

УДК 550.385:550.388

ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В ИОНОСФЕРЕ В ТЕЧЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОГО МИНИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2012 г. В. П. Бурмака¹, Л. Ф. Черногор²

¹Институт ионосферы НАНУ и МОНУ г. Харьков, Украина,

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

e-mail: viktor_burmaka@ukr.net, Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 12.10.2010 г.

После доработки 02.05.2011 г.

С использованием харьковского радара некогерентного рассеяния выполнены наблюдения за волновыми возмущениями (ВВ) концентрации электронов N в ионосфере на высотах 120–600 км. Измерения проведены в периоды весеннего и осеннего равноденствий, а также зимнего и летнего солнцестояний. Проанализированы высотно-временные зависимости абсолютных ΔN и относительных $\Delta N/N$ амплитуд волновых возмущений, а также спектральный состав возмущений. Показано, что ВВ в ионосфере с периодами 10–180 мин существовали практически в любое время суток и во все сезоны. Их абсолютные амплитуды изменялись от 6×10^9 до $6 \times 10^{10} \text{ м}^{-3}$, а относительные амплитуды — от 0.01 до 0.5. Максимальные значения ΔN и $\Delta N/N$ имели место на высоте ~200 км. Прохождение солнечного терминатора существенно изменяло параметры волновых возмущений.

1. ВВЕДЕНИЕ

Волны играют важную роль в переносе энергии и импульса в системе Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера (ЗАИМ), они ответственны за взаимодействие подсистем [Черногор 2003а, б; 2006; 2007]. Волны также несут важную информацию о строении околоземной среды и процессах в ней.

Знание морфологии и параметров волновых возмущений (ВВ) необходимо для построения адекватных моделей физических процессов в атмосфере и геокосмосе. Пока эти знания далеки от желаемых. Поэтому изучение ВВ в околоземной среде остается актуальной задачей, несмотря на то, что они изучаются около 60-ти лет (см., например, книги [Авакян и др., 1981; Beer, 1974; Гершман, 1974; Госсард и Хук, 1978; Казимировский и Кокоуров, 1979; Сорокин и Федорович, 1982; Волновые ..., 1987], а также обзоры [Yen and Liu, 1974; Francis, 1975; Hunsucker, 1982; Williams et al., 1988; Williams, 1996; Hocke and Schlegel, 1996; Григорьев, 1999; Бурмака и др., 2005 а, б]).

Одним из наиболее совершенных и информативных методов исследования ВВ является метод некогерентного рассеяния (НР). При помощи этого метода получены обширные знания о физических процессах в ионосфере, включая процессы, связанные с генерацией и распространением ВВ [Thome, 1964; Testud, Vasseur, 1969; Vasseur and Waldteufel, 1969; Ioannidis and Farley, 1972; Vasseur et al., 1972; Vidal-Madjar, 1978; Таран и др., 1979; Williams, 1982; Kirchengast et al., 1995]. Подобные

исследования проводились и нами [Бурмака и др., 2005а, 2006].

В работах [Бурмака и др., 2005а, 2006б] описаны результаты исследования ВВ вблизи максимума солнечной активности в 23-м цикле. Этот период характеризуется повышенными значениями концентрации электронов N в ионосфере, возникновением возмущений, сопровождающих ионосферные бури, и т.д.

В настоящей работе изложены результаты наблюдения ВВ в ионосфере в период глубокого и продолжительного минимума солнечной активности (2008–2009 гг.). Значения N в максимуме ионизации обычно не превышали $(1.6–3) \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$ в ночное и дневное время соответственно. Максимум ионизации находился на высотах 200–300 км в дневное и ночное время соответственно. Особенности в поведении регулярной ионосферы в рассматриваемый период должны наложить свой отпечаток на характер ВВ.

Целью настоящей работы является изложение результатов экспериментального исследования основных параметров ВВ в ионосфере в диапазоне высот 120–600 км в период минимума солнечной активности.

Как и в предыдущих наших работах, измерения выполнены вблизи характерных геофизических периодов — весеннего и осеннего равноденствий, летнего и зимнего солнцестояний.

2. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

Радар некогерентного рассеяния. Радар расположен в ионосферной обсерватории Института ионосферы (49°36'N, 36°18'E). Основные параметры радара следующие: частота – 158 МГц, диаметр зенитной параболической антенны – 100 м, эффективная площадь антенны – ~3700 м², коэффициент усиления антенны ~10⁴, ширина основного лепестка диаграммы направленности антенны ~1°, импульсная и средняя мощности радиопередающего устройства достигают 3.6 МВт и 100 кВт соответственно, длительность импульса $\tau_p \leq 800$ мкс, частота следования импульсов $F = 24.4$ Гц. Полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства составляет 5.5–9.5 кГц [Таран, 2001].

Ионозонд. Стандартный ионозонд “БАЗИС” предназначен для общего контроля состояния ионосферы и калибровки мощности НР-сигналов. Ионозонд расположен в ионосферной обсерватории рядом с радаром НР.

Методы анализа. Статистическому анализу подвергались временные зависимости мощности смеси сигнала и шума P_{sn} , мощности сигнала P_s и мощности шума P_n . При этом использовались методики, описанные в работах [Бурмака и др., 2004 а, б].

Аналізу повергались временные зависимости

$$\delta_q = k \frac{\delta P_s}{P_n},$$

$$\delta_N = \frac{\delta P_s}{P_s},$$

где $k = \frac{P_{\max} \tau_{p \max} \Delta f}{P \tau_p \Delta f_{\max} T_{\text{сист}}}$ (параметры с индексом “max” обозначают максимальные значения из всех измерительных кампаний, без индекса – текущие значения для каждой отдельной измерительной кампании), P – импульсная мощность радиопередающего устройства, $P_{\max} = 2.2$ МВт, $\tau_{p \max} = 800$ мкс, Δf – полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства, $\Delta f_{\max} = 9.5$ кГц, $T_{\text{сист}}$ – эффективная шумовая температура системы, приведенная ко входу радиоприемного устройства, $T_{\text{сист max}} = 570–1320$ К в зависимости от времени суток, $\delta P_s = P_s - \bar{P}_s$, \bar{P}_s и \bar{P}_n – мощности сигнала и шума соответственно, сглаженные с помощью скользящего среднего на интервале 180 мин. При этом δ_q и δ_N описывают временные вариации амплитуд и относительных амплитуд ВВ концентрации электронов. Поскольку δ_q измеряется в относительных единицах (о.е.), требовалась их нормировка. В данной измерительной кампании 1 о.е. $\approx 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Калибровочный коэффициент позволяет сравнивать значения δ_q , полученные при измерениях с различными параметрами радара.

Для оценки периодов и амплитуд ВВ применялись оконное преобразование Фурье (ОПФ), адаптивное преобразование Фурье (АПФ) и вейвлет преобразование (ВП), подробно описанные в работах [Лазоренко и др., 2006; Бурмака и др., 2007, Черногор, 2008].

При этом используется формат представления результатов анализа, предложенный в указанных работах.

3. СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Состояние космической погоды удобно описывать при помощи параметров солнечного ветра (концентрации n_{sw} и температуры частиц T_{sw} , частиц ветра, его скорости V_{sw} и давления p_{sw}), плотностей потоков протонов Π_{pr} и электронов Π_e , меридиональной компоненты Bz и модуля Bt межпланетного магнитного поля, энергетической функции Акасофу ϵ , Hp -компоненты геомагнитного поля, индексов AE и Dst , характеризующих магнитную активность в высоких и низких широтах, планетарного Kp -индекса. Эти данные представлены в интернете на сайтах: <http://www.srl.caltech.edu>, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>, <http://goes.ngdc.noaa.gov>. Значения p_{sw} и ϵ рассчитывались авторами.

В период осеннего равноденствия 2008 г. космическая погода (20–26 сентября) была спокойной (рис. 1). Значения параметров солнечного ветра, потоков высокоэнергичных частиц, магнитного поля и соответствующих индексов были свойственны невозмущенным условиям.

Накануне (21–22 сентября) и после (25 сентября) выбранных для анализа суток (23 сентября) имели место увеличение до 3–7 раз значений ϵ , уменьшение Bz до –5 нТл, рост в 5–8 раз значений индекса AE , уменьшение до –(10–20) нТл индекса Dst и увеличение Kp -индекса до 3. В эти интервалы времени наблюдалось слабое возмущение космической погоды.

Вблизи зимнего солнцестояния 2008 г. (14–20 декабря) гелигеофизическая обстановка была спокойной. Только 16–17 декабря имело место слабое возмущение (рис. 2). При этом Bz -компонента уменьшилась до –5 нТл, Dst -индекс – до –17 нТл. Индекс AE увеличился до 400 нТл, а Kp – до 2.

Вблизи весеннего равноденствия 2009 г. состояние космической погоды было практически невозмущенным. С 23 по 29 марта Bz -компонента эпизодически уменьшалась до –(3–4) нТл, AE -индекс увеличивался до 300–500 нТл, индекс Dst уменьшался до –(15–25) нТл, а индекс Kp достигал значений 2–4 (рис. 3).

В период летнего солнцестояния 2009 г. (с 15 по 21 июня) состояние космической погоды характеризовалось как спокойное. В выбранные

для анализа сутки (18 июня) флуктуации *Dst*-индекса не превышали единиц нанотесла (рис. 4). Индекс *Kp* изменялся от 0 до 2.

Таким образом, все выбранные для анализа сутки соответствовали невозмущенным условиям космической погоды. Это позволило более уверенно выделить суточные и сезонные особенности в поведении ВВ в ионосфере.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ

Период осеннего равноденствия. Максимальные значения отношения сигнал/шум $q \approx 11\text{--}12$ имели место вблизи полудня (около 09:00, здесь и далее UT) на высотах 130–150 км. По мере увеличения высоты значения q постепенно уменьшались. Кроме того, во временной зависимости $q(t)$ появлялся второй максимум (вблизи 17:00). При $z \approx 220\text{--}230$ км величина этих максимумов сравнялась, а выше второй максимум стал преобладать над первым.

ВВ наблюдались в течение всех суток (рис. 5).

Поведение амплитуд ВВ в целом отслеживало временные вариации q , а значит и N , поскольку q пропорционально N . В целом, в дневное время амплитуда ВВ была в 2–3 раза больше, чем в ночное время, и достигала значений 0.4–0.5 о.е.

Временные вариации относительных амплитуд δ_N и амплитуд были подобны. В среднем $\delta_N \approx 0.1$, эпизодически они достигали значений 0.2 и даже 0.3.

После восхода Солнца на уровне ионосферы (высота около 450 км) значения $\delta_N(t)$ постепенно увеличивались от 0.2 до 0.4–0.5. Максимальные значения δ_N имели место около 06:00. Продолжительность этого процесса была около 6 час.

После захода Солнца на уровне Земли амплитуда δ_q увеличилась от 0.2 до 0.5–0.7 о.е. Это продолжалось около 4 ч.

Описанные эффекты наблюдались на всех высотах.

Период зимнего солнцестояния. Максимальные значения $q \approx 6$ наблюдались на высотах 140–160 км в ~09:00.

Временные вариации δ_q и δ_N в основном повторяли суточный ход $N(t)$. В дневное время δ_q и δ_N достигали значений 0.5–0.6 о.е. и 0.3–0.4 соответственно. В ночное время δ_q и δ_N приближались к 0.2 о.е. и 0.3 соответственно.

После восхода Солнца в ионосфере (высота 450 км) имел место квазипериодический процесс с $\delta_q \approx 0.1$ о.е., $\delta_N \approx 0.1$ и периодом $T \approx 20\text{--}30$ мин продолжавшийся около 3–4 ч (рис. 6). Далее на его смену пришел процесс с квазипериодом $T \approx 1\text{--}2$ ч. Его продолжительность составляла не менее 7 ч.

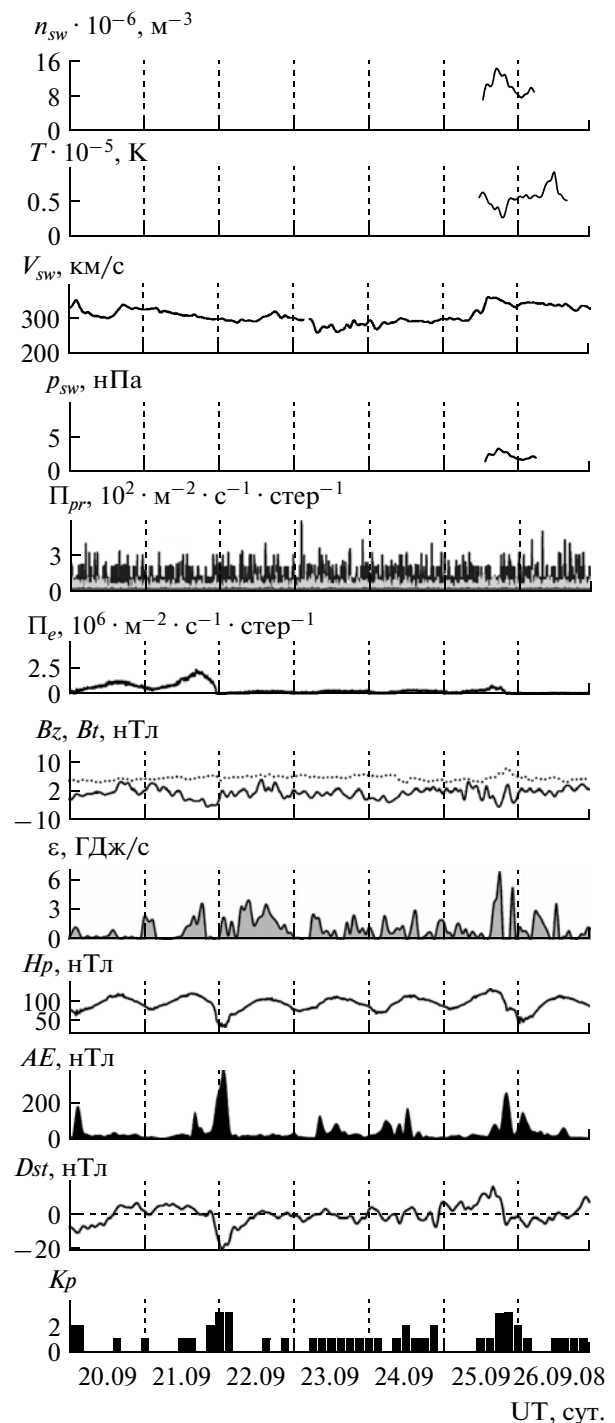


Рис. 1. Временные вариации концентрации и температуры частиц, радиальной скорости солнечного ветра V_{sw} (ACE Satellite – Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor) и давления солнечного ветра (расчет) в период с 20 по 26 сентября 2008 г.: временные вариации потоков протонов P_{pr} (космический аппарат GOES-8(W75)) и электронов P_e (GOES-12), компоненты B_z и модуля B_t межпланетного магнитного поля (космический аппарат ACE Satellite – Magnetometer); H_p – компоненты геомагнитного поля (космический аппарат GOES-12); AE – индекса авральной активности (World Data Center for Geomagnetism Kyoto University); Dst – индекса (World Data Center for Geomagnetism Kyoto University); Kp – индекса (US Air Force Weather Agency).

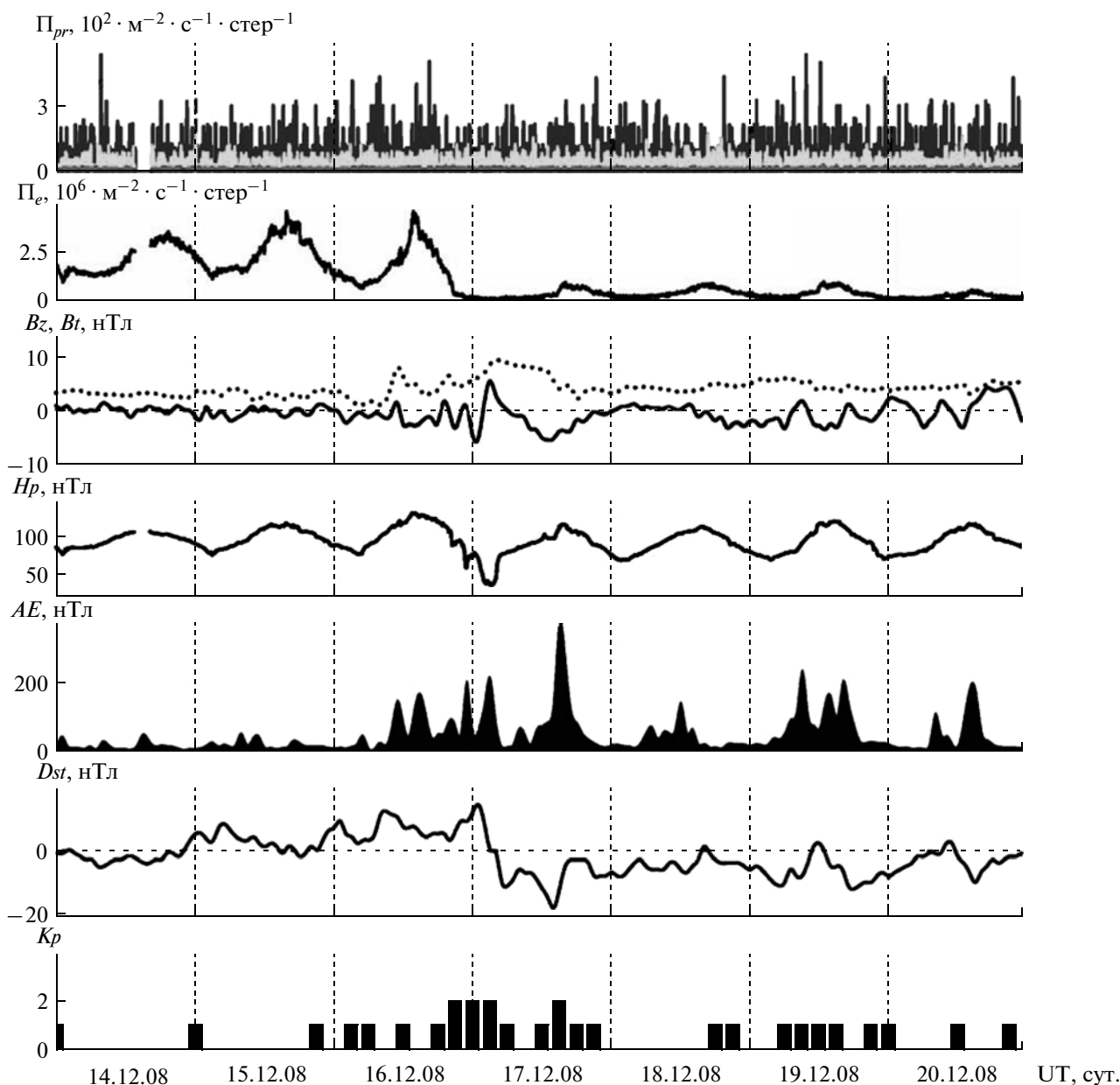


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для 14–20 декабря 2008 г.

После захода Солнца на уровне Земли возник квазипериодический процесс, который наложился на существовавший. Амплитуды временных вариаций δ_q и δ_N достигали значений 0.4–0.5 о.е. и 0.2–0.3.

Период весеннего равноденствия. Максимальные значения q регистрировались в интервале времени 09:00–10:00 на высотах 140–160 км.

Наибольшие значения δ_q (~0.4 о.е.) и δ_N (~0.4) наблюдались на высоте 200 км (рис. 7).

ВВ отмечались в течение суток. Почти сразу же после восхода Солнца на уровне Земли значения δ_q увеличились от 0.1 до 0.2–0.3 о.е. Это продол-

жалось около 8 ч. Заход Солнца привел к изменению характера ВВ и их спектрального состава. Значения δ_q в дневное и ночное время были близкими между собой, тогда как значения δ_N днем достигали 0.1–0.2, а ночью – 0.2–0.4, т.е. увеличились в среднем в 2 раза.

Летнее солнцестояние. В летнее время зависимость $q(t)$ имела два максимума. Первый из них имел место через 2–4 ч после восхода Солнца на уровне Земли, а второй – в зависимости от высоты в интервале времени 13:00–15:00. Величина второго максимума достигала 6 на высотах 120–130 км.

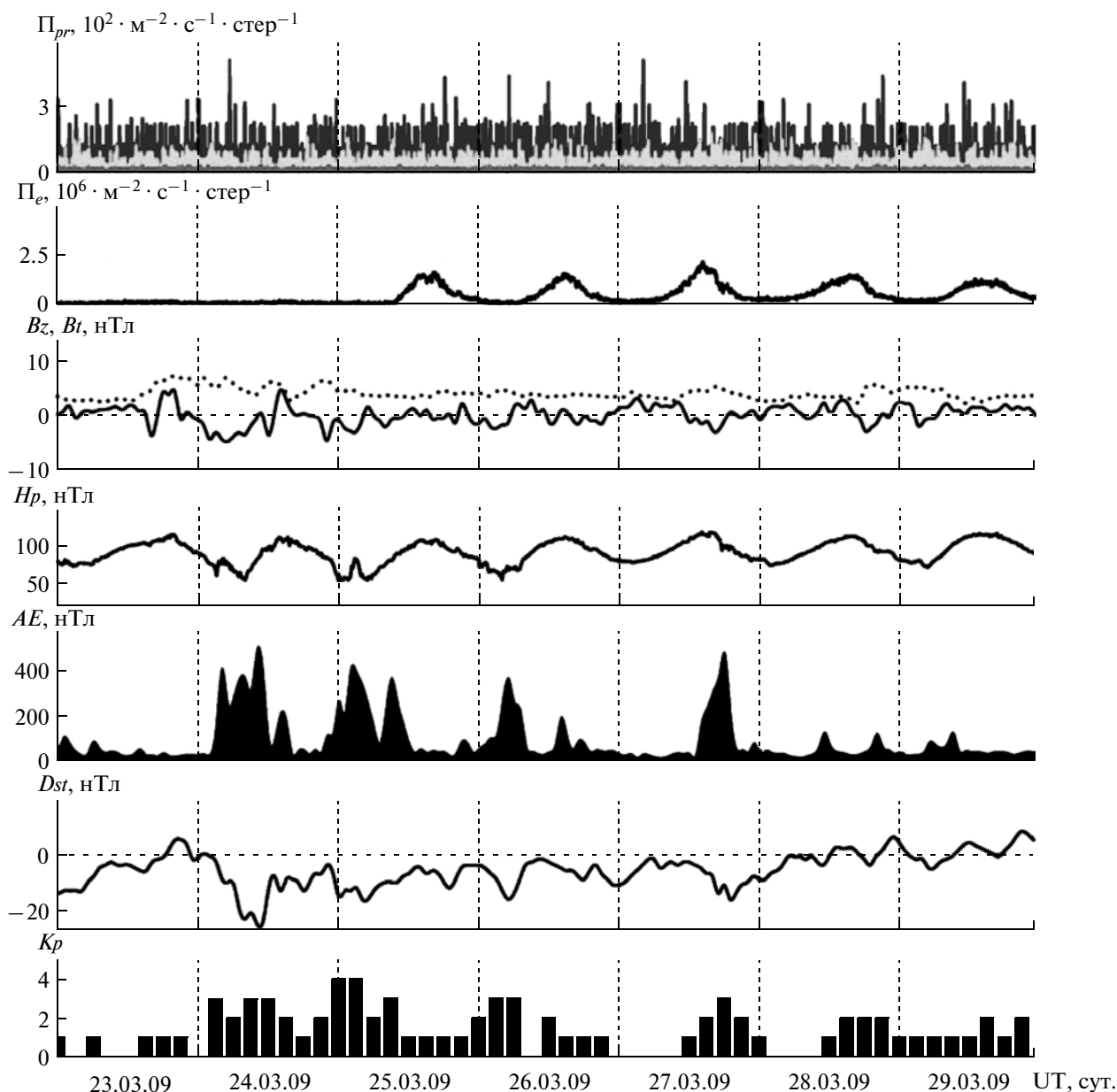


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, для 23–29 марта 2009 г.

Как и для других сезонов, наибольшие значения δ_q и δ_N наблюдались при $z \approx 200$ км (рис. 8).

Амплитуда δ_q в среднем принимала значения 0.05 и 0.1 о.е. в ночное и дневное время соответственно. Исключение составляли интервалы времени, следовавшие за восходом и заходом Солнца.

Примерно через 2 ч после восхода Солнца на уровне Земли имел место резкий всплеск δ_q до 0.6–0.7 о.е. Затем его спад до -0.5 о.е. и опять рост до 0.3 о.е. Общая продолжительность этого процесса составляла ~ 4 час.

Вскоре после захода Солнца на уровне Земли значения δ_q изменялись в течение 5–6 час по ква-

зипериодическому закону. Амплитуда ВВ достигала 0.6 о.е.

Временные вариации δ_q и δ_N были подобными.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Спектральный анализ временных зависимостей δ_N для фиксированных высот производился для диапазона периодов 10–180 мин. Учитывая, что амплитуда гармоник с $T \approx 10$ –30 мин были примерно на порядок меньше, чем амплитуда составляющих с $T \approx 120$ –180 мин, спектральный

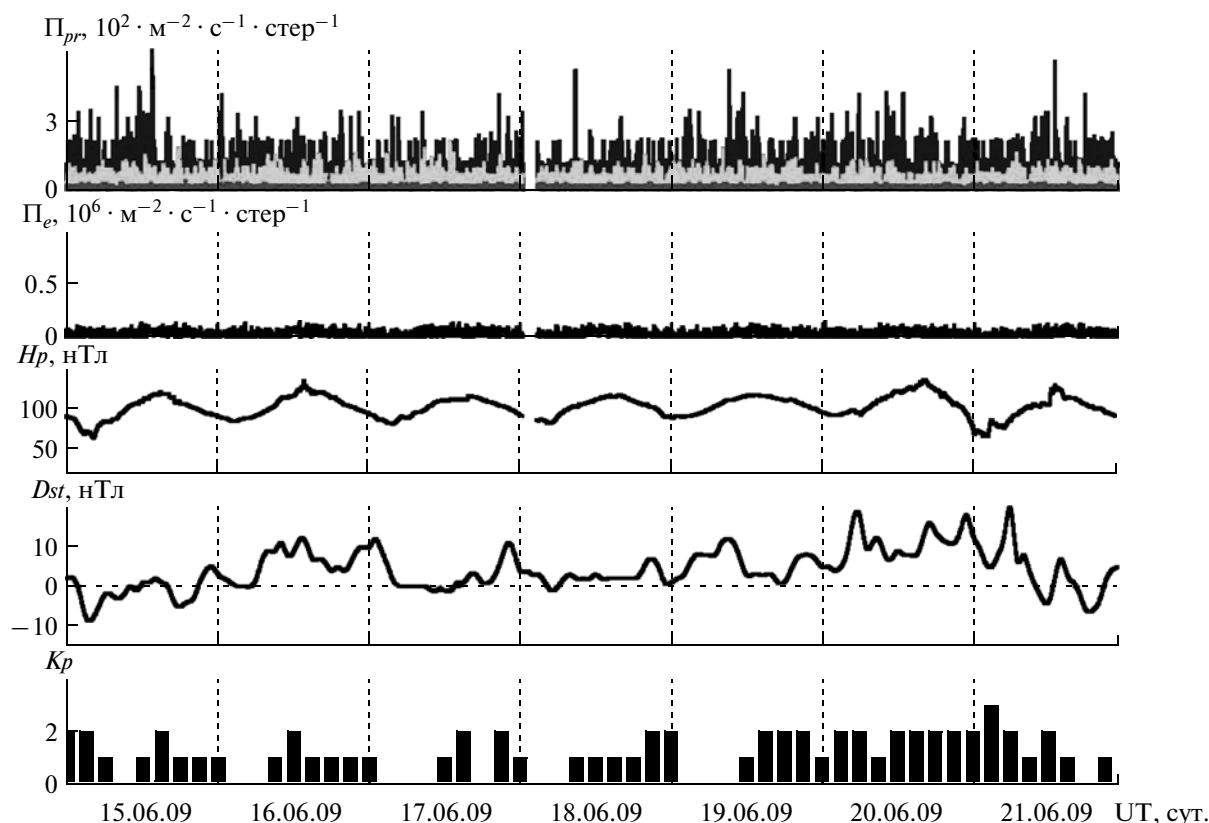


Рис. 4. То же, что и на рис. 1, для 15–21 июня 2009 г.

анализ был также выполнен для поддиапазонов периодов 10–25, 25–65 и 65–180 мин.

Для примера далее приведены результаты анализа временных зависимостей δ_N на высоте 200 км.

Осеннее равноденствие. Поведение ВВ 23 сентября 2008 г. было следующим. При прохождении утреннего и вечернего солнечного терминатора в ионосфере (высоты 100–500 км) наблюдались две группы возмущений с очень широким спектром: от 15 до 180 мин и $\delta_N \approx 0.05–0.30$ соответственно. Продолжительность этих возмущений была около 4–5 ч.

В остальное время суток в ионосфере также имели место ВВ примерно с теми же периодами, но с меньшей амплитудой (0.02–0.15).

Зимнее солнцестояние. 17 декабря 2008 г. наблюдались три группы сильных ВВ: перед восходом Солнца с $T = 140–180$ мин, вблизи местного полудня с $T = 120–180$ мин и вблизи местной полуночи с $T = 100–130$ мин (рис. 10). Относительная амплитуда этих ВВ достигала 0.30–0.45, а продолжительность ΔT не превышала 2–3 ч. Почти одновременно с названными возмущениями проявлялись ВВ с $T \approx 20–70$ мин и $\delta_N \approx 0.05–0.10$.

Весеннее равноденствие. Поведение ВВ 25 марта 2009 г. было следующим (рис. 11). Наиболее

сильное ($\delta_N \approx 0.45$) возмущение наблюдалось вблизи местной полуночи. Значение $T \approx 110–160$ мин, $\Delta T \approx 4$ ч.

Менее сильные ($\delta_N \approx 0.1–0.2$) ВВ имели место в течение восхода Солнца в ионосфере (02:00–04:00), в первой половине дня (с 05:00 до 08:00) и в течение захода Солнца в ионосфере (17:00–19:00). Их периоды составляли ~20–30, 50–60 и 160–180 мин, продолжительность – ~2–4 ч.

Летнее солнцестояние. Пример ВВ, наблюдавшихся 18 июня 2006 г., показан на рис. 12. Видно, что имели место две группы сильных ($\delta_N \approx 0.4–0.5$) ВВ в утреннее время (03:00–07:00) в период захода–восхода Солнца в ионосфере (18:00–24:00). Периоды возмущений составляли 15–30, 50–70 и 100–180 мин, а их продолжительности – ~4–6 часов. Как и в другие сезоны, меньшим периодам соответствовали меньшие значения δ_N (от 0.05 до 0.10–0.15).

6. ОБСУЖДЕНИЕ

Целью работы был поиск ВВ (квазипериодических колебаний) в диапазоне периодов от 10 мин до 3 часов. Такие периоды имеют внутренние гравитационные волны (ВГВ).

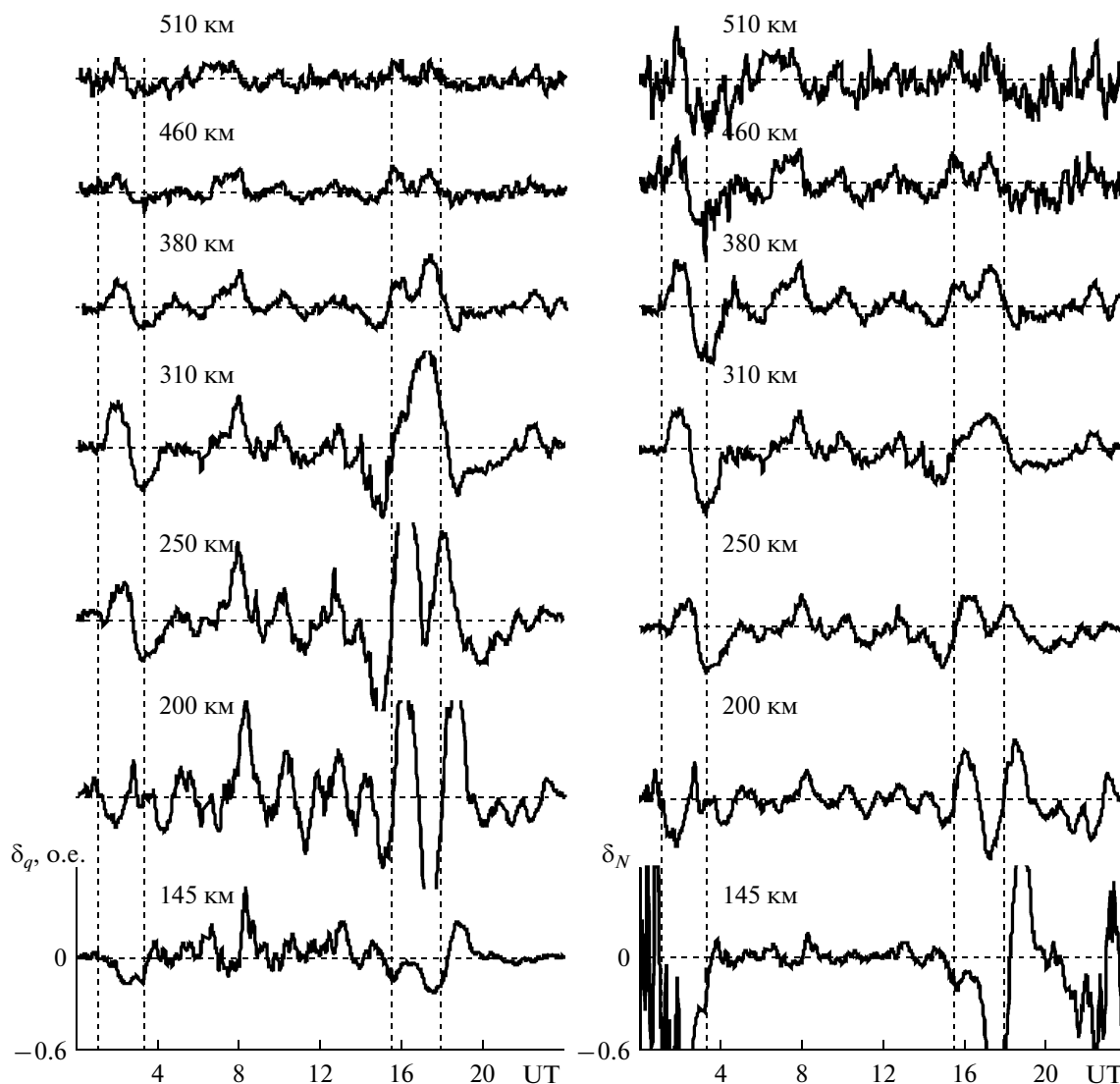


Рис. 5. Временные вариации возмущений δ_q и относительных возмущений δ_N концентрации электронов в период осеннего равноденствия 23 сентября 2008 г. (вертикальными пунктирными линиями отмечены моменты восхода и захода Солнца на высоте 450 км и на уровне Земли).

Источники ВВ. Существует не менее десяти мощных источников естественного и антропогенного происхождения, генерирующих ВГВ в атмосфере (см., например, [Госсард и Хук, 1978; Сорокин и Федорович, 1982]). К первым относятся солнечный терминатор, геокосмические бури, сильные землетрясения, взрывы мощных вулканов, погодные фронты, обтекание ветром горных массивов, солнечные затмения, падение болидов и т.д.

К антропогенным источникам ВГВ относятся старты и полеты ракет и крупных самолетов, мощные взрывы, нагрев ионосферной плазмы радиоизлучением мощных радиосистем и т.п.

В результате воздействия этих источников в атмосфере возникает интерференция ВГВ. Спектр

этих волн широкий и постоянно изменяется во времени.

Солнечный терминатор. К регулярно действующим в определенное время суток источникам ВГВ относится солнечный терминатор. Однако даже он не приводит к генерации полностью повторяющихся от суток к суткам возмущений. В момент прохождения терминатором ионосферных высот в ионосфере генерируются ВВ с $T \approx 20\text{--}30$ мин, $\Delta N \approx 3 \times 10^9 \text{ м}^{-3}$ и $\delta_N \approx 0.03\text{--}0.05$.

С запаздыванием по отношению к моменту восхода Солнца, которое изменялось в пределах 1–2 ч, в ионосфере наблюдались ВВ с $T \approx 2\text{--}3$ ч $\Delta N \approx 3 \times 10^{10} \text{ м}^{-3}$ и $\delta_N \approx 0.3\text{--}0.5$. Их продолжительность составляла 5–6 ч.

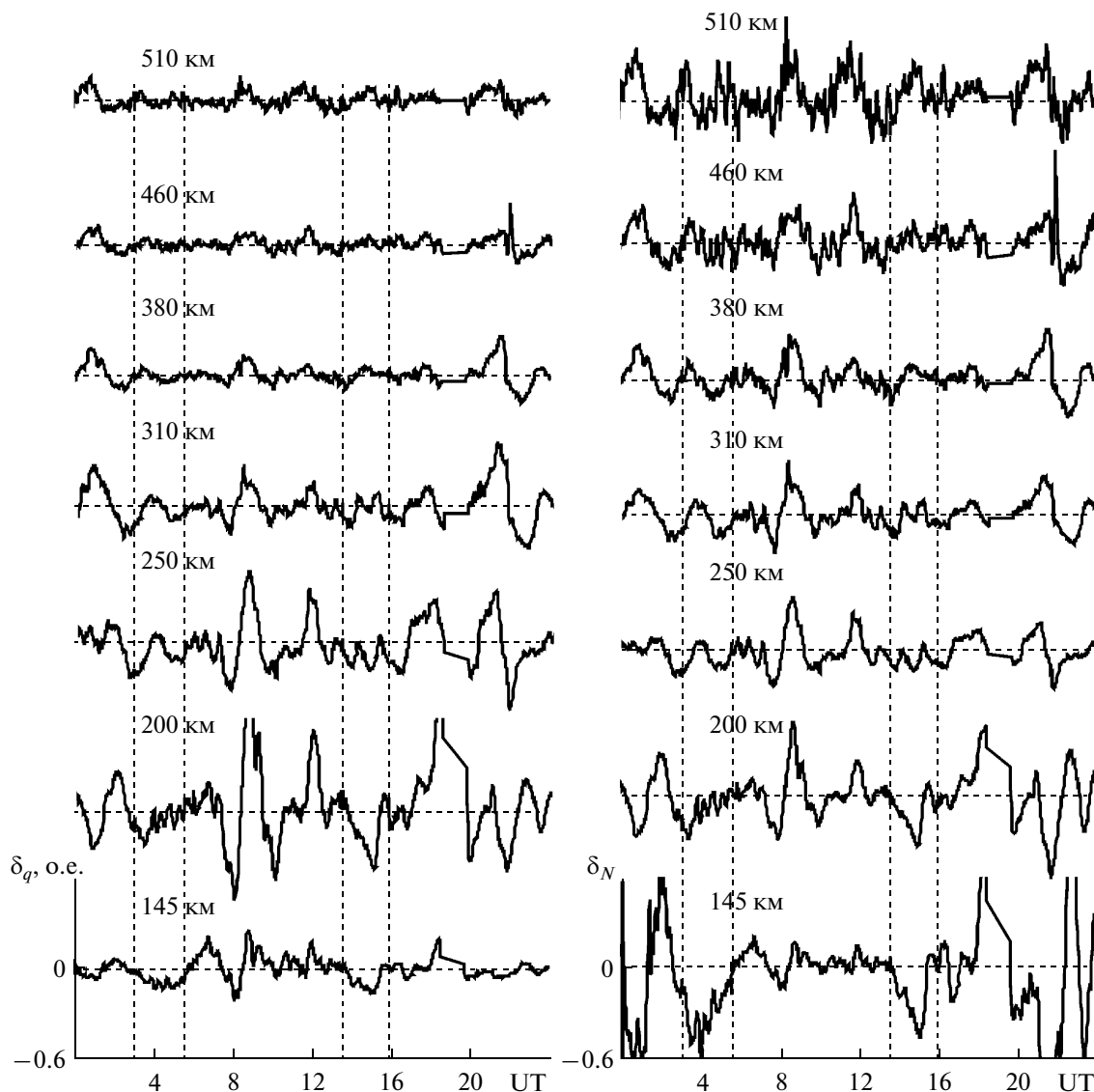


Рис. 6. То же, что и на рис. 5, для периода зимнего солнцестояния 17 декабря 2008 г.

Если такие ВВ вызваны действием утреннего и вечернего терминаторов, суммарная длительность ВВ в течение суток составляет 10–12 ч. Более вероятно, что возмущения с $T = 2–3$ ч и достаточно большой амплитудой ($\Delta N \approx 5 \times 10^{10} \text{ м}^{-3}$) представляют собой гармонику приливных процессов, имеющих период 12 ч. Как известно, высшие гармоники с периодами 6, 4, 3 и 2 ч образуются в результате нелинейного распада волны с $T = 12$ ч.

Полученные данные об эффектах солнечного терминатора дополнили сведения, приведенные в работах [Антонова и др., 1988; Сомсиков, 1991; Иванов и др., 1994; Galushko et al., 1998; Костров и др., 1999а, б; Бурмака и др., 2003а, б, 2004 а, б, 2006; Костюкевич и др., 2004].

Периоды ВВ. Спектральный анализ показал, что ВВ с периодами 10–180 мин в действительно-

сти наблюдались в течение почти всего времени суток и в различные сезоны.

Наименьшие значения периода определялись частотой Брента-Вайсяля (см., например, [Гершман, 1974; Госсард и Хук, 1978]):

$$T_{\min} = \frac{2\pi}{\omega_B} = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma H}{\gamma - 1 g}},$$

где γ – показатель адиабаты, g – ускорение свободного падения, H – приведенная высота нейтральной атмосферы. При значении H на высотах F -области ионосферы, равном 30–50 км, имеем $T_{\min} \approx 11–14$ мин.

Максимальное значение $T_{\max} \approx 3$ ч ограничено периодами гармоник приливных волн в атмосфе-

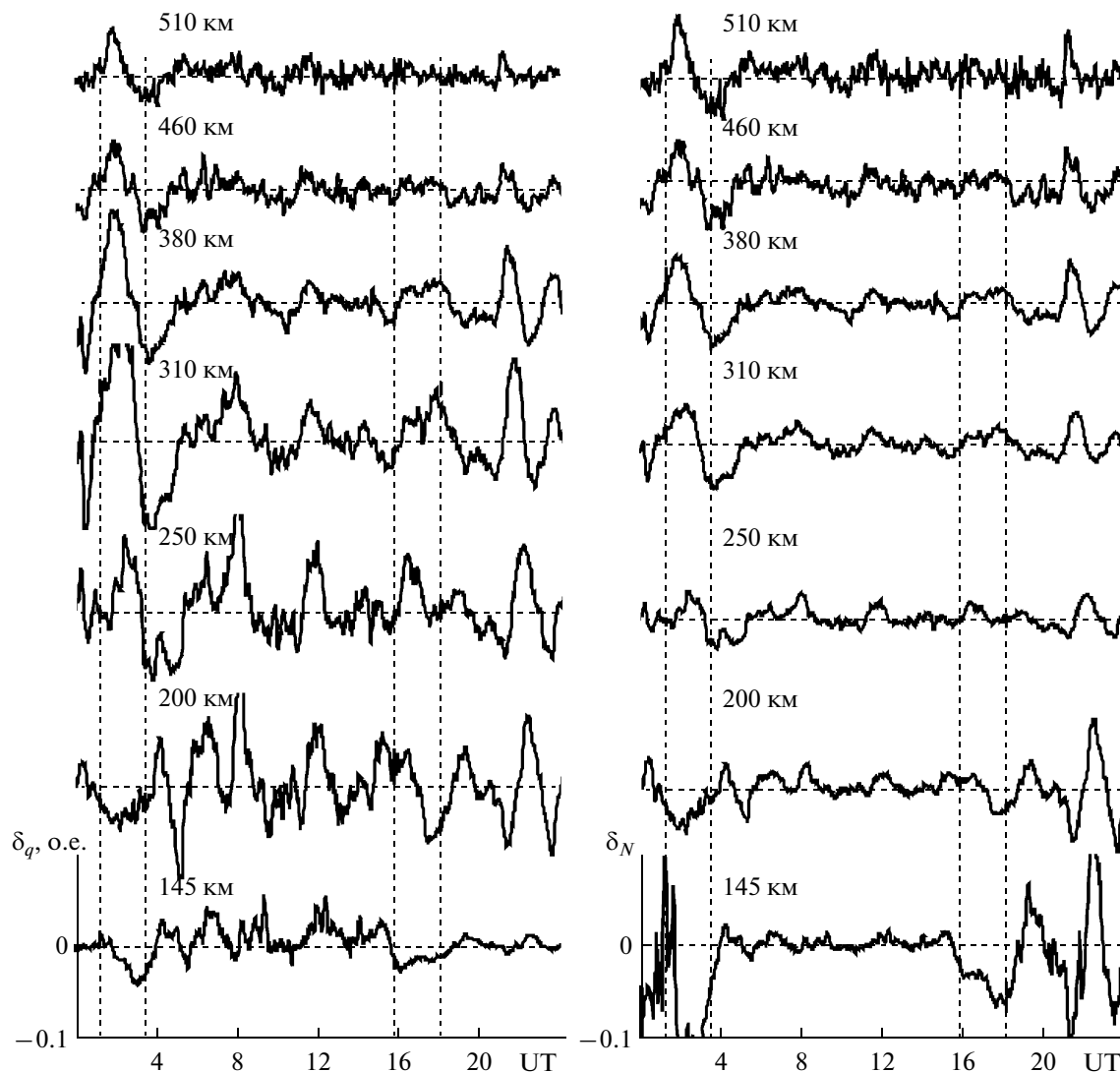


Рис. 7. То же, что и на рис. 5, для периода весеннего равноденствия 25 марта 2009 г.

ре (см., например, [Гершман, 1974; Госсард и Хук, 1978]).

ВВ в ионосфере с периодом от 10 мин до 3 ч возникают в результате модуляции концентрации электронов атмосферными ВГВ.

Полученные данные о периодах согласуются с результатами других авторов и дополняют их (см., например, [Бакай и др., 1980; Иванов и Терехов, 1983; Иванов и др., 1987, 1994; Афраймович и др., 2001а, б]). Так, в обзоре [Антонова и др., 1988] $T \approx 1-2.5$ ч, в работе [Galushko et al., 1998] $T \approx 1.5-2.5$ ч, а в статье [Костюкевич и др., 2004] $T \approx 50-70$ мин.

Амплитуды ВВ. Этот параметр возмущений также изменялся в широких пределах. Волны с периодами, равными нескольким десяткам минут,

имели относительные амплитуды $\delta_N \approx 0.01-0.05$, реже δ_N достигала 0.1.

Относительная амплитуда ВВ с $T \approx 2-3$ ч составляла 0.3–0.5. Волны с такими амплитудами должны быть нелинейными. Известно, что нелинейность проявляется после прохождения волной расстояний в тысячи километров. При этом в результате действия эффекта укручения профиля волны крутизна переднего и заднего фронтов заметно отличаются (см., например, [Григоренко и др., 2003]). В настоящих наблюдениях крутизна волны обоих фронтов была практически одинаковой. Это означает, что возмущения, скорее всего, генерировались вблизи области наблюдения и представляли собой колебательный процесс, вызванный приливами в атмосфере.

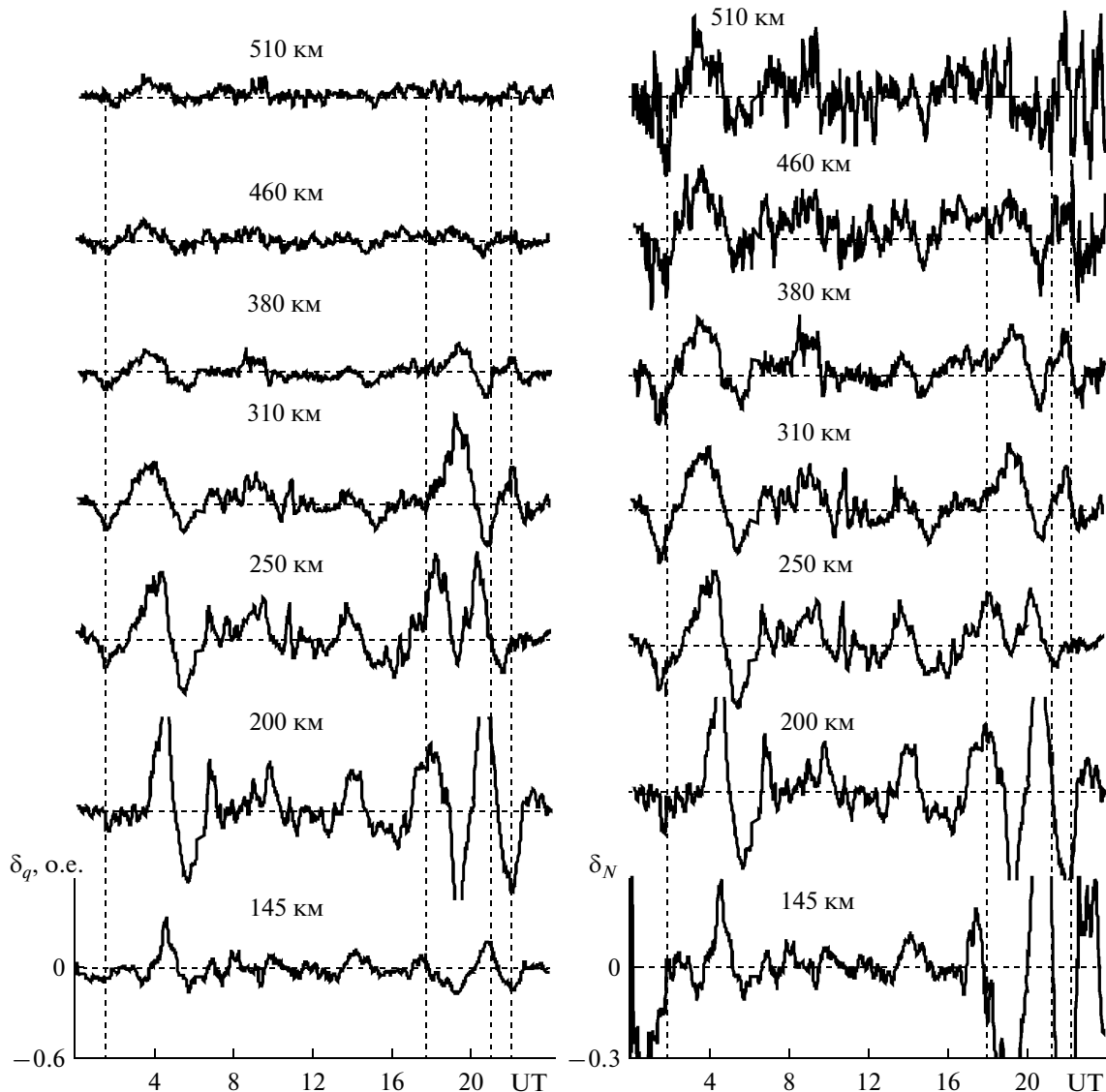


Рис. 8. То же, что и на рис. 5, для периода летнего солнцестояния 18 июня 2009 г. (вертикальными пунктирными линиями отмечены моменты восхода и захода Солнца на высоте 250 км и на уровне Земли).

Высотная зависимость амплитуд ВВ. В течение всех сезонов наблюдалось увеличение как абсолютных, так и относительных амплитуд при увеличении высоты примерно от 120 до 200 км, а затем — их уменьшение при дальнейшем увеличении высоты. Максимальные значения ΔN и δ_N имели место на высоте ~ 200 км. Такое поведение амплитуд объясняется следующим [Гершман, 1974; Бурмака и др., 2006]. С одной стороны, в нижней части F -области ионосферы амплитуды ВВ увеличиваются при увеличении высоты как

$$\Delta N(z) \sim \exp \left\{ \int_0^z \frac{dz}{2H} \right\}.$$

Причиной этого увеличения служит падение давления в атмосфере по закону

$$p(z) = p(0) \exp \left\{ - \int_0^z \frac{dz}{H} \right\}$$

и рост относительных возмущений давления

$$\frac{\Delta p}{p} = \exp \left\{ \int_0^z \frac{dz}{2H} \right\}.$$

С другой стороны, по мере увеличения высоты увеличивается роль амбиполярной диффузии. В нижней части области F она выражена слабо. В верхней части этой области диффузия является определяющей. Конкуренция двух названных процессов при-

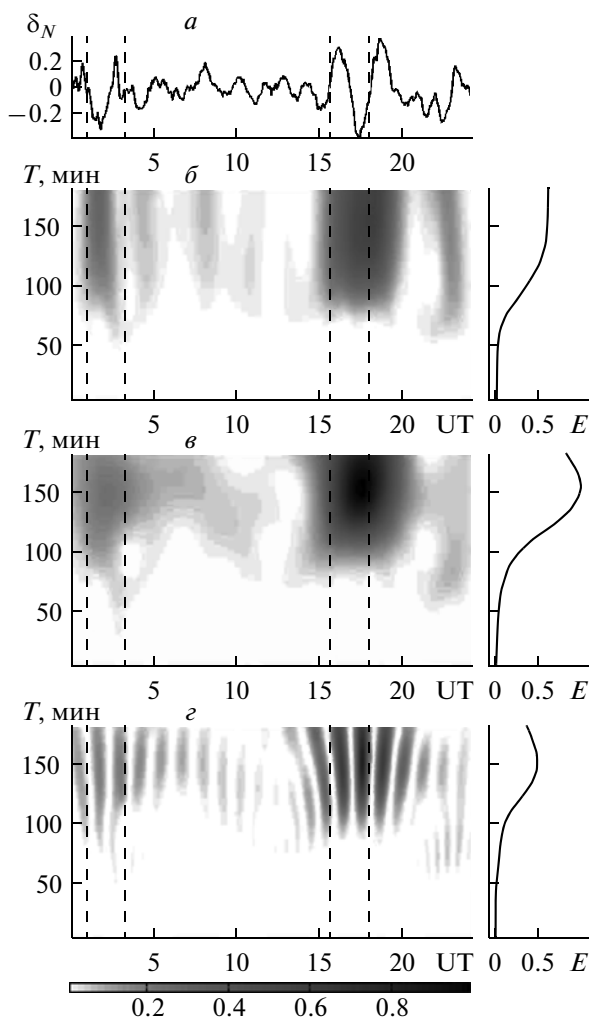


Рис. 9. Результаты спектрального анализа временных вариаций $\delta_N(t)$ 23 сентября 2008 г. для высоты 200 км: *a* – сигнал; *б*, *в*, *г* – спектрограммы (в относительных единицах) энергограммы (в относительных единицах) соответственно для оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования сигнала.

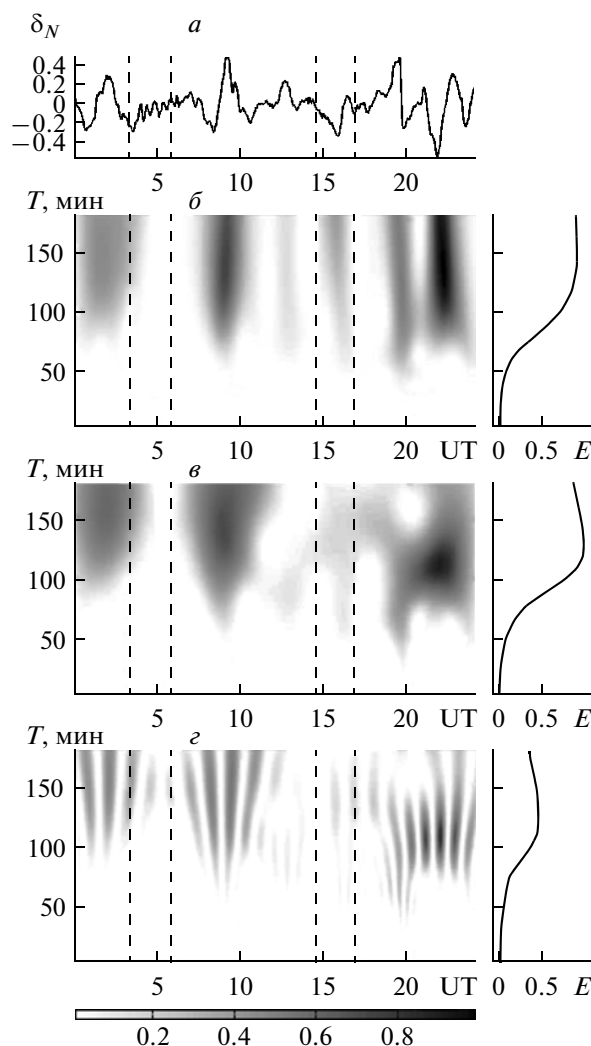


Рис. 10. То же, что и на рис. 9, для 17 декабря 2008 г., $z = 200$ км.

водит к формированию максимальных значений ΔN и δ_N на высоте $z \approx 200$ км.

По-видимому, свою роль в формировании высотной зависимости ΔN и δ_N также играют волновые свойства термосферы.

Суточная зависимость ВВ. Временные зависимости абсолютных амплитуд ΔN и относительных амплитуд δ_N в значительной мере подобны. Они, как правило, отслеживают суточную зависимость регулярной концентрации электронов. При равных значениях ΔN в светлое и темное время суток значения δ_N в 2–3 раза больше ночью, чем днем.

При прохождении солнечного терминатора и через 1–2 ч после этого наблюдался рост как ΔN ,

так и δ_N . Значения первых достигали $4 \times 10^{10} - 6 \times 10^{10} \text{ м}^{-3}$, вторых – 0.4–0.5.

Сезонная зависимость амплитуд ВВ. Значения как абсолютных, так и относительных амплитуд от сезона зависели слабо. Примерно одинаковым был и спектральный состав ВВ.

Возможно, несколько отличалась реакция ионосферных возмущений, сопутствовавших солнечному терминатору. Например, в периоды равноденствий после восхода и захода Солнца на уровне Земли сначала появляется положительная, затем отрицательная и наконец опять положительная полуволны возмущений (см. рис. 5 и 7). В периоды солнцестояний ВВ начинались с отрицательной полуволны. Интересной была реакция на прохождение терминатора в июне – возмущения от вечернего и утреннего терминаторов накладывались друг на друга. Дело в том, что в

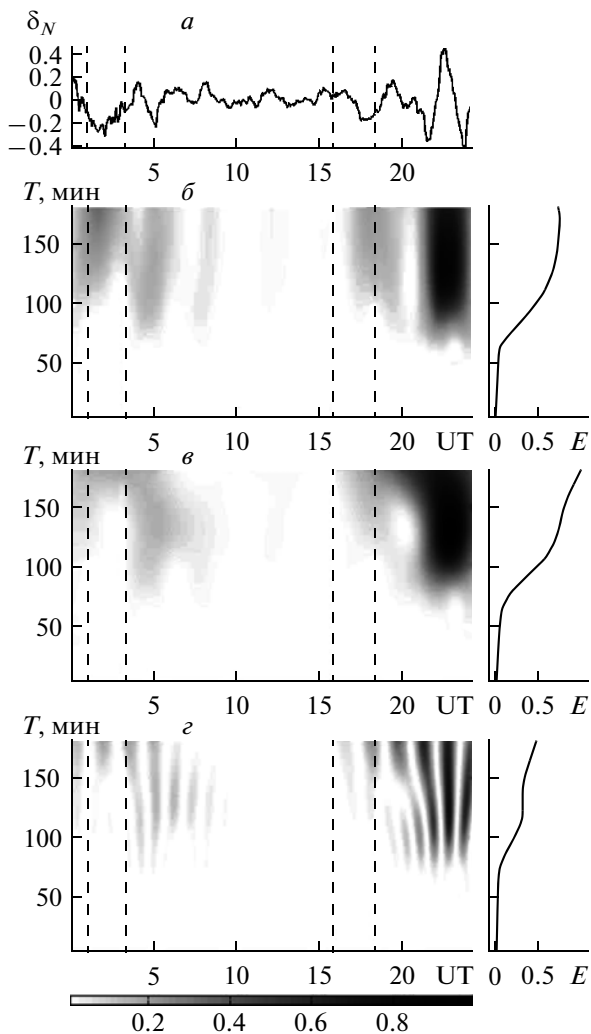


Рис. 11. То же, что и на рис. 9, для 25 марта 2009 г., $z = 200$ км.

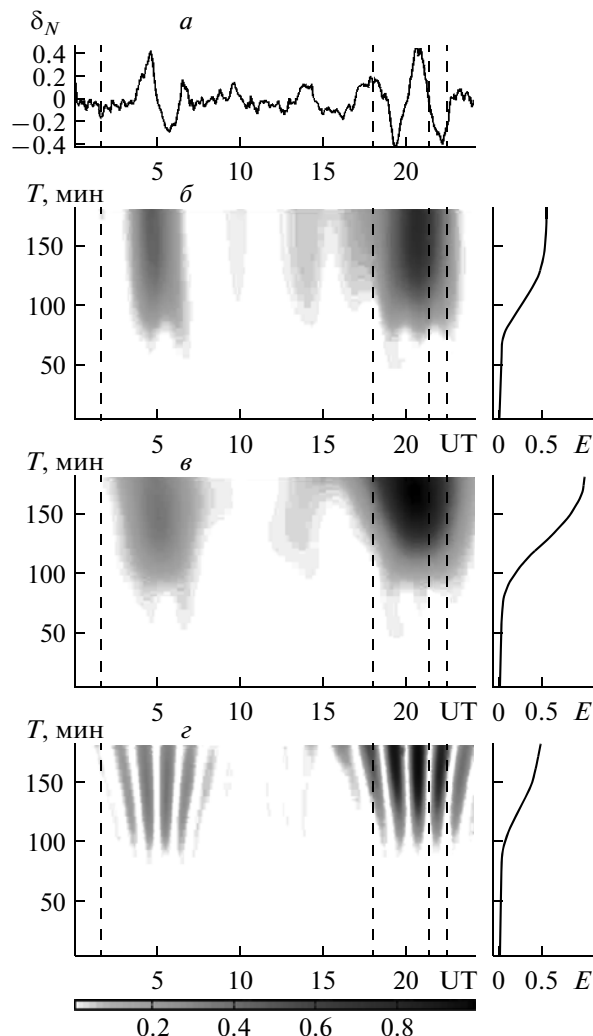


Рис. 12. То же, что и на рис. 9, для 18 июня 2009 г., $z = 200$ км.

ионосфере на высотах $z > 250\text{--}300$ км Солнце не заходило.

7. ВЫВОДЫ

Анализ волновых возмущений в ионосфере в период глубокого и продолжительного минимума солнечной активности показал следующее.

1. ВВ в ионосфере присутствовали практически всегда. Волновая активность во все сезоны была примерно одинаковой.

2. ВВ концентрации электронов имели широкий спектр периодов: примерно от 10 мин до 3 ч. Наибольшие амплитуды имели возмущения с периодами $\sim 2\text{--}3$ ч и продолжительностью 4–6 ч.

Для них $\Delta N_{\max} \approx 6 \times 10^{10} \text{ м}^{-3}$, $\delta_{N \max} \approx 0.5$. Параметры ВВ с $T \approx 20\text{--}30$ мин следующие: $\Delta N_{\max} \approx 5 \times 10^9 \text{ м}^{-3}$, $\delta_{N \max} \approx 0.05\text{--}0.10$.

3. Высотные зависимости $\Delta N(z)$ и $\delta_N(z)$ — не-монотонные. До высоты $z \approx 200$ км амплитуды ВВ увеличиваются, достигая максимальных значений. Затем с увеличением высоты они уменьшаются.

4. Временные зависимости $\Delta N(t)$ и $\delta_N(t)$ в основном подобны между собой, в целом они отслеживают суточный ход $N(t)$.

5. Как утренний, так и вечерний терминаторы существенно влияют на волновую активность в ионосфере. Их прохождение может подавлять существовавший в среде волновой процесс и приводить к генерации ВВ с иными параметрами.

Через 1–2 ч после восхода Солнца на уровне Земли наблюдались ВВ с $T \approx 2\text{--}3$ ч, $\Delta N_{\max} = (2\text{--}6) \times 10^{10} \text{ м}^{-3}$ и $\delta_N \approx 0.2\text{--}0.5$. Их продолжительность составляла 5–6 ч.

Реакция на прохождение вечернего терминатора наступала через 0.5–1 ч после захода Солнца на уровне Земли. Параметры ВВ примерно такие же, как и после прохождения утреннего терминатора.

Авторы благодарны Л.Я. Емельянову, А.Ф. Кононенко и С.В. Черняеву за проведение измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авакян С.В., Дробжес 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, 167 с. 1981.
- Антонова В.П., Гусейнов Ш.Ш., Дробжес В.И. и др. Комплексное экспериментальное исследование волн в атмосфере, генерируемых солнечным терминатором // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. Т. 24. № 2. С. 134–143. 1988.
- Афраймович Э.Л., Бернгард О.И., Золотухина Н.А., Штынев Б.Г. Корреляция P_s6 пульсаций геомагнитного поля, вариаций полного электронного содержания и мощности эхо-сигнала обратного рассеяния во время большой магнитной бури 24–25 сентября 1998 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 41. № 5. С. 595–603. 2001а.
- Афраймович Э.Л., Косоголов Е.А., Ласюта О.С., Ушаков И.И. Спектр перемещающихся ионосферных возмущений по данным глобальной сети GPS // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 44. № 10. С. 828–839. 2001б.
- Бакай А.С., Иванов В.П., Карвецкий В.Л. и др. Пространственно-временная структура волновых возмущений в ионосфере. – В кн.: Волновые возмущения в атмосфере. Алма-Ата. С. 50–64. 1980.
- Бурмака В.П., Костров Л.С., Черногор Л.Ф. Статистические характеристики сигналов доплеровского ВЧ радара при зондировании средней ионосферы, возмущенной стартами ракет и солнечным терминатором // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 8. № 2. С. 143–162. 2003а.
- Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Результаты комплексных радиофизических наблюдений волновых возмущений в геокосмосе, сопровождавших страты и полеты ракет // Космічна наука і технологія. ДОДАТОК. Т. 9. № 2. С. 57–61. 2003б.
- Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 44. № 4. С. 518–534. 2004а.
- Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Комплексные радиофизические исследования волновых возмущений в ионосфере, сопровождавших старты ракет на фоне естественных нестационарных процессов // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 9. № 1. С. 5–28. 2004б.
- Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния // Усп. соврем. радиоэлектроники. № 3. С. 4–35. 2005а.
- Бурмака В.П., Лысенко В.Н., Черногор Л.Ф. Результаты исследования волновых процессов в ионосфере при различных состояниях космической погоды // Космічна наука і технологія. Т. 11. № 1/2. С. 37–57. 2005б.
- Бурмака В.П., Лысенко В.Н., Черногор Л.Ф., Черняк Ю.В. Волновые процессы в F-области ионосферы, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Байконур // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 46. № 5. С. 1–18. 2006.
- Бурмака В.П., Панасенко С.В., Черногор Л.Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических процессов в геокосмосе // Усп. соврем. радиоэлектроники. № 11. С. 3–24. 2007.
- Волновые возмущения в ионосфере. Алма-Ата, Наука, 172 с. 1987.
- Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. М.: Мир, 532 с. 1978.
- Гершман Б.Н. Динамика ионосферной плазмы. М.: Наука, 256 с. 1974.
- Григоренко Е.И., Лазоренко С.В., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопровождавшие вспышку на Солнце и сильнейшую магнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 43. № 6. С. 770–787. 2003.
- Григорьев Г.И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 42. № 1. С. 3–25. 1999.
- Иванов В.Н., Терехов А.С. Результаты исследования методом ВНЗ волновых возмущений среднеширотной ионосферы. // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 26. № 10. С. 1308–1320. 1983.
- Иванов В.П., Карвецкий В.Л., Коренькова Н.А. Сезонно-суточные вариации в параметрах среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 27. № 3. С. 511–516. 1987.
- Иванов В.П., Карвецкий В.Л., Коренькова Н.А. Структура и динамика перемещающихся волнообразных возмущений по данным доплеровского зондирования ионосферы. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 34. № 1. С. 109–114. 1994.
- Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д. Движения в ионосфере. Новосибирск. Наука, 344 с. 1979.
- Костров Л.С., Розуменко В.Т., Черногор Л.Ф. Доплеровское радиозондирование естественно возмущенной средней ионосферы. // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 4. № 3. С. 209–226. 1999а.
- Костров Л.С., Розуменко В.Т., Черногор Л.Ф. Доплеровское радиозондирование возмущений в средней ионосфере, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 4. № 3. С. 227–246. 1999б.
- Костокевич С.М., Нагорский П.М., Цыбиков Б.Б. Волновые возмущения в вечернее время на суточном ходе f_oF_2 // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 44. № 4. С. 476–479. 2004.
- Лазоренко О.В., Панасенко С.В., Черногор Л.Ф. Адаптивное преобразование Фурье // Электромагнитные волны и электронные системы. Т. 10. № 10. С. 39–49. 2006.

- *Сомсиков В.М.* Волны в атмосфере, обусловленные солнечным терминатором (Обзор). // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 31. № 1. С. 1–12. 1991.
- *Сорокин В.М., Федорович Г.В.* Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. М.: Энергоиздат, 136 с. 1982.
- *Таран В.И.* Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 41. № 5. С. 659–666. 2001.
- *Таран В.И., Подъячий Ю.И., Головин В.И. и др.* Перемещающиеся ионосферные возмущения, обнаруженные методом некогерентного рассеяния. // Ионосферные исследования. № 27. С. 102–110. 1979.
- *Черногор Л.Ф.* Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 8. № 1. С. 59–106. 2003 а.
- *Черногор Л.Ф.* Земля–атмосфера–геокосмос как открытая динамическая нелинейная система // Космічна наука і технологія. Т. 9. № 5/6. С. 96–105. 2003 б.
- *Черногор Л.Ф.* “Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера” как открытая динамическая нелинейная физическая система (Ч. 1) // Нелинейный мир. Т. 4. № 12. С. 655–697. 2006.
- *Черногор Л.Ф.* “Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера” как открытая динамическая нелинейная физическая система (Ч. 2) // Нелинейный мир. Т. 5. № 4. С. 198–231. 2007.
- *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.
- *Beer T.* Atmospheric waves. Halsted Press. 315 p. 1974.
- *Francis S.H.* Global propagation of atmospheric gravity waves: a review. // J. Atmos. Terr. Phys. V. 37. P. 1011–1054. 1975.
- *Galushko V.G., Paznukhov V.V., Yampolski Y.M., Foster J.C.* Incoherent scatter radar observations of AGW/TID events generated by the moving solar terminator. // Ann. Geophysicae. V. 16. P. 821–827. 1998.
- *Hocke K., Schlegel K.* A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982–1995. // Ann. Geophysicae. V. 14. P. 917–940. 1996.
- *Hunsucker R.D.* AGWs generated in the high-latitude ionosphere: a review. // Rev. Geophys. Space Phys. V. 20. P. 293–315. 1982.
- *Ioannidis G., Farley D.T.* Incoherent scatter observations at Arecibo using compressed pulses. – Radio Sci. V. 7. № 7. P. 763–765. 1972.
- *Kirchengast G., Hocke K., Schlegel K.* Gravity waves determined by modeling of TIDs in ISR measurements. // Radio Sci. V. 30. № 6. P. 1551–1567. 1995.
- *Testud G., Vasseur G.* Gravity waves in the thermosphere. // Ann. Geophysicae. V. 25. № 2. P. 525–545. 1969.
- *Thome G.D.* Incoherent scatter observations of traveling ionospheric disturbances. // J. Geophys. Res. V. 69. № 19. P. 4047–4056. 1964.
- *Vasseur G., Reedy C.A., Testud J.* Observations of waves and TIDs. // Space Research 12. Berlin. V. 2. P. 1109–1131. 1972.
- *Vasseur G., Waldteufel P.* Thomson scatter observation of gravity wave in the ionospheric F-region. // J. Atmos. Terr. Phys. V. 31. № 7. P. 885–895. 1969.
- *Vidal-Madjar D.* Gravity wave detection in lower thermosphere with the French incoherent scatter facility. // J. Atmos. Terr. Phys. V. 40. № 6. P. 685–689. 1978.
- *Williams P.J.S.* Observations of atmospheric gravity waves with incoherent scatter radar. // Adv. Space Res. V. 9(5). P. 65–72. 1982.
- *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: EGS. P. 136–180. 1996.
- *Williams P.J.S., Crowley G., Schlegel K., et al.* The generation of atmospheric gravity waves observed during the Worldwide Acoustic-Gravity wave Study (WAGS). // J. Atmos. Terr. Phys. V. 50. P. 323–337. 1988.
- *Yen K.C., Liu C.H.* Acoustic gravity waves in the upper atmosphere. // Rev. Geophys. Space Phys. V. 12. P. 193–216. 1974.