

УДК 533.951+537.868

НАБЛЮДЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ НА ХАРЬКОВСКОМ РАДАРЕ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ОКОЛОЗЕМНУЮ ПЛАЗМУ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ

Л. Ф. Черногор^{1,2}, С. В. Панасенко¹, В. Л. Фролов^{3,4*}, И. Ф. Домнин¹

¹ Институт ионосферы МОН и НАН Украины;

² Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, г. Харьков, Украина

³ Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород;

⁴ Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

С помощью харьковского радара некогерентного рассеяния выполнены измерения характеристик волновых возмущений концентрации электронов в ионосфере. Генерация данных возмущений сопровождала воздействие на околоземную плазму мощным периодическим радиоизлучением нагревного стенда «Сура». Расстояние между стендом и радаром составляло около 960 км. Подтверждена возможность генерации волновых возмущений в ионосфере с периодом 20÷30 мин в диапазоне внутренних гравитационных волн. Скорость распространения возмущений была близка к 320÷400 м/с, а относительная амплитуда вариаций концентрации электронов составляла 1÷10 %. Волновые возмущения появлялись в диапазоне высот 145÷235 км. При первых включениях периодического радиоизлучения в режиме 30 мин — нагрев, 30 мин — пауза на высотах 145÷310 км регистрировались аperiodические всплески концентрации электронов с относительной амплитудой до 5÷10 %. Результаты наблюдений в целом находятся в соответствии с данными синхронных наблюдений, выполненных с помощью харьковского доплеровского радара вертикального зондирования и сети ионозондов.

ВВЕДЕНИЕ

Возможность генерации перемещающихся ионосферных возмущений при модификации ионосферы мощным периодическим радиоизлучением за счёт слабого нагрева нейтральных частиц была обоснована в середине 1970 годов [1]. В работе [2] было дано описание другого механизма генерации волновых возмущений в диапазоне акустико-гравитационных волн, связанного с модуляцией токовой струи на высотах динамо-области ионосферы под действием периодического нагрева ионосферной плазмы мощным радиоизлучением. В работе [3] была дана оценка относительного вклада этих механизмов; эта оценка показала, что наиболее эффективным механизмом генерации волн является модуляция ионосферных токов в области верхнего гибридного резонанса с учётом эффекта магнитного зенита. Также существенным, особенно в ночное время, может быть механизм, связанный с нагревом нейтральных частиц во внешней ионосфере (высоты более 350÷450 км).

Первые экспериментальные исследования перемещающихся ионосферных возмущений были проведены в радиофизической обсерватории Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина вскоре после введения в эксплуатацию в НИРФИ нагревного стенда «Сура» (начало 1980 годов) [4–13]. В этих работах была продемонстрирована принципиальная возможность генерации перемещающихся ионосферных возмущений и их распространения на расстояния порядка 1 000 км и больше.

Результаты современных экспериментальных исследований представлены в работах [14–20]. В этих работах для обнаружения волновых возмущений в ионосфере обычно использовался доплеровский радар [15, 16, 18–20] и реже — харьковский радар некогерентного рассеяния [14,

* frolov.418@nirfi.sci-nnov.ru

17]. В них были установлены основные свойства волновых возмущений в ионосфере в диапазоне акустико-гравитационных волн (периоды $T \approx 1 \div 180$ мин), появлявшихся при воздействии на околосземную плазму мощным периодическим радиоизлучением стенда «Сура». Также в работах [14–20] было показано, что эффективность генерации перемещающихся ионосферных возмущений существенно зависит от режима излучения нагревного стенда, времени суток и состояния космической погоды.

Основные результаты исследований свелись к следующему.

1) Периодический нагрев верхней ионосферы мощным радиоизлучением в большинстве случаев приводил к генерации или усилению перемещающихся ионосферных возмущений с периодом повторения циклов нагрев/пауза, регистрируемых на расстоянии $R \approx 1000$ км. Наиболее эффективным для их генерации был режим излучения стенда, в котором использовалась радиоволна обыкновенной поляризации (О) с эффективной мощностью излучения $PG \geq 40 \div 50$ МВт и длительными ($15 \div 30$ мин) интервалами нагрева и паузы, излучавшаяся в направлении магнитного зенита. Эффективность генерации волновых возмущений в дневное время на частотах стенда $f < 5$ МГц снижалась из-за сильного поглощения радиоизлучения в нижней ионосфере и дефокусировки радиоволны на высотах $120 \div 200$ км.

2) Скорость распространения волновых возмущений обычно составляла $300 \div 500$ м/с на высотах $z \approx 120 \div 200$ км и возрастала с высотой.

3) Относительная амплитуда возмущений концентрации электронов N в поле акустической (инфразвуковой) и гравитационной волн составляла около $0,1 \div 1,0$ и $1 \div 10$ % соответственно.

4) Параметры (в первую очередь скорость) перемещающихся ионосферных возмущений существенно зависели от близости периода волн к периодам собственных колебаний атмосферы (периодам акустической отсечки и периоду Брента–Вяйсяля). При приближении периода волн к периодам собственных колебаний скорость волн уменьшалась на сотни метров в секунду.

5) Длительность волновых цугов и вероятность их появления зависели не только от режима работы стенда, но и от самого факта включения (в ряде случаев и выключения) всей серии циклов нагрев/пауза. Можно полагать, что волновые процессы возникали при изменении состояния системы атмосфера–ионосфера–магнитосфера при ударном воздействии на неё мощным радиоизлучением. Это означает, что в таких случаях механизм генерации перемещающихся ионосферных возмущений отличался от механизмов, рассмотренных в работах [1–3].

Выполненные исследования продемонстрировали, что для подтверждения и более глубокого изучения свойств обнаруженных закономерностей требуется постановка новых экспериментов. Отметим, что результаты краткого сообщения [21] — в котором была обнаружена генерация перемещающихся волновых возмущений при работе стенда HAARP (Аляска) — в целом подтверждают результаты наших исследований.

В данной работе представлены результаты наблюдений периодических и аperiodических возмущений в ионосфере, сопровождавших воздействие на околосземную плазму мощным радиоизлучением нагревного стенда «Сура». Измерения проводились на харьковском радаре некогерентного рассеяния 28 и 29 августа 2012 года. По имеющимся данным [20] можно заключить, что в дни измерений космическая погода была спокойной; суммарный за сутки индекс ΣK_p 28 и 29 августа 2012 года равнялся 5,3 и 6,0 соответственно.

Таблица 1. Основные параметры и режим работы радара некогерентного рассеяния Института ионосферы (г. Харьков)

Рабочая частота, МГц	158
Режим работы	Импульсный
Мощность в импульсе, МВт	1,8
Эффективная мощность PG , ГВт	23
Длительность «длинного» импульса, мкс	663
Длительность «короткого» импульса, мкс	135
Диаметр антенны, м	100
Диапазон исследуемых высот, км	100 ÷ 1 500
Период работы радара	28.08.2012 с 04:30 до 24:00 UT 29.08.2012 с 00:00 до 24:00 UT

1. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

1.1. Нагревный стенд «Сура»

Воздействие на ионосферу осуществлялось в циклическом режиме нагрев—пауза немодулированной радиоволной обыкновенной поляризации. Три радиопередатчика работали синфазно. Эффективная мощность излучения стенда составляла $PG \approx 80 \div 150$ МВт. Диаграмма направленности антенны стенда была наклонена к югу на 12° , что обеспечивало усиление взаимодействия волны накачки с плазмой за счёт эффекта магнитного зенита.

Географические координаты стенда «Сура» следующие: $56,15^\circ$ с. ш., $46,1^\circ$ в. д.

1.2. Радар некогерентного рассеяния

Радар некогерентного рассеяния находится вблизи г. Харьков, Украина ($49^\circ 36'$ с. ш., $36^\circ 18'$ в. д.). Его основные характеристики и время работы даны в табл. 1. Отметим, что в настоящее время измерения проводятся с параллельным использованием импульсов с длительностью 663 и 135 мкс для зондирования ионосферы. Такой режим работы позволяет улучшить высотное разрешение до 20 км на высотах 100 ÷ 300 км, а на больших высотах достичь приемлемого отношения сигнал/шум q (от 0,1 — в ночное и до 1 — в дневное время соответственно). Более подробно технические характеристики радара и режимы его функционирования представлены в работах [14, 17]. Харьковский радар некогерентного рассеяния Института ионосферы является на сегодня единственной в Европе установкой, с помощью которой можно получать наиболее полную информацию об основных параметрах среднеширотной ионосферной плазмы.

В эксперименте анализировались высотно-временные вариации относительных флуктуаций мощности некогерентно рассеянного сигнала δP в диапазоне высот 145 ÷ 325 км в интервале периодов волновых возмущений в ионосфере от порядка 10 до 60 мин.

1.3. Методы обработки сигнала

Для определения относительных вариаций δP мощности некогерентно рассеянного сигнала вначале выполнялись базовые оценки её значений на интервале 1 мин. Затем определялся тренд с помощью аппроксимации полученного временного ряда полиномом третьего порядка по методу наименьших квадратов на интервале 120 мин с шагом 1 мин, проводилось вычитание тренда и нормировка на него. Полученный таким образом ряд данных усреднялся на интервале 5 мин со сдвигом 1 мин. Более подробно применяемые методики описаны в работе [14].

Регулярные параметры ионосферной плазмы определялись по методикам [22], разработанным в Институте ионосферы (г. Харьков). Их погрешность для дневного времени обычно не превышала $1 \div 10\%$ в диапазоне высот $180 \div 600$ км.

На следующем этапе результаты измерений были обработаны с целью выявления квазипериодических процессов в ионосфере по методике, более подробно описанной в работе [14]. Проводилась полосовая фильтрация с помощью цифрового фильтра, построенного путём комбинации фильтров высоких и низких частот [17]. Его импульсная характеристика определяется следующим выражением:

$$h(t) = \frac{2}{T_1} \exp\left(-\frac{t^2}{a^2 T_1^2}\right) \operatorname{sinc}\left(2\pi \frac{t}{T_1}\right) - \frac{2}{T_2} \exp\left(-\frac{t^2}{a^2 T_2^2}\right) \operatorname{sinc}\left(2\pi \frac{t}{T_2}\right),$$

где a — подгоночный параметр (в данной работе $a = 40$), T_1 и T_2 — периоды, соответствующие границам полосы пропускания фильтра, $\operatorname{sinc}(x) = \sin(x)/x$. Так, например, при поиске гармоники с $T = 10$ мин полоса фильтрации составляла $7 \div 13$ мин, с $T = 15$ мин — $10 \div 20$ мин, с $T = 20$ мин — $15 \div 25$ мин и т. д.

При этом считалось, что относительные амплитуды δ_{P_m} квазипериодических вариаций мощности некогерентно рассеянного сигнала примерно равны относительным амплитудам δ_{N_m} волновых возмущений концентрации электронов. Это справедливо в случае, если относительные амплитуды волновых возмущений температуры электронов T_e и температуры ионов T_i намного меньше амплитуд δ_{N_m} , что в действительности имеет место согласно работам [23, 24].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

2.1. Вариации регулярных параметров ионосферной плазмы

Высотно-временные вариации концентрации электронов N в ионосфере над местом расположения радара некогерентного рассеяния были следующими.

На высотах $145 \div 180$ км зависимость $N(t)$ была достаточно плавной, максимальное значение концентрации N наблюдалось вблизи местного полудня. На больших высотах ($235 \div 325$ км) регистрировались два максимума концентрации N : один примерно в 08:00 UT, второй — в $15:00 \div 18:00$ UT в зависимости от высоты. Относительное увеличение концентрации N в этих максимумах составляло около 50 %. Максимум слоя F_2 находился на высоте около 255 км. Несмотря на то, что гелиогеофизическая обстановка 28 и 29 августа была сходной, высотно-временные вариации концентрации N заметно отличались: 29 августа концентрация N была, в целом, на десятки процентов выше, чем 28 августа.

Остановимся кратко на высотно-временных вариациях температур электронов и ионов. На высотах $z \approx 200 \div 220$ км вариации T_e и T_i плавно изменялись во времени. В диапазоне высот $235 \div 325$ км зависимость $T_e(t)$ была существенно немонотонной: наблюдались чёткие максимумы в интервалах $04:00 \div 06:00$ и $10:00 \div 16:00$ UT. Вблизи 08:00 UT достигался дневной минимум температуры T_e , глубина провала в котором составляла 500 К (25 %). Температура ионов (на высотах $200 \div 300$ км это, в основном, ионы O^+) в течение суток плавно изменялась во времени.

2.2. Волновые возмущения в ионосфере

2.2.1. Вариации мощности некогерентно рассеянных сигналов 28 августа 2012 года

В этот день стенд «Сура» работал в следующих режимах. С 06:15 до 09:45 UT в каждом часовом интервале стенд в течение 30 мин излучал на частоте $f = 4785$ кГц с эффективной

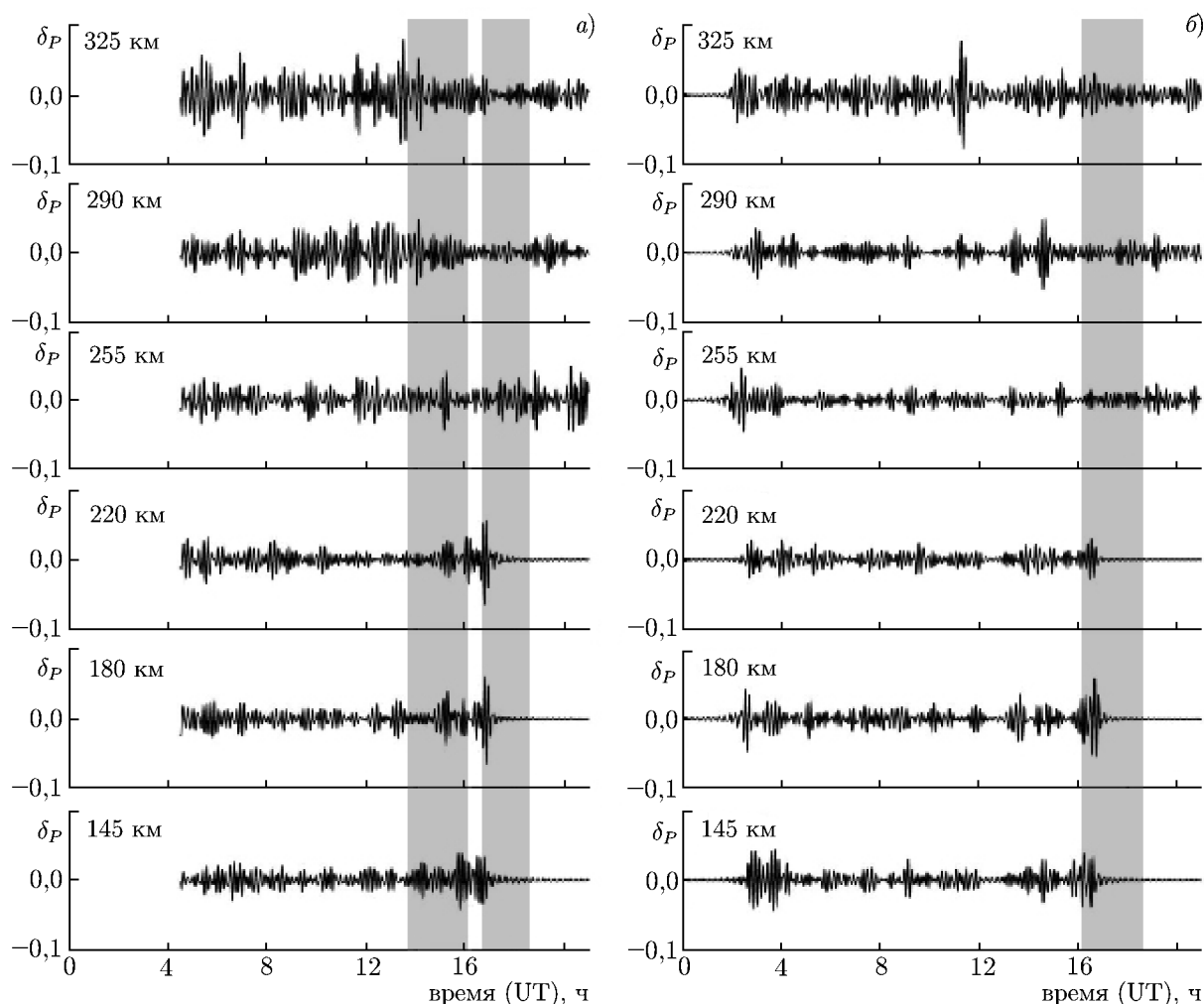


Рис. 1. Высотно-временные вариации относительных флуктуаций δ_P мощности некогерентно рассеянного сигнала в диапазоне периодов $7 \div 13$ мин 28.08.2012 (а) и 29.08.2012 (б). Затенёнными полосами показаны периоды работы стенда «Сура» в режиме $[+10 \text{ мин}; -10 \text{ мин}]$. Здесь и далее числа на панелях соответствуют высоте рассеяния

мощностью $PG \approx 80$ МВт, затем в течение 30 мин была пауза (далее такой режим обозначен как $[+30 \text{ мин}; -30 \text{ мин}]$). В интервале $13:00 \div 13:30$ UT непрерывный нагрев осуществлялся на частоте 5828 кГц с мощностью $PG \approx 110$ МВт. С $13:45$ до $15:55$ UT стенд излучал на той же частоте и с той же эффективной мощностью в режиме $[+10 \text{ мин}; -10 \text{ мин}]$. Такой же режим излучения был и в период $16:40 \div 18:30$ UT, но с параметрами сигнала $f = 4785$ кГц и $PG \approx 80$ МВт. Наконец, с $18:45$ до $20:30$ UT стенд излучал на частоте $f = 4785$ кГц с мощностью $PG \approx 80$ МВт в режиме $[+15 \text{ мин}; -15 \text{ мин}]$. Целью экспериментов в этот день был поиск квазипериодических вариаций мощности сигнала некогерентного рассеяния в интервалах периодов $7 \div 13$ мин (см. рис. 1а), $15 \div 25$ мин (рис. 2а), $10 \div 20$ мин (рис. 3а), $20 \div 40$ мин (рис. 4а) и $40 \div 80$ мин (рис. 5а). Соответствующие периоды работы стенда отмечены на рисунках затенёнными полосами.

Существенное увеличение амплитуды δ_{P_m} до $0,03 \div 0,06$ с периодом $7 \div 13$ мин наблюдалось на высотах $180 \div 220$ км с $14:25$ до $15:25$ UT (см. рис. 1а).

Из рис. 2а видно, что в интервале $14:25 \div 15:55$ UT на высотах $z \approx 145 \div 220$ км амплитуда δ_{P_m} увеличивалась в $1,5 \div 2$ раза с периодом $15 \div 25$ мин. Следующее увеличение относительной ам-

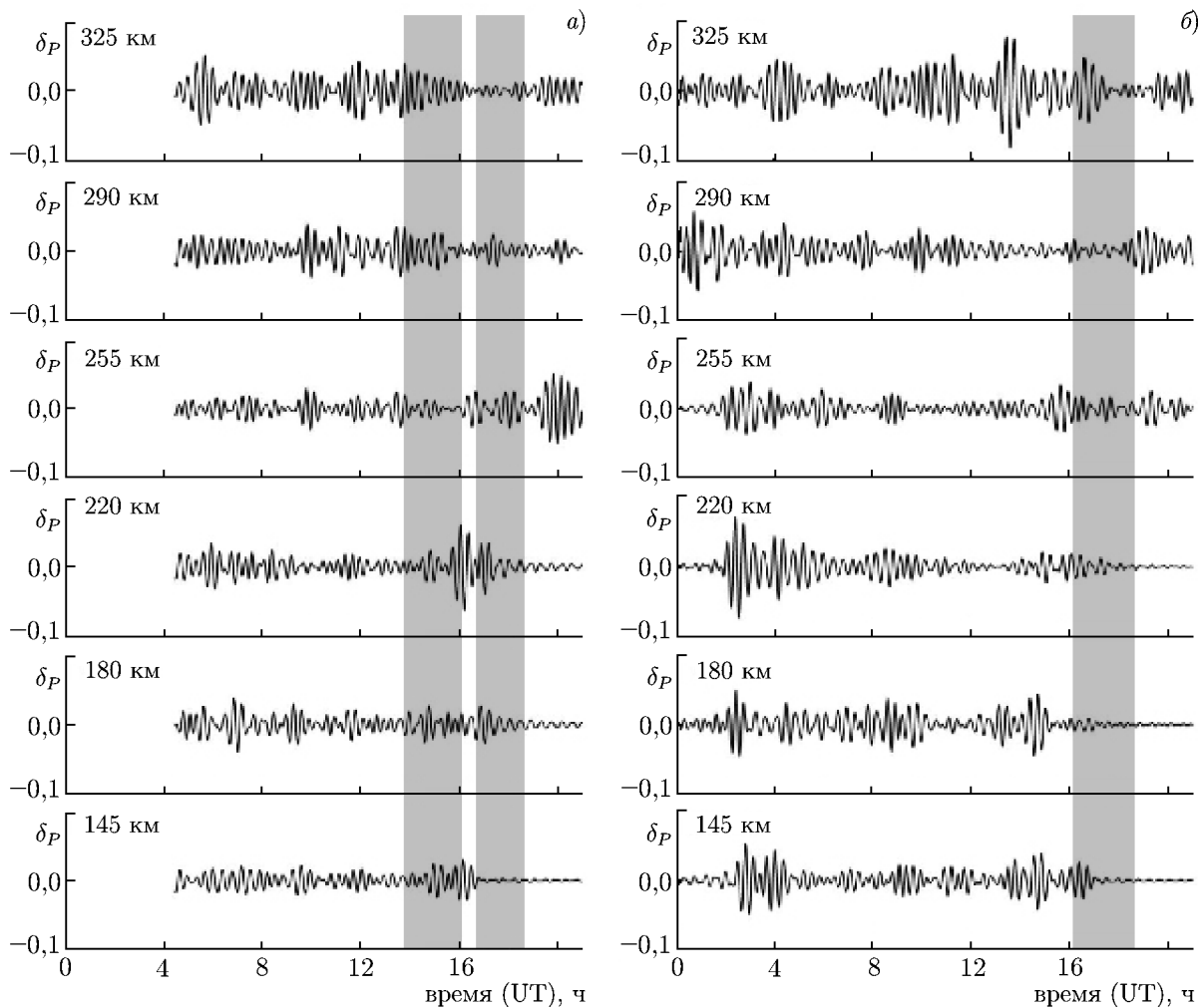


Рис. 2. Высотно-временные вариации относительных флуктуаций δP мощности некогерентно рассеянного сигнала в диапазоне периодов $15 \div 25$ мин 28.08.2012 (а) и 29.08.2012 (б). Затенёнными полосами показаны периоды работы станда «Сура» в режиме $[+10 \text{ мин}; -10 \text{ мин}]$

плитуды колебаний с периодом $15 \div 25$ мин на высотах $235 \div 255$ км началось примерно в 17:20 UT и продолжалось около 100 мин. На меньших высотах увеличения этой амплитуды обнаружить не удалось из-за низкого отношения сигнал/шум для рассеянного излучения в тёмное время суток.

При режиме излучения $[+15 \text{ мин}; -15 \text{ мин}]$ с 18:30 до 20:30 UT заметное увеличение амплитуды δP_m до $0,06 \div 0,10$ в диапазоне периодов $10 \div 20$ мин отмечалось на высотах $235 \div 255$ км (см. рис. 3а). Возможно, подобный эффект имел место и на меньших высотах, но его обнаружение также было затруднено из-за низкого отношения сигнал/шум для рассеянного излучения в тёмное время суток.

Увеличение амплитуды δP_m в $1,5 \div 2$ раза в диапазоне периодов $20 \div 40$ мин наблюдалось примерно в 06:15 и 08:15 UT, а также в интервалах $15:00 \div 18:00$ UT и $19:10 \div 20:30$ UT (см. рис. 4а). В ночное время на высотах более 220 км амплитуда естественных колебаний в этом диапазоне была значительной.

Как следует из рис. 5а, существенный всплеск вариаций δP мощности рассеянного сигнала в диапазоне периодов $40 \div 80$ мин с учётом «звона» фильтра наблюдался примерно в момент включения мощного радиоизлучения в режиме $[+30 \text{ мин}; -30 \text{ мин}]$ в 06:15 UT. Следующее уве-

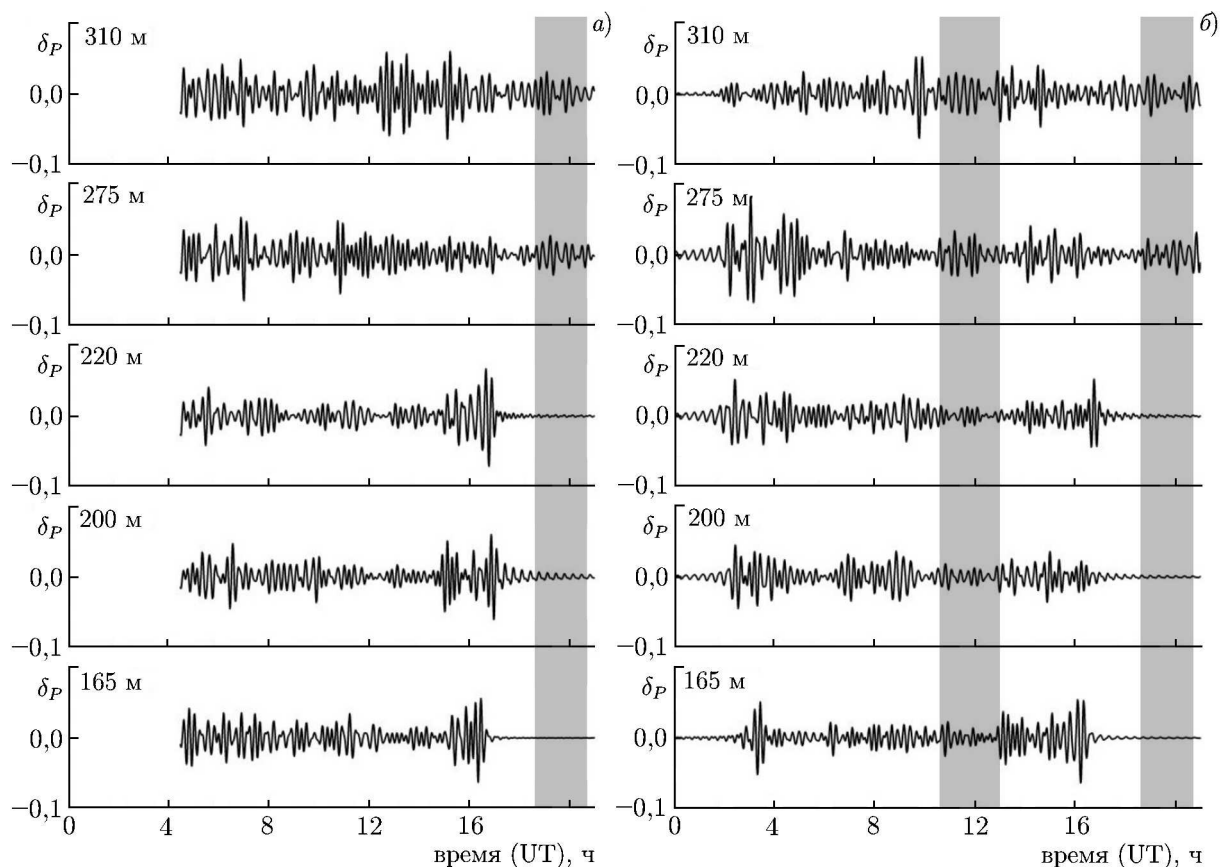


Рис. 3. Высотно-временные вариации относительных флуктуаций δ_P мощности некогерентно рассеянного сигнала в диапазоне периодов 10÷20 мин 28.08.2012 (а) и 29.08.2012 (б). Затенёнными полосами показаны периоды работы стенда «Сура» в режиме [+15 мин; -15 мин]

личение амплитуды δ_{P_m} началось около 16:00 UT и продолжалось практически всё тёмное время суток и утром (примерно до 06:00 UT 29 августа). Это увеличение наблюдалось в диапазоне высот 145÷255 км.

2.2.2. Вариации мощности некогерентно рассеянных сигналов 29 августа 2012 года

В этот день нагревный стенд излучал в следующих режимах. В период 06:00÷09:30 UT стенд излучал на частоте 4785 кГц с эффективной мощностью $PG \approx 80$ МВт в режиме [+30 мин; -30 мин]. С 10:45 до 13:00 UT он излучал на частоте 6720 кГц с мощностью $PG \approx 150$ МВт в режиме [+15 мин; -15 мин]. В интервале 13:15÷13:45 UT излучение происходило в непрерывном режиме с теми же частотой и эффективной мощностью. С 14:15 до 15:45 UT стенд излучал на частоте 5828 МГц с мощностью $PG \approx 110$ МВт в режиме [+30 мин; -30 мин]. В интервалах 16:05÷18:35 UT и 18:45÷20:30 UT при тех же частоте и мощности использовались режимы [+10 мин; -10 мин] и [+15 мин; -15 мин] соответственно.

При режиме [+10 мин; -10 мин] вариации δ_P увеличивались в диапазоне высот 145÷200 км (см. рис. 1б).

Заметный рост амплитуды δ_{P_m} в диапазоне высот 220÷275 км с периодами 15÷25 мин наблюдался в интервале 16:55÷19:25 UT при работе стенда в режиме [+10 мин; -10 мин] (см. рис. 2б). При этом амплитуда δ_{P_m} достигала 0,03÷0,04 на высотах 200÷235 км. В то же время реакция на

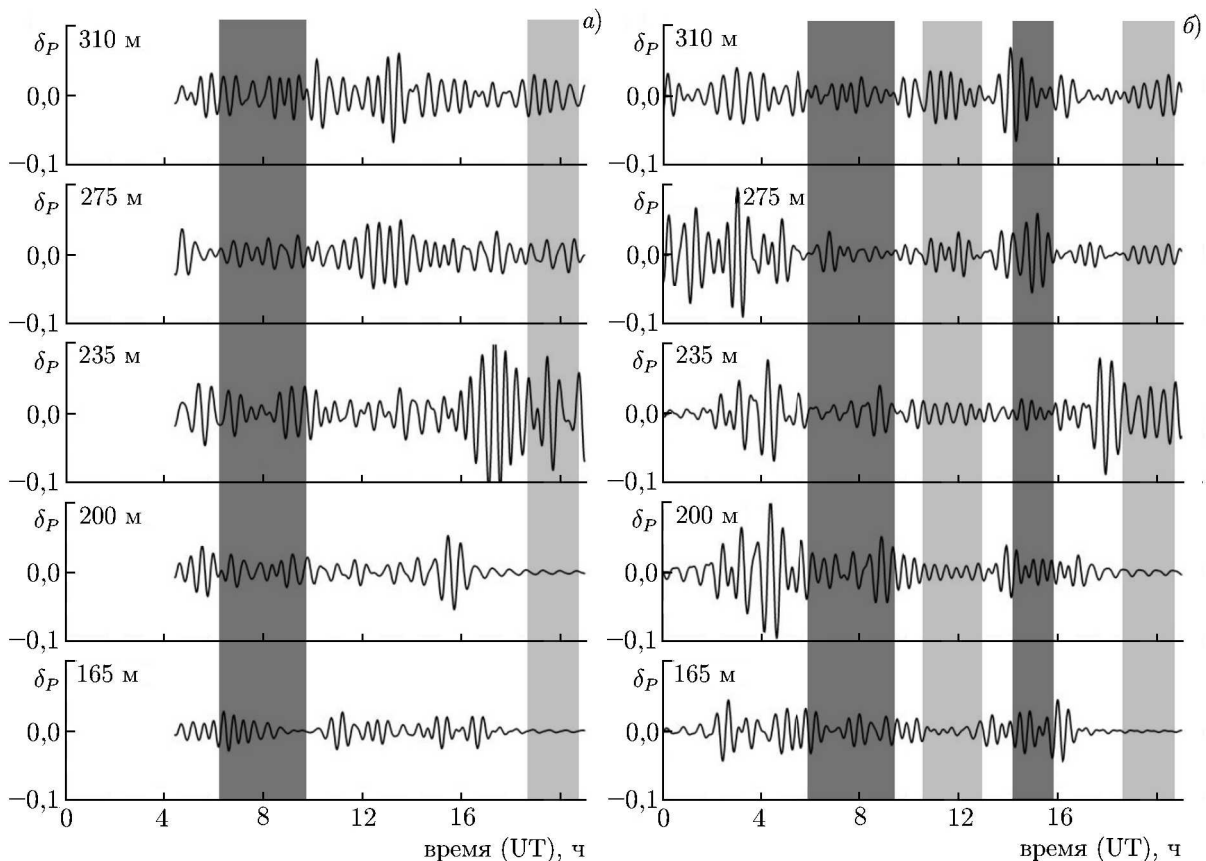


Рис. 4. Высотно-временные вариации относительных флуктуаций δP мощности некогерентно рассеянного сигнала в диапазоне периодов $20 \div 40$ мин 28.08.2012 (а) и 29.08.2012 (б). Светлыми серыми полосами показаны периоды работы станда «Сура» в режиме $[+15 \text{ мин}; -15 \text{ мин}]$, а темными полосами — в режиме $[+30 \text{ мин}; -30 \text{ мин}]$

включение станда в диапазоне периодов $7 \div 13$ мин на высотах $235 \div 325$ км практически отсутствовала (см. рис. 1б).

Нагрев ионосферы в режиме $[+15 \text{ мин}; -15 \text{ мин}]$ с 10:45 до 13:00 UT и с 18:45 до 20:30 UT сопровождался заметными изменениями характера вариаций δP мощности рассеянного сигнала в диапазоне периодов $20 \div 40$ мин на высотах $145 \div 165$ км в светлое время суток (см. рис. 4б). В темное время суток на высотах $255 \div 325$ км отмечалось некоторое увеличение амплитуды δP_m в диапазоне периодов $10 \div 20$ мин (см. рис. 3б).

При излучении станда 29 августа в интервале времени 06:00–09:30 UT в режиме $[+30 \text{ мин}; -30 \text{ мин}]$ на высотах $145 \div 235$ км с временем запаздывания $\Delta t \approx 50$ мин наблюдалось увеличение вариаций δP мощности рассеянного сигнала, их относительная амплитуда составляла $0,05 \div 0,03$ при $z \approx 145 \div 165$ км (см. рис. 4б). В течение светлого времени суток значения δP_m в среднем равнялись $0,03 \div 0,01$ на тех же высотах. Включение станда в том же режиме $[+30 \text{ мин}; -30 \text{ мин}]$ в интервале времени 14:15–15:45 UT привело к усилению колебания с периодом $20 \div 40$ мин (см. рис. 4б). При этом не наблюдалось заметной задержки появления вариаций относительно времени включения станда ($\Delta t \approx 0$ мин). Увеличение амплитуды δP_m до $0,05 \div 0,10$ для периодов $40 \div 80$ мин имело место на высотах $180 \div 235$ км с временем запаздывания около $40 \div 45$ мин (см. рис. 5б).

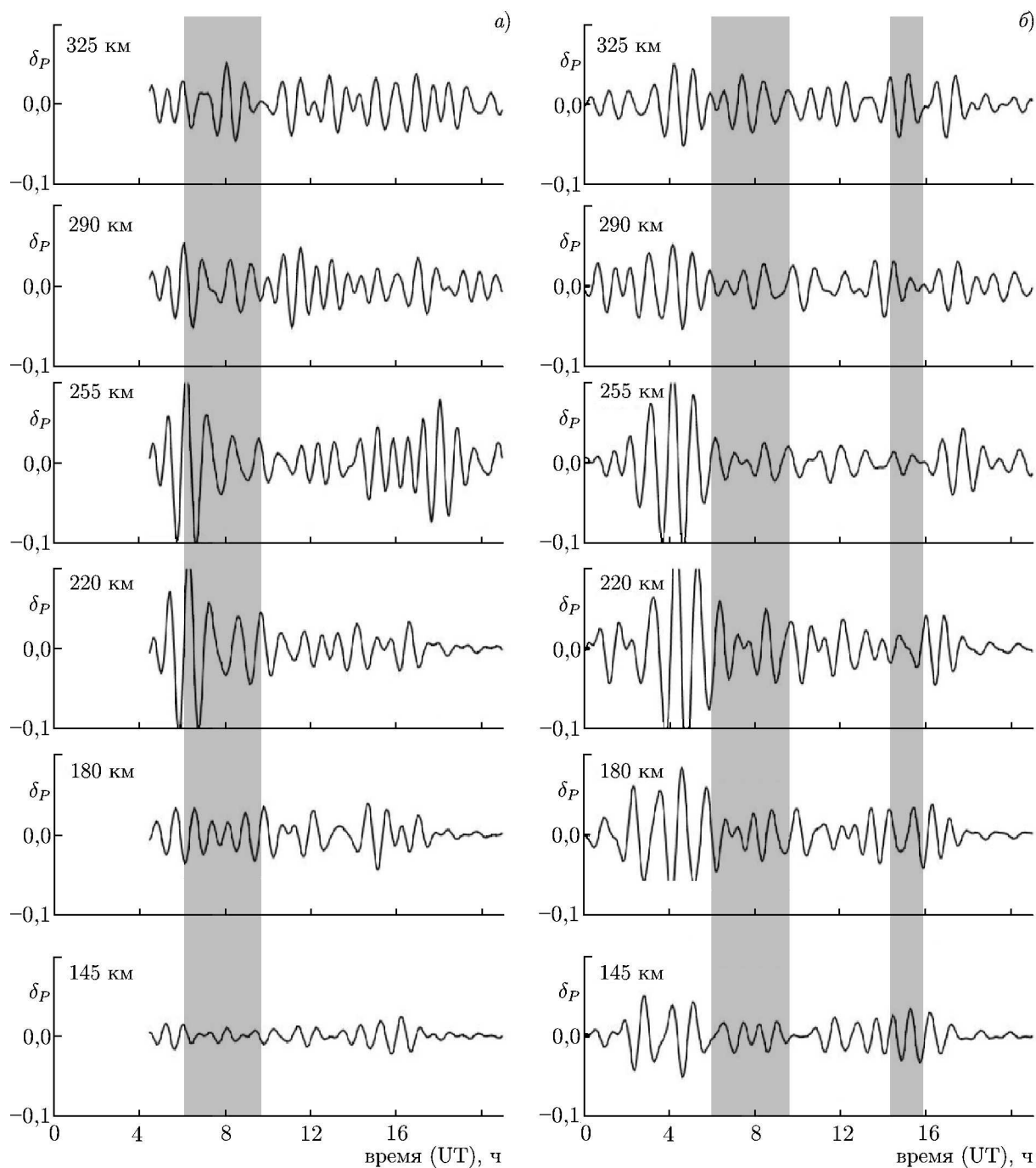


Рис. 5. Высотно-временные вариации относительных флуктуаций δ_P мощности некогерентно рассеянного сигнала в диапазоне периодов $40 \div 80$ мин 28.08.2012 (а) и 29.08.2012 (б). Затенёнными полосами показаны периоды работы стенда «Сура» в режиме $[+30 \text{ мин}; -30 \text{ мин}]$

3. ОБСУЖДЕНИЕ

При известном расстоянии R между источником волновых возмущений и средством диагностики по времени запаздывания Δt волновых возмущений относительно времени изменения режима излучения стенда можно оценить предполагаемую горизонтальную скорость их распро-

странения:

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

где Δt_0 — время становления источника возмущений. Полагая $\Delta t_0 \ll \Delta t$, получим $v \approx R/\Delta t$.

3.1. Волновые возмущения в ионосфере 28 августа 2012 года

3.1.1. Волновые возмущения с периодами 7÷13 мин

28 августа заметное увеличение амплитуды δR_m на высотах 180÷220 км отмечалось в интервале времени 14:25÷15:25 UT (см. рис. 1а). Если оно связано с включением стенда в режиме [+10 мин; –10 мин] в 13:45 UT, то время запаздывания $\Delta t \approx 40$ мин, а скорость распространения $v \approx 400$ м/с. Включение стенда в таком же режиме в вечернее время в 16:40 UT не позволило обнаружить волновые возмущения с периодом 7÷13 мин из-за низкого отношения сигнал/шум для рассеянного излучения на высотах, меньших 220 км.

3.1.2. Волновые возмущения с периодом 15÷25 мин

Если увеличение относительной амплитуды колебаний мощности некогерентно рассеянного сигнала с периодом $T \approx 15\div 25$ мин, наблюдаемое в интервале времени 14:25÷15:55 UT, связано с включением в 13:45 UT стенда «Сура» в режиме [+10 мин; –10 мин], то время запаздывания волнового возмущения $\Delta t \approx 40$ мин (см. рис. 2а). При этом скорость $v \approx 400$ м/с.

Следующее значительное увеличение амплитуды δR_m возникло в 17:20 UT, т. е. через промежуток $\Delta t \approx 40$ мин после включения второй серии циклов нагрева ионосферы в 16:40 UT в режиме [+10 мин; –10 мин] (см. рис. 2а). При этом скорость также составляла 400 м/с. Амплитуда δR_m в этой серии циклов нагрева превышала значения для первой серии. Это объясняется как уменьшением концентрации электронов в тёмное время суток, так и возможным наложением в фазе реакций от вечернего терминатора и мощного радиоизлучения нагревного стенда.

3.1.3. Волновые возмущения с периодом 10÷20 мин

В режиме [+15 мин; –15 мин] стенд излучал с 18:45 до 20:30 UT во время движения по ионосфере вечернего терминатора. Это существенно усложнило выделение реакции мощности некогерентно рассеянного излучения на работу нагревного стенда. При этом наблюдаемое увеличение амплитуды δR_m на высотах 235÷275 км здесь может быть обусловлено обоими факторами.

3.1.4. Волновые возмущения с периодом 20÷40 мин

Из рис. 4а следует, что значительное увеличение относительной амплитуды колебаний с периодом $T \approx 20\div 40$ мин на высотах 145÷200 км началось примерно в 15:00 UT. Скорее всего, это увеличение вызвано движением вечернего терминатора. Изменение характера колебаний $\delta R(t)$ на высотах, больших 220 км, началось примерно в 19:10 UT. Оно могло быть связано как с движением вечернего терминатора, так и с включением стенда в режиме [+15 мин; –15 мин] в 18:45 UT.

Первое включение стенда в режиме [+30 мин; –30 мин] в 06:15 UT сопровождалось некоторым увеличением амплитуды δR_m до 0,04 в диапазоне периодов 20÷40 мин на высотах 145÷235 км с временами запаздывания 15 и 135 мин (см. рис. 4а). Скорее всего, это была реакция на включение

периодического радиоизлучения в 06:15 и 08:15 UT. Реакция была кратковременной: её продолжительность не превышала 30 мин. По-видимому, реакция носила аperiodический характер, при этом для обоих случаев время запаздывания $\Delta t \approx 15$ мин.

3.1.5. Волновые возмущения с периодом 40÷80 мин

При включении нагревного стенда с 06:15 до 09:45 UT в режиме [+30 мин; –30 мин] заметная периодическая реакция на воздействие мощного радиоизлучения не наблюдалась (см. рис. 5а). Вероятной причиной этого факта является работа стенда на низкой частоте (4785 кГц). При этом радиоволна сильно поглощалась в нижней ионосфере, а также дефокусировалась в E - и F_1 -слоях ионосферы. Отсюда можно сделать вывод, что, по-видимому, не модификация нижней ионосферы является источником перемещающихся ионосферных возмущений.

3.1.6. Сравнение с результатами доплеровского радиозондирования

В работе [20] были представлены результаты наблюдений волновых возмущений в ионосфере на высотах 120÷300 км, выполненных при помощи доплеровского радара в радиофизической обсерватории Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина (географические координаты 49°38' с. ш., 36°20' в. д.) в те же дни, что и наблюдение с помощью радара некогерентного рассеяния. При этом расстояние от стенда «Сура» до радара также составляло $R \approx 960$ км. Представляет интерес сравнение результатов, полученных при помощи доплеровского радара и радара некогерентного рассеяния.

При работе нагревного стенда в дневное время (06:15÷09:45 UT) волновые возмущения не были обнаружены ни при помощи доплеровского радара, ни при помощи радара некогерентного рассеяния. В 14:25 UT оба радара зарегистрировали возмущение в ионосфере, которое имело время запаздывания около 40 мин относительно начала работы стенда в 13:45 UT, что даёт скорость распространения около 400 м/с. В 17:20 UT, т. е. через 40 мин после включения стенда в режиме [+10 мин; –10 мин] в 16:40 UT, оба радара зарегистрировали усиление колебаний. В 19:05 UT доплеровский радар, а в 19:10 UT радар некогерентного рассеяния позволили обнаружить усиление колебаний с периодами $T \approx 15$ мин и $T \approx 20\div 40$ мин соответственно. При этом стенд излучал в режиме [+15 мин; –15 мин] с 18:45 до 20:30 UT.

Относительные амплитуды возмущений концентрации электронов δN_m , определённые при помощи доплеровского радара, составляли 3,0÷8,6 %. Примерно такие же значения $\delta N_m \approx \delta P_m$ дал и метод некогерентного рассеяния.

3.2. Волновые возмущения в ионосфере 29 августа 2012 года

3.2.1. Волновые возмущения с периодом 7÷13 мин

Воздействие на ионосферу мощным радиоизлучением в режиме [+10 мин; –10 мин] в этот день имело место в вечернее время с 16:05 до 18:35 UT. Отношение сигнал/шум для рассеянного излучения на высотах, меньших 220 км, было низким. Здесь слабое увеличение амплитуды δP_m колебаний до 0,01÷0,02 наблюдалось лишь на высоте 235 км в интервале времени 16:55÷19:55 UT (см. рис. 1б). Параметры возмущения при этом были следующими: $\Delta t \approx 50$ мин, а $v \approx 320$ м/с.

3.2.2. Волновые возмущения с периодом 15÷25 мин

Наблюдаемый рост амплитуды δP_m , имевший место в интервале времени 16:55÷19:55 UT, скорее всего, вызван работой нагревного стенда в режиме [+10 мин; –10 мин] с 16:05 до 18:35 UT (см. рис. 2б). При этом время запаздывания $\Delta t \approx 50$ мин, а скорость распространения $v \approx 320$ м/с. В пользу этого вывода говорит тот факт, что длительность цуга колебаний практически совпала с продолжительностью циклов нагрев/пауза (150 мин). Увеличение значений δP_m в 2,5÷3 раза по сравнению с фоновым значением, без сомнения, определялось уменьшением электронной концентрации N в тёмное время суток, а также движением вечернего терминатора.

3.2.3. Волновые возмущения с периодом 10÷20 мин

Возмущение ионосферы мощным радиоизлучением в режиме [+15 мин; –15 мин] в этот день осуществлялось как в дневное (с 10:45 до 13:00 UT), так и в вечернее (с 18:45 до 20:30 UT) время. Наблюдаемое значительное увеличение амплитуды δP_m в дневное время (см. рис. 3б) имело место вне интервала работы нагревного стенда, т. е. носило естественный характер. В вечернее время зарегистрированное увеличение амплитуды колебаний, скорее всего, было связано с движением вечернего терминатора.

3.2.4. Волновые возмущения с периодом 20÷40 мин

Как отмечалось выше, нагрев ионосферы в режиме [+15 мин; –15 мин] имел место как в светлое, так и в тёмное время суток. При этом в диапазоне периодов 20÷40 мин не наблюдалась реакция рассеянного сигнала на воздействие мощным радиоизлучением. Возможно, имело место подавление естественных колебаний, существовавших в ионосфере. Отметим, что в интервалах 11:10÷11:25 UT и 12:40÷13:00 UT частота радиоволны $f = 6,7$ МГц $\approx f_{oF_2}$ (f_{oF_2} — критическая частота слоя F_2). При этом значительная часть энергии волны накачки могла «просачиваться» сквозь ионосферу, уменьшая эффективность её взаимодействия с плазмой F_2 -слоя ионосферы.

При включении нагревного стенда в режиме [+30 мин; –30 мин] в интервале времени 06:00÷09:30 UT значительное (в 1,5÷2 раза) увеличение амплитуды δP_m наблюдалось на высотах 145÷165 км в интервале времени 07:00÷10:30 UT, а на высотах 180÷235 км — с 08:30 до 10:45 UT. Если это увеличение связано с периодическим включением нагрева, то время запаздывания возмущений близко к нулю. Возможно, имели место отдельные всплески вариаций δP мощности рассеянного излучения, вызванные переключениями стенда с периодом в 30 мин, для которых время запаздывания $\Delta t \approx 0$. Включение стенда в том же режиме в интервале 14:15÷15:45 UT опять привело к появлению двух всплесков вариаций δP мощности рассеянного излучения на высотах 145÷180 км с задержкой $\Delta t \approx 0$.

3.2.5. Волновые возмущения с периодом 40÷80 мин

Нагрев околослойной плазмы в режиме [+30 мин; –30 мин] в предполуденные часы с 06:00 до 09:30 UT сопровождался периодическими всплесками вариаций δP мощности рассеянного излучения, которые наблюдались с временем запаздывания 40÷50 мин на высотах 180÷235 км соответственно. Если колебания δP вызваны включением нагревного стенда, то скорость распространения $v \approx 320\div 400$ м/с, соответственно; длительность времени их наблюдения составляла $\Delta T \approx 90$ мин.

Значительное увеличение амплитуды δP_m от 0,01÷0,03 до 0,06÷0,10 с периодом $T \approx 40\div 80$ мин в диапазоне высот 235÷255 км в интервале 16:25÷19:25 UT могло быть вызвано как движением

вечернего терминатора, так и выключением в 15:45 UT мощного периодического (с периодом $T = 60$ мин) радиоизлучения (см. рис. 5б). Если выключение нагрева привело к генерации волновых возмущений, то время запаздывания $\Delta t \approx 40$ мин, а скорость распространения $v \approx 400$ м/с.

Отметим, что динамика ионосферных процессов 29 августа 2012 года, регистрируемая при помощи радара некогерентного рассеяния и доплеровского радара, в целом была подобной.

3.3. Аперiodические возмущения в ионосфере

28 августа после включений нагревного стенда в режиме $[+30 \text{ мин}; -30 \text{ мин}]$ с 06:15 до 09:45 UT в диапазоне высот $200 \div 275$ км наблюдались всплески амплитуды δR_m с временем запаздывания Δt , близким к нулю (см. рис. 5а). В реальности, поскольку продолжительность «звона» фильтра составляла около $20 \div 40$ мин, это время могло составлять $10 \div 15$ мин. Продолжительность возмущения также составляла не менее нескольких десятков минут. Скорее всего, наблюдалась реакция на включение и выключение мощного радиоизлучения с периодом $T = 60$ мин в разных циклах нагрева.

В то же время 29 августа после включений стенда в режиме $[+30 \text{ мин}; -30 \text{ мин}]$ наблюдалось подавление всплесков амплитуды δR_m .

Такие аперiodические всплески вариаций δR мощности рассеянного излучения, а значит, и концентрации электронов, могут быть вызваны всплесками ионизации в результате ударного воздействия на систему ионосфера—магнитосфера—атмосфера—ионосфера [13, 25–27]. Вероятные механизмы взаимодействия подсистем в упомянутой системе могут быть следующими. Продолжительное (30 мин) непрерывное радиоизлучение возмущает ионосферную плазму (как в пределах, так и за пределами диаграммы направленности антенны), а также приводит к генерации электромагнитных возмущений [13, 25–27]. При выключении стенда возмущаются первичные параметры плазмы (температуры T_e , концентрации N и т. д.) и, следовательно, её проводимость на высотах динамо-области ионосферы. Возмущения достигают магнитосферы, где вызывают перераспределение электронов с энергиями порядка $1 \div 10$ кэВ по pitch-углам, стимулируют таким образом высыпание частиц в верхнюю атмосферу и модифицируют состояние ионосферы на высотах $80 \div 200$ км. Высыпающиеся электроны приводят к наблюдаемым всплескам ионизации. Характерное время развития этого процесса составляет $1 \div 15$ мин. Подобные процессы наблюдались при значительном возмущении E -области ионосферы в дневное время, когда ионосферные токи были сильными.

Заметим, что 28–30 августа 2012 года всплески концентрации электронов после включения нагревного стенда в режиме $[+30 \text{ мин}; -30 \text{ мин}]$ наблюдались также при помощи сети ионозондов [26, 27]. При этом удаление ионозондов от нагревного стенда составляло $560 \div 2\,200$ км.

ВЫВОДЫ

При помощи харьковского радара некогерентного рассеяния выполнены наблюдения за волновыми возмущениями в ионосфере, генерируемыми при воздействии на ионосферную плазму мощным периодическим радиоизлучением нагревного стенда «Сура», который находится на расстоянии около 960 км от места диагностики возмущений. При этом установлено следующее.

1) Подтверждено, что мощное периодическое радиоизлучение с периодом цикла 20 и 30 мин может приводить к генерации (усилению) волновых возмущений концентрации электронов в ионосфере на высотах $145 \div 235$ км с периодами около 20 и 30 мин соответственно. Эффективность возбуждения волновых возмущений с периодом, равным половине периода цикла нагрева,

оказывается ниже. Скорость движения волновых возмущений составляла примерно $320 \div 400$ м/с, а относительная амплитуда колебаний концентрации плазмы — $1 \div 10$ %.

2) Результаты наблюдений волновых возмущений, выполненных одновременно в одном и том же месте на радаре некогерентного рассеяния и на доплеровском радаре, в целом хорошо согласуются.

3) При включении (выключении) мощного радиоизлучения в режиме нагрев — 30 мин, пауза — 30 мин обнаружены аperiodические всплески концентрации электронов с временем запаздывания $1 \div 15$ мин и относительной амплитудой около 5 % в диапазоне высот $145 \div 180$ км. Эти всплески можно объяснить дополнительной ионизацией атмосферы потоками высокоэнергичных электронов, высыпаящимися под действием мощного радиоизлучения из магнитосферы. Возможность появления всплесков ионизации подтверждается синхронными наблюдениями на сети ионозондов.

Авторы благодарны Г. П. Комракову за обеспечение работы нагревного стенда «Сура», а также Л. Я. Емельянову, А. Ф. Кононенко и Я. Н. Чепурному за проведение измерений на радаре некогерентного рассеяния.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 14-12-00556 в части анализа полученных экспериментальных данных. Эксперименты на стенде «Сура» выполнены при финансовой поддержке РФФИ (в рамках научных проектов 13-02-12074-офи_м, 13-02-12241-офи_м) и ФЦП «Геофизика».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев Г. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 12. С. 1801.
2. Караштин А. Н., Митяков Н. А., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20, № 5. С. 787.
3. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2012. Т. 17, № 3. С. 240.
4. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шварцбург А. Б. // Компьютерная оптика. 1989. Вып. 6. С. 62.
5. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. // Вестник Харьков. ун-та. Сер. «Радиофизика и электроника». 1988. № 318. С. 29.
6. Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29, № 3. С. 513.
7. Мисюра В. А., Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. // Космическая наука и техника. 1989. Вып. 4. С. 72.
8. Гармаш К. П., Гритчин А. И., Губарев А. А. и др. // Труды Научно-исследовательского института радио. М.: Радио и связь, 1989. № 9. С. 57.
9. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. // Космическая наука и техника. 1990. Вып. 5. С. 71.
10. Костров Л. С., Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30, № 1. С. 159.
11. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1998. № 6. С. 17.
12. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. // Электромагнитные явления. 1998. Т. 1, № 1. С. 90.
13. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2009. Т. 14, № 4. С. 377.
14. Бурмака В. П., Домнин И. Ф., Урядов В. П., Черногор Л. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 11. С. 859.
15. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Комраков Г. П., Пушин В. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 2. С. 81.
16. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 14.

17. Домнин И. Ф., Панасенко С. В., Урядов В. П., Черногор Л. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 4. С. 280.
18. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Пушин В. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 5. С. 327.
19. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 4. С. 219.
20. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 5. С. 307.
21. Mishin E., Sutton E., Milikh G., et al. // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. Art. no. L11101.
22. Богомаз А. В., Котов Д. В. // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Радиофизика и ионосфера. 2013. № 28. С. 29.
23. Kirchengast G., Hocke K., Shlegel K. // Radio Sci. 1995. V. 30, No. 5. P. 1551.
24. Hocke K., Shlegel K., Kirchengast G. // J. Atm. Terr. Phys. 1996. V. 58, No. 1–4. P. 245.
25. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф., Панасенко С. В., Урядов В. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 3. С. 173.
26. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2013. Т. 18, № 1. С. 49.
27. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Барабаш В. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 2. С. 110.

Поступила в редакцию 25 апреля 2014 г.; принята в печать 2 июня 2014 г.

OBSERVATIONS OF THE IONOSPHERIC WAVE DISTURBANCES USING THE KHARKOV INCOHERENT SCATTER RADAR IN THE RF-HEATED NEAR-EARTH PLASMA

L. F. Chernogor, S. V. Panasenko, V. L. Frolov, and I. F. Domnin

Characteristics of the wave disturbances of the ionospheric electron number density were measured using the Kharkov incoherent scatter radar. The disturbance generation accompanied the SURA heating of the near-Earth plasma by high-power periodic radiation. The distance between the heater and the radar was about 960 km. The possibility of generating ionospheric wave disturbances with a period of 20 to 30 min in the internal gravity wave range was confirmed. The disturbance propagation velocity was near 320–400 m/s, and the relative amplitude of the electron density variation was 1–10%. The wave disturbances appeared in the altitude range 145–235 km. Aperiodic bursts of the electron number density with a relative amplitude of up to 5–10% were detected after the first switch-ons of periodic radiation in the 30-min heating — 30-min pause regime at altitudes of 145 to 310 km. The observation results generally conform to the synchronous observation data obtained using the Kharkov vertical-sounding Doppler radar and a network of ionosondes.