

ДИНАМИКА ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАД АЛМАТЫ ОТ УРОВНЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ЗА ПЕРИОД 1999–2013 гг.

В.И. Капютин, А.М. Малимбаев, С.Н. Мукашева

Институт ионосферы «Национальный центр космических исследований и технологий», Алматы, Казахстан,
nanozavr@mail.ru

VARIATIONS IN IONOSPHERIC PARAMETERS OVER ALMATY, DEPENDING ON SOLAR ACTIVITY LEVEL IN 1999–2013

V.I. Kaputin, A.M. Malimbayev, S.N. Mukasheva

Institute of Ionosphere, Almaty, Kazakhstan
nanozavr@mail.ru

Аннотация. В работе приводятся результаты исследования поведения полного электронного содержания ионосферы от солнечной активности в период 1999–2013 гг. над Алматы (Казахстан). Рассматриваемый период охватывает разные уровни солнечной активности.

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

Abstract. The paper presents the results of a study of the behavior of the total electron content of the ionosphere from solar activity in the period 1999–2013 over Almaty (Kazakhstan). The period under review covers different levels of solar activity.

Keywords: total electronic content, solar activity, ionosphere.

Радиозондирование ионосферы с помощью сигналов глобальной навигационной системы GPS сегодня позволяет осуществлять непрерывный мониторинг ионосферы Земли [Афраймович, Перевалова, 2006]. 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 [Mannucci и др., 1998]. 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. Исследованиям динамики ионосферных параметров в зависимости от солнечной и геомагнитной активности в последние годы посвящено немало работ, например [Mandrikova и др., 2018; Shreedevi и др., 2018]. Ведутся работы по модификация индексов солнечной активности в международных справочных моделях ионосферы IRI и IRI-Plas [Гуляева, 2016]. В данной работе на основе карт GIM (Global Ionospheric Maps) за достаточно длительный период времени, охватывающий различные уровни 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.

Динамика ионосферных параметров от уровня солнечной активности. 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 элек-

тронного содержания (ПЭС), I_V , за одни сутки по шкале мирового времени UT с временным разрешением 2 ч. Вертикальное полное электронное содержание рассчитывается с учетом состояния солнечно-геомагнитных условий по сферическим гармоническим формулам [Афраймович, Перевалова, 2006]. Общепринятая единица полного электронного содержания — TECU (total electron content unit), равная 10^{16} эл/м². Рассмотрены вариации полного электронного содержания $I(t)$, рассчитанные по картам IONEX в узле GIM [42.5° N; 75.0° E] наиболее близком к координатам Алматы. Поведение полного электронного содержания анализировалось с вариациями электронной концентрации в максимуме ионосферного слоя F2, N_m , измеренные на ионосферной станции вертикального зондирования Алматы [43.25° N; 76.92° E]. Информация о солнечной активности, на основе потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см, $F_{10.7}$, получена с сайта Центра прогноза космической погоды (SWPC) Национальной администрации США по океанам и атмосфере (NOAA) [http://www.swpc.noaa.gov]. Рассматриваемый период охватывает разные уровни солнечной активности (CA): высокий (1999–2002 гг.), когда поток радиоизлучения Солнца $F_{10.7} > 150$; средний $F_{10.7} = 100 \div 150$ (2003–2004 гг. — фаза спада CA); 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 до аномально низкого максимума CA). Развитие текущего 24-го цикла солнечной активности идет по сценарию низких солнечных циклов [Ишков, 2012; www.izmiran.ru].

Среднегодовые значения индекса солнечной активности $F_{10.7}$, полуденных и полуночных значений полного электронного содержания $I(t)$ и электронной концентрации в максимуме слоя F2, N_m , приведены в таблице. Среднегодовые полуденные значения полного электронного содержания $I(t)$ уменьшаются примерно в ~5 раз, от 63.1 TECU в максимуме солнечной активности (1999 г.) до 12.7 TECU

в минимуме солнечной активности (2009 г.). Среднегодовые полуденные значения электронной концентрации в максимуме слоя F2, N_m , уменьшаются примерно в ~4.3 раза, от 175.6 эл/м³ в максимуме солнечной активности (2001 г.) до 40.3 эл/м³ в минимуме солнечной активности (2008 г.). Среднегодовые полуденные значения $I(t)$ уменьшаются примерно в ~3 раза, от 18.3 TECU в максимуме солнечной активности (2002 г.) до 6.1 TECU в минимуме солнечной активности (2008 г.). Среднегодовые полуночные значения N_m уменьшаются примерно в ~2.6 раз, от 41.7 эл/м³ в максимуме солнечной активности (2000 г.) до 16.1 эл/м³ в минимуме солнечной активности (2008 г. и 2009 г.). Полуночные значения, как полного электронного содержания, так и электронной концентрации в максимуме слоя F2, достигают в годы максимума солнечной активности уровня своих полуденных значений в годы минимума солнечной активности — (15±3) TECU и (41±3) эл/м³, соответственно.

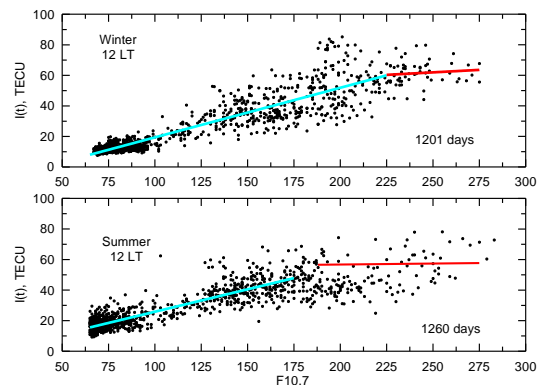
Среднегодовые значения индекса солнечной активности $F10.7$, полуденных и полуночных значений полного электронного содержания $I(t)$ и электронной концентрации в максимуме слоя F2, N_m

Годы	$F10.7$	Среднегодовые значения				Уровни солнечной активности
		$I(t)$, TECU		$N_m \times 10^{10}$, эл/м ³		
		12 LT	00 LT	12 LT	00 LT	
1999	153.7	63.1	13.2	131.5	31.0	Высокий $F10.7 > 150$
2000	179.5	50.6	15.9	147.3	41.7	
2001	181.5	50.1	15.4	175.6	29.8	
2002	179.5	56.3	18.3	—	—	
2003	128.8	33.2	12.7	104.9	26.2	
2004	106.5	24.4	10.3	83.4	26.2	Средний (фаза спада СА) $F10.7 = 100 \pm 150$
2005	91.7	20.1	8.7	67.9	20.8	Низкий (годы, на которые приходится наиболее глубокий минимум солнечной активности за последние 100 лет) $F10.7 < 100$
2006	80.0	16.1	7.5	54.0	18.9	
2007	73.1	15.2	6.9	47.7	17.0	
2008	69.0	13.2	6.1	40.3	16.1	
2009	70.6	12.7	6.5	41.7	16.1	
2010	80.1	17.9	9.2	57.3	19.8	Средний (фаза роста и аномально низкого максимума СА), $F10.7 = 100 \pm 150$
2011	113.4	27.9	11.3	83.4	25.1	
2012	119.9	25.3	10.6	98.2	27.4	
2013	122.8	31.1	12.6	104.9	27.4	

Регрессионная зависимость полуденных зимних (верхний рисунок) и летних (нижний рисунок) значений полного электронного содержания $I(t)$ от уровня солнечной активности в период 1999–2013 гг. показана на рисунке. Регрессионные зависимости получены на основе данных 1201 полуденных зимних (ноябрь, декабрь, январь, февраль) и 1260 полуденных летних (май, июнь, июль, август) значений $I(t)$ выбранных за период 1999–2013 гг. Полуденные значения $I(t)$ зимой выше, чем летом, при $F10.7 > 100$, и эта разница увеличивается с ростом солнечной активности. Наблюдается положительная корреляция полуденных зимних значений $I(t)$ с солнечной активностью при $F10.7 < 225$ и регрессионную зависимость можно представить в виде линейной функции $y = b_1x + b_0$, где $b_1 = 0.315$, $b_0 = -12.172$, коэффициент регрессионной зависимости $R\text{-squared} = 0.85$. При $F10.7 > 225$ зимой наблюдается эффект насыщения, когда с ростом уровня солнечной активности значения $I(t)$ не увеличиваются: $I(t) = (60 \pm 18)$ TECU. Для летних условий при $F10.7 < 175$ регрессионную зависимость можно представить в виде линейной функции с $b_1 = 0.293$, $b_0 = -3.477$, коэффи-

циент регрессионной зависимости $R\text{-squared} = 0.80$. Эффект насыщения летом наблюдается при $F10.7 > 175$ $I(t) = (55 \pm 18)$ TECU. Результаты согласуются с данными из литературных источников, например [Демин и др., 2015], где также приведены результаты анализа длинных временных рядов геофизических параметров.

Тенденция к насыщению ионосферы при высоких значениях $F10.7$ нами были получены по данным регистрации эффекта Фарадея при приеме сигналов с частотой $f = 136.112$ МГц от геостационарного ИСЗ «ETS-II» за период с сентября 1985 г. по декабрь 1989 г. на радиополигоне «Орбита» Алматы (43.2° N; 76.9° E) [Мукашева, 1999]. Аналогичную зависимость интегрального электронного содержания ионосферы от потока радиоизлучения Солнца отмечают в работе [Balan и др., 1993], где представлены результаты анализа ИЭС по данным пяти станций северного полушария за период измерений с декабря 1980 г. по декабрь 1985 г., когда поток радиоизлучения Солнца менялся от 66 до 303 единиц. Авторы [Balan и др., 1993] отмечают, что наблюдаемая нелинейная связь интегрального электронного содержания ионосферы от потока радиоизлучения Солнца $F10.7$ является убедительным доказательством нелинейной зависимости солнечного ультрафиолетового излучения от потока радиоизлучения Солнца, на длине волны $\lambda = 10.7$ см, что подтвердили модельные расчеты и спутниковые измерения. Так, согласно [Balan и др., 1993] вариации всего ультрафиолетового спектра солнечного излучения показывают линейно возрастающую зависимость от $F10.7$, до значений $F10.7 < \sim 200$ единиц. При значениях потока $F10.7 > \sim 200$ единиц наблюдается: (1) суммарный солнечный ультрафиолетовый поток (50–1050 Å) очень медленно возрастает с увеличением значений $F10.7$; (2) потоки солнечного ультрафиолетового излучения, играющие существенную роль при нагревании термосферы, хромосферные линии He II (303.78 Å) и H Lyman-β (1025.72 Å) и хромосферные эмиссии (850–900) Å, не изменяются с увеличением значений $F10.7$; (3) потоки солнечного ультрафиолетового излучения с корональными линиями (Fe XV 284.15 Å) и корональными эмиссиями (300–350) Å показывают даже уменьшение с увеличением значений $F10.7$; (4) потоки солнечного



Регрессионная зависимость полуденных зимних (верхний рисунок) и летних (нижний рисунок) значений полного электронного содержания $I(t)$ от уровня солнечной активности

ультрафиолетового излучения Lyman- α (1216) Å и He I (10.830 Å), измеренные спутником SME (the Solar Mesosphere Explorer) во время 21 цикла солнечной активности также не изменяются с увеличением значений $F10.7$.

Таким образом, наблюдаемая нелинейная связь интегрального электронного содержания ионосферы от потока радиоизлучения Солнца $F10.7$ является следствием нелинейной зависимости солнечного ультрафиолетового излучения от солнечного индекса $F10.7$. То что эффект насыщения летом наблюдается при $F10.7 > 175$, а зимой при $F10.7 > 225$, по-видимому, объясняется сезонной аномалией вариаций среднеширотной ионосферы. Один из механизмов сезонной аномалии это сезонная изменчивость температуры кислорода на высотах F области ионосферы [Золотухина и др., 2013].

Работа выполнена при поддержке программно-целевого финансирования научно-технической программы О.0799 Аэрокосмическим комитетом Министерства цифрового развития, оборонной и аэрокосмической промышленности Республики Казахстан, проект № 0118PK00799.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.

Гуляева Т.Л. Модификация индексов солнечной активности в международных справочных моделях ионосферы IRI и IRI-Plas в связи с пересмотром ряда чисел солнечных пятен // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 21, № 3. С. 59–68.

Деминов М.Г., Деминова Г.Ф., Жеребцов Г.А., Полех Н.М. Свойства изменчивости концентрации максимума F2-слоя над Иркутском при разных уровнях солнечной и геомагнитной активности // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 1. С. 56–62.

Золотухина Н.А., Полех Н.М., Романова Е.Б. Полякова А.С. Сезонная изменчивость суточных и полусуточных вариаций F2-слоя над Иркутском по данным ионосферного радиозондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 1. С. 112–125.

Ишков В.Н. Текущий 24 цикл солнечной активности: эволюция, особенности, активные явления, прогноз развития [http://www.izmiran.ru/POLAR2012/REPORTS/POLAR_2012_Ischkov.pdf] (дата обращения 3.04.2019 г.)

Мукашева С.Н. Морфология поведения интегрального электронного содержания ионосферы над Казахстаном (по данным трансionoсферного зондирования): дис. ... к. физ.-мат. н. Алматы: Институт ионосферы, 1999. 120 с.

Mandrikova O., Polozov Y., Fetisova N., Zalyaev T. Analysis of the dynamics of ionospheric parameters during periods of increased solar activity and magnetic storms // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2018. V. 181. P. 116–126.

Balan N., Bailey G.J., Jayachandran B. Ionospheric evidence for a nonlinear relationship between the solar e.u.v. and 10.7 cm fluxes during an intense solar cycle // Planet. Space Sci. 1993. V. 41, N 2. P. 141–145.

Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., et al. A global mapping technique for GPS derived ionosphere TEC measurements // Radio Sci. 1998. V. 33, N 3. P. 565–582.

Shreedevi P.R., Choudhary R.K., Yadav S., et al. Variation of the TEC at a dip equatorial station, Trivandrum and a mid latitude station, Hanle during the descending phase of the solar cycle 24(2014–2016) // Atmos. Solar-Terr. Phys. 2018. V. 179. P. 425–434.