

УДК 550.388,520.16;523.31;523.9:520.86

СУТОЧНО-СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В МАКСИМУМЕ СЛОЯ F2 ИОНОСФЕРЫ С УЧЕТОМ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2019 г. Л. Ф. Черногор*

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

**e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua*

Поступила в редакцию 03.08.2017 г.

После доработки 21.04.2018 г.

Принята к публикации 27.09.2018 г.

Представлены результаты анализа регулярных и квазипериодических суточно-сезонных вариаций концентрации электронов в максимуме слоя F2 ионосферы в период низкой солнечной активности (в 2016 г.). Для системного спектрального анализа временных вариаций концентрации электронов в диапазоне периодов 30–180 мин применялись оконное преобразование Фурье, адаптивное преобразование Фурье и вейвлет-преобразование. Во все сезоны в слое F2 ионосферы проявлялось преобладающее колебание с периодом 70–120 мин, амплитудой $\Delta N_a \approx (2-10) \times 10^{10} \text{ м}^{-3}$, относительной амплитудой $\Delta N_a / \bar{N} \approx 0.20-0.70$. Продолжительность этого колебания в зависимости от сезона изменялась от 6 до 17 ч. Амплитуда колебаний с другими периодами была заметно меньше. Подтверждено, что регулярные суточно-сезонные вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2 полностью соответствуют существующим представлениям о физико-химических процессах в ионосфере. Установлены основные закономерности в поведении квазипериодических вариаций концентрации электронов.

DOI: 10.1134/S0016794019020044

1. ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера как составная часть системы Солнце–межпланетная среда–магнитосфера–ионосфера–атмосфера–Земля (ее внутренние оболочки) испытывает на себе влияния как “сверху”, так и “снизу”. На сегодня достаточно хорошо изучены и моделируются регулярные процессы взаимодействия ионосферы с другими подсистемами. Этого нельзя сказать о нерегулярных процессах, которые вызываются нестационарными процессами в других подсистемах. Важнейшими проявлениями таких процессов являются волновые возмущения (ВВ) в ионосфере в широком диапазоне периодов. Именно ВВ наряду с потоками энергии и частиц отвечают за взаимодействие подсистем в упомянутой системе. Поэтому исследование как регулярных, так и нерегулярных процессов в ионосфере представляет значительный научный интерес.

Подобные исследования имеют и практический аспект. Дело в том, что ионосфера по-прежнему остается в качестве основного канала распространения радиоволн декаметрового и более низкочастотных диапазонов. На распростране-

ние более высокочастотных (более 50 МГц) волн она также может оказывать заметное влияние, особенно во время ионосферных бурь. При этом существенно усиливается неоднородная структура, вызывающая эффективное рассеяние радиоволн вплоть до радиоволн дециметрового диапазона. Сотни наземно-космических средств непрерывно обеспечивают потребителей услугами глобальной радионавигации, телекоммуникации, телевидения, диагностики земных недр, поверхности суши и Мирового океана, прогнозирования катастрофических явлений и другими жизненно важными потребностями нашей цивилизации. Нестационарные процессы и, в частности, ВВ в ионосфере могут ограничивать потенциальные характеристики средств телекоммуникации, радиопеленгации, радиолокации, радионавигации, мониторинга и прогнозирования. Исследованию ВВ посвящено огромное количество теоретических и экспериментальных работ (см., например, [Hines, 1960; Tolstoy, 1967; Дикий, 1969; Chimonas, 1970; Yeh and Liu, 1972, 1974; Гершман, 1974; Beer, 1974; Francis, 1974; 1975; Голицын и Чунчузов, 1975; Пономарев и Ерущенко, 1977;

Госсард и Хук, 1978; Авакян и др., 1981; Сорокин и Федорович, 1982; Волновые ..., 1987; Williams, 1996; Григорьев, 1999]). Известно, что систематическое исследование таких возмущений только начинается (см., например, [Электромагнитные ..., 2005; Бурмака и др., 2005, 2006а, 2006б; Черногор и Барабаш, 2012]).

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, например, авторы работы [Черногор и Барабаш, 2012], 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 [Черногор и Барабаш, 2012] ограничились диапазоном периодов ВВ, равным 30–360 мин. Основные результаты работы [Черногор и Барабаш, 2012] свелись к установлению следующих фактов. Во-первых, во все сезоны в слое $F2$ ионосферы проявлялось преобладающее квазипериодическое колебание N с периодом 140–200 мин, имеющее амплитуду $(0.2–2) \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$ и относительную амплитуду, равную 0.1–0.2. Во-вторых, продолжительность преобладающего колебания составляла 5–7 ч, а в период летнего солнцестояния достигала 24 ч. В-третьих, в спектре вариаций N эпизодически возникали также колебания с периодами от 60–100 до 300 мин. Их амплитуда была в несколько раз меньше амплитуды преобладающего колебания.

Таким образом, существует необходимость в продолжении начатых систематических исследований квазипериодических процессов в ионосфере.

Цель настоящей работы – изучение суточно-сезонных вариаций концентрации электронов и ее ВВ в максимуме слоя $F2$ ионосферы в период низкой солнечной активности (2016 г.). В отличие от других авторов, для исследования квазипериодических возмущений концентрации электронов нами применялся системный спектральный анализ, позволяющий одновременно повысить разрешающую способность по времени и частоте, а также проследить за динамикой преобразований одних колебаний в другие [Черногор, 2008].

2. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

Наблюдения за вариациями концентрации электронов в ионосфере осуществлялись с помощью несерийного ионозонда с цифровой регистрацией параметров отраженного сигнала. Ионозонд расположен в Радиофизической обсерватории ХНУ им. В.Н. Каразина ($49^{\circ}38' \text{ N}$, $36^{\circ}20' \text{ E}$) вблизи г. Харьков, Украина [Черногор и др., 2013]. Темп регистрации ионограмм – одна ионограмма каждые 1–15 мин. Погрешность отсчета частоты на ионограммах – 25 кГц.

Измерения проводились в течение полного цикла солнечной активности ежемесячно в течение 3–7 сут. В настоящей работе мы ограничились представлением результатов для случая низкой солнечной активности и четырех характерных геофизических периодов.

Для спектрального анализа использовались взаимно дополняющие друг друга оконные преобразование Фурье (ОПФ), адаптивное преобразование Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразование (ВП), описанные в работе [Черногор, 2008].

Системный спектральный анализ временных вариаций N выполнен для диапазона периодов 30–180 мин. Для определения периода преобладающих колебаний вычислялись энергограммы путем интегрирования амплитуды колебания по времени при постоянном значении периода. Эта процедура повторялась для всех значений периодов [Черногор, 2008].

3. СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Состояние солнечной активности оценивалось по числам Вольфа W и индексу $F10.7$, а геомагнитной активности – по индексам Kp , Dst и AE (табл. 1). Из таблицы 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 суточными и сезонными процессами.

4. СУТОЧНО-СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЭЛЕКТРОНОВ

4.1. Регулярные вариации

Продолжительность непрерывных наблюдений для каждого из геофизических периодов составляла 3–7 сут.

Во время весеннего и осеннего равноденствий временные вариации концентрации электронов N в максимуме слоя $F2$ в целом были подобными (рис. 1а и 1б). В интервале времени 00:00–05:00 LT

Таблица 1. Состояние космической погоды

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

(здесь и далее время местное) $N \approx 1.5 \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$. После восхода Солнца на высотах слоя $F2$ концентрация электронов постепенно увеличивалась до значений $(0.7–0.8) \times 10^{12} \text{ м}^{-3}$ в период весеннего равноденствия и до значений $0.5 \times 10^{12} \text{ м}^{-3}$ 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 $4 \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$ до момента захода Солнца на уровне Земли. После захода Солнца в ионосфере скорость уменьшения N увеличивалась. К 22:00 достигалось минимальное значение N ($\sim(1.5–3) \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$).

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

Далее опишем суточные вариации N в период зимнего солнцестояния (рис. 1з). 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 $4 \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$. В интервале времени 10:00–14:00 значения $N \approx 4 \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$. 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 $N(t)$ накладываются квазипериодические возмущения.

4.2. Нерегулярные вариации

В период весеннего равноденствия возмущения концентрации электронов ΔN носили квазипериодический характер (рис. 2а, верхняя панель). В ночное время амплитуда ΔN_a была $\sim 10^{10} \text{ м}^{-3}$, а в дневное время – $5 \times 10^{10} \text{ м}^{-3}$, т.е. в 5 раз больше (рис. 2а, верхняя панель). В дневное время период преобладающего колебания $T \approx 70–100$ мин.

Вблизи летнего солнцестояния в возмущениях $\Delta N(t)$ в дневное время выделялись преобладающие колебания с периодом 100–140 мин, амплитуда которых составляла $(2–4) \times 10^{10} \text{ м}^{-3}$ (рис. 2б, верхняя панель). В ночное время $T \approx 50–70$ мин, а амплитуда колебаний $\Delta N_a \approx (1.5–2) \times 10^{10} \text{ м}^{-3}$.

В период осеннего равноденствия в ночное время $\Delta N_a \approx (1–2) \times 10^{10} \text{ м}^{-3}$, а в дневное время – $\Delta N_a \approx 4 \times 10^{10} \text{ м}^{-3}$, т.е. в 2–4 раза больше (рис. 2в, верхняя панель). В дневное время преобладало колебание с $T \approx 80–120$ мин, а в ночное время – колебание с $T \approx 40–60$ мин. В интервале времени с 00:00 до 05:00 квазипериодические возмущения практически отсутствовали.

Вблизи зимнего солнцестояния величина возмущений ΔN также существенно зависела от времени суток. В ночное время $\Delta N_a \approx 10^{10} \text{ м}^{-3}$, а в дневное время $\Delta N_a \approx (5–10) \times 10^{10} \text{ м}^{-3}$ (рис. 2г, верхняя панель). Различие в ΔN_a достигало по-

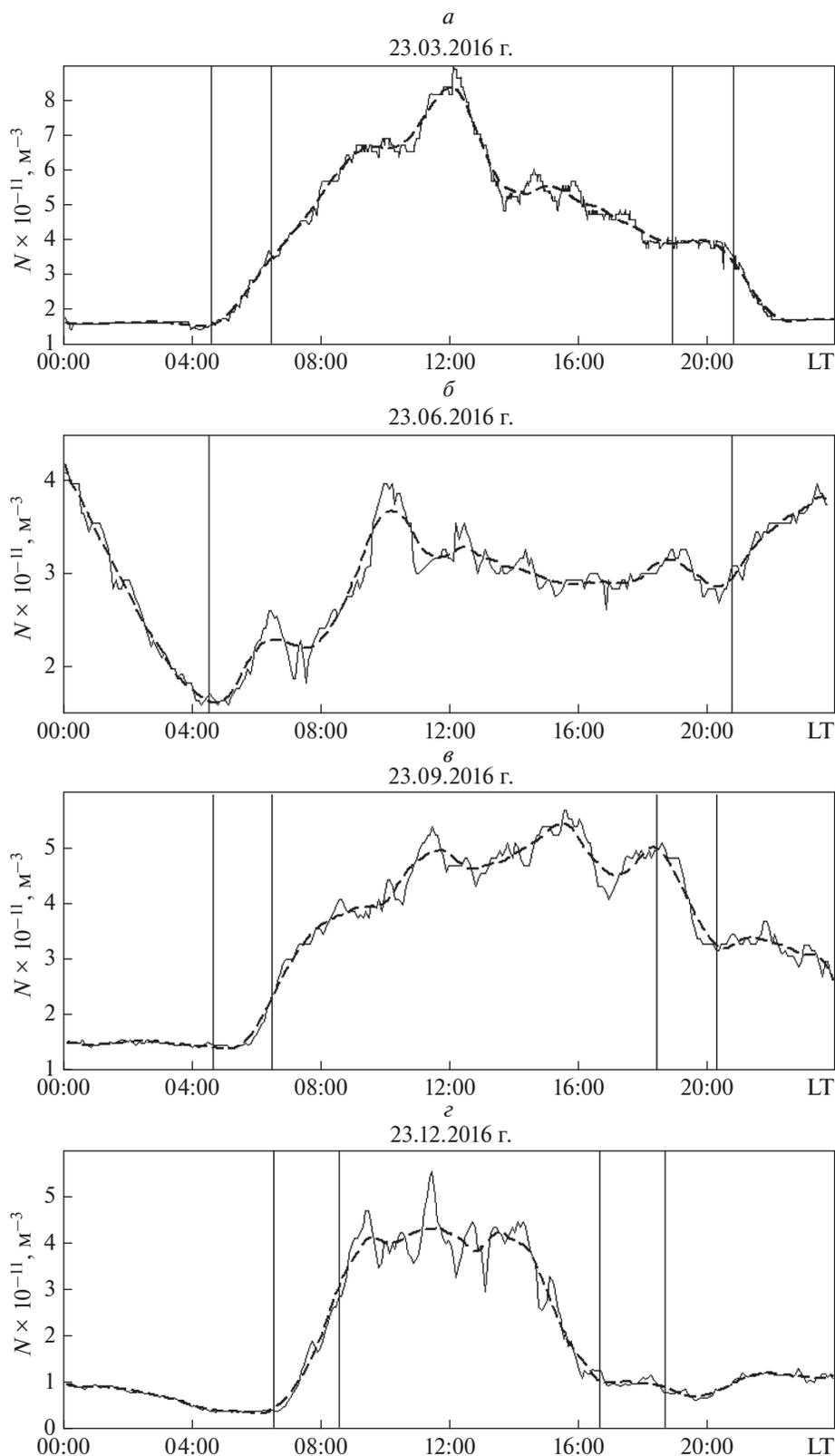


Рис. 1. Временные вариации концентрации электронов в максимуме слоя F_2 : (*a*) – 23 марта 2016 г., (*б*) – 23 июня 2016 г., (*в*) – 23 сентября 2016 г., (*г*) – 23 декабря 2016 г. (Штриховая линия – результат усреднения на интервале времени 3 ч). Вертикальными линиями здесь и далее показаны моменты восхода Солнца на высотах 300 и 0 км и моменты захода Солнца на высотах 0 и 300 км.

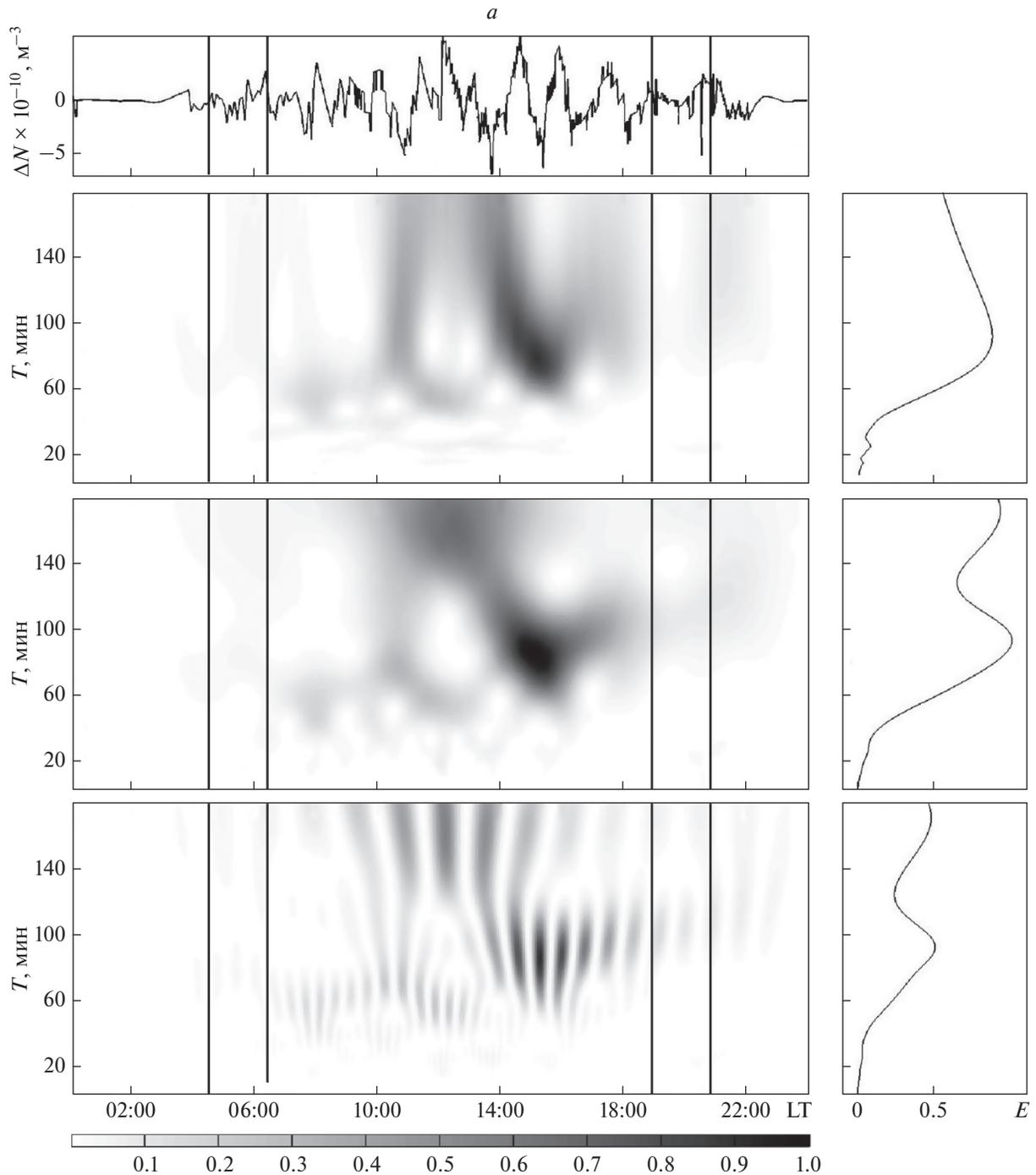


Рис. 2. Зависимость $\Delta N(t)$ для: (а) – 23 марта 2016 г., (б) – 23 июня 2016 г., (в) – 23 сентября 2016 г., (г) – 23 декабря 2016 г. Результаты спектрального анализа при помощи ОПФ, АПФ, и ВП (панели сверху вниз). Справа показаны соответствующие энергограммы.

рядка величины. В ночное время период преобладающего колебания был близок к 30–50 мин, а в дневное время – к 70–90 мин.

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 рисунков 2 и 3 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 значений 0.40, но в среднем амплитуда колебаний δ_{Na} была ~ 0.30 (см. рис. 3а).

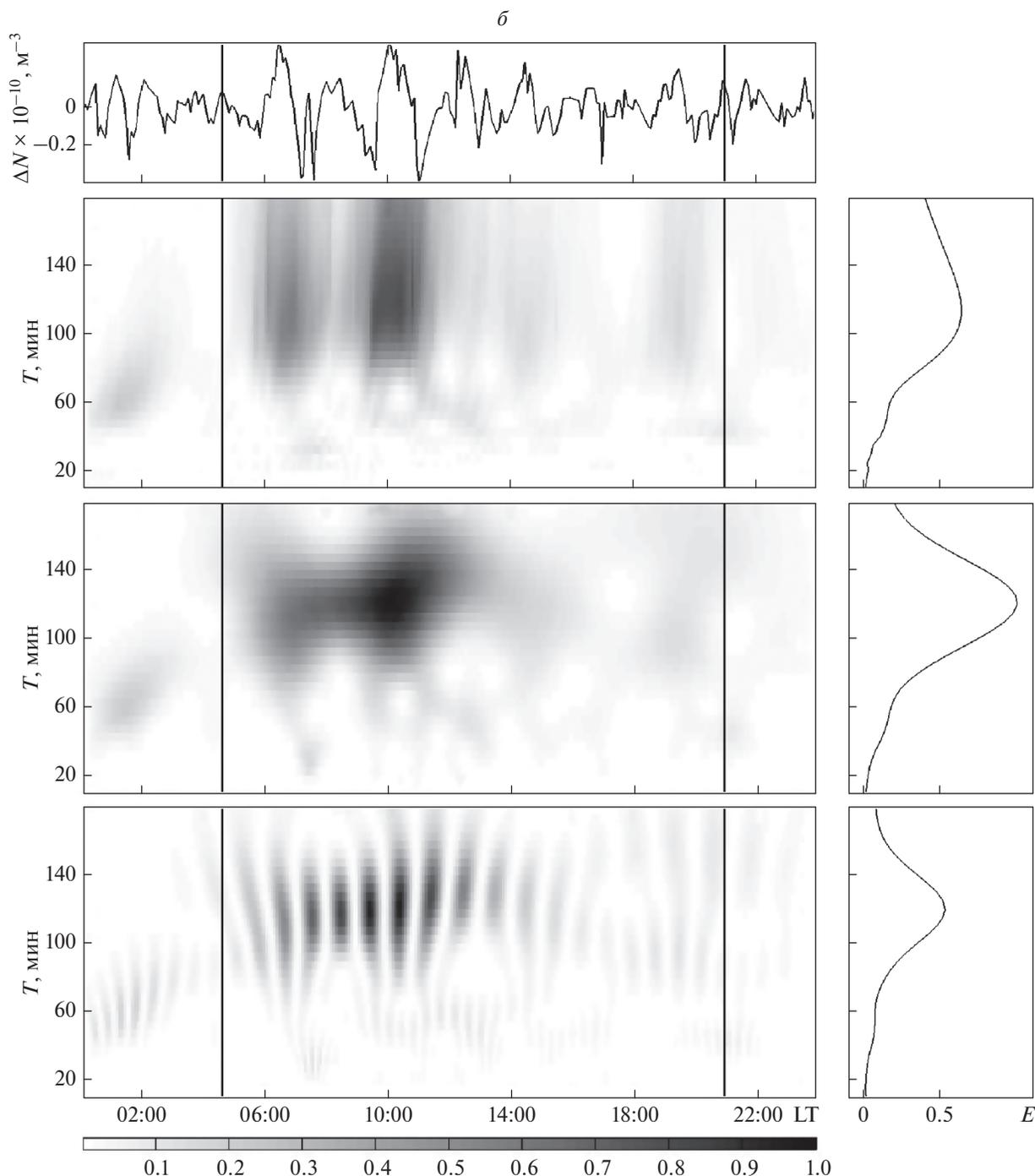


Рис. 2. Продолжение.

В период летнего солнцестояния флуктуации δ_N обычно не превышали ± 0.30 , в среднем их амплитуда составляла 0.20 (см. рис. 3б).

Во время осеннего равноденствия вариации $\delta_N(t)$ были подобны вариациям во время весеннего равноденствия. В дневное время в среднем $\delta_{Na} \approx 0.2-0.3$ (см. рис. 3в).

В период зимнего солнцестояния в дневное время вариации δ_N достигали $\pm 0.60-0.70$ (см. рис. 3г). В среднем $\delta_{Na} \approx 0.50$.

Во время летнего солнцестояния ВВ присутствовали в течение всех суток, в то же время в другие сезоны они были слабо выражены примерно с 00:00 до восхода Солнца в ионосфере.

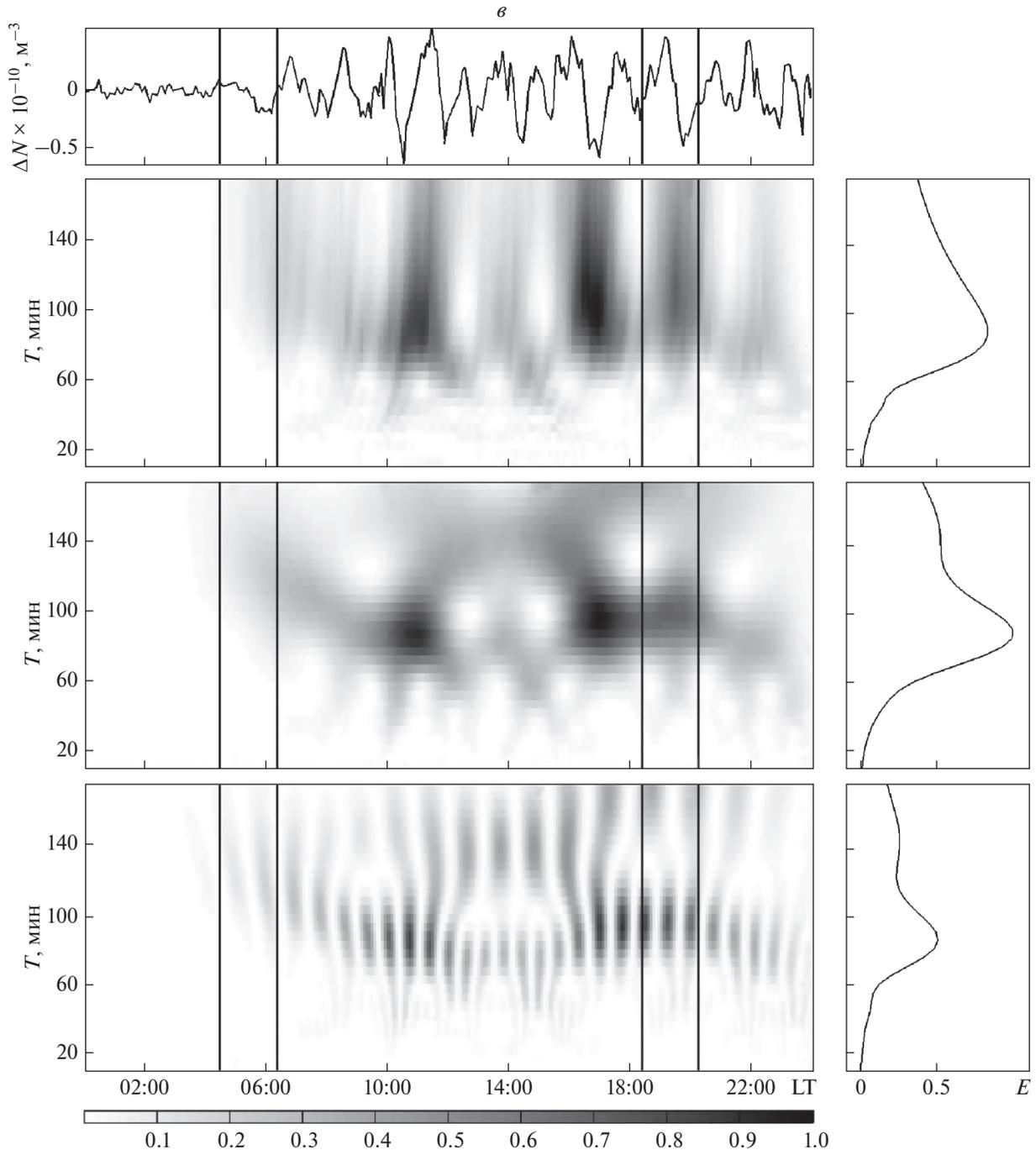


Рис. 2. Продолжение.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

5.1. 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 70 до 100 мин и продолжительностью

$\Delta T \approx 17$ ч, эпизодически также наблюдались колебания с периодами ~ 30 и $80\text{--}100$ мин и $\Delta T \approx 1.5\text{--}2$ ч (см. рис. 2а).

Вблизи летнего солнцестояния в дневное время преобладало колебание с $T \approx 100\text{--}140$ мин (см. рис. 2б). Его продолжительность $\Delta T \approx 9$ ч. Кроме этого колебания, наблюдались осцилляции с периодами ~ 30 и $40\text{--}60$ мин, их амплитуда

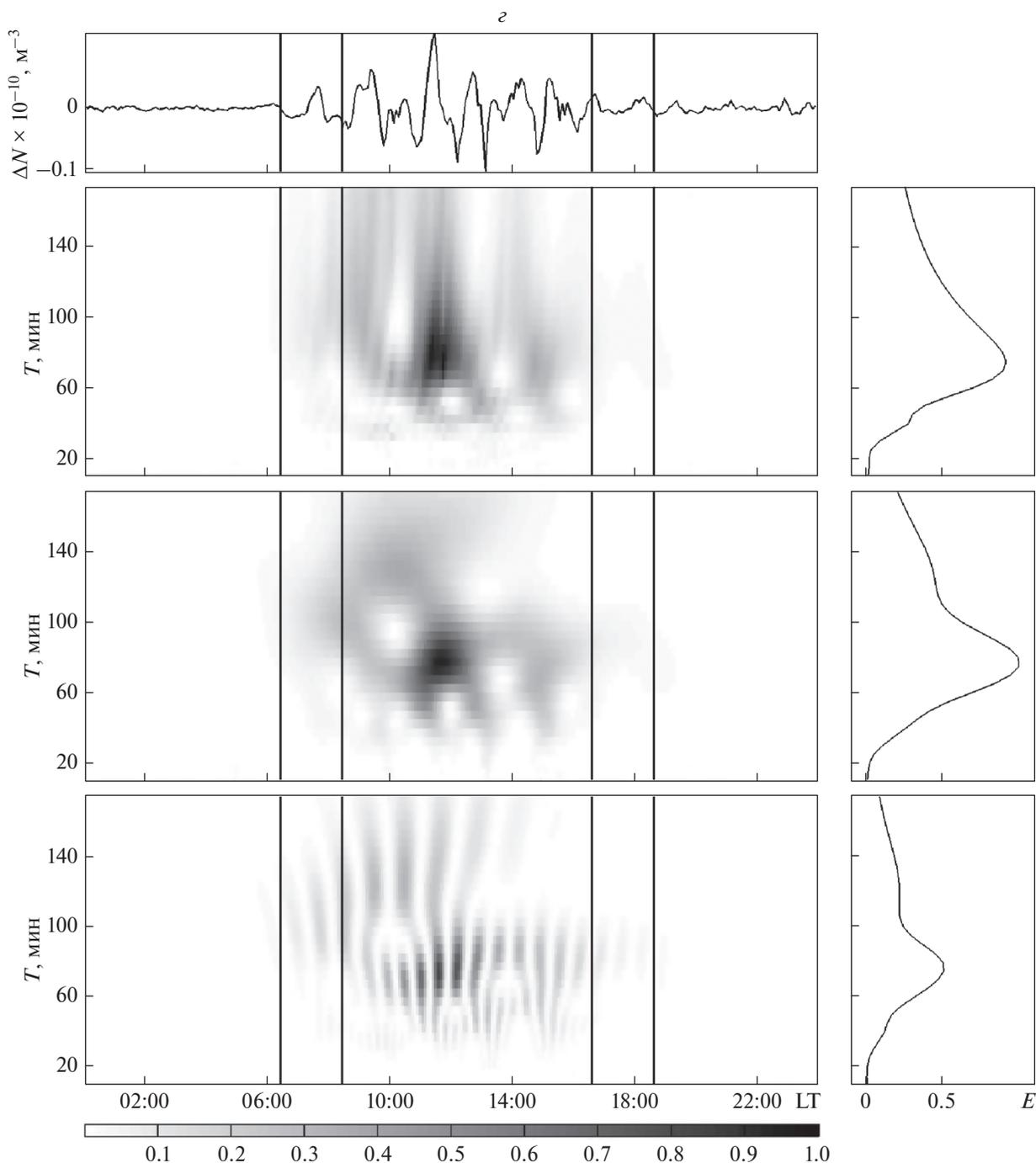


Рис. 2. Окончание.

была в ~ 3 раза меньше амплитуды преобладающего колебания. Эпизодически также возникали колебания с $T \approx 60$ мин и $\Delta T \approx 1-2$ ч.

В период осеннего равноденствия в утреннее, дневное и вечернее время было ярко выражено колебание с $T \approx 80-120$ мин (см. рис. 2в). Его продолжительность была не меньше 13 ч. В ночное

время основным было колебание с $T \approx 40-60$ мин и $\Delta T \approx 3-4$ ч.

Во время зимнего солнцестояния днем преобладало колебание с периодом 70–90 мин (см. рис. 2г). Его продолжительность составляла ~ 6 ч. В ночное время проявлялись ВВ с $T \approx 30-50$ мин.

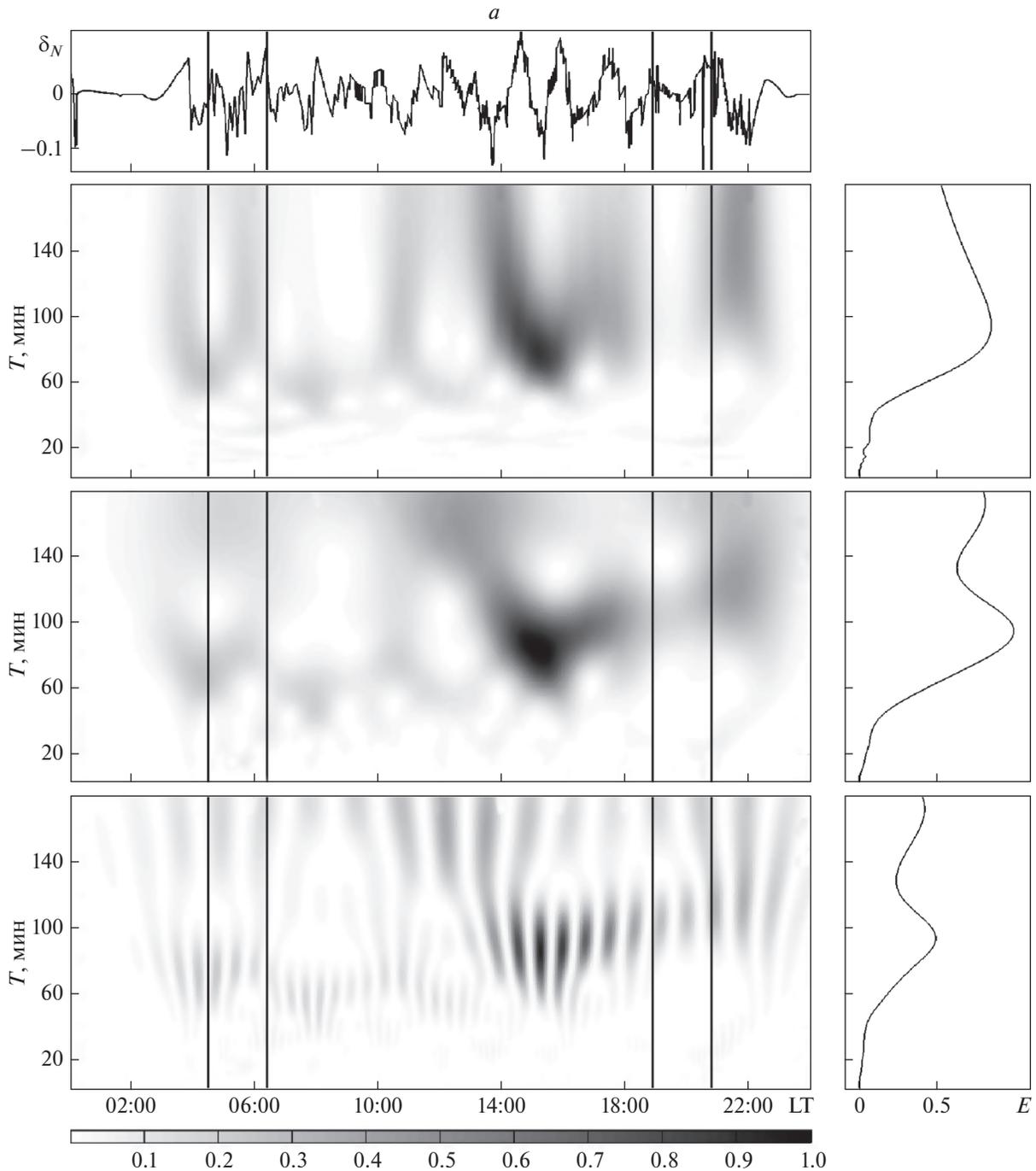


Рис. 3. Зависимость $\delta_N(t)$ для: (а) – 23 марта 2016 г., (б) – 23 июня 2016 г., (в) – 23 сентября 2016 г., (г) – 23 декабря 2016 г. Результаты ОПФ, АПФ, и ВП (панели сверху вниз). Справа показаны соответствующие энергограммы.

5.2. Спектральный состав суточно-сезонных вариаций относительных значений возмущений концентрации электронов

Результаты спектрального анализа $\delta_N(t)$ представлены на рис. 3. Из рисунка 3а видно, что в период весеннего равноденствия с 13:00 до 18:00 пе-

риод основного колебания был близок к 70–100 мин. Кроме того, в дневное время выделялись два колебания с периодами ~60 и 180 мин.

Вблизи летнего солнцестояния с 06:00 до 15:00 преобладало колебание с $T \approx 100$ –140 мин. Кроме него, эпизодически возникали колебания с периодами ~30 и 40–60 мин (см. рис. 3б). Их общая

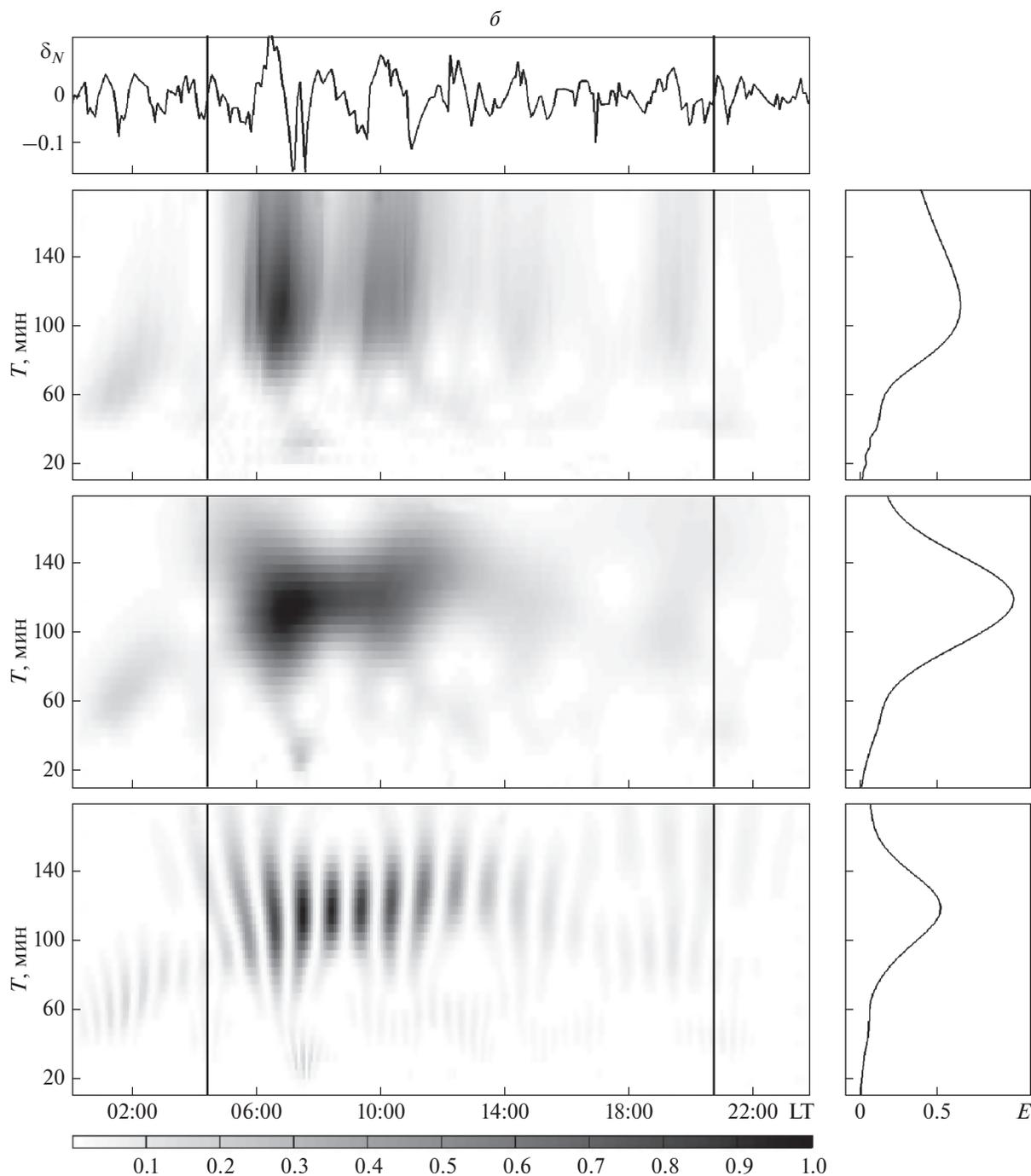


Рис. 3. Продолжение.

продолжительность составляла ~ 1 и 8 ч соответственно.

Во время осеннего равноденствия утром и днем преобладало колебание с $T \approx 80\text{--}120$ мин. Его продолжительность достигала 14 ч (см. рис. 3б). Ночью главным было колебание с $T \approx 40\text{--}60$ мин и $\Delta T \approx 2\text{--}3$ ч.

В период зимнего солнцестояния наибольшие вариации $\delta_N(t)$ имели место при прохождении солнечных терминаторов и в течение $6\text{--}7$ ч в дневное время (см. рис. 3г). Период основного колебания составлял $70\text{--}90$ мин. Кроме этого колебания, также наблюдалось колебание с периодом $30\text{--}50$ мин. Для него $\Delta T \approx 5$ ч.

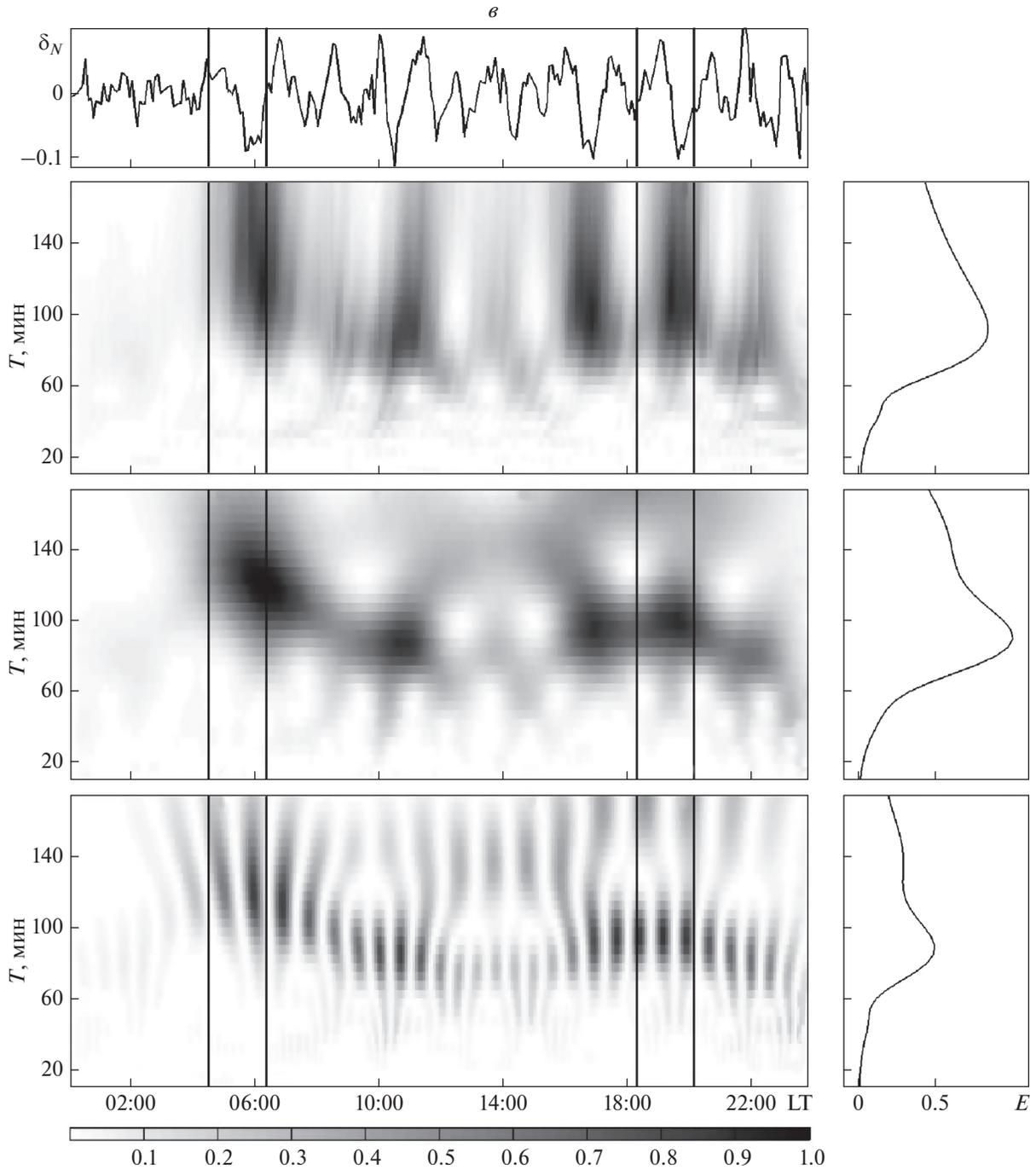


Рис. 3. Продолжение.

6. ОБСУЖДЕНИЕ

Как и следовало ожидать, суточно-сезонные вариации регулярных значений \bar{N} полностью соответствуют имеющимся представлениям о физико-химических процессах в ионосфере (см., например, [Брюнелли и Намгаладзе, 1988; Schunk and Nagy, 2000]). Полученные данные хорошо согласуются с измерениями методом некогерентно-

го рассеяния значениями \bar{N} в данном регионе в период роста солнечной активности [Ляшенко и др., 2006].

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

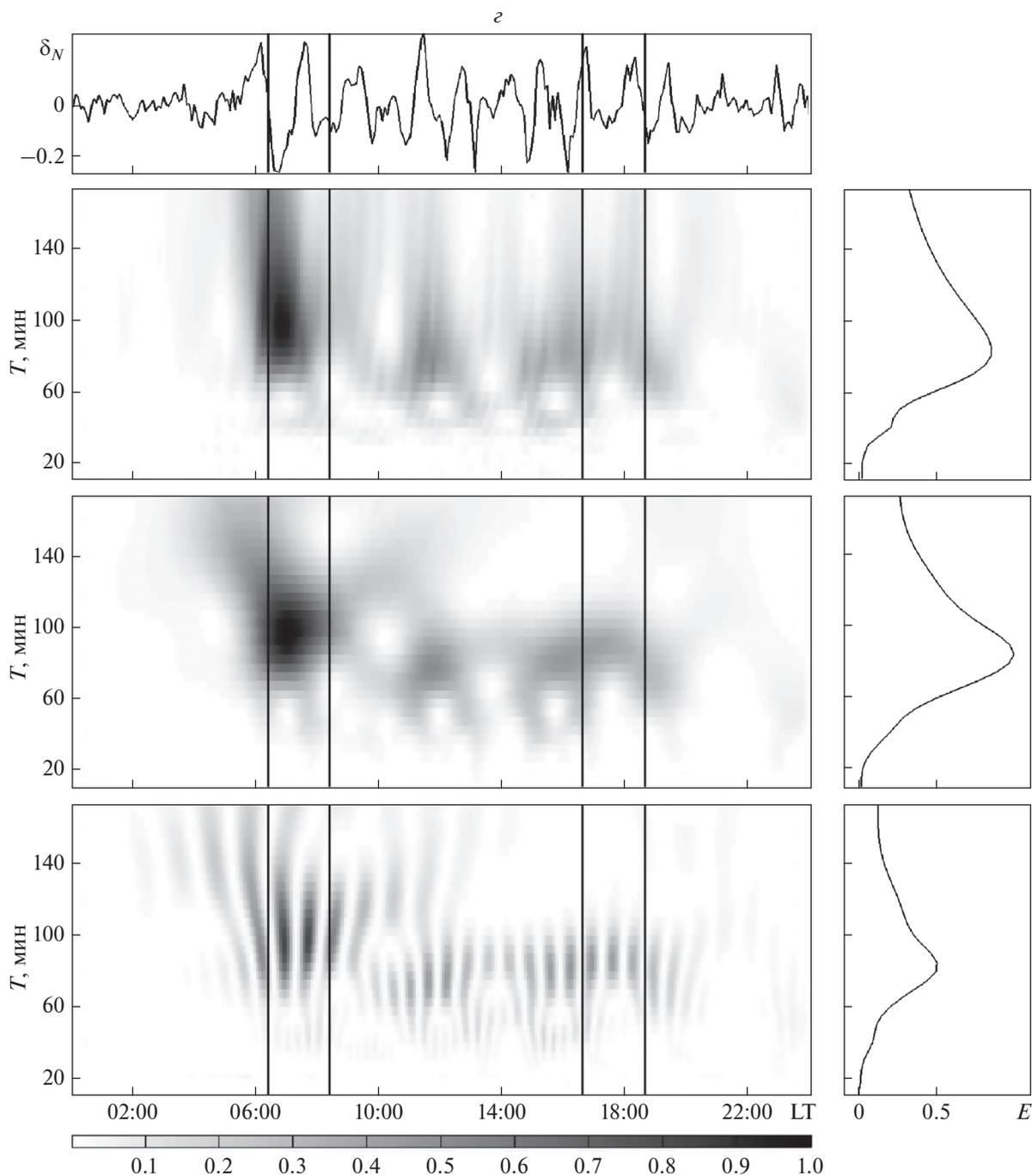


Рис. 3. Окончание.

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 в 4–10 раз меньше, чем в дневное время. В течение летнего солнцестояния значения ΔN_a в ночное время были меньше дневных значений в ~ 1.5 –2 раза.

Относительные амплитуды квазипериодических изменений концентрации электронов в дневное время были близки к 0.20–0.40, а в период зимнего солнцестояния достигали 0.60–0.70. В ночное время значение δ_N во все сезоны были в ~ 2 –6 раз меньше, чем в дневное время.

Период преобладающих колебаний в различные сезоны года составляли от 70 до 140 мин (см.

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	5×10^{10} (10^{10})	0.30–0.40 (0.10)	70–100	17
			30	1.5–2
			80	1.5–2
			(20–40, 50–70)	(6–7)
Летнее солнцестояние	$(2-4) \times 10^{10}$ ($(1.5-2) \times 10^{10}$)	0.20–0.30 (0.10–0.15)	100–140	19
			40–60	(5–6)
			(30, 50–70)	
Осеннее равноденствие	4×10^{10} ($(1-2) \times 10^{10}$)	0.20–0.30 (0.05–0.10)	80–120	13
			(40–60)	(3–4)
Зимнее солнцестояние	10×10^{10} ($(2-3) \times 10^{10}$) (10^{10})	0.60–0.70 0.10–0.20 (0.05–0.10)	70–90	6–7
			30–50	5
			(30–50)	(5–6)

табл. 2). Этот период близок к периоду гармоник приливных процессов в атмосфере, равному 120 мин [Брюнелли и Намгаладзе, 1988; Schunk and Nagy, 2000]. Эпизодически также появлялось колебание с меньшими δ_N и периодами $\sim 30, 60$, и 90 мин. Волновые процессы с указанными периодами и амплитудами свойственны внутренним гравитационным волнам [Брюнелли и Намгаладзе, 1988; Schunk and Nagy, 2000].

Продолжительность преобладающих колебаний была значительной: от 6–7 ч в течение зимнего солнцестояния 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 в 1.5–2 раза 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_{Na} и \bar{N} составляли 0.75–0.81 для различных сезонов.

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, [Бурмака и др., 2005, 2006а, б; Ляшенко и др., 2006]).

7. ВЫВОДЫ

1. Регулярные суточно-сезонные вариации концентрации электронов и ее ВВ в максимуме слоя F2 в период умеренной солнечной активности полностью соответствуют существующим представлениям о физико-химических процессах в ионосфере.

2. Во все сезоны на регулярный ход концентрации электронов накладывались ее квазипериодические вариации. Установлены основные закономерности, свойственные суточным и сезонным квазипериодическим изменениям концентрации электронов.

3. Во все сезоны в слое F2 ионосферы проявлялось преобладающее ВВ концентрации электронов со средним периодом 70–120 мин, имеющее абсолютную амплитуду $(2-10) \times 10^{10} m^{-3}$ и относительную амплитуду, равную 0.20–0.70.

4. Продолжительность преобладающего колебания в различные сезоны 2016 г. составляла 6–17 ч.

5. Эпизодически в спектре вариаций N также возникали колебания с периодами $\sim 30, 60$ и 90 мин. Их амплитуда была в несколько раз меньше амплитуды преобладающего колебания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авакян С.В., Дробжез 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. 167 с. 1981.
– Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука. 527 с. 1988.

- 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 аэрономия. Т. 46. № 2. С. 193–208. 2006а.
- 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 аэрономия. Т. 46. № 2. С. 209–218. 2006б.
- Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния // Успехи соврем. радиоэлектроники. № 3. С. 4–35. 2005.
- Волновые возмущения в ионосфере. Ред. Дробжев В.И. Алма-Ата: Наука. 172 с. 1987.
- Гершман Б.Н. Динамика ионосферной плазмы. М.: Наука. 256 с. 1974.
- Голицын Г.С., Чунгузов Е.П. Акустико-гравитационные волны в атмосфере / Полярные сияния и свечения ночного неба. М.: Наука. № 23. С. 5–21. 1975.
- Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. М.: Мир. 532 с. 1978.
- Григорьев Г.И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 42. № 1. С. 3–25. 1999.
- Дикий Л.А. Теория колебаний земной атмосферы. Л.: Гидрометеоздат. 196 с. 1969.
- 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. Т. 12. № 5/6. С. 58–68. 2006.
- Пономарев Е.А., Ерущенков А.И. Инфразвуковые волны в атмосфере Земли (Обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 20. № 12. С. 1773–1789. 1977.
- Сорокин В.М., Федорович Г.В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. М.: Энергоиздат. 136 с. 1982.
- Черногор Л.Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 5. С. 681–702. 2008.
- Черногор Л.Ф., Барабаш В.В. Волновые возмущения концентрации электронов в слое F2 ионосферы: сезонно-суточные вариации // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 17. № 4. С. 353–361. 2012.
- 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”. Киев: Академперіодика. С. 160–182. 2013.
- Электромагнитные проявления геофизических эффектов в Антарктиде. Ред. Литвиненко Л.Н., Ямпольский Ю.М. Харьков: Радиоастрономический институт НАН Украины. 331 с. 2005.
- Beer T. Atmospheric waves. N.Y.: Halsted Press. 315 p. 1974.
- Chimonas G. Observations of waves in the ionosphere // Planet Space Sci. V. 18. № 4. P. 591–605. 1970.
- Francis S.H. A theory of medium-scale travelling ionospheric disturbances // J. Geophys. Res. V. 79. № 34. P. 5245–5260. 1974.
- Francis S.H. Global propagation of atmospheric gravity waves: a review // J. Atmos. Terr. Phys. V. 37. P. 1011–1054. 1975.
- Hines C.O. Internal gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys. V. 38. P. 1441–1481. 1960.
- Schunk R.W., Nagy A.F. Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry / Cambridge atmospheric and space science series. Eds. Houghton J.T., Rycroft M.J., Dessler A.J. Cambridge: Cambridge University Press. 555 p. 2000.
- Tolstoy I. Long-period gravity waves in the atmosphere // J. Geophys. Res. V. 72. № 18. P. 4605–4622. 1967.
- Williams P.J.S. Tides atmospheric gravity waves and travelling disturbances in the ionosphere // Modern ionospheric science. A collection of articles published on the occasion of the anniversary: “50 years of ionospheric research in Lindau”. Katlenburg. Lindau: EGP. P. 136–180. 1996.
- Yeh K.C., Liu C.H. Acoustic gravity waves in the upper atmosphere // Rev. Geophys. Space Phys. V. 12. P. 193–216. 1974.
- Yeh K.S., Liu C.H. Theory of ionospheric waves. N.Y., London: Academic Press. 464 p. 1972.