

С.Н. Мукашева

Национальный центр космических исследований и технологий
Институт ионосферы, г. Алматы, Казахстан

ЗАВИСИМОСТЬ ОТ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ НАД КАЗАХСТАНСКИМ РЕГИОНОМ

Аннотация. В работе приводятся результаты исследования поведения полного электронного содержания от солнечной активности в период 1999-2013 гг. над Казахстанским регионом. Рассматриваемый период охватывает разные уровни солнечной активности (СА): высокий (1999-2002гг.), когда поток радиоизлучения Солнца $F_{10.7} > 150$; средний $F_{10.7} = 100 \div 150$ (2003-2004гг. – фаза спада СА); низкий $F_{10.7} < 100$ (2005-2010гг, на которые приходится наиболее глубокий минимум солнечной активности за последние 100 лет, в особенности 2007-2009гг.); средний $F_{10.7} = 100 \div 150$ (2011-2013гг. – фаза роста и аномально низкого максимума СА). Показано, что вариации полного электронного содержания $I(t)$, так и электронной концентрации в максимуме слоя F2 “отслеживают” изменение солнечной активности.

Ключевые слова: полное электронное содержание, солнечная активность, ионосфера.

Введение.

Радиозондирование ионосферы с помощью сигналов глобальной навигационной системы GPS сегодня позволяет осуществлять непрерывный мониторинг ионосферы Земли [1-3]. Так называемая технология GIM (Global Ionospheric Maps), разработанная в нескольких исследовательских центрах (JPLG, США; CODE, Швейцария, и др.) является мощным современным средством для мониторинга и исследования глобальной и локальной структуры ионосферы [1, 4-6]. Эти исследования важны для понимания эволюционных процессов на Земле. Они дают возможность понять, как внешние факторы, такие как вариация солнечной активности, влияют на динамические структуры Земли, в частности, на околоземное космическое пространство.

В данной работе на основе карт GIM (Global Ionospheric Maps) за достаточно длительный период времени, охватывающий различные циклы солнечной активности, изучены вариации полного электронного содержания над Казахстанским регионом. Целью исследования являлось выявление зависимости характеристик ионосферы от вариаций внешних факторов,

к которым относится поток солнечной радиации.

Результаты анализа.

В работе используются значения полного электронного содержания $I(t)$ рассчитаны по картам IONEX в узле GIM [42.5 N; 75.0 E] наиболее близком к координатам г. Алматы. В работе используются GIM-карты, рассчитанные Швейцарским центром CODE (Center for Orbit Determination in Europe, University of Berne, Switzerland) с использованием данных более 150 GPS приемных пунктов, которые в формате IONEX содержатся на сайте <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex>. Каждый IONEX dat-файл содержит значения вертикального полного электронного содержания (ПЭС), I_V , за одни сутки по шкале мирового времени UT с временным разрешением 2 часа. Вертикальное полное электронное содержание рассчитывается с учетом состояния солнечно-геомагнитных условий по сферическим гармоническим формулам [1,2,7]. Общепринятая единица полного электронного содержания – TECU (total electron content unit), равная 10^{16} эл/м². Поведение полного электронного содержания сравнивалось с

в период 1999-2013 годы

вариациями критической частоты ионосферного слоя F2, f_0F2 , полученными на ионосферной станции вертикального зондирования г. Алматы [43.25°N; 76.92°E]. Критическая частота f_0F2 является непосредственной мерой электронной концентрации в максимуме ионизации.

На рисунке 1а (красная кривая) приведены вариации суточных значений индекса солнечной активности, потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см, $F_{10.7}$. Информация получена с сайта Центра прогноза космической погоды (SWPC) Национальной администрации США по океанам и атмосфере (NOAA) <http://www.swpc.noaa.gov>. Вариации за период 1999-2013гг. полуденных и полуночных значений полного электронного содержания $I(t)$, рассчитанных по картам IONEX в узле GIM [42.5°N; 75°E], приведены на рисунке 1б и 1с, соответственно. Темно-зеленная кривая на рисунках 1а, голубая кривая на рисунках 1б и 1с – их скользящая средняя с 81-дневным временным окном.

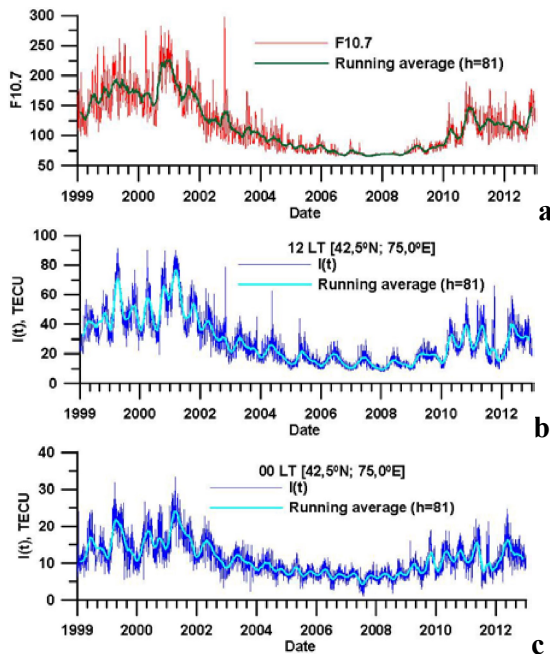


Рисунок 1. – Вариации потока радиоизлучения Солнца $F_{10.7}$ (а), полуденных (б) и полуночных (с) значений полного электронного содержания $I(t)$, рассчитанных по картам IONEX в узле GIM [42.5°N; 75°E],

Рассматриваемый период охватывает разные уровни солнечной активности (СА): высокий (1999-2002гг.), когда поток радиоизлучения Солнца $F_{10.7} > 150$; средний $F_{10.7} = 100 \div 150$ (2003-2004гг. – фаза спада СА); низкий $F_{10.7} < 100$ (2005-2010гг, на которые приходится наиболее глубокий минимум солнечной активности за последние 100 лет, в особенности 2007-2009гг.); средний $F_{10.7} = 100 \div 150$ (2011-2013гг. – фаза роста и аномально низкого максимума СА). Развитие текущего 24-го цикла солнечной активности идёт по сценарию низких солнечных циклов [8]. Как видно из рисунка 1, предыдущий максимум солнечной активности (2000-2002

Таблица 1. – Среднегодовые значения индекса солнечной активности $F_{10.7}$ и уровни солнечной активности

Годы	Среднегодовые значения $F_{10.7}$	Уровни солнечной активности
1999	153,7	Высокий $F_{10.7} > 150$
2000	179,5	
2001	181,5	
2002	179,5	
2003	128,8	Средний (фаза спада СА) $F_{10.7} = 100 \div 150$
2004	106,5	
2005	91,7	Низкий (годы, на которые приходится наиболее глубокий минимум солнечной активности за последние 100 лет) $F_{10.7} < 100$
2006	80,0	
2007	73,1	
2008	69,0	
2009	70,6	
2010	80,1	
2011	113,4	Средний (фаза роста и аномально низкого максимума СА) $F_{10.7} = 100 \div 150$
2012	119,9	
2013	122,8	

гг.) был значительно выше – F10.7~180. В таблице 1 приведены среднегодовые значения индекса солнечной активности $F_{10.7}$, показаны разные уровни солнечной активности за исследуемый период.

Вариации полуденных (а) и полуночных (б) значений критических частот слоя F2, f_0F_2 , по данным станции вертикального зондирования г. Алматы [43.25°N; 76.92°E] в период 1999-2013 годы приведены на рисунке 2а и 2б, соответственно. Голубая кривая на рисунках 2а и 2б – их скользящая средняя с 81-дневным временным окном.

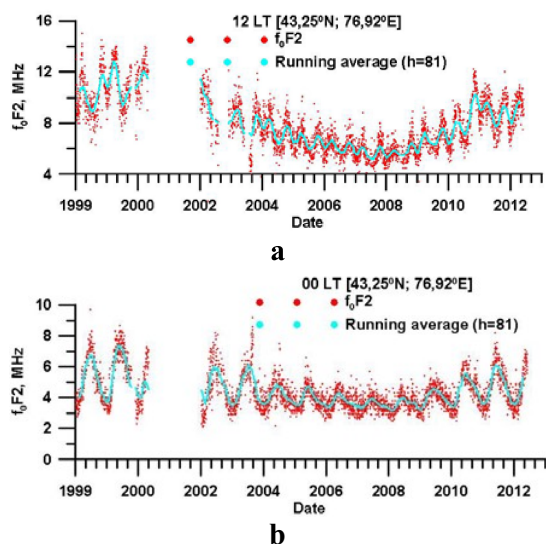


Рисунок 2. – Вариации полуденных (а) и полуночных (б) значений критических частот слоя F2, f_0F_2 , по данным станции вертикального зондирования г. Алматы в период 1999-2013 годы

Вариации полного электронного содержания $I(t)$, так и электронной концентрации в максимуме слоя F2 “отслеживают” изменение солнечной активности. Среднегодовые величины полуденных и полуночных значений полного электронного содержания $I(t)$ и критической частоты слоя F2, f_0F_2 приведены в таблице 2. Среднегодовые полуденные значения полного электронного содержания $I(t)$ уменьшаются примерно в ~5 раз, от 63,1 TECU в максимуме солнечной активности (1999г.) до 12,7 TECU в минимуме солнечной активности (2009г.). Среднегодовые полуден-

ные значения критической частоты слоя F2, f_0F_2 уменьшаются примерно в ~2 раза,

Таблица 2 – Среднегодовые величины полуденных и полуночных значений полного электронного содержания $I(t)$ и критической частоты слоя F2, f_0F_2

Годы	Среднегодовые значения			
	$I(t)$, TECU		f_0F_2 , MHz	
	12 LT	00 LT	12 LT	00 LT
1999	63,1	13,2	10,3	5,0
2000	50,6	15,9	10,9	5,8
2001	50,1	15,4	11,9	4,9
2002	56,3	18,3	-	-
2003	33,2	12,7	9,2	4,6
2004	24,4	10,3	8,2	4,6
2005	20,1	8,7	7,4	4,1
2006	16,1	7,5	6,6	3,9
2007	15,2	6,9	6,2	3,7
2008	13,2	6,1	5,7	3,6
2009	12,7	6,5	5,8	3,6
2010	17,9	9,2	6,8	4,0
2011	27,9	11,3	8,2	4,5
2012	25,3	10,6	8,9	4,7
2013	31,1	12,6	9,2	4,7

от 11,9 MHz в максимуме солнечной активности (2001г.) до 5,7MHz в минимуме солнечной активности (2008г.). Среднегодовые полуночные значения полного электронного содержания $I(t)$ уменьшаются примерно в ~3 раза, от 18,3 TECU в максимуме солнечной активности (2002г.) до 6,1 TECU в минимуме солнечной активности (2008г.). Среднегодовые полуночные значения критической частоты слоя F2, f_0F_2 уменьшаются примерно в ~1,6 раз, от 5,8 MHz в максимуме солнечной активности (2000г.) до 3,6 MHz в минимуме солнечной активности (2008 г. и 2009 г.). Полуночные значения, как полного электронного содержания, так и критической частоты слоя F2, достигают в годы максимума солнечной активности уровня своих полуденных значений в годы минимума солнечной активности – (15±3) TECU и (6,3±1,5) MHz, соответственно. Особенно

хорошо видна эта зависимость на сглаженных с 81-дневным временным окном кривых. Регрессионные зависимости полуденных и полуночных значений полного электронного содержания $I(t)$ и критической частоты слоя F2, f_0F2 , от уровня солнечной активности в период 1999-2013гг. приведены на рисунках 3а,б и 4а,б соответственно.

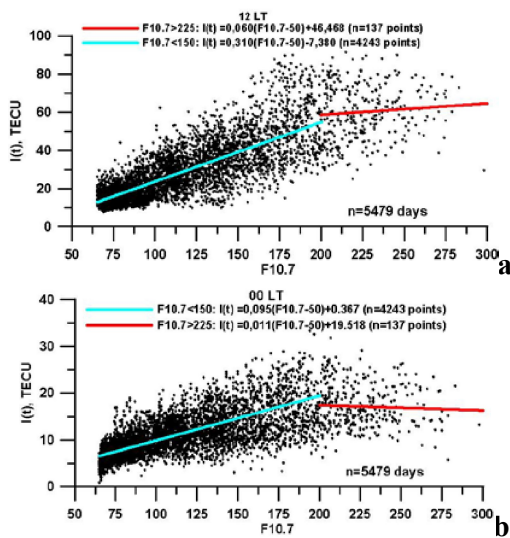


Рисунок 3 – Регрессионная зависимость полуденных (а) и полуночных (б) значений полного электронного содержания $I(t)$ от уровня солнечной активности

Наблюдается положительная корреляция ионосферных параметров $I(t)$ и f_0F2 с солнечной активностью при $F_{10.7} < 150$ и регрессионную зависимость можно представить в виде линейных функций вида $y = b_1x + b_0$. Начиная со значений $F_{10.7} > (150 \div 200)$ единиц зависимость ПЭС от $F_{10.7}$ ослабевает (с ростом значений $F_{10.7}$ рост значений ПЭС, практически, прекращается). При $F_{10.7} < 150$ значения среднеквадратичных отклонений, σ , при $F_{10.7} < 150$ по параметру $I(t)$: $\sigma \sim 17$ для полуденных условий и $\sigma \sim 7$ для полуночных условий; f_0F2 : $\sigma \sim 1,4$ для полуденных условий и $\sigma \sim 0,8$ для полуночных условий. При $F_{10.7} > 150$ отмечается значительный разброс. Тенденция к насыщению ионосферы при высоких значениях $F_{10.7}$ нами были получены по данным регистрации эффекта

Фарадея при приёме сигналов с частотой $f = 136,112$ МГц от геостационарного ИСЗ “ETS-II” за период с сентября 1985 г. по декабрь 1989 г. на станции “Орбита” Алматы (43,2°N; 76.9°E) [9]. Результаты согласуются с работами [1, 10, 11], где также приведены результаты анализа длинных временных рядов геофизических параметров.

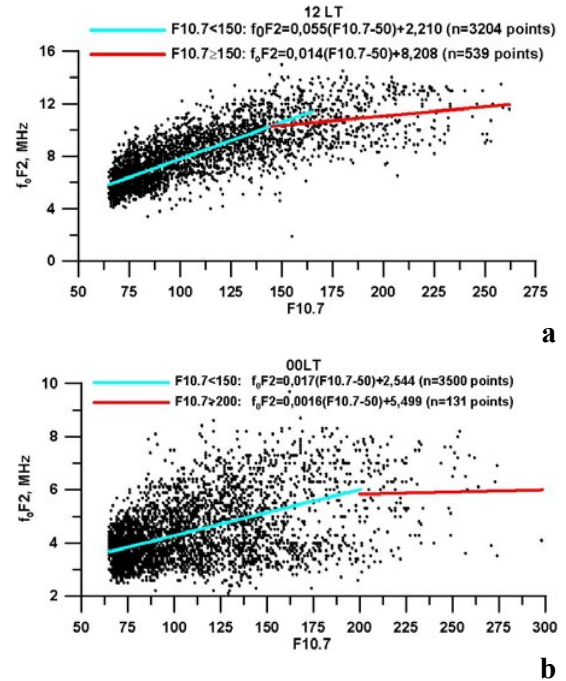


Рисунок 4 – Регрессионная зависимость полуденных (а) и полуночных (б) значений критической частоты слоя F2, f_0F2 , от уровня солнечной активности

Заключение.

В работе с использованием современных технологий GIM (Global Ionospheric Maps) и экспериментальных данных вертикального зондирования ионосферы (г. Алматы [43.25°N; 76.92°E]) исследовано поведение ионосферных параметров $I(t)$ и f_0F2 от солнечной активности за период 1999-2013гг. над Казахстанским регионом. Рассматриваемый период охватывает разные уровни солнечной активности. Показано, что наблюдается положительная корреляция ионосферных параметров с солнечной активностью при $F_{10.7} < 150$ и регрессионную зависимость можно представить в виде линейной функции, начиная со значений $F_{10.7} > (150 \div 200)$ единиц зависи-

мость полуденных и полуночных значений $I(t)$ и f_0F_2 от $F_{10.7}$ ослабевает, и при $F_{10.7} > 200$ рост значений ионосферных параметров практически, прекращается, наблюдается, так называемый эффект «насыщения».

Список литературы

- 1 Afraimovich E.L., Perevalova N.P. GPS-monitoring of the Earth's upper atmosphere/– Irkutsk: SC RRS SB RAMS.– 2006.–480 p.(in Russian).
- 2 Ashkaliev J.F., Bibosinov A.Z., Breusov N.G., Zhumabaev B.T., Kurmanov B.K., Mukasheva S.N., Nurgaliyeva K.E., Sadykov K.A/ Preparation of Global Navigation Satellite System Gps Data for Identification Of Seismic-Ionosphere Effects (Workbook).– Almaty: Gylym, –2012. –43p.
- 3 Ясукович Ю.В., Живетьев И.В., Лухнев А.В. Региональное электронное содержание в Байкальской рифтовой зоне//Электронный сборник докладов Российской конференции «Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой», Секция 2 «Радиофизические методы диагностики окружающей среды». РФ, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, 6-10.09.2010. С. 195-205//<http://jre.cplire.ru/alt/library/Ulan-Ude-2010/conf.pdf>.
- 4 Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., Ho C.M., Lindqwister U.J., Runge T.F. A global mapping technique for GPS derived ionosphere TEC measurements // Radio Sci. – 1998.–V. 33, N 3. –P. 565–582.
- 5 Schaer S., Beutler G., Rothacher M. Mapping and predicting the ionosphere // Proceedings of the IGS AC Workshop. Darmstadt, Germany. February 9-11.– 1998.– P. 307-320.
- 6 Schaer S., Gurtner W., Feltens J. IONEX: The Ionosphere Map Exchange Format Version1// Proceedings of the IGS AC Workshop. Darmstadt, Germany. February 9-11.–1998.– P. 233-247.
- 7 Полякова А.С., Перевалова Н.П. Суточные вариации полного электронного содержания в восточносибирском регионе в августе 2009 г.// Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой. Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия. -2012.- С. 259-268.
- 8 Ишков В.Н. Текущий 24 цикл солнечной активности: эволюция, особенности, активные явления, прогноз развития// ishkov@izmiran.ru
- 9 Mukasheva S.N. Morphology behavior integral electron content of the ionosphere over Kazakhstan (according to the method of trans-ionospheric sounding): dis. ... the candidate of physical and mathematical sciences: 01.03.03 / Institute of Ionosphere. – Almaty, 1999. – 120 p. – Inv. № 0499PK01150.
- 10 Libo Liu, Weixing Wan, Baiqi Ning, Pirog O.M., Kurkin V. I. Solar activity variations of the ionospheric peak electron density// Journal of Geophysical Research.– 2006.–Vol. 111. A08304, doi:10.1029/2006JA011598.
- 11 Живетьев И.В. Ионосферные возмущения на различных фазах 23-го цикла солнечной активности по данным глобальной сети GPS: автореф. ... канд. с.-х. наук: 25.00.29. – Иркутск: Наука, 2007. – 22 с.

Работа выполнена по программе 101 «Грантовое финансирование научных исследований» в рамках темы «Разработать математические модели и исследовать литосферно-ионосферные процессы в период активизации геодинамических явлений» (грант 0184/ГФ).

Принято в печать 11.04.14

С.Н. Мукашева

*Национальный центр космических исследований и технологий
Институт ионосферы, г. Алматы, Казахстан*

admion1@mail.ru

**ЗАВИСИМОСТЬ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ НАД
КАЗАХСТАНСКИМ РЕГИОНОМ ОТ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

Аннотация. В работе приводятся результаты исследования поведения полного электронного содержания от солнечной активности в период 1999-2013 гг. над Казахстанским регионом. Рассматриваемый период охватывает разные уровни солнечной активности (СА): высокий (1999-2002 гг.), когда поток радиоизлучения Солнца $F_{10.7} > 150$; средний $F_{10.7} = 100 \div 150$ (2003-2004 гг. – фаза спада СА); низкий $F_{10.7} < 100$ (2005-2010 гг, на которые приходится наиболее глубокий минимум солнечной активности за последние 100 лет, в особенности 2007-2009 гг.); средний $F_{10.7} = 100 \div 150$ (2011-2013 гг. – фаза роста и аномально низкого максимума СА). Показано, что вариации полного электронного содержания $I(t)$, так и электронной концентрации в максимуме слоя F2 “отслеживают” изменение солнечной активности.

Ключевые слова: полное электронное содержание, солнечная активность, ионосфера.

S.N.Mukasheva

National Center of Space Researches and Technologies
Institute of Ionosphere, Almaty, Kazakhstan

admion1@mail.ru

DEPENDENCE OF TOTAL ELECTRON CONTENT OVER KAZAKHSTAN REGION ON SOLAR ACTIVITY

Annotation. In the paper there are given results of the research of total electron content behavior over Kazakhstan region in the period from 1999 to 2013. The investigated period covers different levels of Solar activity (SA): high (1999-2002), when the Solar radio flux $F_{10.7} > 150$; middle $F_{10.7} = 100 \div 150$ (2003-2004 – the phase of decrease in SA); low $F_{10.7} < 100$ (2005-2010, when there is the deepest minimum of the SA in the last 100 years, in particular in the years 2007-2009); middle $F_{10.7} = 100 \div 150$ (2011-2013 – phase of increasing and abnormal low SA maximum). It has been shown that the variations of total electron content $I(t)$, as well as of the electron density “follow” changes in Solar activity.

Keywords: total electron content, Solar activity, the Ionosphere.

С.Н. Мукашева

Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы» акционерлік қоғамы
Ионосфера институты, г. Алматы, Казахстан

admion1@mail.ru

ҚАЗАҚСТАН АЙМАҒЫНЫҢ ҮСТІНДЕГІ ЖАЛПЫ ЭЛЕКТРОН МАЗМҰННЫҢ КҮН БЕЛСЕНДІЛІГІНЕН ТӘУЕЛДІЛІГІ

Аннотация. Жұмысында Қазақстан аймағының үстіндегі жалпы электрон мазмұнның 1999-2013 жж. кезеңінде зерттеулерінің нәтижелері берілген. Қарастырылған кезеңіне күн белсенділіктің әртүрлі деңгейлері жатады: жоғары (1999-2002 жж.), күн радио сәулелену $F_{10.7} > 150$ болған кезде; орта $F_{10.7} = 100 \div 150$ (2003-2004 жж. – күн белсенділіктің құлдырауы саты), төмен $F_{10.7} < 100$ (2005-2010 жж., күн белсенділігінің соңғы 100 жылындағы ең төмен минимумның кезеңі); орта $F_{10.7} = 100 \div 150$ (2011-2013 жж. – өсеуі саты және күн белсенділігінің жалпы заңдылықтан ауытқыған төмен максимумы). Жалпы электрон мазмұнның $I(t)$ және F2 қабаттың электрон шоғырлануының вариациялары күн белсенділіктің өзгертулерімен сәйкестендіреді.

Маңызды сөздер: жалпы электрон мазмұны, күн белсенділігі, ионосфера.