

Л.Ф. ЧЕРНОГОР, д-р физ.-мат. наук, проф., проф., ХНУ имени В.Н. Каразина, Харьков;
В.В. БАРАБАШ, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков

ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В СЛОЕ F2 ВБЛИЗИ ПЕРИОДОВ ВЕСЕННЕГО И ОСЕННЕГО РАВНОДЕНСТВИЯ

Выполнен анализ суточных вариаций концентрации электронов N в слое F2 ионосферы в период весеннего и осеннего равноденствий в 2011 г. Приведены результаты спектрального анализа, для осуществления которого было применено оконное преобразование Фурье, адаптивное преобразование Фурье и вейвлет-преобразование. Для рассмотренных периодов в слое F2 ионосферы обнаружено преобладающее колебание с периодом 140–200 мин, амплитудой $\Delta N_e \approx (0.2 - 2) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Его продолжительность в зависимости от сезона изменялась от 5–7 до 15 ч.

Ключевые слова: метод вертикального зондирования, равноденствия, концентрация электронов, регулярные и квазипериодические возмущения, спектральный анализ, внутренние гравитационные волны.

Введение. Ионосфера – один из основных каналов распространения радиоволн это. Особую роль играют нестационарные процессы в ионосфере, которые ограничивают потенциальные характеристики различных радиосистем [1].

Важное место в нестационарных процессах ионосферы отводится квазипериодическим (волновым) процессам. Существует большое количество экспериментальных и теоретических работ относящихся к их исследованию (см., например, [2,3]). Тем не менее, можно сказать, что систематическое изучение таких процессов только начинается (см., например, [4]).

Поскольку непрерывные наблюдения в глобальных масштабах являются невозможными, исследователи ограничиваются измерениями для характерных геофизических периодов (см., например, [4]). К ним относятся весеннее и осеннее равноденствия, а также летнее и зимнее солнцестояния.

Цель данной работы – исследование суточных вариаций концентрации электронов и её волновых возмущений в максимуме слоя F2 ионосферы, для периодов весеннего и осеннего равноденствия 2011.

Методика анализа. Для спектрального анализа использовались оконное преобразование Фурье (ОПФ), адаптивное преобразование Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразование (ВП). Формат представления данных анализа такой же, как в работе [5]. Системный спектральный анализ выполнен для диапазона периодов 30–360 мин.

© Л.Ф. Черногор, В.В. Барабаш, 2013

Суточные вариации концентрации электронов. Рассмотрим отдельно регулярные и нерегулярные вариации концентрации электронов.

Регулярные вариации. Во время весеннего и осеннего равноденствий временные вариации концентрации электронов N в максимуме слоя F2 в основном были подобными (рис. 1а и 1б). В промежутке времени 0000 – 0400 LT (здесь и далее время LT, местное) $N \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. После восхода Солнца на высотах слоя F2 концентрация электронов постепенно возросла до значений $(6 - 7) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ в период весеннего равноденствия и до величин $(1.0 - 1.1) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ в период осеннего равноденствия. Максимальное значение N имело место в 1200 – 1300 и 1000 – 1200 в периоды осеннего и весеннего равноденствий соответственно. После этого наблюдался медленный спад значений N до $(5 - 7) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ до момента захода Солнца на уровне Земли. После захода Солнца в ионосфере скорость уменьшения N возросла. К 2200 достигалось минимальное значение концентрации (около $(2 - 3) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$).

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

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

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

В период осеннего равноденствия в ночное время $\Delta N_a \approx (1 - 5) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, а в дневное время – $\Delta N_a \approx (1.0 - 3.5) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, т.е. в 3 – 10 раз больше (рис. 2б, верхняя панель).

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

Во время осеннего равноденствия в утренние и дневные часы было ярко выражено колебание с $T \approx 170 - 210$ мин (рис. 2б). Его продолжительность была не меньше 10 ч. В вечернее и ночное время основным было колебание с $T \approx 230 - 300$ мин и $\Delta T \approx 6 - 7$ ч.

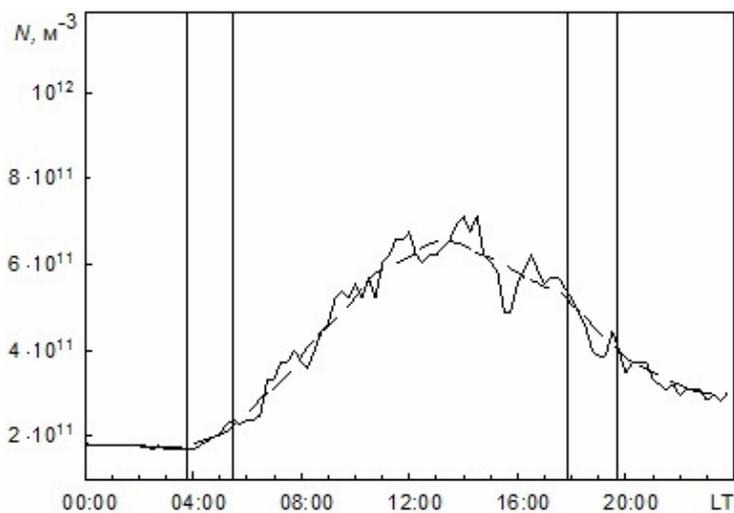


Рис. 1 а – Временные вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2 23 марта 2011 г. Здесь и далее штриховая линия – результат усреднения на интервале времени, равном 3 ч. Вертикальными линиями показаны моменты восхода и захода Солнца на высотах 0 и 300 км.

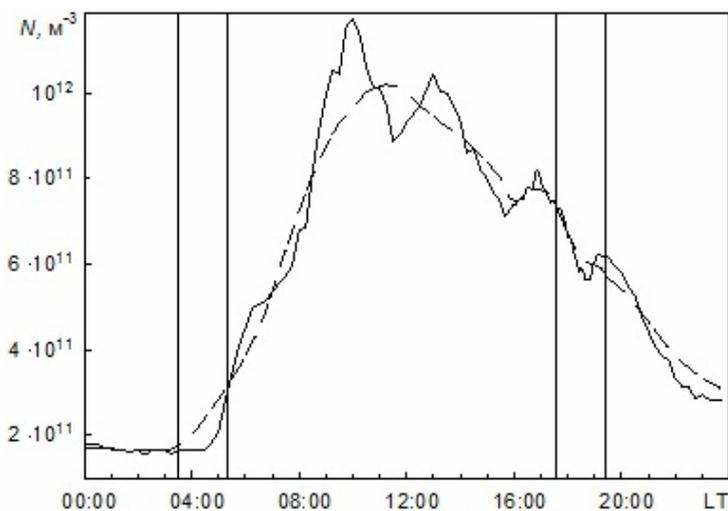


Рис. 1 б – Временные вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2 20 сентября 2011 г.

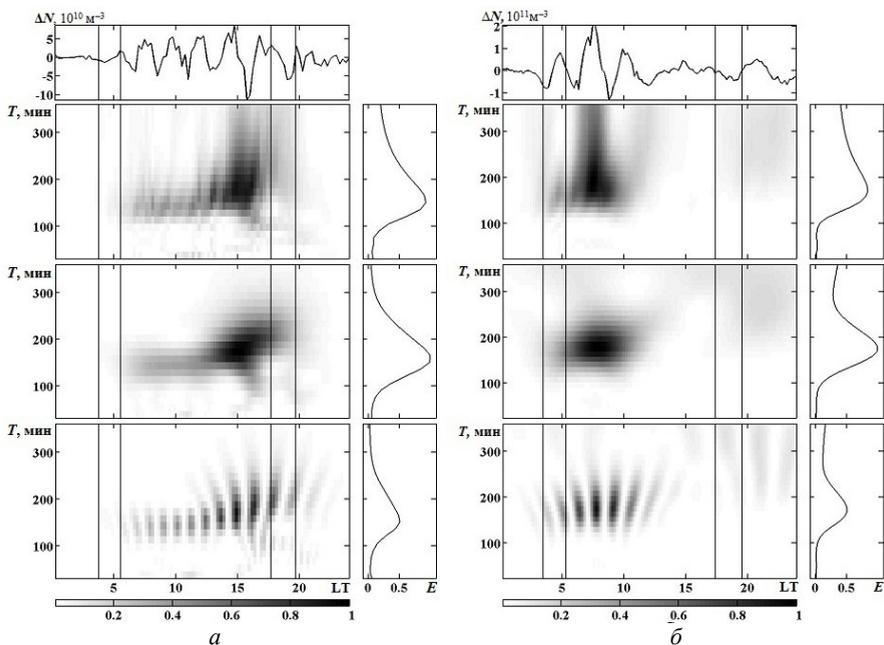


Рис. 2 – Зависимость $\Delta N(t)$ для a – 23 марта 2011 г.; b – 20 сентября 2011 г. Результаты спектрального анализа при помощи ОПФ, АПФ, и ВП (панели сверху вниз). Справа показаны соответствующие энергограммы

Обсуждение. Суточные вариации регулярных значений \bar{N} в период весеннего и осеннего равноденствия полностью соответствуют имеющимся представлениям о физико-химических процессах в ионосфере (см., например, [6, 7]). Полученные данные хорошо согласуются с измерениями методом некогерентного рассеяния значениями \bar{N} в данном регионе в период роста солнечной активности [8].

Обобщенные сведения о квазипериодических вариациях концентрации электронов в дневное и ночное (в скобках) время приведены в таблице.

Таблица – Сведения о квазипериодических вариациях концентрации электронов в дневное и ночное (в скобках) время

Сезон	Амплитуда колебаний, m^{-3}	Период преобладающего колебания, мин	Продолжительность квазипериодического процесса, ч
Весеннее равноденствие	$(5 - 6) \cdot 10^{10}$ $((1 - 2) \cdot 10^{10})$	120 – 160 (60 – 70, 180 – 220)	15
Осеннее равноденствие	$(1.0 - 1.5) \cdot 10^{11}$ $((1 - 5) \cdot 10^{10})$	140 – 190 (230 – 300)	10 (6 – 7)

Из таблицы видно, что большие значения амплитуд ΔN_a имели место в осеннее время, несколько меньшие значения – в весеннее время. В ночное время амплитуда ΔN_a в 3 – 10 раз меньше, чем в дневное время.

Период преобладающих колебаний в различные сезоны года составляли 140 и 175 мин (см. табл.). Этот период близок к периоду третьей гармоники приливных процессов в атмосфере, равному 180 мин. Эпизодически также появлялось колебание с периодами около 60, 100, 220 и 300 мин. Возможно, что эти периоды относятся к гармоникам единого процесса с периодом около 300 мин. Волновые процессы с указанными периодами и амплитудами свойственны внутренним гравитационным волнам [2–4].

Продолжительность преобладающих колебаний была от 5 – 7 до 15 ч.

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 [4].

Выводы.

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

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

3. В период весеннего и осеннего равноденствий в слое F2 ионосферы проявлялось преобладающее квазипериодическое колебание N с периодом 140 – 200 мин, имеющее амплитуду $(0.2 - 2) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$.

4. Продолжительность преобладающего колебания в период осеннего равноденствия составляла 5 – 7 ч, а в период весеннего равноденствия – 15 ч.

5. Эпизодически в спектре вариаций N также возникали колебания с периодами от 60 – 100 до 300 мин. Их амплитуда была в несколько раз меньше амплитуды преобладающего колебания.

Список литературы: 1. *Кравцов Ю.А.* Прохождение радиоволн через атмосферу Земли / *Кравцов Ю.А., Фейзулин З.И., Виноградов А.Г.* – М.: Радио и связь, 1983. – 224 с. 2. *Григорьев Г.И.* Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли / *Григорьев Г.И.* // Изв. вузов. Радиофизика. – 1999. – Т. 42, № 1. – С. 3-25. 3. Электромагнитные проявления геофизических эффектов в Антарктиде / Под ред. *Л.Н. Литвиненко, Ю.М. Ямпольского.* – Х.: РИНАН, 2005. – 331 с. 4. *Черногор Л.Ф.* Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния / *Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф.* // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 3. – С. 4-35. 5. *Черногор Л.Ф.* Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов / *Черногор Л.Ф.* // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2008. – Т. 48, № 5. – С. 681-702. 6. *Брюнелли Б.Е.* Физика ионосферы / *Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А.* – М.: Наука, 1988. – 528 с. 7. *Schunk R.W.* Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry / *Schunk R.W., Nagy A.F.* – Cambridge atmospheric and space science series, 2000. – 555 p. 8. *Черногор Л.Ф.* Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период роста солнечной активности / *Ляшенко М.В., Пуляев В.А., Черногор Л.Ф.* // Космічна наука і технологія. – 2006. – Т. 12, № 5/6. – С. 58-68.

Поступила в редколлегию 19.11.2013

Изменения концентрации электронов в слое F2 вблизи периодов весеннего и осеннего равноденствия / Л.Ф. Черногор, В.В. Барабаш // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 33 (1066). – С. 56-61. Бібліогр.: 8 назв.

Виконано аналіз добових варіацій концентрації електронів N в шарі F2 іоносфери в період весняного та осіннього рівнодення 2011 р. Наведено результати спектрального аналізу, для здійснення якого було застосовано віконне перетворення Фур'є, адаптивне перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення. Для розглянутих періодів в шарі F2 іоносфери, виявлено переважаюче коливання з періодом 140–200 хв, та амплітудою $\Delta N_a \approx (0.2 - 2) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Його тривалість в залежності від сезону змінювалася від 5–7 до 15 год.

Ключові слова: метод вертикального зондування, рівнодення, концентрація електронів, регулярні та квазіперіодичні збурення, спектральний аналіз, внутрішні гравітаційні хвилі.

Daily variations of electron concentration N , in ionospheric F2- layer during the vernal and autumnal equinoxes in 2011 are analyzed. Short-time Fourier transform, adaptive Fourier transform and wavelet transform were applied to the system spectral analysis. For the period under review in ionospheric F2- layer prevailing oscillation with the period of 140 ÷ 200 min, amplitude $\Delta N_a \approx (0.2 - 2) \cdot 10^{11} \text{ m}^{-3}$ was shown. Duration of this oscillation depending on a season changed from 5 – 7 to 15 h.

Keywords: vertical sounding method, the equinoxes, the concentration of electrons, regular and quasi-periodic disturbances, spectral analysis, internal gravity waves.