

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra22.03.212>УДК 550.388.4, 520.16,
523.31, 523.9:520.86

PACS numbers: 94.20.dj

Л. Ф. ЧЕРНОГОР¹, В. В. БАРАБАШ²¹ Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua² Институт ионосферы НАН и МОН Украины,
ул. Кирпичова, 16, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: Barabash_VV@ukr.net

ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В СЛОЕ F2 ИОНОСФЕРЫ: СУТОЧНО-СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ В ПЕРИОД СПАДА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Предмет и цель работы: Проанализированы регулярные и квазипериодические суточно-сезонные вариации концентрации электронов N в слое F2 ионосферы в период спада солнечной активности (в 2016 г.).

Методы и методология: Для системного спектрального анализа временных вариаций N применялись оконное преобразование Фурье, адаптивное преобразование Фурье и вейвлет-преобразование.

Результаты: Во все сезоны в слое F2 ионосферы проявлялось преобладающее колебание с периодом $150 \div 260$ мин, амплитудой $\Delta N_a \approx (0.4 \div 1.1) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, относительной амплитудой $\Delta N_a / \bar{N} \approx 0.09 \div 0.23$. Продолжительность этого колебания в зависимости от сезона изменялась от 13 до 17 ч. Амплитуда колебаний с другими периодами была заметно меньше.

Заключение: Регулярные суточно-сезонные вариации концентрации электронов и ее волновые возмущения в максимуме слоя F2 в периоды роста и спада солнечной активности в целом близки и полностью соответствуют существующим представлениям о физико-химических процессах в ионосфере.

Ключевые слова: ионозонд, суточно-сезонная зависимость, концентрация электронов, регулярные и квазипериодические возмущения, системный спектральный анализ, волновые возмущения

1. Введение

Ионосфера является основным каналом распространения радиоволн. Нестационарные процессы и, в частности, волновые возмущения (ВВ) в ионосфере ограничивают потенциальные характеристики систем телекоммуникации, радиопеленгации, радиолокации и радионавигации. Исследованию ВВ посвящено огромное количество теоретических и экспериментальных работ (см., например, [1–18]). Известно, что систематическое исследование таких возмущений только начинается (см., например, [19–23]).

Для построения эмпирической модели ВВ, дающей суточно-сезонные зависимости их параметров в глобальных масштабах, потребовались бы согласованные и непрерывные наблюдения во всех регионах земного шара. Поскольку такие наблюдения пока невозможны, исследователи ограничиваются измерениями для характерных геофизических периодов, а именно для летнего и зимнего солнцестояний, а также для весеннего и

осеннего равноденствий. Так поступили авторы работы [23], в которой по данным цифрового ионозонда были проанализированы суточно-сезонные вариации концентрации электронов N , абсолютной и относительной амплитуд ВВ N в максимуме слоя F2 ионосферы в период роста солнечной активности в 2011 г. Авторы [23] ограничились диапазоном периодов ВВ, равным $30 \div 360$ мин. Основные результаты работы [23] свелись к установлению следующих фактов. Во-первых, во все сезоны в слое F2 ионосферы проявлялось преобладающее квазипериодическое колебание N с периодом $140 \div 200$ мин, имеющее амплитуду $(0.2 \div 2) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ и относительную амплитуду, равную $0.1 \div 0.2$. Во-вторых, продолжительность преобладающего колебания составляла $5 \div 7$ ч, а в период летнего солнцестояния достигала 24 ч. В третьих, в спектре вариаций N эпизодически возникали также колебания с периодами от $60 \div 100$ до 300 мин. Их амплитуда была в несколько раз меньше амплитуды преобладающего колебания.

Цель настоящей работы – изучение суточно-сезонных вариаций концентрации электронов

© Л. Ф. Черногор, В. В. Барабаш, 2017

и ее ВВ в максимуме слоя F2 ионосферы в период спада солнечной активности (2016 г.), а также сравнение результатов, полученных в 2011 и 2016 гг., отстоящих друг от друга по времени примерно на полцикла солнечной активности. Важно, что средняя солнечная активность в эти периоды была близкой.

2. Средства и методы

2.1. Цифровой ионозонд

Наблюдения ионосферы осуществлялись с помощью несерийного ионозонда с цифровой регистрацией параметров отраженного сигнала. Ионозонд расположен в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (49°38' с. ш., 36°20' в. д.) вблизи г. Харькова, Украина [24].

Цифровой ионозонд включает в себя доработанные широкополосное радиопередающее устройство “Бриг-2”, радиоприемное устройство IC-R75, синтезатор прямого цифрового синтеза (ПЦС) для формирования излучаемых радиоимпульсов нужной частоты и продолжительности, а также микроконтроллерный блок, который осуществляет общую синхронизацию работы ионозонда, оцифровку принятого радиосигнала и поддерживает связь с внешней персональной электронной вычислительной машиной.

Зондирующие радиоимпульсы длительностью 100 мкс с частотой следования 125 Гц, несущей частотой в диапазоне 1÷16 МГц и мощностью 1.5 кВт в импульсе излучаются широкополосным радиочастотным усилителем мощности передатчика “Бриг-2”.

Радиоприемное устройство IC-R75 выполнено по супергетеродинной схеме с тройным преобразованием частоты. Самая широкая полоса пропускания равняется 15 кГц, что достаточно для работы с радиоимпульсами указанной длительности. Входные цепи приемника разработаны для условий функционирования рядом с передатчиками, т. е. имеют достаточный динамический диапазон и цепи защиты от перегрузок. Для дистанционного управления приемником в нем предусмотрен последовательный интерфейс в стандарте RS232 и связной протокол с развитым набором команд. Доработка приемника заключается в установке дополнительных разъемов на

корпусе. К одному из разъемов подключается выход усилителя третьей промежуточной частоты, и дальше сигнал подается на амплитудный детектор в микроконтроллерном блоке. Через второй разъем на внутренние цепи подавления импульсных помех поступает импульс запирающего на время излучения зондирующего радиоимпульса. На антенный вход приемника принятый высокочастотный сигнал подается через антенный ключ, который также запирается на время излучения зондирующего радиоимпульса.

Синтезатор ПЦС выполнен на современной интегральной микросхемной базе и позволяет синтезировать сигнал частотой до 25 МГц, имеет время перестройки с частоты на частоту меньше 1 мкс и способен формировать радиоимпульсы заданной продолжительности. Для установления частоты генерации и режима работы синтезатора используется 24-разрядная шина связи, по которой от микроконтроллерного блока передаются 24-разрядные слова управления. Для формирования высокочастотных радиоимпульсов нужной продолжительности в блок синтезатора также поступает соответствующий строб.

Обмен информацией между микроконтроллерным блоком и внешней ПЭВМ происходит по стандартной шине USB.

Для излучения и приема радиоволн используются вертикальные широкополосные ромбические антенны Айзенберга. Высота подвеса антенн равняется 18 м, а их горизонтальный размер достигает 50 м.

Темп регистрации ионограмм – одна ионограмма каждые 1÷15 мин.

Погрешность отсчета частоты на ионограммах – 25 кГц.

2.2. Методика анализа

Для спектрального анализа, как и в работе [23], использовались оконное преобразование Фурье (ОПФ), адаптивное преобразование Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразование (ВП). Формат представления данных анализа такой же, как в работе [23]. Более подробно методика анализа описана в работе [25].

Для сравнения с результатами [23] системный спектральный анализ временных вариаций N выполнен для диапазона периодов 30 ÷ 360 мин.

2.3. Состояние космической погоды

Как и в работе [23], состояние солнечной активности оценивалось по числам Вольфа W и индексу $F10.7$, а геомагнитной активности – по индексам K_p , D_{st} , и AE (табл. 1). Из табл. 1 видно, в периоды измерений Солнце оставалось достаточно спокойным. Состояние магнитного поля Земли также было практически невозмущенным. Поэтому описанные ниже вариации концентрации электронов и ее ВВ, надо полагать, были вызваны точными и сезонными процессами.

3. Суточно-сезонные вариации концентрации электронов

3.1. Регулярные вариации

Продолжительность непрерывных наблюдений для каждого из геофизических периодов составляла 3–4 суток.

Во время весеннего и осеннего равноденствий временные вариации концентрации электронов N в максимуме слоя F2 в целом были подобными (рис. 1, *a* и *в*). В интервале времени 00:00 ÷ 05:00 LT (здесь и далее время местное) $N \approx 1.5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. После восхода солнца на высотах слоя F2 концентрация электронов постепенно увеличивалась до значений $(0.7 \div 0.8) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ в период весеннего равноденствия и до значений $0.5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ в период осеннего равноденствия. Максимальное значение N имело место в интервалах времени 10:00 ÷ 13:00 и 14:00 ÷ 17:00 в периоды осеннего и весеннего равноденствий

соответственно. После этого наблюдалось медленное уменьшение N до $4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ до момента захода солнца на уровне земли. После захода солнца в ионосфере скорость уменьшения N увеличивалась. К 22:00 достигалось минимальное значение N (около $(1.5 \div 3) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$).

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 $4 \cdot 10^{11}$ до $1.2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ (рис. 1, *б*). Затем наблюдался рост N до $(3.5 \div 4) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, который наступил около 10:00. После 10:00 ÷ 12:00 возникло продолжительное уменьшение N до $3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Далее имел место вечерний рост N . Максимальные значения N в ночное время достигали $3.8 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ примерно в 24:00.

Далее опишем суточные вариации N в период зимнего солнцестояния (рис. 1, *г*). В интервале времени с 16:00 до 07:00 (следующих суток) значения N были близки к 10^{11} м^{-3} . С 07:00 и до 10:00 наблюдался рост N до значений $4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. В интервале времени 10:00 ÷ 14:00 значения $N \approx 4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. После 14:00 в течение двух часов N уменьшилась до ночных значений 10^{11} м^{-3} .

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

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

Таблица 1. Состояние космической погоды

| Дата | W | $F10.7$ | K_p | | D_{st} , нТл | | AE , нТл | |
|---------------------|-----|---------|-------|-----|----------------|-----|------------|-----|
| | | | max | min | max | min | max | min |
| 22 марта 2016 г. | 20 | 87 | 2.3 | 0.3 | 3 | -12 | 314 | 25 |
| 23 марта 2016 г. | 21 | 87 | 3.3 | 1.0 | 5 | -14 | 474 | 26 |
| 24 марта 2016 г. | 35 | 87 | 2.7 | 0.7 | 5 | -16 | 248 | 34 |
| 22 июня 2016 г. | 23 | 78 | 4.7 | 0.7 | 14 | -11 | 519 | 35 |
| 23 июня 2016 г. | 12 | 78 | 3.7 | 0.7 | 12 | -8 | 721 | 34 |
| 24 июня 2016 г. | 12 | 76 | 3.7 | 1.7 | -8 | -30 | 770 | 102 |
| 22 сентября 2016 г. | 36 | 85 | 2 | 0 | 5 | -8 | 243 | 17 |
| 23 сентября 2016 г. | 60 | 86 | 1.3 | 0 | 16 | 1 | 54 | 17 |
| 24 сентября 2016 г. | 55 | 85 | 2.3 | 0 | 13 | -8 | 403 | 18 |
| 22 декабря 2016 г. | 16 | 75 | 4.7 | 2.7 | -23 | -40 | 611 | 114 |
| 23 декабря 2016 г. | 0 | 74 | 4.0 | 2.7 | -20 | -39 | 777 | 117 |
| 24 декабря 2016 г. | 0 | 73 | 3.3 | 2.0 | -8 | -32 | 578 | 64 |

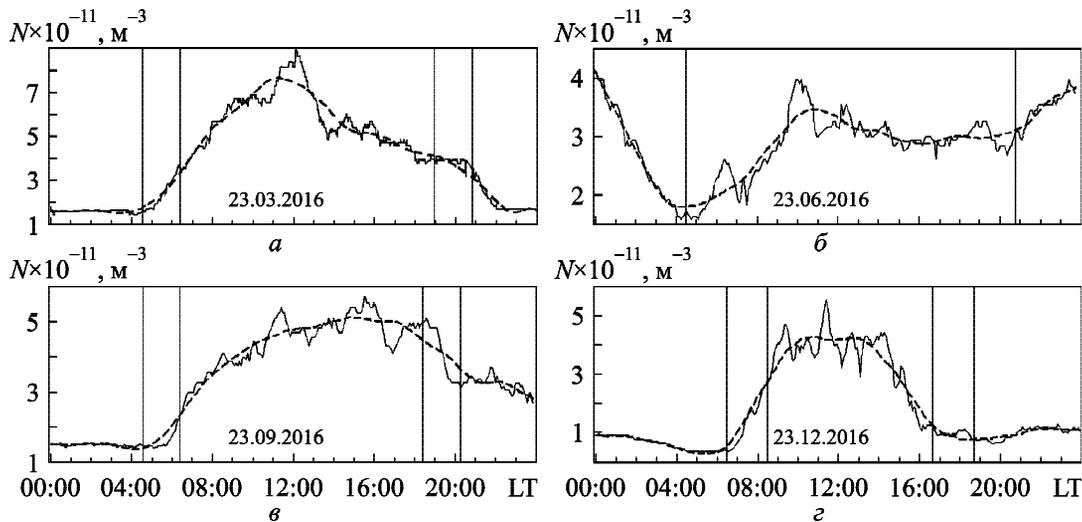


Рис. 1. Временные вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2 23 марта 2016 г. (а), 23 июня 2016 г. (б), 23 сентября 2016 г. (в), 23 декабря 2016 г. (г). Штриховая линия – результат скользящего усреднения на интервале времени 6 ч. Вертикальными линиями здесь и далее показаны моменты восхода солнца на высотах 300 и 0 км и моменты захода солнца на высотах 0 и 300 км

3.2. Нерегулярные вариации

В период весеннего равноденствия возмущения концентрации электронов ΔN носили квазипериодический характер (рис. 2, а, верхняя панель). В ночное время амплитуда ΔN_a была около 10^{10} м^{-3} , а в дневное время – $(5 \div 13) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, т. е. в $5 \div 13$ 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 составляла $(2 \div 6) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ (рис. 2, б, верхняя панель).

В период осеннего равноденствия в ночное время $\Delta N_a \approx (1 \div 2) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, а в дневное время – $\Delta N_a \approx (3 \div 6) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, т. е. в 3 раза больше (рис. 2, в, верхняя панель).

Вблизи зимнего солнцестояния значения возмущений ΔN также существенно зависели от времени суток. В ночное время $\Delta N_a \approx 10^{10} \text{ м}^{-3}$, а в дневное время $\Delta N_a \approx (8 \div 12) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ (рис. 2, г, верхняя панель). Различие в ΔN_a достигало порядка величины.

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

В период весеннего равноденствия максимальные значения δ_N имели место в дневное время. Они достигали 0.20, но в среднем амплитуда колебаний δ_{N_a} была около 0.15 (см. рис. 3, а).

В конце июня флуктуации δ_N обычно не превышали ± 0.20 , в среднем их амплитуда составляла $0.10 \div 0.15$ (см. рис. 3, б).

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

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

4. Результаты спектрального анализа

4.1. Спектральный состав суточно-сезонных вариаций абсолютных значений возмущений концентрации электронов

В период весеннего равноденствия в дневное время преобладали колебания N с переменным периодом T от 150 до 210 мин и продолжительностью $\Delta T \approx 14$ ч, эпизодически наблюдалось также колебание с $\Delta T \approx 100$ мин и $\Delta T \approx 1.5 \div 2$ ч (см. рис. 2, а).

Вблизи летнего солнцестояния в дневное и ночное время преобладали колебания с $T \approx 180 \div 260$ мин (см. рис. 2, б). Их продолжительность $\Delta T \approx 17$ ч. Кроме этих колебаний, наблюдались процессы с $T \approx 100 \div 150$ мин, их амплитуда была примерно в $2 \div 3$ раза меньше ампли-

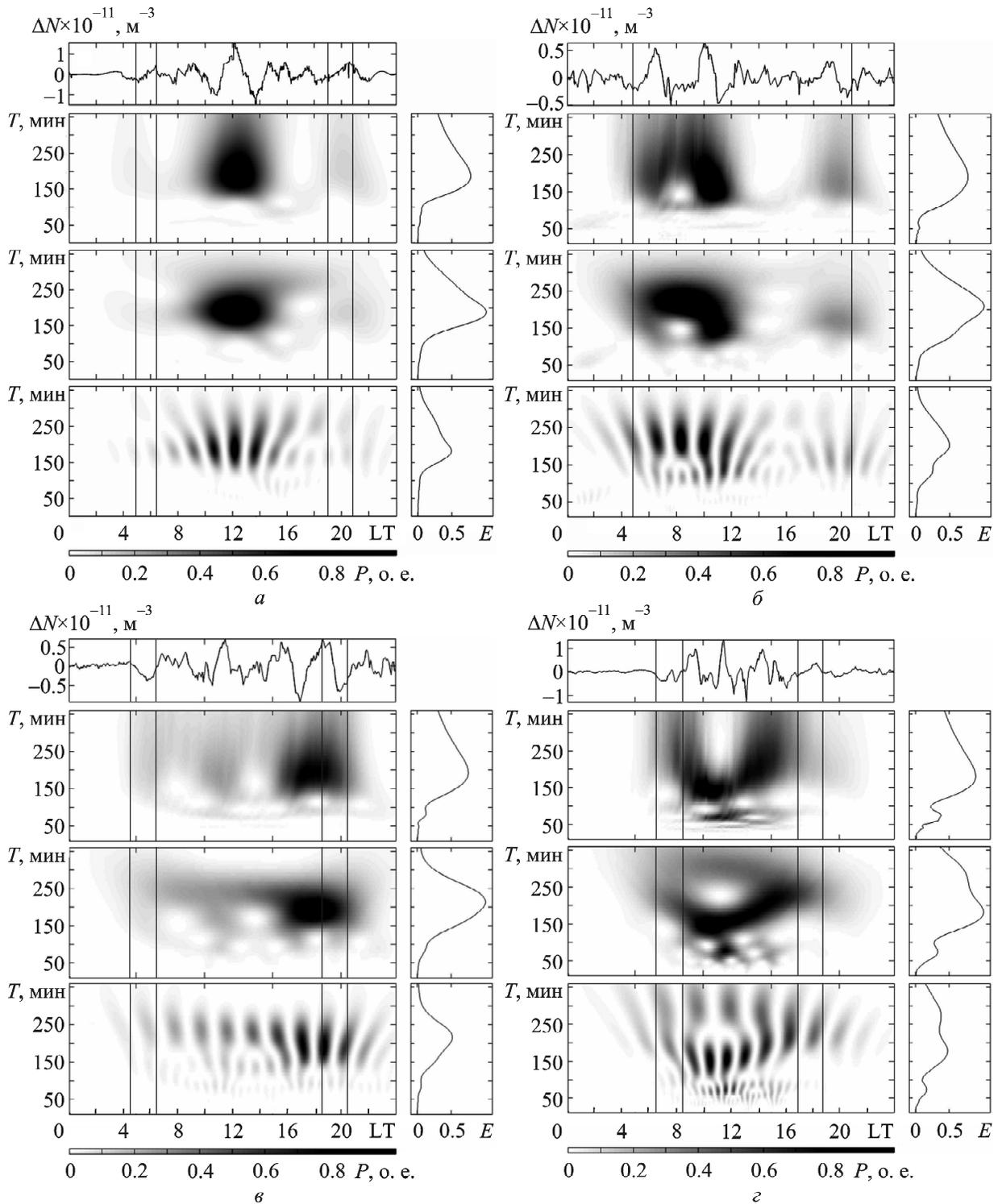


Рис. 2. Зависимость $\Delta N(t)$ для 23 марта 2016 г. (а), 23 июня 2016 г. (б), 23 сентября 2016 г. (в) и 23 декабря 2016 г. (з), а также результаты спектрального анализа при помощи ОПФ, АПФ, и ВП (панели сверху вниз). Справа показаны соответствующие энергограммы

туды преобладающих колебаний. Эпизодически возникали также колебания с $T \approx 60$ мин и $\Delta T \approx 1 \div 2$ ч.

В период осеннего равноденствия в утреннее, дневное и вечернее время было ярко выражено колебание с $T \approx 180 \div 260$ мин (см. рис. 2, в).

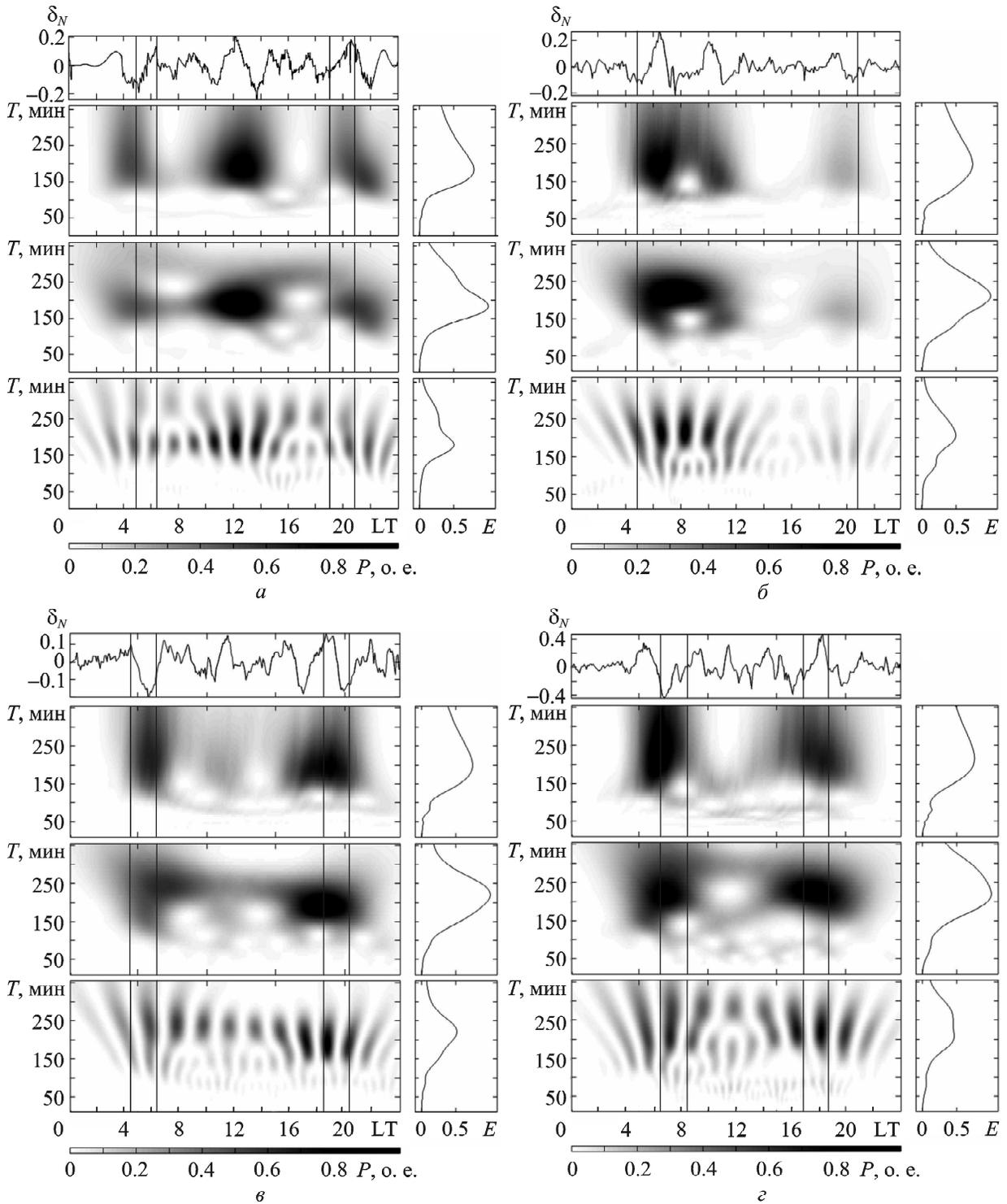


Рис. 3. Зависимость $\delta_N(t)$ для 23 марта 2016 г. (а), 23 июня 2016 г. (б), 23 сентября 2016 г. (в), 23 декабря 2016 г. (з) и результаты ОПФ, АПФ, и ВП (панели сверху вниз). Справа показаны соответствующие энергограммы

Его продолжительность была не меньше 16 ч. В ночное время основным было колебание с $T \approx 140 \div 150$ мин и $\Delta T \approx 3$ ч.

Во время зимнего солнцестояния днем преобладали колебания с периодами $60 \div 90$ и $160 \div 260$ мин (см. рис. 2, з). Их продолжительность составляла

около 6 и 13 ч соответственно. В ночное время ВВ были выражены слабо.

4.2. Спектральный состав суточно-сезонных вариаций относительных значений 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 $150 \div 210$ мин. В предзаходное время выделялись два колебания с периодами около 60 и 90 мин.

Вблизи летнего солнцестояния в течение почти всех суток 23 июня 2011 г. преобладало колебание с $T \approx 180 \div 260$ мин длительностью 17 ч. Кроме него, эпизодически возникали колебания с периодами $60 \div 70$ и около 120 мин (см. рис. 3, б). Их продолжительность составляла от 4 до 6 ч.

Во время осеннего равноденствия утром и днем преобладало колебание с $T \approx 180 \div 260$ мин. Его продолжительность достигала 16 ч (см. рис. 3, в). Ночью главным было колебание с $T \approx 140 \div 160$ мин и $\Delta T \approx 3$ ч.

В период зимнего солнцестояния наибольшие вариации $\delta_N(t)$ имели место при прохождении солнечных терминаторов и в течении $4 \div 5$ ч в дневное время (см. рис. 3, г). Период основного колебания составлял $160 \div 260$ мин. Кроме этого колебания, наблюдалось также колебание с периодом $50 \div 100$ мин. Для него $\Delta T \approx 10$ ч.

5. Обсуждение

Суточно-сезонные вариации регулярных значений \bar{N} полностью соответствуют имеющимся пред-

ставлениям о физико-химических процессах в ионосфере (см., например, [26, 27]). Полученные данные хорошо согласуются с измеренными методом некогерентного рассеяния значениями \bar{N} в данном регионе в период роста солнечной активности [28].

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

Относительные амплитуды квазипериодических изменений концентрации электронов в дневное время были близки к $0.1 \div 0.2$, а в период зимнего солнцестояния достигали $0.15 \div 0.26$. В ночное время значение δ_N во все сезоны были примерно в 2 раза меньше, чем в дневное время.

Период преобладающего колебания в различные сезоны года составлял от 150 до 260 мин (см. табл. 2). Этот период близок к периоду гармоника приливных процессов в атмосфере, равному 180 мин [26, 27]. Эпизодически появлялись также колебания с меньшими δ_N и периодами около 60, 120, 220 и 300 мин. Волновые процессы с указанными периодами и амплитудами свойственны внутренним гравитационным волнам [26, 27].

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

| Сезон | Абсолютная амплитуда колебаний, m^{-3} | Относительная амплитуда колебаний | Период преобладающего колебания, мин | Продолжительность квазипериодического процесса, ч |
|------------------------|---|---|--|---|
| Весеннее равноденствие | $(6.5 \div 11.4) \cdot 10^{10}$ $((3 \div 5) \cdot 10^{10})$ | $0.09 \div 0.23$ (0.10) | $150 \div 210$ $(40 \div 70, 80 \div 110)$ | 14 (4 ÷ 9) |
| Летнее солнцестояние | $(3.8 \div 6.3) \cdot 10^{10}$ $((2 \div 3) \cdot 10^{10})$ | $0.10 \div 0.21$ (0.03 ÷ 0.05) | $180 \div 260$ $(50 \div 70, 80 \div 120)$ | 17 (6) |
| Осеннее равноденствие | $(4.5 \div 7.5) \cdot 10^{10}$ $((1 \div 3) \cdot 10^{10})$ | $0.09 \div 0.19$ (0.05 ÷ 0.10) | $180 \div 260$ $(140 \div 160)$ | 16 (3 ÷ 4) |
| Зимнее солнцестояние | $(5.8 \div 10.2) \cdot 10^{10}$ $(1.9 \div 3.4) \cdot 10^{10}$ $((1 \div 3) \cdot 10^{10})$ | $0.15 \div 0.26$ $0.04 \div 0.08$ (0.05 ÷ 0.08) | $160 \div 260$ $50 \div 100$ $(50 \div 70, 80 \div 130)$ | 13 10 (8 ÷ 16) |

Продолжительность преобладающих колебаний была значительной: от 13 до 17 ч (в период летнего солнцестояния).

Отметим, что параметры как регулярных, так и нерегулярных вариаций в течение весеннего и осеннего равноденствий были близкими. В период зимнего солнцестояния абсолютная и относительная амплитуды ВВ были больше, чем в период летнего солнцестояния.

Подтверждено, 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.

Сравним результаты, полученные в 2011 и 2016 гг. при близкой солнечной активности. Как и следовало ожидать, параметры регулярных и нерегулярных вариаций оказались сходными. Подобными оказались как суточные, так и сезонные вариации. В 2016 г. абсолютные и относительные амплитуды ВВ, а также их периоды были несколько (в $1.5 \div 2$ раза) больше, чем эти же параметры в 2011 г.

Полученные сведения о квазипериодических процессах в максимуме слоя F2 в целом также хорошо согласуются с результатами наших наблюдений в этом же регионе на радаре некогерентного рассеяния (см., например, [20–22, 28]).

6. Выводы

1. Регулярные суточно-сезонные вариации концентрации электронов и ее ВВ в максимуме слоя F2 в периоды роста и спада солнечной активности в целом близки и полностью соответствуют существующим представлениям о физико-химических процессах в ионосфере.

2. Во все сезоны в периоды роста и спада солнечной активности на регулярный ход концентрации электронов накладывались ее квазипериодические вариации.

3. Во все сезоны в слое F2 ионосферы в период спада солнечной активности проявлялось преобладающее ВВ концентрации электронов со средним периодом $150 \div 260$ мин, имеющее абсолютную амплитуду $(3.8 \div 11.4) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ и относительную амплитуду, равную $0.09 \div 0.23$.

4. Продолжительность преобладающего колебания в различные сезоны 2016 г. составляла $13 \div 17$ ч.

5. В 2016 г. эпизодически в спектре вариаций N возникали также колебания с периодами около 60, 90 и 120 мин. Их амплитуда была в несколько раз меньше амплитуды преобладающего колебания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дикий Л. А. Теория колебаний земной атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 196 с.
2. Yen K. S. and Liu C. H. Theory of ionospheric waves. – New York, London: Academic Press, 1972. – 464 p.
3. Beer T. Atmospheric waves. – New York: Halsted Press, 1974. – 315 p.
4. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. – М.: Наука, 1974. – 256 с.
5. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. – М.: Мир, 1978. – 532 с.
6. Авакян С. В., Дробжев В. И., Краснов В. М., Кудряшов 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.
7. Сорокин В. М., Федорович Г. В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. – М.: Энергоиздат, 1982. – 136 с.
8. Волновые возмущения в ионосфере / Под ред. В. И. Дробжева. – Алма-Ата: Наука, 1987. – 172 с.
9. Hines C. O. Internal gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys. – 1960. – Vol. 38. – P. 1441–1481.
10. Tolstoy I. Long-Period Gravity Waves in the Atmosphere // J. Geophys. Res. – 1967. – Vol. 72, No. 18. – P. 4605–4622. DOI: 10.1029/JZ072i018p04605
11. Chimonas G. Infrasonic waves generated by auroral currents // Planet Space Sci. – 1970. – Vol. 18, Is. 4. – P. 591–605. DOI: 10.1016/0032-0633(70)90134-0
12. Yen K. C. and Liu C. H. Acoustic gravity waves in the upper atmosphere // Rev. Geophys. – 1974. – Vol. 12, Is. 2. – P. 193–216. DOI: 10.1029/RG012i002p00193
13. Francis S. H. A Theory of Medium-Scale Travelling Ionospheric Disturbances // J. Geophys. Res. Space Phys. – 1974. – Vol. 79, Is. 34. – P. 5245–5260. DOI: 10.1029/JA079i034p05245
14. Francis S. H. Global propagation of atmospheric gravity waves: A review // J. Atmos. Terr. Phys. – 1975. – Vol. 37, Is. 6-7. – P. 1011–1054. DOI: 10.1016/0021-9169(75)90012-4
15. Голицин Г. С., Чунгузов Е. П. Акустико-гравитационные волны в атмосфере // Полярные сияния и свечения ночного неба: Сб. статей. – М.: Наука, 1975. – Вып. 23. – С. 5–21.
16. Пономарев Е. А., Ерущенков А. И. Инфразвуковые волны в атмосфере Земли (Обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. – 1977. – Т. 20, № 12. – С. 1773–1789.
17. 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”. – Kaltenburg-Lindau: EGP, 1996. – P. 136–180.

18. Григорьев Г. И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли // Изв. вузов. Радиофизика. – 1999. – Т. 42, № 1. – С. 3–25.
19. Электромагнитные проявления геофизических эффектов в Антарктиде / Под ред. Л. Н. Литвиненко, Ю. М. Ямпольского. – Харьков: РИ НАН Украины, НАНЦ МОН Украины, 2005. – 331 с.
20. 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.
21. 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 аэрoномия. – 2006. – Т. 46, № 2. – С. 193–208.
22. 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 аэрoномия. – 2006. – Т. 46, № 2. – С. 209–218.
23. Черногор Л. Ф., Барабаи В. В. Волновые возмущения концентрации электронов в слое F2 ионосферы: сезонно-суточные вариации // Радиофизика и радиоастрономия. – 2012. – Т. 17, № 4. – С. 353–361.
24. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Поднос В. А., Тырнов О. Ф. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина – средство для мониторинга ионосферы в космических экспериментах / Космический проект “Ионосат-Микро” / Под ред. С. А. Засухи, О. П. Федорова. – Киев: Академперіодика, 2013. – С. 160–182.
25. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэрoномия. – 2008. – Т. 48, № 5. – С. 681–702.
26. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 527 с.
27. Schunk R. W. and Nagy A. F. Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry. In: J. T. Houghton, M. J. Rycroft, A. J. Dessler, eds. Cambridge atmospheric and space science series. – Cambridge: Cambridge University Press, 2000. – 555 p.
28. 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.
5. GOSSARD, E. E. and HOOKE, W. H., 1975. *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves, Their Generation and Propagation (Developments in Atmospheric Science)*. Amsterdam, New York: Elsevier Scientific Pub. Co.
6. AVAKIAN, S. V., DROBZHEV, V. I., KRASNOV, V. M., KUDRIASHEV, G. S., LAZAREV, A. I., NIKOLAEV, A. G., RIAZANOVA, L. D., SEVASTIANOV, V. I. and IAKOVETS, A. F., 1981. *Waves and Radiation in the Upper Atmosphere*. Alma-Ata, USSR: Nauka Publ. (in Russian).
7. SOROKIN, V. M. and FEDOROVICH, G. V., 1982. *Physics of Slow MGD Waves in the Ionospheric Plasma*. Moscow, USSR: Energoizdat Publ. (in Russian).
8. DROBZHEV, V. I., ed. 1987. *Wave-like disturbances in the ionosphere*. Alma-Ata, USSR: Nauka Publ. (in Russian).
9. HINES, C. O., 1960. Internal gravity waves at ionospheric highs. *Can. J. Phys.* vol. 38, pp. 1441–1481.
10. TOLSTOY, I., 1967. Long-Period Gravity Waves in the Atmosphere. *J. Geophys. Res.* vol. 72, no. 18, pp. 4605–4622. DOI: 10.1029/JZ072i018p04605
11. CHIMONAS, G., 1970. Infrasonic waves generated by auroral currents. *Planet Space Sci.* vol. 18, is. 4, pp. 591–605. DOI: 10.1016/0032-0633(70)90134-0
12. YEN, K. C. and LIU, C. H., 1974. Acoustic gravity waves in the upper atmosphere. *Rev. Geophys.* vol. 12, is. 2, pp. 193–216. DOI: 10.1029/RG012i002p00193
13. FRANCIS, S. H., 1974. A Theory of Medium-Scale Travelling Ionospheric Disturbances. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 79, is. 34, pp. 5245–5260. DOI: 10.1029/JA079i034p05245
14. FRANCIS, S. H., 1975. Global propagation of atmospheric gravity waves: A review. *J. Atmos. Terr. Phys.* vol. 37, is. 6-7, pp. 1011–1054. DOI: 10.1016/0021-9169(75)90012-4
15. GOLITSIN, G. I. and CHUNCHUZOV, E. P., 1975. Acoustic-gravity waves in the atmosphere. In: *The polar aurora and luminescence of the night sky*. Moscow, USSR: Nauka Publ. no. 23, pp. 5–21 (in Russian).
16. PONOMAREV, E. A. and ERUSHCHENKOV, A. I., 1977. Infrasonic waves in the Earth's atmosphere (review). *Radiophys. Quantum Electron.* vol. 20, is. 12, pp. 1218–1229.
17. WILLIAMS, P. J. S., 1996. 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”*. Kaltenburg-Lindau: EGP, pp. 136–180.
18. GRIGOR'EV, G. I., 1999. Acoustic-gravity waves in the earth's atmosphere (review). *Radiophys. Quantum Electron.* vol. 42, no. 1, pp. 1–21. DOI: 10.1007/BF02677636
19. LYTVYNENKO, L. N. and YAMPOLSKI, Y. M., eds., 2005. *Electromagnetic manifestations of geophysical effects in Antarctica*. Kharkiv: IRA NAS of Ukraine, NASCU MES of Ukraine Publ. (in Russian).
20. BURMAKA, V. P., TARAN, V. I. and CHERNOGOR, L. F., 2005. The results of investigation of wave-like disturbances in the ionosphere by incoherent scattering technique. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki.* no. 3, pp. 4–35 (in Russian).

REFERENCES

21. BURMAKA, V. P., TARAN, V. I. and CHERNOGOR, L. F., 2006. Wave-Like Processes in the Ionosphere under Quiet and Disturbed Conditions. 1. Kharkov Incoherent Scatter Radar Observations. *Geomagn. Aeron.* vol. 46, is. 2, pp. 183–198. DOI: 10.1134/S0016793206020071
22. BURMAKA, V. P., TARAN, V. I. and CHERNOGOR, L. F., 2006. Wave-Like Processes in the Ionosphere under Quiet and Disturbed Conditions. 2. Analysis of Observations and Simulation. *Geomagn. Aeron.* vol. 46, no. 2, pp. 199–208. DOI: 10.1134/S0016793206020083
23. CHERNOGOR, L. F. and BARABASH, V. V., 2012. Wave Disturbances of Electron Density in Ionospheric F2 Layer: Seasonal-Diurnal Variations. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 17, no. 4, pp. 353–361 (in Russian).
24. CHERNOGOR, L. F., GARMASH, K. P., PODNOS, V. A. and TYRNOV, O. F. 2013. The V. N. Karazin Kharkiv National University Radiophysical Observatory – the tool for ionosphere monitoring in space experiments. In: S. A. ZASUKHA, O. P. FEDOROV, eds. *Space Project "Ionosat-Micro"*. Kyiv, Akadempriodika Publ., pp. 160–182 (in Russian).
25. CHERNOGOR, L. F., 2008. Advanced Methods of Spectral Analysis of Quasiperiodic Wave-Like Processes in the Ionosphere: Specific Features and Experimental Results. *Geomagn. Aeron.* vol. 48, is. 5, pp. 652–673. DOI: 10.1134/S0016793208050101
26. BRUNELLI, B. E. and NAMGALADZE, A. A., 1988. *Physics of the ionosphere*. Moscow, USSR: Nauka Publ. (in Russian).
27. SCHUNK, R. W. and NAGY, A. F., 2000. Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry. In: J. T. HOUGHTON, M. J. RYCROFT, A. J. DESSLER, eds. *Cambridge atmospheric and space science series*. Cambridge: Cambridge University Press.
28. LYASHENKO, M. V., PULYAEV, V. A. and, CHERNOGOR, L. F., 2006. Diurnal and seasonal variations of ionospheric plasma parameters during rise solar activity record. *Kosmichna nauka i tekhnologiya*. vol. 12, no. 5/6, pp. 58–68 (in Russian).

L. F. Chernogor¹ and V. V. Barabash²

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

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

WAVE DISTURBANCES IN THE IONOSPHERIC F2 LAYER ELECTRON DENSITY: DIURNAL AND SEASONAL VARIATIONS DURING THE DECLINING PHASE OF THE SOLAR CYCLE

Purpose: The regular and quasi-periodic diurnal and seasonal variations in the F2 region electron density N during the declining phase of the solar cycle in 2016.

Desing/methodology/approach: For the system spectral analysis of time variations N , the short-time Fourier transform, the adaptive Fourier transform, and the wavelet transform were used. *Findings:* The dominant oscillation occurs with a period of 150–260 min, amplitude of $\Delta N_a \approx (0.4–1.1) \cdot 10^{11} \text{ m}^{-3}$, and the amplitude of $\Delta N_a / \bar{N} \approx 0.09–0.23$. on a relative scale in the ionospheric F2 region over all seasons. This oscillation had temporal duration of 13 to 17 h, depending on the season. The amplitude of the oscillations with other periods was notably smaller.

Conclusions: The regular diurnal and seasonal variations and wave disturbances in the electron density at the F2 peak height during the ascending and declining phases of the solar cycle are generally close to and completely correspond to the existing concept of physical and chemical processes in the ionosphere.

Key words: ionosonde, diurnal and seasonal dependence, electron density, regular and quasi-periodic disturbances, system spectral analysis, wave disturbances

Л. Ф. Черногор¹, В. В. Барабаш²

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

²Інститут іоносфери НАН та МОН України, вул. Кирпичова, 16, м. Харків, 61002, Україна

ХВИЛЬОВІ ЗБУРЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЕЛЕКТРОНІВ У ШАРІ F2 ІОНОСФЕРИ: ДОБОВО-СЕЗОННІ ВАРІАЦІЇ В ПЕРІОД СПАДУ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ

Предмет і мета роботи: Проаналізовано регулярні та квазіперіодичні добово-сезонні варіації концентрації електронів N в шарі F2 іоносфери в період спаду сонячної активності (в 2016 р.).

Методи і методологія: Для системного спектрального аналізу часових варіацій N використовувались віконне перетворення Фур'є, адаптивне перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення.

Результати: В усі сезони у шарі F2 іоносфери виявлялося переважаюче коливання з періодом 150 ÷ 260 хв, амплітудою $\Delta N_a \approx (0.4 \div 1.1) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, відносною амплітудою $\Delta N_a / \bar{N} \approx 0.09 \div 0.23$. Тривалість цього коливання залежно від сезону змінювалась від 13 до 17 г. Амплітуда коливань з іншими періодами була помітно меншою.

Висновки: Регулярні добово-сезонні варіації концентрації електронів та її хвильових збурень у максимумі шару F2 в періоди росту та спаду сонячної активності в цілому близькі та повністю відповідають існуючим уявленням про фізико-хімічні процеси в іоносфері.

Ключові слова: іонозонд, добово-сезонна залежність, концентрація електронів, регулярні та квазіперіодичні збурення, системний спектральний аналіз, хвильові збурення

Стаття постуила в редакцію 27.06.2017