^2 = \frac{S_{Nm}}{T_{\min}} \frac{\Delta T}{T}. \quad (7)$$

Тогда из формул (6) и (7) имеем

$$\tilde{\sigma}_N^2 = \frac{\sigma_N^2}{\ln \tau} \frac{\Delta T}{T}. \quad (8)$$

Значения $\tilde{\sigma}_N$ определяют чувствительность методики выделения колебаний доплеровского смещения частоты в заданном диапазоне периодов. Дисперсия $\sigma_{f_d}^2$ флуктуаций последней связана с $\tilde{\sigma}_N^2$ следующим соотношением (см., например, [12, 14]):

$$\sigma_{f_d} = \frac{4\pi L}{cT} f \tilde{\sigma}_N, \quad (9)$$

где L — характерный интервал высот, дающих основной вклад в вариации доплеровского смещения частоты, c — скорость света в вакууме, T — период колебаний (волны), f — несущая частота доплеровского радара.

Подставляя (4) в выражение (9), получим

$$\sigma_{f_d} = \frac{4\pi L f}{cT^2} \sqrt{T_{\text{ef}} \Delta T} \sigma_N. \quad (10)$$

Для случая линейного роста флуктуаций (8) имеем

$$\sigma_{f_d} = \frac{4\pi L f}{cT} \sqrt{\frac{\Delta T}{T \ln \tau}} \sigma_N. \quad (11)$$

Важно, что в этих случаях $\sigma_{f_d} \propto T^{-2}$ и $T^{-3/2}$ соответственно.

Используя соотношения (10) и (11), оценим σ_{f_d} . Как показали модельные расчёты для частоты $f \approx 3 \div 4$ МГц, значение L близко к 30 км. Величина T_{\min} определяется интервалом времени оценки доплеровских спектров, в настоящих исследованиях $T_{\min} = 1$ мин. Величина T_{\max} равна максимальному периоду внутренних гравитационных волн, т.е. $T_{\max} = 180$ мин. Тогда $T_{\text{ef}} \approx T_{\min} \approx 1$ мин, а $\ln \tau \approx 5,2$. Выполненные оценки показали, что значение ΔT целесообразно выбирать в пределах $2 \div 6$ мин при полосно-пропускающей фильтрации периодов $5 \div 30$ мин соответственно. Многолетние экспериментальные исследования разных авторов показали, что $\sigma_N \sim 0,01$. Оценки по формулам (10) и (11) для $T = 5$ мин, $\sigma_N = 0,01$, $\Delta T = 2$ мин и $f = 4$ МГц приводят к результатам $\sigma_{f_d} = 45$ мГц и $\sigma_{f_d} = 44$ мГц соответственно (см. табл. 2). Из табл. 2 видно, что с ростом T значения σ_{f_d} быстро убывают. Кроме того, как и следовало ожидать, величина σ_{f_d} заметно зависит от вида спектральной плотности $S(T)$, хотя на порядок величины её вид не влияет при $T = 5 \div 40$ мин.

Заметим, что величина $\sigma_{f_d}^2$ определяет отношение сигнал/шум при обнаружении в зависимостях $f_d(t)$ периодического процесса с амплитудой A :

$$q_d = \frac{A^2}{2\sigma_{f_d}^2}. \quad (12)$$

Поэтому при анализе результатов экспериментов в каждом из них наряду с оценкой A оценивалась и дисперсия $\sigma_{f_d}^2$, а затем и q_d .

Таблица 2. Зависимость среднеквадратичного отклонения доплеровского смещения частоты от периода колебаний T и интервала периодов ΔT для плоской ($S(T) = \text{const}$) и линейной ($S(T) \propto T$) спектральных плотностей (σ_{fd1} и σ_{fd2} соответственно)

T , мин	ΔT , мин	σ_{fd1} , мГц	σ_{fd2} , мГц
5	2	45,0	44,0
10	4	15,9	22,0
15	5	7,9	13,4
20	6	4,8	9,5
25	6	3,1	6,8
30	6	2,2	5,2
40	7	1,9	3,6
50	8	0,9	3,1
60	10	0,3	2,4

Для A справедлива формула, аналогичная (9):

$$A = \frac{4\pi L}{cT} f \delta_N, \quad (13)$$

где δ_N — относительная амплитуда возмущения N с периодом T . Тогда из (12) и (13) с учётом (10) имеем

$$q_d = \frac{\delta_N^2}{2\sigma_N^2} \frac{T^2}{T_{\text{ef}} \Delta T} = \frac{T^2}{T_{\text{ef}} \Delta T} q_N, \quad (14)$$

а с учётом (11) получим

$$q_d = \frac{\delta_N^2}{2\sigma_N^2} \frac{T \ln \tau}{\Delta T} = \frac{T}{\Delta T} q_N \ln \tau. \quad (15)$$

Здесь

$$q_N = \frac{\delta_N^2}{2\sigma_N^2} \quad (16)$$

есть отношение сигнал/шум для искомой гармоники в вариациях концентрации электронов.

Отношение

$$Q = q_d/q_N$$

представляет собой выигрыш в отношении сигнал/шум, даваемый полосовой фильтрацией. Для указанных выше зависимостей $S_N(T)$ из (14) получаем

$$Q = \frac{T^2}{T_{\text{ef}} \Delta T}, \quad (17)$$

из (15) —

$$Q = \frac{T}{\Delta T} \ln \tau. \quad (18)$$

Из этих соотношений следует, что выигрыш Q пропорционален добротности фильтра $Q_f = T/\Delta T$, которая в данных исследованиях составляла $2,5 \div 4,0$. Кроме того, $T/T_{\text{ef}} \approx 5 \div 15$ и $\ln \tau \approx 5$, что давало выигрыш $Q \approx 12,5 \div 60,0$. Это обстоятельство позволило обнаруживать гармоники с $\delta_N \ll \ll \sigma_N \sim 10^{-2}$.

Заметим, что значительное уменьшение ΔT с целью увеличения Q неоправданно, т.к. при этом увеличивается время реакции полосового фильтра и увеличивается неопределённость при оценке времени прихода волнового (квазипериодического) возмущения, а также его длительности.

Минимальные значения $\delta_{N \min}$ вычисляются из соотношений (14), (15) и (16) при $q_{d \min} = 1$:

$$\delta_{N \min} = \sqrt{2/Q} \sigma_N, \quad (19)$$

где Q задано соотношениями (17) или (18).

Результаты расчётов по формуле (19) приведены в табл. 3. Из табл. 3 видно, что полосовая фильтрация позволяет обнаружить квазипериодические вариации концентрации электронов с $\delta_N \approx 0,1 \div 1,0$ %.

Таблица 3. Зависимость максимальных значений относительной амплитуды возмущений концентрации электронов от Q и σ_N

Q	$\sigma_N = 10^{-2}$	$\sigma_N = 2 \cdot 10^{-2}$	$\sigma_N = 3 \cdot 10^{-2}$
10	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^{-2}$
20	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-3}$
30	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-3}$
40	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$
50	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$
60	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$
70	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$
80	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$
90	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$
100	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ

3.1. Временные вариации доплеровского смещения частоты в диапазоне периодов 4 ÷ 6 мин

Наблюдения за временными вариациями доплеровских спектров и доплеровского смещения частоты $f_d(t)$ проводились с 21 по 24 мая 2012 года. Измерения 21 мая, когда стенд «Сура» не работал, использовались в качестве контрольных.

Временные вариации доплеровского смещения частоты на частоте $f_1 = 4,2$ МГц для четырёх соседних дней приведены на рис. 2. Из рис. 2 видно, что в ионосфере в течение всего времени наблюдения существовали цуги колебаний с длительностью около 20 мин и амплитудой A до 40 ÷ 50 мГц. Для контрольного дня $f_d(t) \approx 25$ мГц. Существенное увеличение амплитуды колебаний имело место после 06:00 UT. Оно было связано с появлением экранирующего ионосферного слоя E_s с критической частотой $f_{E_s} > 4,2$ МГц. Слой E_s приводит к резкому уменьшению амплитуды отражённой от ионосферы радиоволны. Доплеровские спектры при этом становились диффузными, а сигнал $f_d(t)$ — шумоподобным сигналом, в котором присутствовали гармоники с самыми разными периодами. В этом случае спектр $f_d(t)$ не описывает реальное состояние атмосферы и ионосферы. В то же время 22, 23 и 24 мая этот параметр увеличивался до 40; 35 и 60 мГц соответственно.

При включении нагревного стенда 22 мая характер колебаний существенно не изменился. Некоторое увеличение их амплитуды в интервале времени 06:00–07:00 UT связано с частичным экранированием вышележащих слоёв слоем E_s .

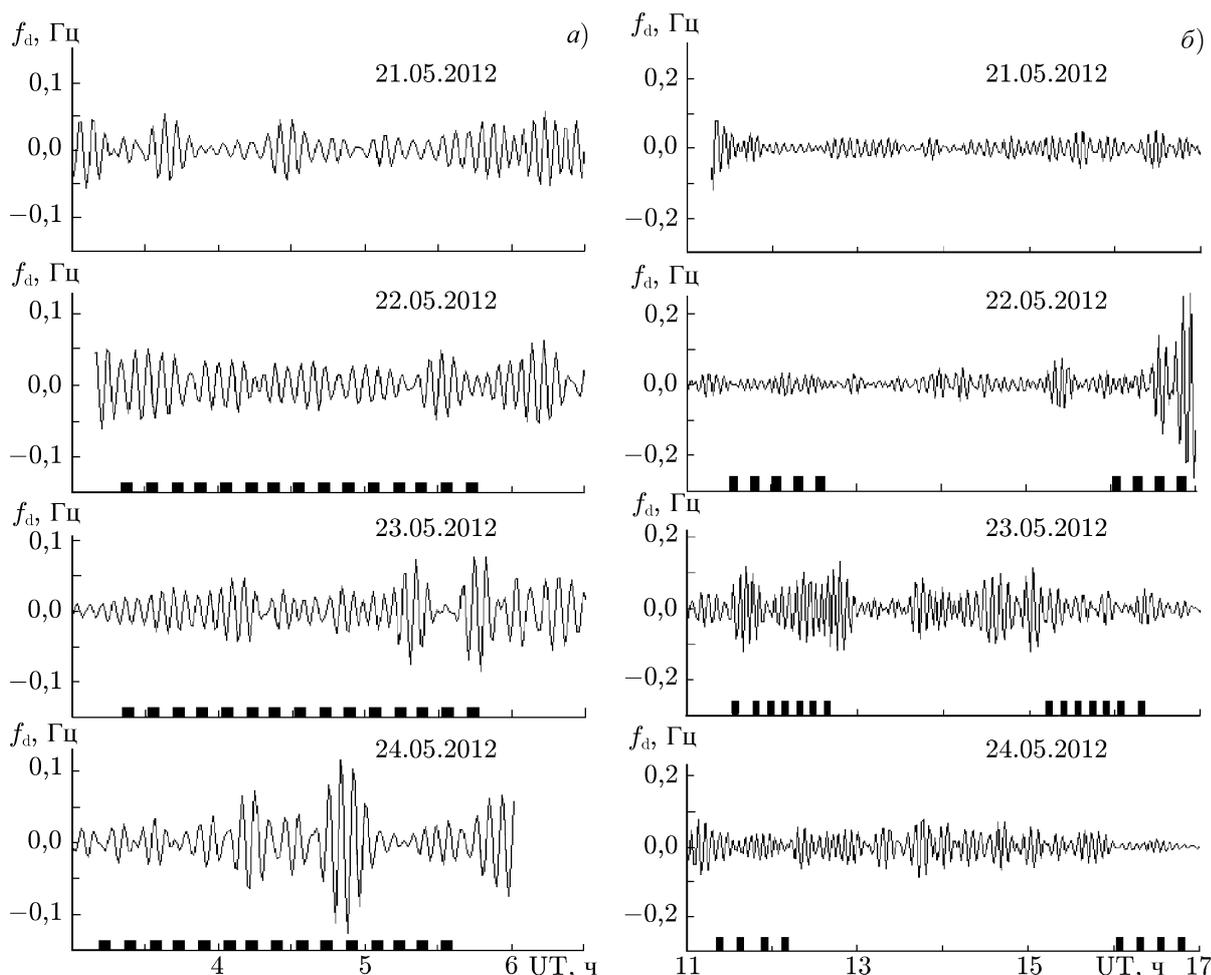


Рис. 2. Временные вариации доплеровского смещения частоты отражённого сигнала в диапазоне периодов $T = 4\div 6$ мин при частоте ионозонда 4,2 МГц

23 мая заметное увеличение f_d до 50 мГц наблюдалось с 04:31 до 04:45 UT, т. е. примерно через 40 мин после первого включения нагревного стенда. Увеличение амплитуды колебаний до 70 мГц также имело место в интервалах времени 05:40–06:00 и 06:05–06:25 UT. Значение $\sigma_{f_d} \approx 30$ мГц.

23 мая имели место ещё два сеанса с режимами [+5 мин; –5 мин] (см. табл. 1). Уровень колебаний в диапазоне периодов 4÷6 мин в этот день был выше, чем в другие дни (рис. 2б). Это объясняется влиянием магнитной бури и существованием слоя E_s (с 07:00 до 15:00 UT). Эти обстоятельства не позволили обнаружить влияние мощного радиоизлучения на уровень колебаний в диапазоне периодов 4÷6 мин.

24 мая первое заметное изменение характера колебаний наблюдалось с 04:31 до 04:51 UT, т. е. примерно через 50 мин после первого включения мощного радиоизлучения. Амплитуда цуга колебаний достигала 60 мГц, а его длительность — 20 мин. Следующий цуг колебаний с амплитудой около 85 мГц был зарегистрирован с 05:10 до 05:30 UT. В среднем за интервал времени с 03:00 до 06:00 UT значение $\sigma_{f_d} \approx 40$ мГц.

3.2. Временные вариации доплеровского смещения частоты в диапазоне периодов 8÷12 мин

В контрольный день 21 мая значительные колебания f_d имели место в интервалах времени 03:30–04:30 и 06:00–07:00 UT (рис. 3). Во втором случае они были вызваны экранирующим действием слоя E_s . В этот день амплитуда доплеровского смещения частоты достигала 60 мГц, а σ_{f_d} — 45 мГц.

22 мая ещё до первого включения стенда наблюдалось колебание с постепенно уменьшающейся амплитудой от 70 до 30 мГц. В интервале времени 04:45–05:30 UT значения f_d флуктуировали в пределах 10÷50 мГц. С 05:31 до 05:56 UT, т. е. примерно через 100 мин после первого включения нагревного стенда, амплитуда колебаний увеличилась до 75 мГц. Длительность этого цуга колебаний была близка к 25 мин. Сразу за ним последовал второй цуг с практически такими же параметрами. Значение σ_{f_d} в этот день было около 50 мГц.

23 мая до включения стенда «Сура» $\sigma_{f_d} \approx 20$ мГц. Первое увеличение амплитуды колебаний до 65 мГц возникло через 30 мин после первого включения нагревного стенда в 03:51 UT, длительность цуга была близка к 20 мин. Наибольшую амплитуду (до 120 мГц) имел цуг колебаний, наблюдавшийся с временем запаздывания $\Delta t \approx 100$ мин после первого включения стенда. Его

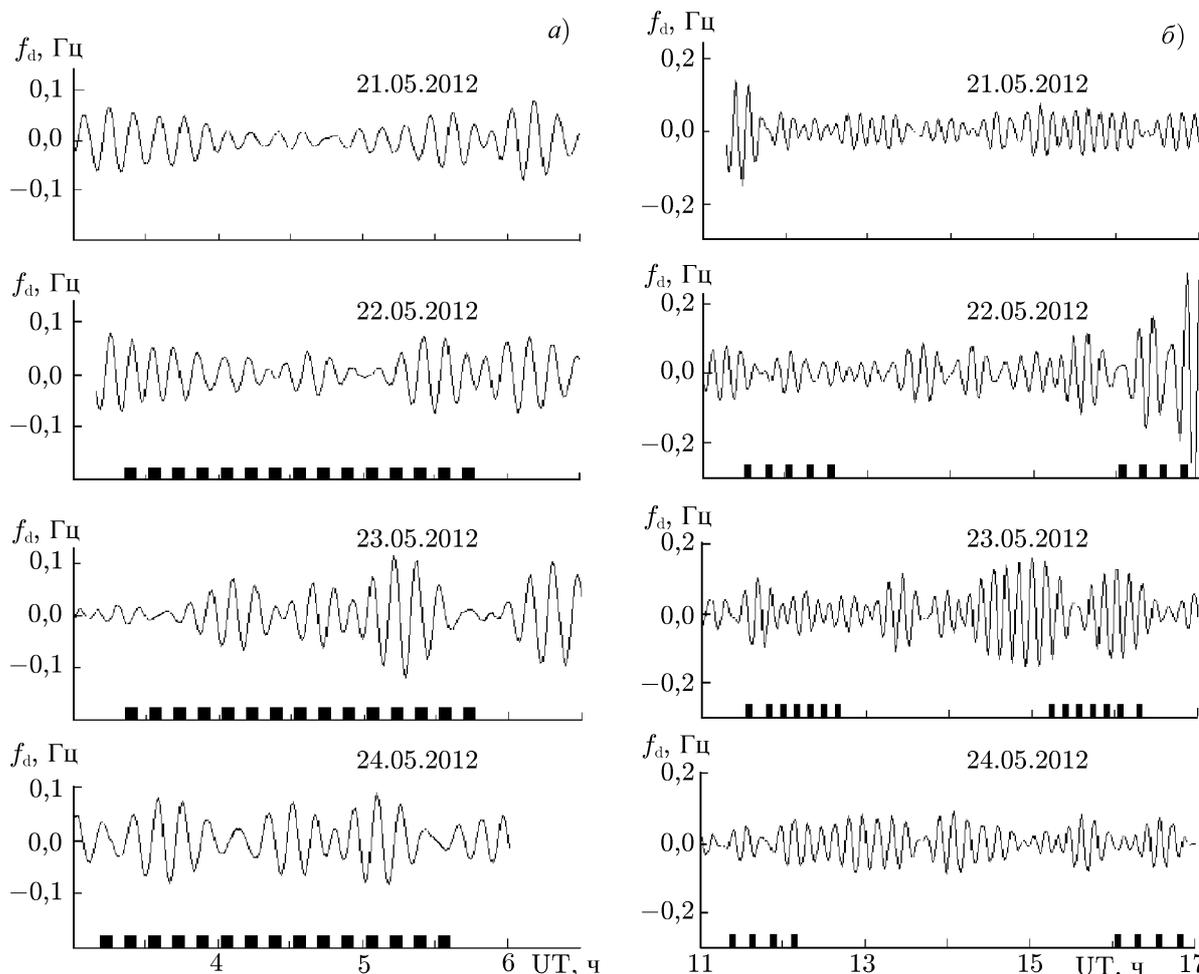


Рис. 3. Временные вариации доплеровского смещения частоты отражённого сигнала в диапазоне периодов $T = 8 \div 12$ мин при частоте ионозонда 4,2 МГц

длительность также была около 20 мин. Следующий цуг появился примерно через 60 мин после цуга с $\Delta t \approx 100$ мин. Его амплитуда достигала 100 мГц, а длительность — 20 мин. В среднем за весь интервал наблюдения $\sigma_{f_d} \approx 60$ мГц.

Добавим, что в интервалах времени 11:45–12:40 и 15:11–16:06 UT стенд работал в режиме [+5 мин; –5 мин]. Изменения уровня колебаний с $T = 8 \div 12$ мин после включения стенда с 11:45 до 12:40 UT обнаружить не удалось из-за влияния эффектов магнитной бури и экранирующего действия слоя E_s (рис. 3б). Повторное включение стенда с 15:11 до 16:06 UT привело к следующему. Примерно через 30 мин после первого включения стенда появился цуг колебаний с $T = 10$ мин, амплитудой около 130 мГц и длительностью 50 мин.

24 мая до включения нагревного стенда $\sigma_{f_d} \approx 50$ мГц. Наблюдались три цуга колебаний с $\Delta t \approx 11$; 65 и 100 мин после первого включения стенда. Их амплитуды составляли около 70; 70 и 90 мГц, а длительности — 20; 15 и 20 мин соответственно. В среднем за время около 3,5 часа $\sigma_{f_d} \approx 60$ мГц.

3.3. Временные вариации доплеровского смещения частоты в диапазоне периодов 13 ÷ 17 мин

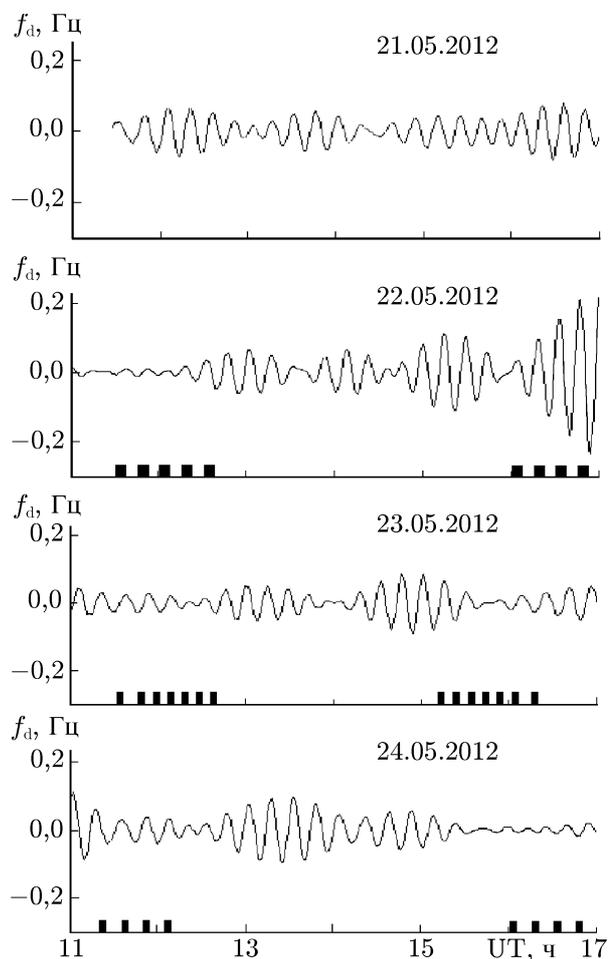


Рис. 4. Временные вариации доплеровского смещения частоты отражённого сигнала в диапазоне периодов $T = 13 \div 17$ мин при частоте ионизации 4,2 МГц

Перейдём к описанию временных вариаций $f_d(t)$ в интервале времени с 11:00 до 17:00 UT, когда использовался режим излучения мощной радиоволны [+5 мин; –10 мин], наиболее подходящий для генерации волновых возмущений с периодом $T = 15$ мин.

22 мая нагревный стенд излучал в режиме [+5 мин; –10 мин] с 11:30 до 12:45 UT, а 23 мая — с 11:30 до 11:45 UT (один цикл нагрева—пауза). 24 мая два цикла нагрева в режиме [+5 мин; –10 мин] с 11:21 до 11:51 UT проводились с эффективной мощностью $PG = 50$ МВт, а три последующие — с $PG = 130$ МВт (с 11:51 до 12:21 UT). Кроме того, с 16:01 до 16:06 UT проводился нагрев ионосферы в том же режиме с $PG = 150$ МВт.

В контрольный день 21 мая в интервале времени 11:00–18:00 UT эпизодически возникали цуги колебаний с амплитудой до 70 мГц, в среднем на этом интервале времени $\sigma_{f_d} \approx 40$ мГц (см. рис. 4). Длительность цугов была около 60 ÷ 75 мин.

22 мая было пять циклов нагрева в режиме [+5 мин; –10 мин] с эффективной мощностью около 150 МВт. До первого включения стенда уровень флуктуаций f_d был очень незначителен ($\sigma_{f_d} \approx 10$ мГц). Через время $\Delta t = 47$ мин после включения стенда амплитуда цуга колебаний постепенно стала увеличиваться от 10 до 65 мГц, длительность цуга составляла около 75 мин. При-

мерно через 60 мин после окончания всех пяти циклов нагрева появился второй цуг колебаний с длительностью около 60 мин и амплитудой 65 мГц. Спустя ещё 60 мин возник третий цуг колебаний с длительностью 60 мин и амплитудой до 105 мГц. После 16:00 UT наблюдался ещё один цуг колебаний с постепенно увеличивающейся амплитудой до 250 мГц.

Заметим, что этот день был удобным для наблюдения волновых возмущений: экранирующий слой E_s появлялся только в интервале времени 17:00–20:00 UT.

Режим излучения нагревного стенда 23 мая был неблагоприятным для генерации акустико-гравитационных волн. С 11:30 до 11:45 был только один цикл нагрева в режиме [+5 мин; –10 мин]. Несмотря на это, примерно через 53 мин появился цуг колебаний с $T = 15$ мин и амплитудой около 50 мГц. Следующий цуг существовал с 14:10 до 15:30 UT, он имел амплитуду около 80 мГц. С 16:06 до 16:36 UT было ещё два цикла нагрева в режиме [+5 мин; –10 мин]. Третий цуг колебаний наблюдался в интервале времени 16:10–17:30 UT, его амплитуда достигала 50 мГц.

24 мая сначала имели место два цикла нагрева (с 11:21 до 11:51 UT) в режиме [+5 мин; –10 мин] с $PG = 50$ МВт, а затем в том же режиме с $PG = 130$ МВт. Нагрев с меньшей мощностью не привёл к заметному росту амплитуды колебания с периодом $T = 15$ мин, её значение было около 30 мГц. Через 45 мин после начала нагрева ионосферной плазмы радиоизлучением с $PG = 130$ МВт, т.е. после 12:36 UT, амплитуда цуга колебаний постепенно увеличилась до 100 мГц. Длительность цуга составила 90÷105 мин. В интервале времени 14:30–15:30 UT наблюдался следующий цуг с амплитудой около 55 мГц и длительностью около 60 мин.

Включение стенда в том же режиме в вечернее время (около 21÷22 MSK) привело лишь к незначительному росту амплитуды цуга колебаний: от 12 до 30 мГц.

Добавим, что экранирующий слой E_s в этот день над Харьковом появлялся в интервалах времени 06:00–08:00 и 10:00–11:00 UT.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

4.1. Оценка скоростей распространения

Полагая траекторию волны близкой к прямолинейной и движение равномерным, для оценки кажущейся скорости распространения имеем очевидную формулу:

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

где $R \approx 960$ км — расстояние между источником волновых возмущений и средством диагностики, Δt_0 — длительность формирования источника волновых процессов. Скорее всего, $\Delta t_0 \ll \Delta t$. Тогда

$$v \approx R/\Delta t.$$

Результаты оценки v по экспериментальным данным приведены в табл. 4.

Для колебаний с периодом $T = 4\div 6$ мин, соответствующим периоду инфразвука, $v \approx 320\div 400$ м/с. Такую скорость при $T < T_a$ имеет инфразвук на высотах 120÷180 км. Примерно этот диапазон высот и даёт основной вклад в доплеровское смещение частоты для радиоволны с $f = 4,2$ МГц. В одном случае (24 мая 2012 года в интервале времени 05:10–05:30 UT) $v = 190$ м/с. Если этот цуг колебаний был вызван мощным периодическим радиоизлучением, малое значение скорости могло наблюдаться для волн, период которых был лишь немного больше T_b . Для таких цугов групповая скорость v_g значительно меньше скорости звука v_s (см. ниже).

Волновые возмущения с $T = 8\div 12$ мин в трёх случаях имели скорость $v \approx 160$ м/с, а в двух случаях — 530 м/с. При $v = 160$ м/с выполнялось условие $T \approx T_b$, при этом $v_g \ll v_s$ (см.

Таблица 4. Параметры волновых возмущений

Диапазон периодов, мин	Δt , мин	v , м/с	A , мГц	δ_N , %	q_d	Примечание
4÷6	40	400	50	0,3	1,4	инфразвук с $T < T_a$
	50	320	60	0,4	1,3	—
	85	190	85	0,5	2,3	имело место условие $T \approx T_b$
8÷12	100	160	75	0,9	1,1	—
	100	160	120	1,5	2,0	—
	100	160	90	1,1	1,1	—
	30	530	130	1,6	2,3	инфразвук с $T < T_a$
	30	530	65	1,2	1,3	—
13÷17	47	340	65	1,2	1,3	реакция на включение
	60	270	65	1,2	1,3	реакция на выключение
	45	35,5	100	2,0	3,0	реакция на включение/выключение
	200	80	105	2,0	3,4	имело место условие $T \approx T_b$
	40	400	40	0,5	1,2	реакция на включение

ниже). Когда $v = 530$ м/с, волна распространялась как инфразвуковая с $T < T_a$. Такое условие выполнялось в вечернее время (с 15:41 до 16:31 UT) 23 мая 2012 года.

Волновые возмущения с $T = 13\div 17$ мин в двух случаях имели скорость $v \approx 270\div 340$ м/с. Такая скорость свойственна внутренним гравитационным волнам на высотах 120÷150 км при условии, что T заметно больше T_b . Действительно, на указанных высотах $T_b \approx 5\div 10$ мин.

В одном случае (с 14:45 до 15:45 UT) 22 мая 2012 года пуг имел запаздывание около 200 мин после первого включения нагревного стенда. Если пуг был создан мощным периодическим радиоизлучением, его скорость распространения была близка к 80 м/с. Такую скорость имеют внутренние гравитационные волны, если их период лишь слегка отличается от периода T_b . Покажем, что это так.

Как известно, показатель преломления для внутренних гравитационных волн при квазигоризонтальном распространении задан следующим соотношением (см., например, [11, 19, 20]):

$$n = \sqrt{(\beta_0^2 Y - 1)/(Y - 1)},$$

где $\beta_0 = \gamma/(2\sqrt{\gamma - 1}) \approx 1,107$, $Y = (T/T_b)^2$.

Горизонтальная проекция групповой скорости \mathbf{v}_g находится из уравнения

$$\frac{v_{gx}}{v_s} = \frac{n(Y - 1)}{n^2 + \beta_0^2 Y - 2}.$$

При $Y \gg 1$, т.е. $T^2 \gg T_b^2$, $n \approx \beta_0$, групповая скорость v_g равна фазовой скорости v_{ph} , причём $v_g \approx v_{ph} \approx v_s/\beta_0$ [11]. При $Y \rightarrow 1$ имеем [11]

$$v_{ph} \approx 2v_s \sqrt{Y - 1} \ll v_s, \quad v_g \approx 2v_s \sqrt{(Y - 1)^3} \ll v_{ph} \ll v_s.$$

При $T < T_a$ дисперсия отсутствует, и $v_{ph} = v_g = v_s$.

На высотах $z \approx 170\div 180$ км (где в дневное время отражалась зондирующая радиоволна) согласно модельным расчётам $T_b \approx 9$ мин. Для волны с $T = 10$ мин $n = 1,26$, а $v_{gx}/v_s \approx 0,26$.

Поскольку на указанных высотах $v_s \approx 580 \div 620$ м/с, то $v_{gx} \approx 150 \div 160$ м/с. Это значение очень близко к полученному из наблюдений (160 м/с).

22 мая в интервале времени 14:45–15:45 UT зондирующая радиоволна отражалась на высотах около 250 км, где $v_s \approx 800$ м/с. На высоте $z = 250$ км согласно модельным расчётам $T_b = 14,3$ мин. Тогда при $T = 15$ мин имеем $n \approx 1,5$, $v_{gx}/v_s \approx 0,1$, а $v_{gx} \approx 80$ м/с, что и наблюдалось в эксперименте.

4.2. Оценка скорости движения области отражения зондирующей радиоволны и относительных амплитуд возмущения концентрации электронов

Зная амплитуду A колебания доплеровского смещения частоты с периодом T , по формуле (13) мы можем оценить относительную амплитуду δ_N волнового возмущения концентрации электронов, а также скорость движения области отражения зондирующей радиоволны. Результаты оценок δ_N также приведены в табл. 4. Из табл. 4 видно, что в инфразвуковом диапазоне ($T = 4 \div 6$ мин) $\delta_N \approx 0,3 \div 0,4$ %. При $T = 8 \div 12$ мин значение δ_N достигало 1,6 %. Это аномально большая величина для волн инфразвукового диапазона. Обычно для них $\delta_N \approx 0,1 \div 1,0$ % [14].

Для внутренних гравитационных волн ($T > T_b$) значение δ_N несколько больше, оно изменялось от 0,5 до 2 %. В среднем для волн этого диапазона ($T \approx 10 \div 15$ мин) $\delta_N \approx 1,2$ %. Обычно с увеличением T увеличивается и δ_N .

Заметим, что описанные цуги колебаний выделялись на фоне шума достаточно уверенно. Отношение сигнал/шум q_d изменялось в пределах 1,1–3,4 (см. табл. 4). В среднем $q_d \approx 1,7$. Значения q_d в табл. 4 сильно занижены, т. к. при оценке дисперсии шума учитывались и те интервалы времени, где присутствовал полезный сигнал. Без учёта этих интервалов значения q_d увеличиваются в 2–4 раза.

Под действием волновых возмущений электронной концентрации высота области отражения зондирующей радиоволны движется по квазипериодическому закону. Амплитуда скорости движения $v = Ac/(2f)$. При $A = 40 \div 120$ мГц получаем $v = 1,5 \div 4,5$ м/с. При средней скорости $v = 3$ м/с амплитуда колебаний области отражения радиоволны $\Delta z = vT/(2\pi)$ составляет 190–450 м для $T = 5 \div 15$ мин соответственно.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

5.1. Волновые возмущения 22 мая 2012 года

В этот день экранирующий слой E_s над зондирующим радаром существовал примерно с 06:00 до 07:00 UT и с 17:00 до 20:00 UT. Состояние ионосферы в целом было благоприятным для наблюдения волн в атмосфере, генерируемых мощным периодическим радиоизлучением.

Включение станда в утреннее время не привело к заметному увеличению амплитуды колебаний в диапазоне $T = 4 \div 6$ мин (см. рис. 2а). Примерно через 100 мин после первого включения станда амплитуда колебания с $T = 8 \div 12$ мин увеличилась до 75 мГц, при этом $\sigma_{fd} \approx 50$ мГц (см. рис. 3а). Скорее всего, это колебание было сгенерировано мощным радиоизлучением. Оно появилось в результате прихода волн с периодом $T \approx 10$ мин, который был больше периода $T_b \approx 9$ мин. Значения периода и групповой скорости (160 м/с) свидетельствуют в пользу того, что наблюдалась реакция ионосферы на распространяющуюся внутреннюю гравитационную волну.

Уверенно наблюдались колебания с $T = 13 \div 17$ мин (см. рис. 4). Через 47 мин после первого включения станда в 12:17 UT амплитуда колебания постепенно увеличилась от фонового значения 10 мГц до 65 мГц. Этому колебанию соответствовала скорость волнового возмущения $v = 340$ м/с.

Через 60 мин после последнего выключения стенда, т. е. в 13:45 UT, в этой серии эксперимента также появилось колебание с $T \approx 13 \div 17$ мин и $A \approx 65$ мГц. Скорее всего, это была реакция среды на выключение нагревного стенда. При этом $v \approx 270$ м/с. Оба волновых процесса представляли собой внутреннюю гравитационную волну, которая распространялась на высотах $150 \div 200$ км, где T_b заметно меньше $T = 15$ мин.

Колебание с временем запаздывания около 200 мин, наблюдавшееся с 14:50 до 15:50 UT, также могло быть вызвано приходом внутренней гравитационной волны, которая пришла по другой траектории, расположенной преимущественно на высотах $250 \div 300$ км, где период T_b был лишь немного меньше $T = 15$ мин. Через 200 мин после последнего выключения стенда, т. е. после 16:00 UT, появился ещё один пуг колебаний. Судя по времени запаздывания, этот пуг мог быть вызван также внутренней гравитационной волной, распространяющейся на высотах $250 \div 300$ км. Далее амплитуда этого пуга стала быстро увеличиваться до 250 мГц. Скорее всего, это было обусловлено влиянием процессов, связанных с возникновением около 17:00 UT слоя E_s и предзаходными эффектами (движущимися возмущениями от вечернего терминатора).

5.2. Волновые возмущения 23 мая 2012 года

Заметное увеличение амплитуды колебаний с периодом $4 \div 6$ мин до 50 мГц наблюдалось примерно через 40 мин после первого включения стенда «Сура» в режиме [+5 мин; -5 мин] (см. рис. 2а). Такому времени запаздывания соответствует скорость распространения возмущения $v \approx 400$ м/с, которую имеет инфразвук на высотах около $120 \div 150$ км.

Последующие два пуга колебаний, которые наблюдались в интервале времени 05:40–06:20 UT, также могли быть вызваны очередными циклами включений стенда.

Первое увеличение амплитуды колебания с периодом $8 \div 12$ мин до 65 мГц возникло примерно через 30 мин после первого включения стенда (см. рис. 3а). Ему соответствовала скорость около $180 \div 200$ км. Зондирующая радиоволна в утреннее время отражалась примерно на этих же высотах.

Следующий пуг с периодом $T = 8 \div 12$ мин наблюдался примерно через 100 мин после первого включения стенда в режиме [+5 мин; -5 мин]. Это была либо реакция на одно из последующих включений стенда, либо на приход волны со скоростью 160 м/с, сгенерированной при первом включении стенда. Групповую скорость $v = 160$ м/с имеют внутренние гравитационные волны на высотах $z \approx 200$ км, где $T_b = 9$ мин. Незначительное превышение $T = 10$ мин над T_b объясняет низкую групповую скорость 160 м/с.

Ещё один пуг колебаний, наблюдавшийся в интервале времени 06:30–07:10 UT, также мог быть вызван подобными причинами.

Добавим, что в дневное время (с 15:11 до 16:06 UT) стенд также излучал в режиме [+5 мин; -5 мин]. Возникший через 30 мин после первого включения стенда, т. е. в 15:41 UT, пуг $T = 8 \div 12$ мин имел огромную амплитуду 130 мГц и длительность около 50 мин (см. рис. 3б). Ему соответствует скорость $v = 530$ м/с. Такую скорость имеет инфразвук на высотах $180 \div 200$ км, давших основной вклад в доплеровское смещение частоты. Аномально большая амплитуда колебания (130 мГц), возможно, объясняется его усилением за счёт магнитной бури. Как известно, магнитные бури сопровождаются генерацией инфразвука в высоких широтах. Магнитной бурей также был вызван пуг колебаний с амплитудой до 150 мГц, зарегистрированный в интервале времени 14:15–15:20 UT. Если бы этот пуг был вызван серией циклов нагрева, продолжавшихся с 11:45 до 12:40 UT, то время запаздывания Δt было порядка 150 мин, а $v \approx 110$ м/с, что представляется неправдоподобным.

Интервал времени с 11:00 до 15:00 UT не был оптимальным для наблюдения волн с периодом

$T = 15$ мин по двум причинам. Во-первых, эффекты нагрева маскировались эффектами магнитной бури и слоем E_s (за счёт экранирования вышележащих слоёв). Во-вторых, количество циклов нагрев—пауза было небольшим (одно или два включения стенда). Тем не менее, через 53 мин после включения нагрева в 11:30 UT наблюдался цуг колебаний с $T = 13\div 17$ мин и амплитудой около 50 мГц (фоновое значение $A \approx 30$ мГц, см. рис. 4). Ему соответствовала скорость около 300 м/с. Такую скорость имеют внутренние гравитационные волны на высотах 150÷180 км, которые и давали основной вклад в доплеровское смещение частоты для радиоволны, отражавшейся на высоте около 180 км.

Цуг колебаний, наблюдавшийся в интервале времени 14:15–15:30 UT, мог быть вызван естественным источником (например, частичной экранировкой слоем E_s). Если он был сгенерирован мощным радиоизлучением, то запаздывание $\Delta t \approx 165$ мин, а $v = 100$ м/с. В принципе, такую скорость имеет внутренняя гравитационная волна, распространяющаяся преимущественно в F -области ионосферы, где $T_b \approx 14$ мин. При $T = 15$ мин её групповая скорость близка к 100 м/с.

Цуг колебаний, зарегистрированный в интервале времени 16:10–17:30 UT, скорее всего, связан с предзаходными эффектами, т. е. волновым процессом, сгенерированным вечерним терминатором.

5.3. Волновые возмущения 24 мая 2012 года

После первого включения стенда в режиме [+5 мин; –5 мин] в 03:41 UT с временем запаздывания $\Delta t = 50$ мин появился цуг колебаний с $T = 4\div 6$ мин и $A \approx 60$ мГц (фоновое значение не превышало 30 мГц, см. рис. 2а). Оценённая скорость распространения возмущений составляла $v = 320$ м/с, что соответствует скорости инфразвука на высотах 100÷120 км. Примерно этот же диапазон высот давал основной вклад в доплеровское смещение частоты.

Следующий цуг колебаний, наблюдавшийся с 05:10 до 05:30 UT, мог быть вызван одним из последующих циклов включения, способствовавшим усилению естественных возмущений.

Возмущения, имевшие место после 06:00 UT, были связаны с частичным экранированием ионосферы слоем E_s . Этот слой наблюдался в интервалах времени 06:00–08:00 и 10:00–11:00 UT. Как уже отмечалось в подразделе 3.1, при наличии слоя E_s спектр зависимости $f_d(t)$ не описывает реальное состояние среды.

Поведение $f_d(t)$ в диапазоне периодов 8÷12 мин было следующим. После первого включения стенда в режиме [+5 мин; –5 мин] возникли три цуга колебаний с амплитудами 70; 70 и 90 мГц (фоновое значение $A \approx 50$ мГц) и запаздываниями 11; 65 и 100 мин соответственно (см. рис. 3а). Первый цуг имел естественное происхождение, второй и третий могли быть созданы мощным периодическим радиоизлучением. Это могло быть и инфразвуковое возмущение, распространяющееся на высотах, где $T < T_a$ ($z \approx 250\div 300$ км), и возмущение, вызванное распространением внутренних гравитационных волн с $T > T_b \approx 8\div 9$ мин ($z \approx 150\div 170$ км). Вторая причина представляется более предпочтительной, т. к. диапазон высот зондирования в это время составлял 140÷180 км. Малая групповая скорость распространения (около 250 и 160 м/с) объясняется близостью T к T_b . Наличие двух цугов может свидетельствовать о двух разных траекториях распространения (разных модах) внутренних гравитационных волн. Более медленная мода распространялась на высотах, где $T \approx T_b$, что и обеспечило уменьшение групповой скорости до 160 м/с.

Обсудим теперь природу цугов колебаний с периодом $T = 13\div 17$ мин. Нагревный стенд работал в режиме [+5 мин; –10 мин] с 11:21 до 11:51 UT с $PG = 50$ МВт, а затем с 11:51 до 12:26 UT с $PG = 130$ МВт. В третьей серии нагрева (с 16:01 до 17:06 UT) эффективная мощность излучения PG составляла 150 МВт. Возмущение ионосферы с $PG = 50$ МВт не привело к заметному росту

амплитуды колебания с $T = 13 \div 17$ мин (см. рис. 4). Через 45 мин после увеличения эффективной мощности передатчика до 130 МВт амплитуда колебаний увеличилась от 30 до 100 мГц. Длительность цуга составляла $90 \div 105$ мин. Поскольку продолжительность циклов нагрева равнялась 35 мин, скорее всего, наложилась реакция на включение и выключение стенда с $PG = 130$ МВт. Времени запаздывания $\Delta t \approx 45$ мин соответствует $v \approx 355$ м/с. Очевидно, что такую групповую скорость имеют внутренние гравитационные волны на высотах $150 \div 180$ км, которые и давали основной вклад в доплеровское смещение частоты для радиоволн, отражающихся на высотах $180 \div 190$ км.

Третье включение стенда в режиме $[+5 \text{ мин}; -10 \text{ мин}]$ с $PG = 150$ МВт привело к увеличению амплитуды колебания от фонового значения 10 мГц до 40 мГц. Его время запаздывания составляло 40 мин, чему соответствует скорость около 400 м/с. Такую групповую скорость имеют внутренние гравитационные волны на высотах $200 \div 220$ км. Заметим, что в это время зондирующая радиоволна отражалась на высотах $220 \div 230$ км.

5.4. Особенности генерации волн

Таким образом, в большинстве случаев после первого включения нагревного стенда, а в ряде случаев и после его последнего выключения отмечались колебания, которые возникали в ионосфере в результате генерации и распространения как инфразвуковых, так и внутренних гравитационных волн. Их фазовые и групповые скорости, в целом, хорошо соответствовали теоретическим представлениям и выполненным оценкам.

Важно, что длительность цуга колебаний и их повторяемость зависела не только от режима работы стенда, но и от самого факта включения (в ряде случаев и выключения) всей серии циклов нагрев—пауза. Другими словами, волны возникали при изменении состояния системы атмосфера—ионосфера—магнитосфера в целом [21–25] при ударном воздействии. Период этих волн задавался режимом работы нагревного стенда. Длительность цугов при таком ударном воздействии определялась временем реакции полосового фильтра.

Ударным воздействием на систему можно объяснить факт генерации волн с периодом $T = 4 \div 6$ мин при нагреве ионосферы в режиме $[+5 \text{ мин}; -5 \text{ мин}]$, т. е. когда период цикла нагрев—пауза составлял 10 мин. В этом случае генерируется гармоника с периодом, равным половине длительности цикла. Нельзя исключать и эффект умножения в два раза частоты в нелинейной системе. При этом также период колебаний равен половине периода циклического воздействия. Подобные соображения могут объяснить причину низкой эффективности генерации волн с периодами T_1 и T_2 , где T_1 и T_2 — длительности нагрева и паузы. При $T_1 \neq T_2$ нарушаются условия синхронизма откликов системы на неравноотстоящие воздействия. Это означает, что в этих случаях механизм генерации акустико-гравитационных волн отличался от классических механизмов, развитых в 1970–1990 годах в работах [26–28].

Как показали наблюдения, при $T_1 \neq T_2$ могут генерироваться волны с периодом $T = T_1 + T_2$. В настоящих наблюдениях $T_1 = 5$ мин, а $T_2 = 10$ мин.

Генерация волн с $T = T_1 + T_2$ вполне описывается механизмами, описанными в [26–28].

Скорость распространения акустико-гравитационных волн с периодами вблизи собственных периодов T_a и T_b при изменении высоты может изменяться в три раза. Одному и тому же периоду волны T на одних высотах соответствует условие $T > T_b$, на больших высотах — $T < T_a$. К этому следует учесть многомодовость при распространении волн и разнообразие их траекторий. Всё это предопределило трудности идентификации волн, создаваемых мощным периодическим радиоизлучением. Идентификацию также осложняло наличие колебаний другой природы с теми же периодами, а также экранирующее действие слоя E_s . В частности, магнитная буря и

солнечный терминатор маскировали эффект генерации волн мощным радиоизлучением. Результаты наблюдения генерации акустико-гравитационных волн терминатором описаны в работе [26]. Оказалось, что терминатор также приводит к усилению этих волн.

Несмотря на указанные трудности, удалось обнаружить акустико-гравитационные волны, которые приводили к периодическим вариациям концентрации электронов и, как следствие, к доплеровскому смещению частоты. Обычно относительная амплитуда δ_N изменения электронной концентрации составляла порядка десятых долей и единиц процентов для инфразвуковых и внутренних гравитационных волн.

Полученные результаты хорошо согласуются с нашими более ранними исследованиями и существенно их дополняют (см., например, [9–14]).

ВЫВОДЫ

1. Проведены экспериментальные исследования эффективности генерации мощным периодическим радиоизлучением и распространения акустико-гравитационных волн с периодами T вблизи собственных периодов атмосферы (период акустической отсечки T_a и период Брента–Вяйсяля T_b). Продемонстрировано, что генерация и распространение акустико-гравитационных волн с такими периодами возможна.

2. Установлено, что длительность цугов колебаний определялась не продолжительностью серии циклов нагрев–пауза, а общим изменением состояния системы атмосфера–ионосфера–магнитосфера, когда ударное воздействие на неё при включении или выключении серии циклов приводило к генерации цугов колебаний. Период цугов определялся периодом цикла или половиной цикла воздействия. Это означает, что механизм генерации акустико-гравитационных волн в этих случаях отличался от развитого ранее классического механизма.

3. Подтверждена установленная нами ранее возможность генерации инфразвука под действием мощного радиоизлучения. Инфразвуковая волна приводила к модуляции доплеровского смещения частоты с периодами 5 и 10 мин и амплитудой 50÷60 и 130 мГц соответственно. Относительное возмущение концентрации электронов при этом было около 0,3÷0,4 и 1,6 % соответственно. Скорость распространения инфразвука в зависимости от высоты изменялась от 320 до 530 м/с (большим высотам соответствовало большее значение скорости).

4. Подтверждена установленная нами ранее эффективность генерации внутренних гравитационных волн с периодами, заметно превышающими период Брента–Вяйсяля. Их фазовые и групповые скорости были на несколько десятков процентов ниже скорости звука, что согласуется с имеющимися теоретическими представлениями. Скорости этих волн в зависимости от высоты изменялись в пределах 340÷400 м/с. Относительное возмущение концентрации электронов δ_N в поле внутренней гравитационной волны составляло 0,5÷2 %.

5. Групповая скорость цугов внутренних гравитационных волн, период которых лишь незначительно (на 5÷10 %) превышал период Брента–Вяйсяля, была существенно меньше (около 80÷160 м/с) скорости звука. При этом $\delta_N \approx 1,1\div 1,5$ %.

6. Установлен пороговый характер зависимости эффективности генерации внутренних гравитационных волн от эффективной мощности излучения станда: при $PG \approx 50$ МВт волны не генерировались (сигнал был на уровне шумов), а при $PG \approx 130$ МВт эти волны уверенно наблюдались, при этом $\delta_N \approx 2$ %.

7. В день повышенной геомагнитной активности амплитуда колебаний с периодами 4÷6 и 8÷12 мин была несколько выше, чем в магнитоспокойные дни. С другой стороны, возбуждаемые магнитной бурей колебания в этих диапазонах затрудняли идентификацию колебаний, вызванных воздействием мощного радиоизлучения. Умеренная магнитная буря не повлияла заметно на

амплитуду колебаний с периодом $13 \div 17$ мин.

Авторы выражают благодарность сотрудникам стенда «Сура» за помощь в проведении экспериментов. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-02-00374).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. // Вестник Харьковского университета. Радиофизика и электроника. 1988. № 318. С. 29.
2. Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29, № 3. С. 513.
3. Мисюра В. А., Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. // Космическая наука и техника. 1989. Вып. 4. С. 72.
4. Гармаш К. П., Гритчин А. И., Губарев А. А. и др. // Труды НИИР. М.: Радио и связь, 1989. № 9. С. 57.
5. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. // Космическая наука и техника. 1990. Вып. 5. С. 71.
6. Костров Л. С., Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30, № 1. С. 159.
7. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. // Успехи современной радиоэлектроники. 1998, № 6. С. 17.
8. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. // Электромагнитные явления. 1998. Т. 1, № 1. С. 90.
9. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2009. Т. 14, № 4. С. 377.
10. Бурмака В. П., Домнин И. Ф., Урядов В. П., Черногор Л. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 11. С. 859.
11. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Комраков Г. П., Пушкин В. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 2. С. 81.
12. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1. С. 14.
13. Домнин И. Ф., Панасенко С. В., Урядов В. П., Черногор Л. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 4. С. 280.
14. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 5. С. 327.
15. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>.
16. <http://www.swpc.noaa.gov>.
17. <http://www.izmiran.ru>.
18. Караштин А. Н., Комраков Г. П., Токарев Ю. В., Шлюгаев Ю. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 24, № 8. С. 765.
19. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. М.: Наука, 1974. 256 с.
20. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978. 532 с.
21. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2003. Т. 8, № 1. С. 59.
22. Черногор Л. Ф. // Нелинейный мир. 2006. Т. 4, № 12. С. 655.
23. Черногор Л. Ф. // Нелинейный мир. 2007. Т. 5, № 4. С. 198.
24. Черногор Л. Ф. // Нелинейная радиофизика. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2004. 200 с.
25. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2008. 528 с.
26. Григорьев Г. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 12. С. 1801.
27. Караштин А. Н., Митяков Н. А., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20, № 5. С. 787.
28. Григорьев Г. И., Трахтенгерц В. Ю. // Геомагнетизм и аэрономия. 1999. Т. 39, № 6. С. 90.
29. Пушкин В. Ф., Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2012. Т. 17, № 4. С. 333.

Поступила в редакцию 12 марта 2013 г.; принята в печать 29 апреля 2013 г.

**FEATURES OF PROPAGATION OF THE ACOUSTIC-GRAVITY WAVES
GENERATED BY HIGH-POWER PERIODIC RADIATION***L. F. Chernogor and V. L. Frolov*

We present the results of the bandpass filtering of time variations of the Doppler frequency shift of radio signals from a vertical-sounding Doppler radar located near the city of Kharkov when the ionosphere was heated by the high-power periodic (with 10 and 15-min periods) radiation of the Sura facility. The filtering was done in the ranges of periods that are close to the acoustic cutoff period and the Brünt – Väisälä period (4–6, 8–12, and 13–17 min). Oscillations with periods 4–6 min and amplitudes 50–100 mHz were not recorded in fact. Oscillations with periods 8–12 and 13–17 min and amplitudes 60–100 mHz were detected in almost all the sessions. In the former and the latter oscillations, the time of delay with respect to the facility switch-on time was close to 100 min and about 40–50 min, respectively. They corresponded to group propagation velocities of about 160 and 320–400 m/s. The Doppler shift oscillations were caused by the acoustic-gravity waves which led to periodic variations in the electron number density with a relative amplitude of about 0.1–1.0%. It was demonstrated that the acoustic-gravity waves were not recorded when the effective power of the Sura facility was equal to 50 MW and they were confidently observed as the effective power was increased up to 130 MW. It is shown that the period of the wave processes was determined by the period of the heating–pause cycles, and the duration of the wave trains did not depend on the duration of the series of heating–pause cycles. The data suggest that the generation mechanism of recorded wave disturbances is different from the mechanism proposed in 1970–1990.