

УДК 550.388, 520.16;
523.31; 523.9:520.86

Л. Ф. ЧЕРНОГОР^{1,2}, В. В. БАРАБАШ²

¹ Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

² Институт ионосферы НАН и МОНМС Украины,
ул. Краснознаменная, 16, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: Barabash_VV@ukr.net

ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В СЛОЕ F2 ИОНОСФЕРЫ: СЕЗОННО-СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ

Проанализированы регулярные и квазипериодические сезонно-суточные вариации концентрации электронов в слое F2 ионосферы в период роста солнечной активности (в 2011 г.). Для системного спектрального анализа применялось оконное преобразование Фурье, адаптивное преобразование Фурье и вейвлет-преобразование. Во все сезоны в слое F2 ионосферы проявлялось преобладающее колебание с периодом $140 \div 200$ мин, амплитудой $(0.2 \div 2) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, относительной амплитудой $0.1 \div 0.2$. Длительность этого колебания в зависимости от сезона изменялась от $5 \div 7$ до 24 ч. Амплитуда колебаний с другими периодами была заметно меньше.

Ключевые слова: метод вертикального зондирования, сезонно-суточная зависимость, концентрация электронов, регулярные и квазипериодические возмущения, системный спектральный анализ, внутренние гравитационные волны

1. Введение

Ионосфера – один из основных каналов распространения радиоволн. Она существенно влияет на характеристики радиоволн с длинной волны от сантиметров до тысяч километров (см., например, [1–5]). Особую роль играют нестационарные процессы в ионосфере. Именно они ограничивают потенциальные характеристики систем радиолокации, радионавигации и телекоммуникаций (см., например, [2]).

Среди нестационарных процессов в ионосфере важное место занимают квазипериодические (волновые) процессы. Их исследованию посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ (см., например, [6–24]). Несмотря на это, систематическое изучение таких процессов только начинается (см., например [25–27]). Ведущую роль в исследовании волновых процессов играют радиофизические методы. К ним относятся методы некогерентного рассеяния, доплеровского зондирования, частичных отражений, вертикального зондирования и др. (см., например, [24–27]).

Для построения модели волновых процессов в ионосфере требуются непрерывные наблюдения в глобальных масштабах. Пока это невозможно. Поэтому исследователи ограничиваются измерениями для характерных геофизических периодов [25–27]. К ним относятся весеннее и осен-

нее равноденствия, а также летнее и зимнее солнцестояния.

Цель настоящей работы – исследование сезонно-суточных вариаций концентрации электронов и ее волновых возмущений в максимуме слоя F2 ионосферы в период роста солнечной активности (в 2011 г.).

2. Средства и методы

2.1. Ионозонд

Наблюдения ионосферы осуществлялись с помощью модифицированного ионозонда “Базис” с цифровой регистрацией параметров отраженного сигнала. Ионозонд расположен в Ионосферной обсерватории Института ионосферы вблизи г. Харькова ($49^{\circ}36'$ с. ш., $36^{\circ}18'$ в. д.).

Передачик ионозонда “Базис” работает в диапазоне частот $0.3 \div 20$ МГц. Выходная мощность составляет 10 кВт, длительность излучаемого импульса – 100 мкс. Частота следования импульсов может изменяться от 3.125 до 25 Гц.

Приемное устройство ионозонда “Базис” создано на основе супергетеродина с преобразованием частоты: в диапазоне частот от 0.3 до 2.3 МГц – с двойным преобразованием, от 2.3 до 40 МГц – с тройным.

Приемная и передающая антенны ионозонда идентичны и расположены ортогонально. Каждая из антенн состоит из двух широкополосных вертикальных ромбов. Малый ромб рабо-

тает в диапазоне частот $6 \div 20$ МГц, большой – в диапазоне $0.3 \div 6$ МГц.

Темп регистрации ионограмм – одна ионограмма каждые 15 мин.

Погрешность отсчета частоты на ионограммах – 25 кГц.

2.2. Методика анализа

Для спектрального анализа использовались оконное преобразование Фурье (ОПФ), адаптивное преобразование Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразование (ВП). Формат представления данных анализа такой же, как в работе [28].

Далее для ОПФ и АПФ в работе используются следующие выражения:

$$P_S(T, \tau) = \sqrt{\frac{2}{t_{wS}}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g\left(\frac{t-\tau}{t_{wS}/2}\right) \exp\left(-i \frac{2\pi t}{T}\right) dt,$$

$$P_A(T, \tau) = \sqrt{\frac{2}{vT_v}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) g\left(\frac{t-\tau}{vT_v/2}\right) \exp\left(-i \frac{2\pi}{T_v}(t-\tau)\right) dt,$$

где t_{wS} – ширина окна для ОПФ; физический смысл величин $T = 2\pi/\omega$ и $T_v = 2a/v$ – периоды колебаний.

В настоящей работе для ОПФ и АПФ в качестве $g(t)$ использовалось окно Хемминга, имеющее вид

$$g_H(t) = \gamma(0.54 + 0.46 \cos \pi t),$$

где $\gamma \approx 1.12$ – нормирующий множитель, t – безразмерное время.

Непрерывное ВП функции $f(t)$ осуществлялось на основании выражения

$$P_W(a, b) = \frac{1}{a^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$$

где символом “*” обозначено комплексное сопряжение, а разложение производится по базису вейвлетов

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{a^{1/2}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right),$$

в котором a – параметр масштабирования ($a > 0$), b – параметр сдвига.

Для ВП в качестве $\Psi(t)$ применялся вейвлет Морле.

Кроме функций $P_S(T, \tau)$, $P_A(T, \tau)$ и $P_W(T, \tau)$, в работе используются также энергограммы, т. е. распределения энергии по периодам [28]:

$$E_S(T) = \int_{-\infty}^{\infty} P_S(T, \tau) d\tau, \quad E_A(T) = \int_{-\infty}^{\infty} P_A(T, \tau) d\tau,$$

$$E_W(T) = \int_{-\infty}^{\infty} P_W(T, \tau) d\tau.$$

Системный спектральный анализ выполнен для диапазона периодов $30 \div 360$ мин.

2.3. Состояние космической погоды

Состояние солнечной активности оценивалось по числам Вольфа W и индексу $F10.7$, а геомагнитной активности – по индексам K_p , D_{st} , AE (табл. 1). Из табл. 1 видно, в периоды измерений Солнце оставалось спокойным. Состояние геомагнитного поля было также невозмущенным. Поэтому описанные ниже вариации концентрации электронов были вызваны суточными и сезонными процессами.

3. Сезонно-суточные вариации концентрации электронов

3.1. Регулярные вариации

Во время весеннего и осеннего равноденствий временные вариации концентрации электронов N в максимуме слоя F2 в целом были подобными (рис. 1, а и в). В интервале времени $00:00 - 04:00$ (здесь и далее указано местное время (LT)) $N \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. После восхода Солнца на высотах слоя F2 концентрация электронов постепенно увеличивалась до значений $(6 \div 7) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ в период весеннего равноденствия и до значений $(1.0 \div 1.1) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ в период осеннего равноденствия. Максимальное значение N имело место в интервалах времени $12:00 - 13:00$ и $10:00 - 12:00$ в периоды осеннего и весеннего равноденствий соответственно. Затем наблюдалось медленное уменьшение N до $(5 \div 7) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ до момента захода Солнца на уровне земли. После захода Солнца в ионосфере скорость уменьшения N увеличивалась. К $22:00$ достигалось минимальное значение N (около $(2 \div 3) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$).

Рассмотрим временные изменения концентрации электронов в период летнего солнцестояния. В этот период Солнце на высотах более 300 км не заходит. С $00:00$ и до $04:00$ имело место падение N примерно от $(3 \div 4) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ до $(2 \div 2.5) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ (рис. 1, б). Затем наблюдался рост N до

Таблица 1. Состояние космической погоды

Дата	W	F10.7	K _p		D _{st} , нТл		AE, нТл	
			max	min	max	min	max	min
22 марта 2011 г.	32	100	3.3	0	13	-17	345	23
23 марта 2011 г.	30	105	3.3	2	8	-12	587	51
24 марта 2011 г.	39	108	1.7	0.7	6	-3	89	22
20 июня 2011 г.	26	96	2.7	1	12	-13	472	49
21 июня 2011 г.	33	95	2.7	1	9	-5	445	64
22 июня 2011 г.	33	93	4	1.3	9	-10	552	64
19 сентября 2011 г.	92	141	1	0	1	-20	107	17
20 сентября 2011 г.	80	144	3	0.7	-2	-16	280	29
21 сентября 2011 г.	70	144	2	0	4	-11	417	18
20 декабря 2011 г.	72	137	2.7	0.7	4	-11	359	23
21 декабря 2011 г.	73	145	2.7	0.3	5	-20	470	20
22 декабря 2011 г.	69	146	2.7	0.3	-7	-21	157	25

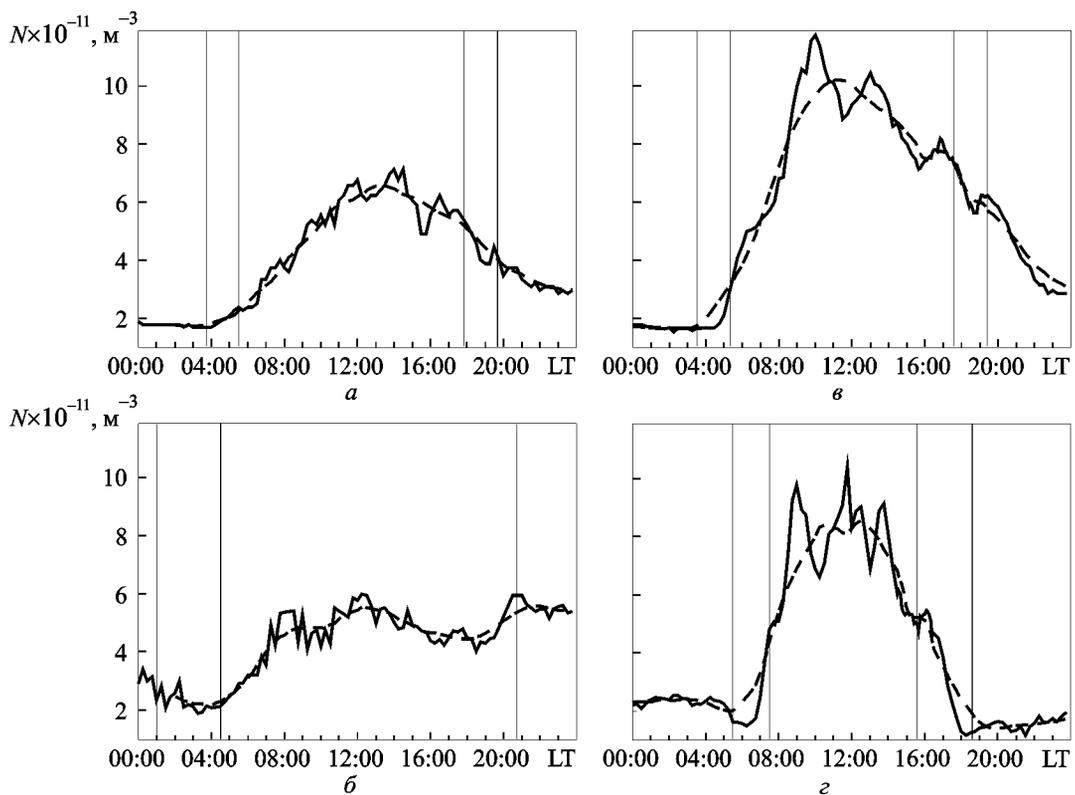


Рис. 1. Временные вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2 23 марта 2011 г. (а), 21 июня 2011 г. (б), 20 сентября 2011 г. (в), 21 декабря 2011 г. (г). Штриховая линия – результат усреднения на интервале времени 3 ч. Вертикальными линиями здесь и далее показаны моменты восхода Солнца на высотах 300 и 0 км и моменты захода Солнца на высотах 0 и 300 км.

$(5 \div 6) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, который начался в интервале времени 09:00–10:00. После 10:00–12:00 возникло кратковременное уменьшение N до $4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Далее имел место вечерний рост N . Максималь-

ные значения N в вечернее время достигали $5.5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ примерно в 20:00.

Далее опишем суточные вариаций N в период зимнего солнцестояния (рис. 1, г). В интервале

времени с 19:00 до 05:00 (следующих суток) значения N были близки к $2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. С 06:00 и до 10:00–11:00 наблюдался рост N до значений $(8 \div 10) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. После 11:00–12:00 в течение 6 ч концентрация N уменьшилась до ночных значений ($2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$).

В дни, соседствующие с днями равноденствий и солнцестояний, временные вариации N в целом были подобными.

На регулярные изменения $N(t)$ накладывались квазипериодические возмущения.

3.2. Нерегулярные вариации

В период весеннего равноденствия возмущения концентрации электронов ΔN носили квазипериодический характер (рис. 2, *а*, верхняя панель). В ночное время амплитуда колебаний электронной концентрации ΔN_a составляла около $(1 \div 2) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, а в дневное время – $(5 \div 6) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, т. е. в 3–5 раз больше (рис. 2, *а*, верхняя панель).

Вблизи летнего солнцестояния возмущения $\Delta N(t)$ были достаточно хаотичными, но и в них выделялись квазипериодические колебания, амплитуда которых практически не зависела от времени суток и составляла $(2 \div 5) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ (рис. 2, *б*, верхняя панель).

В период осеннего равноденствия в ночное время $\Delta N_a \approx (1 \div 5) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, а в дневное время – $\Delta N_a \approx (1.0 \div 1.5) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, т. е. в 3–10 раз больше (рис. 2, *в*, верхняя панель).

Вблизи зимнего солнцестояния возмущения ΔN также существенно зависели от времени суток. В ночное время $\Delta N_a \approx 2 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, а в дневное время $\Delta N_a \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ (рис. 2, *г*, верхняя панель). Различие между значениями ΔN_a достигало порядка величины.

Временные вариации относительных возмущений концентрации электронов $\delta_N = \Delta N / \bar{N}$, где $\bar{N}(t)$ – вариации регулярных значений N , приведены на верхних панелях рис. 3. Из этих рисунков видно, что зависимости $\delta_N(t)$ в основном повторяют зависимости $\Delta N(t)$.

В период весеннего равноденствия максимальные значения δ_N имели место в дневное время. Они достигали значения 0.15, но в среднем амплитуда колебаний δ_{Na} была около 0.1 (см. рис. 3, *а*).

В конце июня суточные вариации δ_N практически отсутствовали. Флуктуации δ_N обычно не превышали ± 0.15 , в среднем их амплитуда составляла 0.1 (см. рис. 3, *б*).

Во время осеннего равноденствия вариации $\delta_N(t)$ были подобны вариациям во время весеннего равноденствия. В среднем $\delta_{Na} \approx 0.1$ (см. рис. 3, *в*).

В период зимнего солнцестояния флуктуации δ_N достигали ± 0.4 (см. рис. 3, *г*). В среднем $\delta_{Na} \approx 0.2$.

4. Результаты спектрального анализа

4.1. Спектральный состав сезонно-суточных вариаций абсолютных возмущений концентрации электронов

В период весеннего равноденствия в дневное время преобладали колебания N с медленно увеличивающимся периодом T от 140 до 230 мин и продолжительностью $\Delta T \approx 10 \div 12$ ч, эпизодически наблюдалось также колебание с $T \approx 40$ мин и $\Delta T \approx 1 \div 2$ ч (см. рис. 2, *а*). В вечернее время имело место колебание с $T \approx 60 \div 100$ мин.

Вблизи летнего солнцестояния в дневное и ночное время преобладали колебания с $T \approx 200$ мин (см. рис. 2, *б*). Их продолжительность $\Delta T \approx 5$ ч. Кроме этих колебаний, наблюдались процессы с $T \approx 100 \div 150$ мин, их амплитуда была примерно в 2 раза меньше преобладающих колебаний. Эпизодически возникали также колебания с $T \approx 40$ мин и $\Delta T \approx 1 \div 2$ ч.

В период осеннего равноденствия в утреннее и дневное время было ярко выражено колебание с $T \approx 170 \div 210$ мин (см. рис. 2, *в*). Его продолжительность была не меньше 10 ч. В вечернее и ночное время основным было колебание с $T \approx 230 \div 300$ мин и $\Delta T \approx 6 \div 7$ ч.

Во время зимнего солнцестояния утром и днем преобладали колебания с периодами 120–160 и 180–220 мин (см. рис. 2, *г*). Их продолжительность составляла 5–6 ч. В вечернее и ночное время период преобладающего колебания был близок к 180–220 мин, $\Delta T \approx 5 \div 6$ ч.

4.2. Спектральный состав сезонно-суточных вариаций относительных возмущений концентрации электронов

Результаты спектрального анализа $\delta_N(t)$ представлены на рис. 3. Из рис. 3, *а* видно, что во время весеннего равноденствия днем период основного колебания был близок к 120–160 мин. В предзаходное и ночное время четко выделялись два колебания с периодами около 60–70 и 180–220 мин.

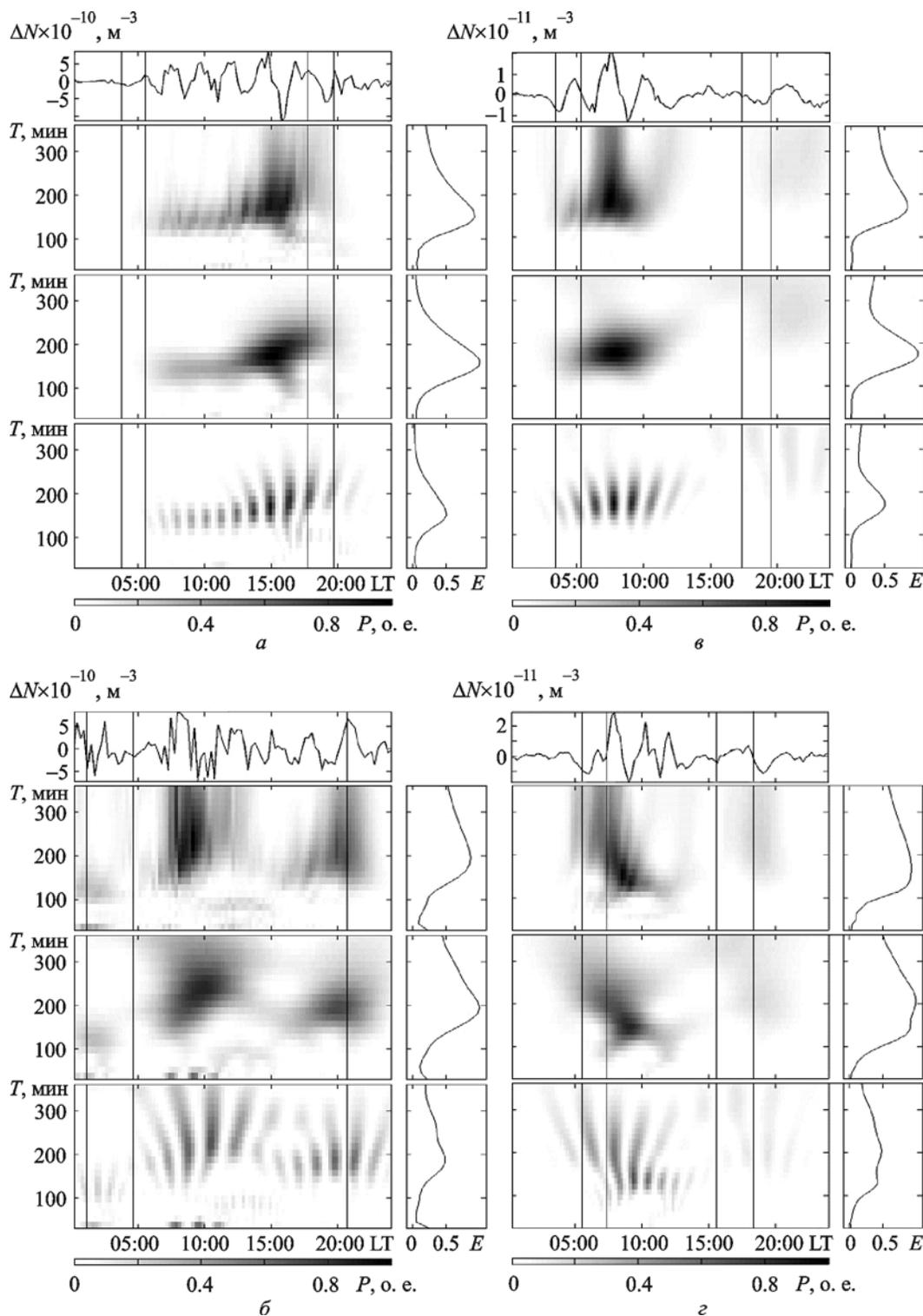


Рис. 2. Зависимости $\Delta N(t)$ для 23 марта 2011 г. (а), 21 июня 2011 г. (б), 20 сентября 2011 г. (в) и 21 декабря 2011 г. (г), а также результаты спектрального анализа при помощи ОПФ, АПФ, и ВП (панели сверху вниз) и соответствующие энергограммы (справа)

Вблизи летнего солнцестояния в течение почти всех суток 21 июня 2011 г. преобладало колебание с $T \approx 150 \div 240$ мин. Кроме него, эпизоди-

чески возникали колебания с периодами $100 \div 120$ и около 300 мин (см. рис. 3, б). Их продолжительность составляла от 4 до 6 ч.

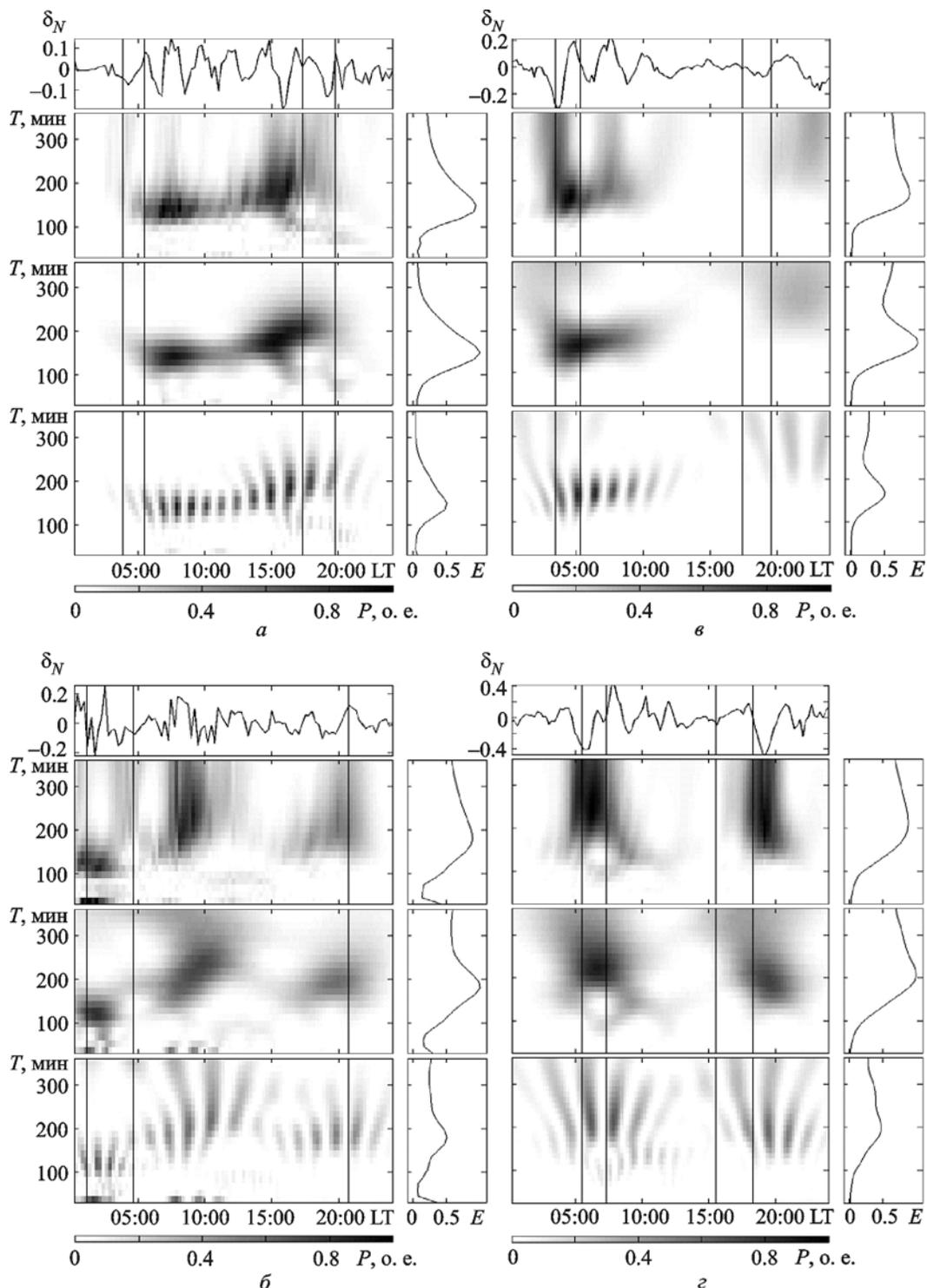


Рис. 3. Зависимости $\delta_N(t)$ для 23 марта 2011 г. (а), 21 июня 2011 г. (б), 20 сентября 2011 г. (в), 21 декабря 2011 г. (г) и результаты ОПФ, АПФ, и ВП (панели сверху вниз), а также соответствующие энергограммы (справа)

Во время осеннего равноденствия утром и днем преобладало колебание с $T \approx 140 \div 190$ мин. Его продолжительность достигала 10 ч (см. рис. 3, в). Ночью главным было колебание с $T \approx 230 \div 300$ мин и $\Delta T \approx 6 \div 7$ ч.

В период зимнего солнцестояния наибольшие вариации $\delta_N(t)$ имели место при прохождении солнечных терминаторов и в течении $4 \div 5$ ч после этого (см. рис. 3, г). Период основного колебания составлял $180 \div 240$ мин. Кроме этого колебания,

эпизодически наблюдались также колебания с периодами $60 \div 110$ и $280 \div 330$ мин. Для них $\Delta T \approx 6 \div 10$ ч.

5. Обсуждение

Сезонно-суточные вариации регулярных значений \bar{N} полностью соответствуют имеющимся представлениям о физико-химических процессах в ионосфере (см., например, [29, 30]). Полученные данные хорошо согласуются с измеренными методом некогерентного рассеяния значениями \bar{N} в данном регионе в период роста солнечной активности [31].

Остановимся подробнее на квазипериодических вариациях концентрации электронов. Обобщенные сведения об этих вариациях приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что наибольшие значения амплитуд ΔN_a имели место в зимнее время, несколько меньшие значения – в осеннее время. В ночное время (кроме периода, близкого к летнему солнцестоянию) амплитуда ΔN_a в $3 \div 10$ раз меньше, чем в дневное время.

Относительные амплитуды квазипериодических изменений концентрации электронов в дневное время были близки к 0.1, а в период зимнего солнцестояния достигали 0.2. В ночное время значение δ_N во все сезоны были примерно в 2 раза меньше, чем в дневное время.

Период преобладающих колебаний в различные сезоны года составлял 140, 180, 175 и 200 мин (см. табл. 2). Этот период близок к периоду третьей гармоники приливных процессов в атмосфере, равному 180 мин. Эпизодически появлялось также колебание с меньшими δ_N и периодами около 60, 100, 220 и 300 мин. Возможно, что эти периоды относятся к гармоникам единого процес-

са с периодом около 300 мин. Волновые процессы с указанными периодами и амплитудами свойственны внутренним гравитационным волнам.

Продолжительность преобладающих колебаний была значительной: от $5 \div 7$ до 24 ч (в период летнего солнцестояния).

Оказалось, что суточные вариации $\Delta N(t)$ и $\delta_N(t)$ в основном отслеживали суточные изменения $\bar{N}(t)$. Коэффициенты взаимной корреляции значений амплитуды ΔN_a и \bar{N} , а также δ_{N_a} и \bar{N} составляли $0.6 \div 0.8$ для различных сезонов.

Полученные сведения о квазипериодических процессах в максимуме слоя F2 в целом хорошо согласуются с результатами наших наблюдений в этом же регионе на радаре некогерентного рассеяния (см., например, [25–27]).

6. Выводы

1. Регулярные сезонно-суточные вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2 полностью соответствуют существующим представлениям о физико-химических процессах в ионосфере и данным других исследований.

2. На регулярный ход $N(t)$ накладывались квазипериодические вариации концентрации электронов.

3. Во все сезоны в слое F2 ионосферы проявлялось преобладающее квазипериодическое колебание N с периодом $140 \div 200$ мин, имевшее амплитуду $(0.2 \div 2) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ и относительную амплитуду, равную $0.1 \div 0.2$.

4. Продолжительность преобладающего колебания составляла $5 \div 7$ ч, а в период летнего солнцестояния достигала 24 ч.

5. Эпизодически в спектре вариаций N возникали также колебания с периодами от $60 \div 100$

Таблица 2. Основные параметры квазипериодических процессов в дневное (ночное) время

Сезон	Амплитуда колебаний, м^{-3}	Относительная амплитуда колебаний	Период преобладающего колебания, мин	Продолжительность квазипериодического процесса, ч
Весеннее равноденствие	$(5 \div 6) \cdot 10^{10}$ $((1 \div 2) \cdot 10^{10})$	0.1 (0.05)	$120 \div 160$ $(60 \div 70, 180 \div 220)$	15
Летнее солнцестояние	$(2 \div 5) \cdot 10^{10}$	0.1 (0.1)	$150 \div 240$ $(100 \div 120, 300)$	24 (4 ÷ 6)
Осеннее равноденствие	$(1.0 \div 1.5) \cdot 10^{11}$ $((1 \div 5) \cdot 10^{10})$	0.1 (0.05)	$140 \div 190$ $(230 \div 300)$	10 (6 ÷ 7)
Зимнее солнцестояние	$2 \cdot 10^{11}$ $(2 \cdot 10^{10})$	0.2 (0.1)	$180 \div 240$ $(60 \div 110, 280 \div 330)$	$5 \div 6$ (6 ÷ 10)

до 300 мин. Их амплитуда была в несколько раз меньше амплитуды преобладающего колебания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Альперт Я. Л.* Распространение электромагнитных волн и ионосфера. – М.: Наука, 1972. – 564 с.
2. *Кравцов Ю. А., Фейзулин З. И., Виноградов А. Г.* Прохождение радиоволн через атмосферу Земли. – М.: Радио и связь, 1983. – 224 с.
3. *Davies K.* Ionospheric radio. – London: Peter Peregrinus Ltd, 1990. – 580 p.
4. *Яковлев О. Н.* Космическая радиофизика. – М.: Научная книга, 1998. – 432 с.
5. *Яковлев О. Н., Якубов В. П., Урядов В. П., Павельев А. Г.* Распространение радиоволн / Под ред. О. Н. Яковлева. – М.: ЛЕНАНД, 2009. – 496 с.
6. *Дикий Л. А.* Теория колебаний земной атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 196 с.
7. *Yeh K. S. and Liu C. H.* Theory of ionospheric waves. – N. Y., London: Academic Press, 1972. – 464 p.
8. *Veer T.* Atmospheric waves. – N.Y.: Halsted Press, 1974. – 315 p.
9. *Гершман Б. Н.* Динамика ионосферной плазмы. – М.: Наука, 1974. – 256 с.
10. *Госсард Э. Э., Хук У. Х.* Волны в атмосфере. – М.: Мир, 1978. – 532 с.
11. *Авакян С. В., Дробжев В. И., Краснов В. М., Кудряшев Г. С., Лазарев А. И., Николаев А. Г., Рязанова Л. Д., Севастьянов В. И., Яковец А. Ф.* Волны и излучение верхней атмосферы. – Алма-Ата: Наука, 1981. – 167 с.
12. *Сорокин В. М., Федорович Г. В.* Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. – М.: Энергоиздат, 1982. – 136 с.
13. Волновые возмущения в ионосфере / Под ред. В. И. Дробжева. – Алма-Ата: Наука, 1987. – 172 с.
14. *Hines C. O.* Internal gravity waves at ionospheric heights // *Can. J. Phys.* – 1960. – Vol. 38, No. 11. – P. 1441–1481.
15. *Tolstoy I.* Long-Period Gravity Waves in the Atmosphere // *J. Geophys. Res.* – 1967. – Vol. 72, No. 18. – P. 4605–4622.
16. *Chimonas G.* Observations of Waves in the Ionosphere // *Planet Space Sci.* – 1970. – Vol. 18, No. 4. – P. 591–605.
17. *Yeh K. C. and Liu C. H.* Acoustic gravity waves in the upper atmosphere // *Rev. Geophys. Space Phys.* – 1974. – Vol. 12, No. 2. – P. 193–216.
18. *Francis S. H.* A Theory of Medium-Scale Travelling Ionospheric Disturbances // *J. Geophys. Res.* – 1974. – Vol. 79, No. 34. – P. 5245–5260.
19. *Francis S. H.* Global propagation of atmospheric gravity waves: a review // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1975. – Vol. 37, No. 5. – P. 1011–1054.
20. *Григорьев Г. С., Чунгузов Е. П.* Акустико-гравитационные волны в атмосфере. В кн.: Полярные сияния и свечения ночного неба. – М.: Наука, 1975. – С. 5–21.
21. *Пономарев Е. А., Ерущенков А. И.* Инфразвуковые волны в атмосфере Земли (Обзор) // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 1977. – Т. 20, №12. – С. 1773–1789.
22. *Williams P. J. S.* Tides, atmospheric gravity waves and travelling disturbances in the ionosphere. In: *Modern ionospheric science. A collection of articles published on the occasion of the anniversary: “50 years of ionospheric research in Lindau”.* – Katlenburg – Lindau: EGP, 1996. – P. 136–180.
23. *Григорьев Г. И.* Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 1999. – Т. 42, №1. – С. 3–25.
24. Электромагнитные проявления геофизических эффектов в Антарктиде / Под ред. Л. Н. Литвиненко, Ю. М. Ямпольского. – Харьков: Радиоастрономический ин-т НАН Украины, 2005. – 331 с.
25. *Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф.* Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния // *Успехи современной радиоэлектроники.* – 2005. – № 3. – С. 4–35.
26. *Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф.* Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 1. Результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния // *Геомагнетизм и аэронаука.* – 2006. – Т. 46, № 2. – С. 193–208.
27. *Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф.* Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 2. Анализ результатов наблюдений и моделирование // *Геомагнетизм и аэронаука.* – 2006. – Т. 46, № 2. – С. 209–218.
28. *Черногор Л. Ф.* Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // *Геомагнетизм и аэронаука.* – 2008. – Т. 48, № 5. – С. 681–702.
29. *Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А.* Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 527 с.
30. *Schunk R. W. and Nagy A. F.* Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry. In: *Dessler A. J., Houghton J. I., Pycroft M. J., editors. Cambridge atmospheric and space science series.* – Cambridge University Press, 2000. – 555 p.
31. *Ляшенко М. В., Пуляев В. А., Черногор Л. Ф.* Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период роста солнечной активности // *Космічна наука і технологія.* – 2006. – Т. 12, № 5/6. – С. 58–68.

Л. Ф. Черногор^{1,2}, В. В. Барабаш²

¹Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

²Інститут іоносфери НАН і МОНМС України, вул. Червонопрапорна, 16, м. Харків, 61002, Україна

ХВИЛЕВІ ЗБУРЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЕЛЕКТРОНІВ У ШАРІ F2 ІОНОСФЕРИ: СЕЗОННО-ДОБОВІ ВАРІАЦІЇ

Проаналізовано регулярні та квазіперіодичні сезонно-добові варіації концентрації електронів у шарі F2 іоносфери в період зростання сонячної активності (у 2011 р.). Для системного спектрального аналізу застосовувалося віконне перетворення Фур'є, адаптивне перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення. В усі сезони в шарі F2 іоносфери спостерігалось переважаче коливання з періодом $140 \div 200$ хв, амплітудою $(0.2 \div 2) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, відносною амплітудою $0.1 \div 0.2$. Тривалість цього коливання залежно від сезону змінювалась від $5 \div 7$ до 24 год. Амплітуда коливань з іншими періодами була помітно меншою.

L. F. Chernogor^{1,2} and V. V. Barabash²

¹V. Kazarin National University of Kharkiv,
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

²Institute of Ionosphere, National Academy of Sciences
of Ukraine and Ministry of Education and Science, Youth
and Sports of Ukraine,
16, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

WAVE DISTURBANCES OF ELECTRON DENSITY
IN IONOSPHERIC F2 LAYER:
SEASONAL-DIURNAL VARIATIONS

Regular and quasiperiodic seasonal and diurnal variations
of electron density in ionospheric F2-layer in growth of solar

activity (2011) are analyzed. Short-time Fourier transform, adaptive Fourier transform and wavelet transform were applied to the system spectral analysis. During all seasons, a prevailing oscillation with the period of $140 \div 200$ min, amplitude $(0.2 \div 2) \cdot 10^{11} \text{ m}^{-3}$, relative amplitude $0.1 \div 0.2$ had been shown in ionospheric F2-layer. Duration of this oscillation, depending on the season, varied within $5 \div 7$ to 24 h. The amplitude of fluctuations with other periods was noticeably smaller.

Статья поступила в редакцию 12.09.2012