

УДК 537.876.2+551.511.3+550.388.2

РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ В ПЕРИОД ЕЁ НАГРЕВА МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ СТЕНДА «СУРА»

И. Ф. Домнин¹, С. В. Панасенко¹, В. П. Урядов², Л. Ф. Черногор^{1,3}

¹ Институт ионосферы МОН и НАН Украины, г. Харьков, Украина

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

³ Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, г. Харьков, Украина

Представлены результаты наблюдения волновых возмущений в F -области ионосферы над Харьковом, сопровождавших воздействие на ионосферную плазму мощного радиоизлучения стенда «Сура», удалённого от места наблюдения на расстояние около 960 км. Обнаружено усиление волновой активности в ионосфере в интервалы времени работы нагревного стенда. Выявлено увеличение в 1,5–4 раза относительной амплитуды волнового возмущения с периодом около 30 мин, близким к режиму функционирования нагревного стенда «Сура», на высотах 160–235 км. Оценены параметры этого возмущения. Показано, что оно может быть вызвано распространением внутренних гравитационных волн в атмосферном волноводе, имеющем высоту около 200 км и ширину 80–100 км. Продемонстрирована эффективность используемого нами комплексного анализа экспериментальных данных для выявления и оценки параметров волновых возмущений с небольшой относительной амплитудой (единицы процентов).

ВВЕДЕНИЕ

Использование мощного радиоизлучения декаметрового диапазона для воздействия на геокосмическую плазму имеет большое фундаментальное и прикладное значение для решения ряда как радиофизических, так и геофизических задач. В процессе таких активных экспериментов появляется возможность качественно и количественно изучить механизмы взаимодействия подсистем в системе Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера, оценить параметры плазменных возмущений, исследовать характеристики радиосигналов, прошедших через возмущённую среду, создавать новые каналы передачи информации, генерировать электромагнитные волны на ионосферных высотах и др. (см., например, [1–4]).

Наибольшее развитие эксперименты по модификации ионосферы мощным радиоизлучением получили в 1970–1990-е годы с введением в строй таких нагревных стендов, как «Аресибо» (Пуэрто-Рико, США), «Сура» (Россия), EISCAT (Норвегия), HIPAS и HAARP (Аляска, США) и др. При этом были обнаружены два типа эффектов.

Первый из них имел место в пределах диаграммы направленности излучающей антенны и заключался в разогреве и изменении концентрации электронов ионосферной плазмы, вызванном нагревным и стрикционным механизмами нелинейности, генерации плазменных неустойчивостей, структуризации ионосферной плазмы, низкочастотном излучении ионосферных токовых систем (эффект Гетманцева), свечении возмущённой среды в оптическом диапазоне и др. Такие эффекты в работах [5–7] были названы локализованными и к настоящему времени изучены относительно хорошо (см., например, [1–4]).

Второй тип эффектов связан с генерацией крупномасштабных возмущений (1–3 тыс. км) в ионосферной плазме, вызванных как распространением волн от источника мощного радиоизлучения, так и стимулированием естественных процессов над пунктом наблюдения через взаимодействие подсистем в системе Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера [5–11]. Сложность

устойчивой регистрации крупномасштабных эффектов заключается в их сильной зависимости от состояния космической погоды, времени суток и сезона, режима работы стенда и других факторов. Поэтому природа крупномасштабных возмущений и способов их генерации в настоящее время изучена недостаточно.

Для преодоления описанных трудностей при выявлении крупномасштабных эффектов необходимо наличие больших массивов сравнительно однородных экспериментальных данных и применение статистических методов анализа. Это подразумевает проведение продолжительных систематических наблюдений параметров ионосферной плазмы в сходных гелиогеофизических условиях в близкие времена суток и сезоны и при одинаковых режимах работы нагревного стенда. Такие совместные исследования, в частности, выполняются в рамках научного сотрудничества между Институтом ионосферы, Харьковским национальным университетом им. В. Н. Каразина (г. Харьков, Украина) и Научно-исследовательским радиофизическим институтом (г. Нижний Новгород, Россия).

В 2009 году нагрев ионосферы осуществлялся в дневное и вечернее время (с 10:50 до 14:40–16:10 UT) с 31 августа по 2 сентября. Результаты наблюдений методом некогерентного рассеяния показали, что на удалении около 960 км от возмущённой области плазмы имели место квазипериодические колебания с периодами, лежащими в диапазоне $30 \div 180$ мин, относительными амплитудами вариаций электронной концентрации $0,04 \div 0,10$ и временами запаздывания $40 \div 60$ мин [12].

В 2010 году стенд «Сура» работал в вечернее время (с 12:50 до 17:40 или 19:10 UT) 20–23 сентября. При этом эффективная мощность излучения была в два раза больше, чем в 2009 году. Результаты наблюдения аperiodических крупномасштабных возмущений в E -области описаны в работе [13]. В настоящей работе изложены результаты исследования волновых возмущений в F -области ионосферы.

Целью работы является описание и анализ временных зависимостей относительных вариаций электронной концентрации на высотах $150 \div 500$ км по данным харьковского радара некогерентного рассеяния, полученным в период и после окончания работы удалённого на расстояние около 960 км нагревного стенда «Сура» на фоне прохождения вечернего солнечного терминатора в пункте наблюдения и в магнитосопряжённой области.

В дни работы стенда значения геомагнитных индексов лежали в пределах: $K_p = 0 \div 2$, $D_{st} \approx -10 \div -24$ нТл. Таким образом, состояние космической погоды в период активных экспериментов было благоприятным для выявления эффектов воздействия мощного радиоизлучения.

1. РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ

Нагревный стенд «Сура» расположен вблизи г. Нижний Новгород, Россия (географические координаты $56,1^\circ$ с. ш., $46,1^\circ$ в. д.). Краткие характеристики режима его работы приведены в табл. 1. В настоящее время стенд «Сура» является единственным функционирующим нагревным стендом, расположенным в средних широтах. Более подробное описание и технические характеристики установки приведены в работах [14, 15].

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. 2. Отметим, что в настоящее время измерения проводятся с одновременным использованием импульсов с длительностью 663 и 135 мкс. Такой режим работы позволяет улучшить высотное разрешение ($\Delta h \approx 20$ км) на высотах $100 \div 300$ км, а на больших высотах достичь приемлемого отношения сигнал/шум ($q \sim 0,1 \div 1$ в ночное и дневное время соответственно). Более подробно технические характеристики радара и режимы его функционирования описаны в работах [16, 17]. Харьковский радар

Таблица 1. Основные сведения о режиме работы стенда «Сура»

Частота радиоволны	4,7 МГц
Поляризация	обыкновенная
Режим излучения	циклический (20 мин нагрев, 10 мин пауза)
Суммарная мощность передатчиков	0,5 МВт
Эффективная мощность системы	80 МВт
Наклон диаграммы направленности	12° к югу (в магнитный зенит)
Период работы стенда	20–22.09.2010 с 12:50 до 17:40 UT; 23.09.2010 с 12:50 до 19:10 UT

Таблица 2. Основные параметры и режим работы радара некогерентного рассеяния Института ионосферы (г. Харьков)

Рабочая частота	158 МГц
Режим работы	импульсный
Импульсная мощность	1,8 МВт
Эффективная мощность	23 ГВт
Длительность импульса «длинного»	663 мкс
«короткого»	135 мкс
Диаметр антенны	100 м
Диапазон исследуемых высот	100 ÷ 1 500 км
Период работы радара	20.09.2010 с 08:20 до 24:00 UT; 21.09.2010 с 00:00 до 24:00 UT; 22.09.2010 с 00:00 до 11:00 UT; 23.09.2010 с 11:20 до 21:00 UT

некогерентного рассеяния Института ионосферы является единственной в среднеширотной Европе установкой, с помощью которой можно получать наиболее полную информацию об основных параметрах ионосферной плазмы.

Для определения временных вариаций мощности некогерентно рассеянного сигнала вначале выполнялись базовые оценки её значений на интервале времени 1 мин. Затем с помощью скользящего усреднения вычитался тренд на интервале 120 мин, и проводилась нормировка на него. Полученный таким образом сигнал усреднялся на интервале 5 мин с шагом 1 мин. Более подробно применяемые методики описаны в работе [18].

Для спектрального анализа использовались оконное преобразование Фурье, адаптивное преобразование Фурье и преобразование на основе вейвлета Морле. Основные соотношения и формат получаемых результатов приведены в работе [19].

Для полосовой фильтрации использовался цифровой фильтр, построенный путём комбинации фильтров высоких и низких частот, описанных в работе [20]. 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, $\operatorname{sinc}(x) = \sin(x)/x$.

2. ВЫСОТНО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Высотно-временные зависимости волновых возмущений для ряда высот представлены на рис. 1 и 2. Из рисунков видно, что в интервале времени 09:00÷13:00 UT вариации относительных изменений электронной концентрации δ_N на высотах 150÷200 км обычно не превышали

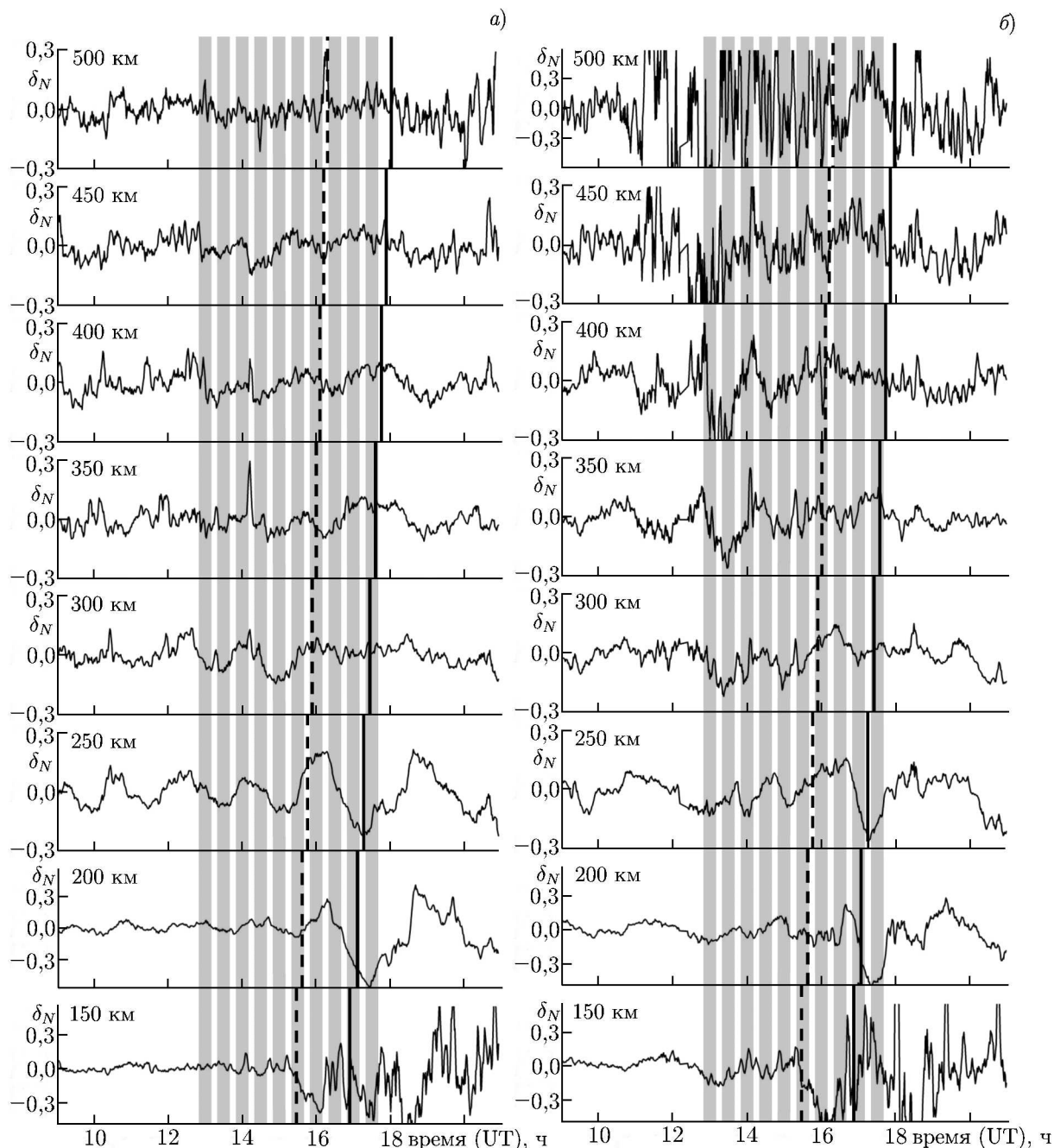


Рис. 1. Высотно-временные зависимости относительных вариаций электронной концентрации в диапазоне периодов 5÷120 мин, полученные с использованием «длинного» зондирующего импульса, для 20 (а) и 21 (б) сентября 2010 года. Здесь и далее вертикальными затенёнными прямоугольниками показаны периоды работы стенда «Сура», а штриховыми и сплошными линиями обозначены моменты прохождения магнитосопряжённого и местного терминаторов соответственно

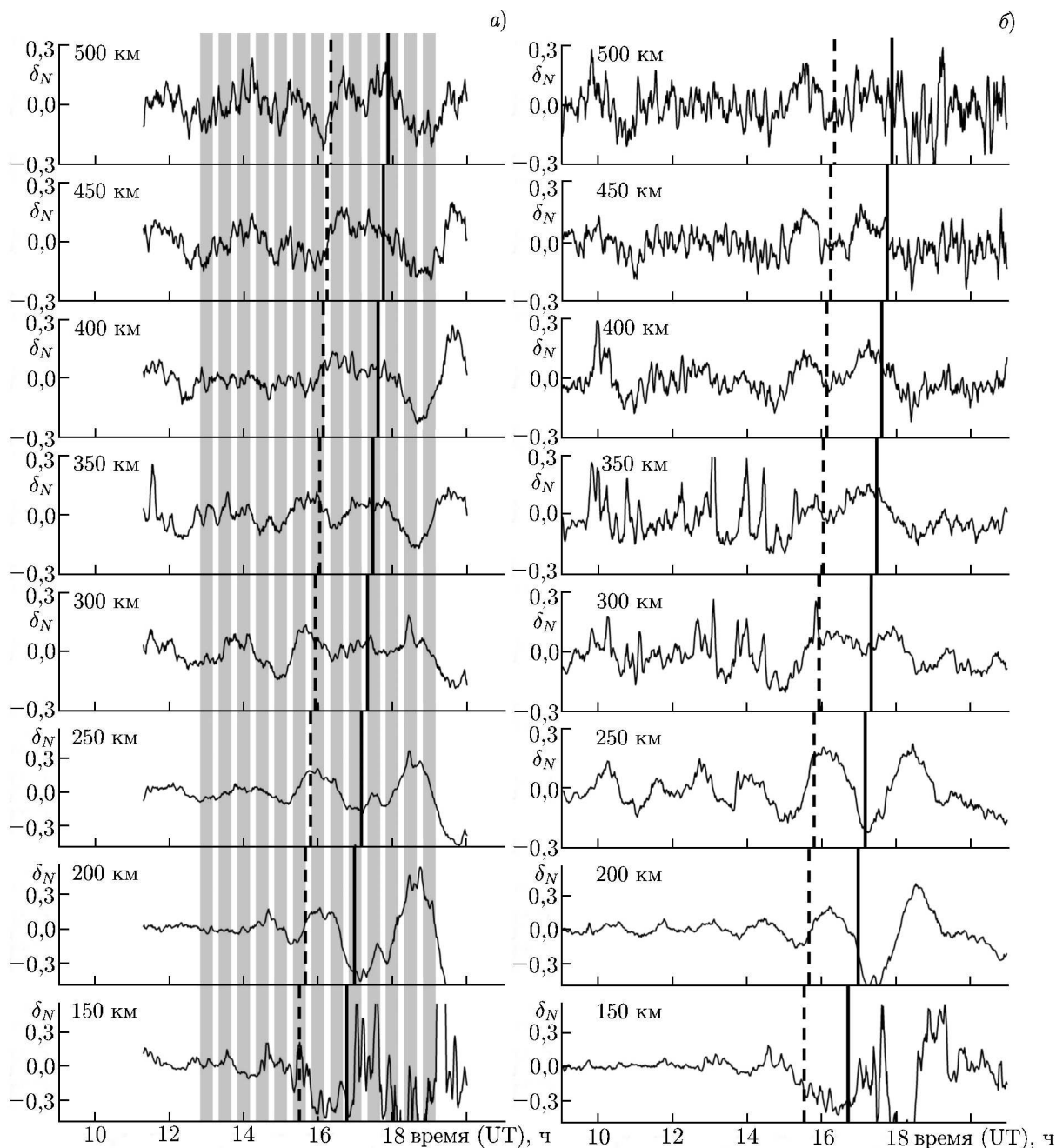


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для 23 сентября 2010 года (а) и контрольных суток 23 сентября 2008 года (б)

$0,05 \div 0,1$ для всех суток. На высотах $250 \div 400$ км имели место как аperiодические возмущения с максимальными абсолютными значениями δ_N , достигающими $0,2 \div 0,3$, так и волновые возмущения с максимальными относительными амплитудами $0,1 \div 0,15$. В диапазоне высот $450 \div 500$ км относительная амплитуда волновых возмущений либо уменьшалась до $0,05 \div 0,1$, либо имела шумоподобный характер.

После начала работы нагревного стенда характер вариаций δ_N 20, 21 и 23 сентября 2010 года несколько изменился. На высотах $150 \div 350$ км, начиная примерно с $13:30 \div 14:00$ UT, имело место усиление волновой активности, особенно ярко выраженное 21 и 23 сентября 2010 года. Относи-

тельные амплитуды волновых возмущений в эти дни возросли до 0,2. Наибольшее увеличение этих амплитуд наблюдалось на высотах $150 \div 250$ км после прохождения магнитосопрежженного и местного вечерних солнечных терминаторов. При этом они достигли $0,25 \div 0,4$ (см. рис. 1 и 2). На высотах $400 \div 500$ км увеличение вариаций δ_N после 13:00 UT не наблюдалось (на некоторых высотах они, наоборот, уменьшились), но в ряде случаев изменился характер сигнала. Например, 20 сентября 2010 года стали преобладать волновые возмущения δ_N с большими периодами, чем в предыдущий интервал времени (см. рис. 1).

В контрольные сутки 23 сентября 2008 года также наблюдалось существенное усиление волновой активности после прохождения терминаторов. Их относительная амплитуда достигла $0,3 \div 0,5$. Остальные описанные выше эффекты были выражены более слабо (см. рис. 2).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Для оценки относительных амплитуд, периодов и длительностей волновых возмущений был проведён спектральный анализ временных вариаций δ_N . Примеры полученных результатов приведены на рис. 3 и 4. Из рисунков видно, что в интервале времени $09:00 \div 14:00$ UT во все сутки наблюдались волновые возмущения с периодами $100 \div 150$ мин, их амплитуда обычно не превышала 0,05, иногда достигая 0,1.

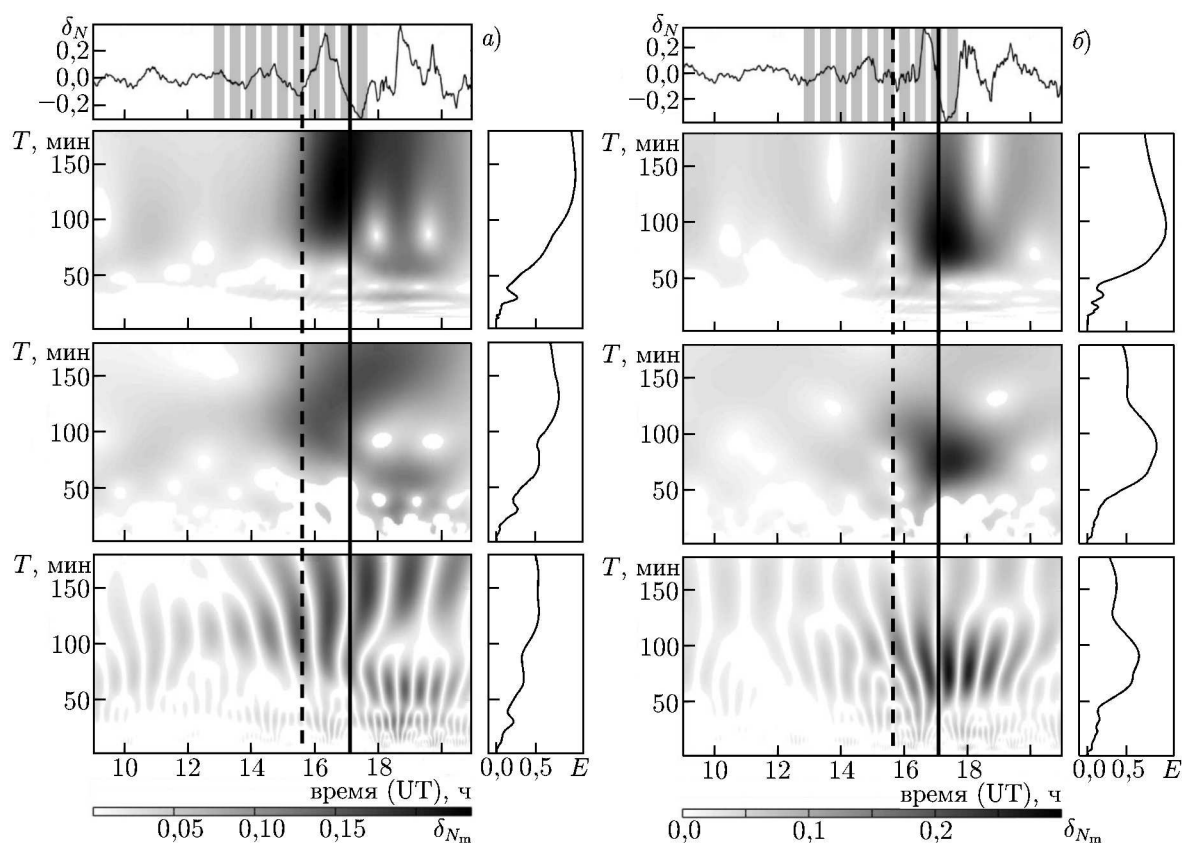


Рис. 3. Результаты применения к относительным вариациям электронной концентрации на высоте 200 км (верхняя панель) оконного (вторая сверху панель) и адаптивного (третья сверху панель) преобразований Фурье, а также преобразования на основе вейвлета Морле (нижняя панель) с использованием порогового критерия при доверительной вероятности 90 % для 20 (а) и 21 (б) сентября 2010 года. Справа приведены соответствующие энергограммы

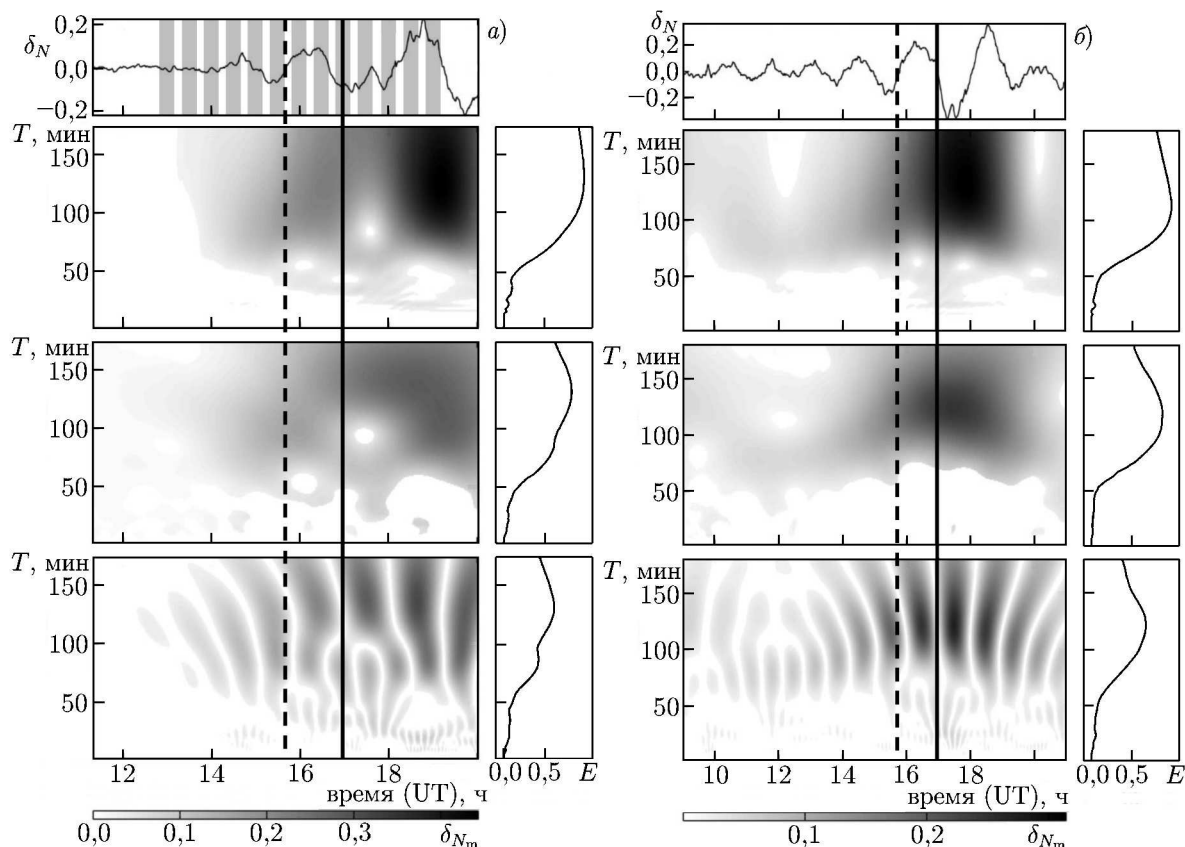


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, для 23 сентября 2010 года (а) и 23 сентября 2008 года (б)

После 14:00 UT спектральный состав вариаций 20, 21 и 23 сентября 2010 года существенно изменился. Через 30÷60 мин после первого включения нагревного стенда возникло волновое возмущение с периодом около 30 мин и длительностью 2÷3 часа. Его относительная амплитуда составила 0,08÷0,1. Важно, что данное возмущение наблюдалось во все дни, когда имело место воздействие на ионосферу радиоизлучения стенда «Сура». В контрольный день колебание с таким периодом не наблюдалось (см. рис. 3 и 4).

После прохождения магнитосопряжённого и местного солнечных терминаторов характер сигнала также изменился. Существенно усилились квазипериодические процессы с периодами 60÷120 мин во все рассматриваемые сутки. Их относительная амплитуда достигла 0,15÷0,3, а длительность составила 1÷2 периода.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛОСОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Для более точной высотно-временной локализации и оценки параметров волнового возмущения с периодом около 30 мин, соответствующим циклическому режиму работы стенда «Сура», была проведена полосовая фильтрация вариаций δ_N . Результаты обработки для ряда высот представлены на рис. 5 и 6.

Из рис. 5а видно, что в интервале времени 09:00÷13:00 UT 20 сентября 2010 года на высотах 160÷200 км наблюдались отдельные пуги колебаний δ_N с относительной амплитудой 0,02÷0,025, периодом 20÷25 мин и длительностью 3÷6 периодов. В то же время, на больших высотах сигнал носил скорее ангармонический характер. Максимальные отклонения δ_N в основном составляли

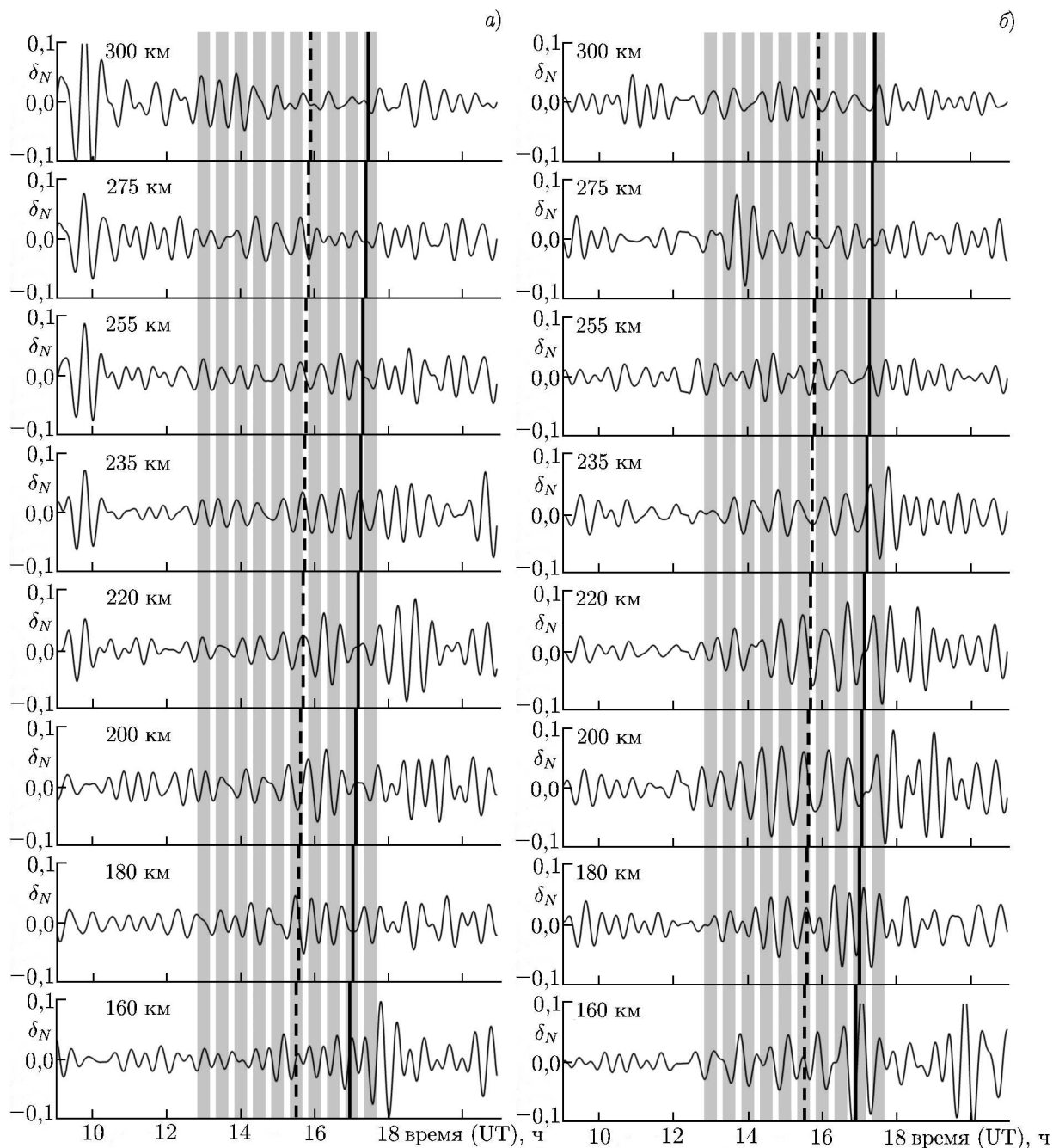


Рис. 5. Результаты применения к относительным вариациям электронной концентрации, полученным с использованием «короткого» импульса, полосовой фильтрации в диапазоне периодов 20÷40 мин для 20 (а) и 21 (б) сентября 2010 года

0,01÷0,035 на высотах 220÷300 км, лишь в 09:30÷10:00 UT имел место кратковременный всплеск δ_N , связанный с аperiодическим процессом.

После начала работы стенда «Сура» относительная амплитуда вариаций δ_N на высотах 160÷220 км существенно не изменилась. На высотах 200 и 220 км примерно через 40 мин после первого включения стенда наблюдалось изменение периода преобладающего колебания с 20÷25 мин до 27÷35 мин. На высотах 235 и 300 км с 12:50÷13:00 UT появились колебания δ_N с периодами

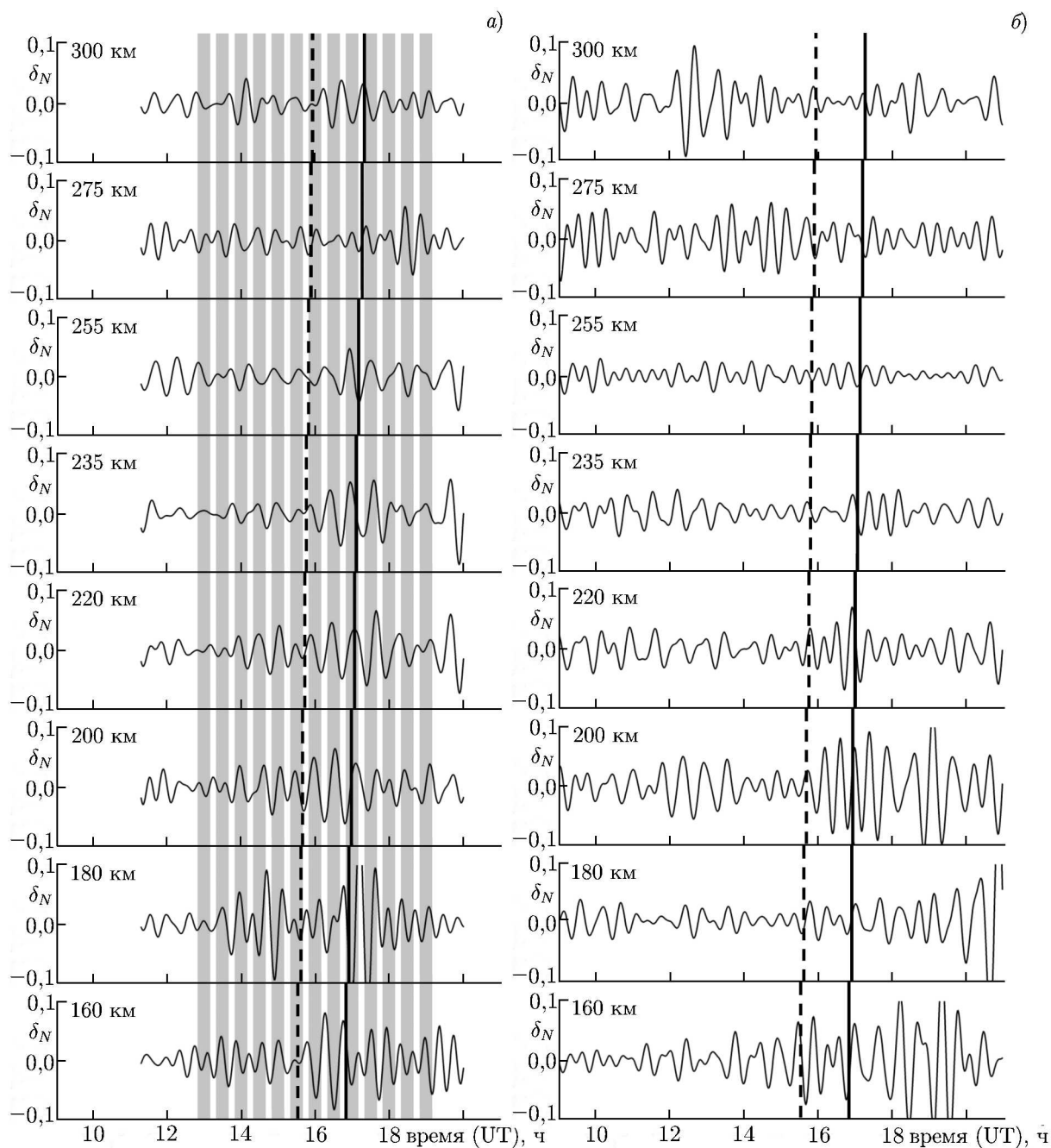


Рис. 6. То же, что и на рис. 5, для 23 сентября 2010 года (а) и 23 сентября 2008 года (б)

около 25 и 30 мин и относительными амплитудами 0,020 и 0,045 соответственно, длительность которых не превысила трёх периодов. Увеличение вариаций δ_N на несколько процентов также имело место вблизи и после прохождения магнитосопрежённого и местного солнечных терминаторов на высотах 160÷255 км.

21 сентября 2010 года поведение δ_N было иным (рис. 5б). В интервале времени 09:00÷13:00 UT на всех высотах наблюдались отдельные пути колебаний с периодами 25÷30 мин и длительностями 2÷3 периода. При этом максимальные вариации δ_N не превышали 0,015 и 0,025 на высотах 160 и 220 км соответственно и 0,035÷0,045 на остальных высотах.

Примерно через 30÷60 мин после начала работы стенда «Сура» на высотах 160÷235 км произошло увеличение максимальных вариаций δ_N . При этом на высотах 180÷235 км сигнал стал квазипериодическим с периодом около 30 мин. Относительная амплитуда волнового возмущения примерно через 2 часа после первого включения стенда достигла максимального значения, которое для высот 180, 200, 220 и 235 км составило соответственно 0,05, 0,07, 0,07 и 0,04. На больших высотах заметного изменения характера сигнала после начала работы стенда не произошло. Наблюдавшийся на высоте 275 км около 14:00 UT всплеск сигнала, скорее всего, связан с аperiodическим процессом. Прохождение солнечных терминаторов привело к увеличению вариаций δ_N на несколько процентов на высотах 160÷235 км.

23 сентября 2010 года в период с 09:00 до 13:00 UT имели место вариации δ_N , максимальные значения которых составляли 0,020÷0,035 (рис. 6а). Примерно через 30÷60 мин после первого включения стенда «Сура» на высотах 160÷235 км также обнаружено увеличение относительной амплитуды сигнала с квазипериодом около 30 мин. Её значение достигло максимального примерно около 15:00 UT и составило для высот 160, 180, 200, 220 и 235 км соответственно 0,04, 0,09, 0,04, 0,04 и 0,02. В остальном временные вариации δ_N были подобными тем, что наблюдались 21 сентября 2010 года.

Наконец, 23 сентября 2008 года заметных изменений сигнала после 12:50 UT выявлено не было (рис. 6б). Имело место только увеличение вариаций δ_N для ряда высот после прохождения солнечных терминаторов, как и в описанные выше сутки.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Наблюдаемые над Харьковом квазипериодические вариации относительных изменений электронной концентрации с периодом около 30 мин, скорее всего, вызваны воздействием мощного радиоизлучения стенда «Сура». В пользу этого утверждения говорят следующие факты. Во-первых, увеличение относительной амплитуды волновых возмущений или изменение характера сигнала имели место во все сутки, когда проводился нагрев ионосферной плазмы. В эти сутки квазипериодические вариации δ_N наблюдались практически в одно и то же время в диапазоне высот 160÷235 км, что не было обнаружено в контрольные сутки (см. рис. 5 и 6). Во-вторых, имело место примерно одинаковое запаздывание наблюдаемых возмущений относительно начала циклического воздействия мощного радиоизлучения стенда «Сура». Наконец, волновые возмущения появлялись до прохождения не только местного, но и магнитоспряжённого солнечного терминаторов на ионосферных высотах, что указывает на то, что они, скорее всего, не связаны с естественными процессами, вызванными заходом Солнца.

Усиление волновой активности в широком диапазоне периодов и изменение характера сигнала, имевшие место после 13:30÷14:00 UT и показанные на рис. 1 и 2, могут быть обусловлены совместным влиянием на ионосферу мощного радиоизлучения и высокоэнергичных естественных процессов в системе Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера. Подобные эффекты наблюдались и в экспериментах по нагреву ионосферной плазмы, проведённых в 2009 году [12].

Оценим скорость распространения волнового возмущения с периодом $T \approx 30$ мин. Расстояние между стендом «Сура» и харьковским радаром некогерентного рассеяния $R \approx 960$ км. Из рис. 3–6 видно, что усиление волнового процесса имело место через 30÷60 мин после начала работы нагревного стенда. Если наблюдаемые возмущения вызваны первым включением стенда «Сура», то скорость их распространения лежит в пределах от 270 до 540 м/с. Если генерация волнового возмущения произошла либо в течение первого цикла нагрева, либо лишь при втором включении стенда, скорость его распространения по оценкам составит 540÷1000 м/с. Такие скорости присущи внутренним гравитационным волнам.

Как известно (см., например, [21]), фазовая и групповая скорости свободно распространяющихся внутренних гравитационных волн направлены одинаково по горизонтали и имеют противоположные направления по вертикали. Таким образом, по наклону фазового фронта волны можно судить о высотной локализации её источника.

На рис. 7 представлены линии равной фазы для различных интервалов времени для высот, на которых волновые возмущения наблюдались устойчиво. При их построении вначале определялись времена, соответствующие максимальным и минимальным значениям δ_N , а затем рассчитывалось их среднее арифметическое значение. Аппроксимация линейной зависимостью проводилась по методу наименьших квадратов. Кроме того, считалось, что фаза волны на двух соседних высотах, отстоящих на $15 \div 20$ км, не может различаться больше, чем на π радиан. Действительно, поскольку период волны $T \approx 30$ мин больше периода Брента—Вяйсяля T_g , который для F -области ионосферы составляет $10 \div 15$ мин, можно воспользоваться приближённым соотношением [21]:

$$\lambda_z/\lambda_x \approx T_g/T, \quad (1)$$

где λ_z и λ_x — вертикальная и горизонтальная длины волн соответственно. Исходя из оценок скоростей распространения внутренних гравитационных волн, приведённых выше, и выражения (1), минимальное значение λ_z составляет около 170 км. В то же время изменение фазы на двух соседних высотах на π радиан соответствует вертикальной длине волны около 40 км, что значительно меньше оценки значения λ_z .

Из рис. 7 видно, что как 21, так и 23 сентября 2010 года примерно до $13:30 \div 13:45$ UT имел место наклон линий равной фазы влево (фаза волны распространялась в вертикальном направлении сверху вниз, энергия — снизу вверх). Это может свидетельствовать о наличии волн естественного происхождения, источники которых находятся на Земле и под её поверхностью или в нижней атмосфере. Начиная с $13:45 \div 14:00$ UT и до $16:30 \div 17:00$ UT в основном наблюдались квазисинфазные колебания на всех высотах с некоторым наклоном линий равной фазы в одну или другую сторону. После $16:30 \div 17:00$ UT вновь отмечался некоторый наклон этих линий влево.

Близкие к синфазным колебания δ_N для ряда высот указывают на то, что в интервале времени $13:45 \div 17:00$ UT внутренние гравитационные волны распространялись в квазигоризонтальном направлении, т. е. имело место их каналирование в атмосферном волноводе. Как видно из рис. 5 и 6, высота этого волновода составила около 200 км, а ширина — около $80 \div 100$ км. В пользу волноводного распространения возмущений также свидетельствует высотная зависимость $\delta_N(t)$. При $z = 180 \div 220$ км наблюдались максимальные значения $\delta_N \approx 0,07 \div 0,09$. Ниже и выше величина δ_N заметно уменьшалась.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что амплитуды относительных вариаций концентрации N , вызванных воздействием мощного радиоизлучения на расстоянии около 960 км от места наблюдения, достаточно малы — составляют $2 \div 9\%$. Они сравнимы, а зачастую существенно меньше амплитуд внутренних гравитационных волн, генерируемых высокоэнергичными естественными процессами (солнечным терминатором, прохождением погодных фронтов, землетрясениями, извержениями вулканов и др.). Как показано в данной работе, только применение комплексного анализа экспериментальных данных, состоящего из предварительной и полосовой фильтрации сигнала, а также спектрального анализа, базирующегося на ряде взаимодополняющих интегральных преобразований, позволило не только выявить волновые возмущения, вызванные воздействием мощного радиоизлучения на ионосферную плазму, но и оценить ряд их характеристик (относительную амплитуду, время прихода возмущения, скорость распространения волн, длительность волновых возмущений и др.). Для более точной идентификации

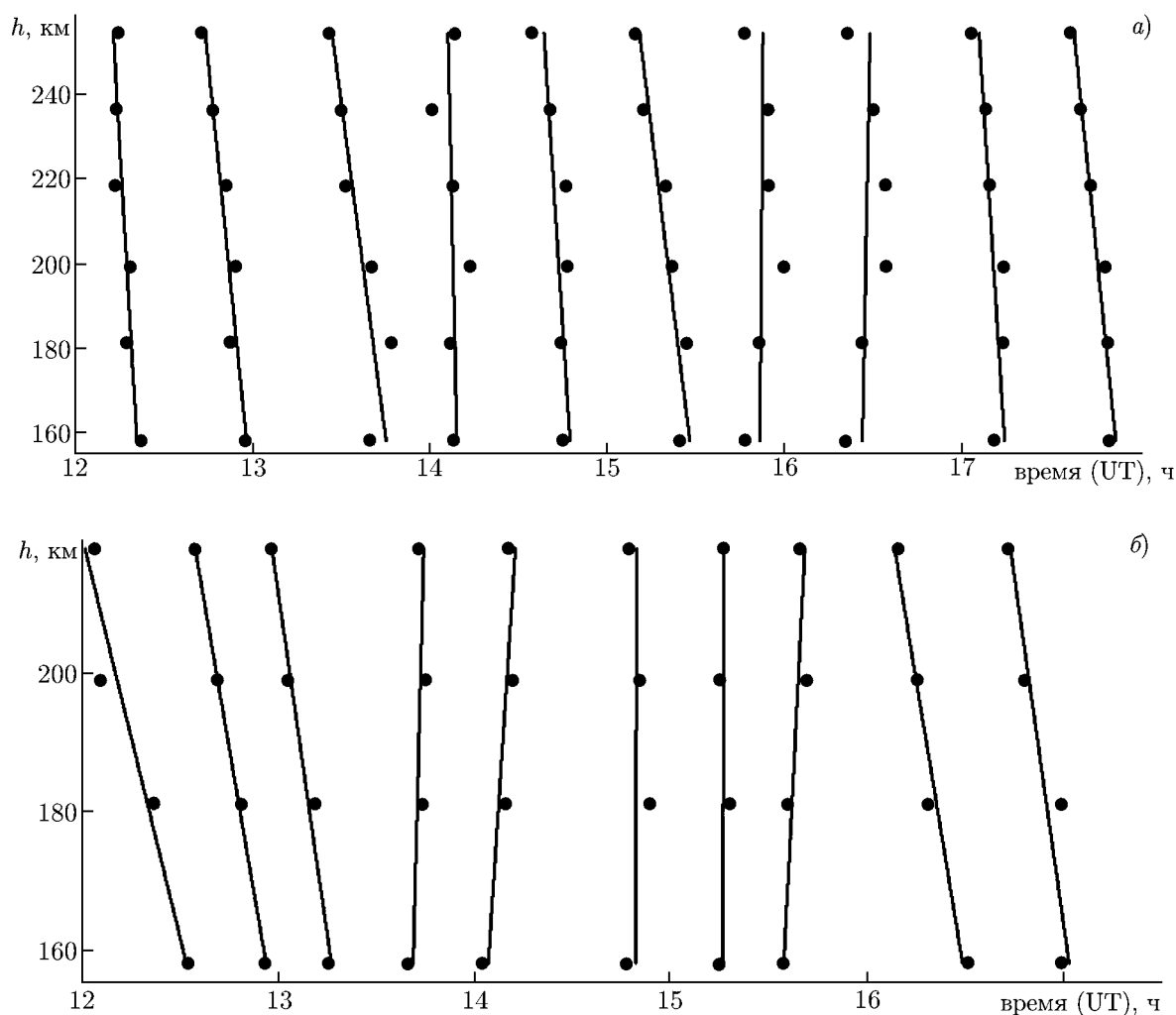


Рис. 7. Линии равной фазы волнового возмущения с квазипериодом около 30 мин, наблюдавшегося 21.09.2010 (а) и 23.09.2010 (б)

таких волновых возмущений и определения их параметров необходимо проведение систематических экспериментов.

ВЫВОДЫ

1) Обнаружено усиление волновых процессов в широком диапазоне периодов ($5 \div 120$ мин) в ионосфере над г. Харьков, а также изменение характера относительных вариаций электронной концентрации в период воздействия на ионосферную плазму мощного периодического радиоизлучения стенда «Сура», расположенного на расстоянии около 960 км от места наблюдения. Наблюдаемые эффекты могут быть связаны как с работой нагревного стенда, так и с естественными возмущениями в системе Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера.

2) Выявлено увеличение (в $1,5 \div 4$ раза) относительной амплитуды волнового возмущения с периодом около 30 мин, близким к циклическому режиму функционирования стенда «Сура», на высотах $160 \div 235$ км во все сутки после начала работы нагревного стенда.

3) Определены параметры этого волнового возмущения. Показано, что время его запаздывания относительно первого включения стенда лежало в пределах $30 \div 60$ мин, длительность состава

вила $2\div 6$ периодов, а относительная амплитуда равнялась $0,02\div 0,09$ для различных высот и в разные сутки, когда имело место воздействие мощного радиоизлучения.

4) Оценены скорости распространения возмущения с периодом около 30 мин. Показано, что они соответствуют скоростям внутренних гравитационных волн. Продемонстрировано, что имело место каналирование этих волн в атмосферном волноводе, высота которого была близка к 200 км, а ширина — $80\div 100$ км.

5) Продемонстрировано, что применение комплексного анализа экспериментальных данных, включающего статистические методы обработки, спектральный анализ с использованием набора взаимодополняющих интегральных преобразований и полосовую фильтрацию, позволило выявить волновые возмущения, вызванные мощным радиоизлучением, относительная амплитуда которых сравнима или значительно меньше амплитуд волновых возмущений естественного происхождения.

Авторы выражают благодарность Л. Я. Емельянову, А. Ф. Кононенко, И. Б. Склярову и С. В. Черняеву за обеспечение функционирования радара некогерентного рассеяния Института ионосферы, а также Г. П. Комракову за обеспечение работы стенда «Сура».

Работа В. П. Урядова выполнена при поддержке РФФИ (грант 12-02-00177).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973. 272 с.
2. Gurevich A. V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. New York, Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag, 1978. 465 p.
3. Митяков Н. А., Грач С. М., Митяков С. Н. // Итоги науки и техники. Сер. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы. 1989. Т. 9. С. 140.
4. Гуревич А. В. // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
5. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шварцбург А. Б. // Компьютерная оптика. 1989. Вып. 6. С. 62.
6. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. // Электромагнитные явления. 1998. Т. 1, № 1. С. 90.
7. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. // Успехи современной радиоэлектроники. 1998. № 6. С. 17.
8. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2003. Т. 8, № 1. С. 59.
9. Черногор Л. Ф. // Нелинейный мир. 2006. Т. 4, № 12. С. 655.
10. Черногор Л. Ф. // Нелинейный мир. 2007. Т. 5, № 4. С. 198.
11. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2008. 528 с.
12. Бурмака В. П., Домнин И. Ф., Урядов В. П., Черногор Л. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 11. С. 859.
13. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф., Панасенко С. В., Урядов В. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 3. С. 173.
14. Белов И. Ф., Бычков В. В., Гетманцев Г. Г. и др. Экспериментальный комплекс «Сура» для исследования искусственных возмущений ионосферы: Препринт № 167 НИРФИ. Горький, 1983. 25 с.
15. Беленов А. Ф., Белов И. Ф., Бенедиктов Е. А. и др. Стенд «Сура». Обзор результатов исследований. Препринт № 343 НИРФИ. Нижний Новгород, 1992. 71 с.
16. Таран В. И. // Вестник Харьковского политехнического института: Исследование ионосферы методом НР. 1979. Т. 155, вып. 1. С. 3.

17. Пуляев В. А., Дзюбанов Д. А., Домнин И. Ф. Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн. Харьков: Нац. техн. ун-т Харьковский политехн. ин-т, 2011. 240 с.
18. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. // Успехи современной радиоэлектроники. 2005. № 3. С. 4.
19. Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48, № 5. С. 681.
20. Лизунов Г. В., Кузьмич А. А. // Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт». 2010. № 48. С. 57.
21. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 521 с.

Поступила в редакцию 18 апреля 2012 г.; принята в печать 27 апреля 2012 г.

RESULTS OF RADIOPHYSICAL STUDIES OF THE WAVE PROCESSES IN THE IONOSPHERIC PLASMA DURING ITS HEATING BY HIGH-POWER RADIO EMISSION OF THE SURА FACILITY

I. F. Domnin, S. V. Panasenko, V. P. Uryadov, and L. F. Chernogor

We present the results of observations of the wave disturbances in the ionospheric F region above Kharkov, which accompanied the impact on the ionosphere by high-power radio emission of the Sura heating facility located about 960 km from the place of observation. Enhancement of the wave activity in the heater operation intervals is detected. A 1.5–4-fold increase in the relative amplitude of wave disturbance with a period of about 30 min close to the operation mode of the Sura facility at altitudes 160–235 km is revealed. The parameters of this disturbance are evaluated. It is shown this effect can be due to the propagation of internal gravity waves in the atmospheric waveguide having about 200 km in height and 80–100 km in width. Efficiency of the comprehensive analysis of experimental data we used to reveal and estimate the parameters of the wave disturbances with small (a few percent) relative amplitude is demonstrated.