

ВАРИАЦИИ ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАД АЛМА-АТОЙ (КАЗАХСТАН) В 1999–2013 гг.

VARIATIONS OF IONOSPHERIC PARAMETERS OVER ALMATY (KAZAKHSTAN) IN 1999–2013

С.Н. Мукашева

*Институт ионосферы Национальный центр космических исследований и технологий,
Алма-Ата, Казахстан, snmukasheva@gmail.com*

В.И. Капютин

*Институт ионосферы Национальный центр космических исследований и технологий,
Алма-Ата, Казахстан, kapytinsanct@mail.ru*

А.М. Малимбаев

*Институт ионосферы Национальный центр космических исследований и технологий,
Алма-Ата, Казахстан, nanozavr@mail.ru*

S.N. Mukasheva

*Institute of Ionosphere National Centre for Space Research and Technology,
Almaty, Kazakhstan, snmukasheva@gmail.com*

V.I. Kapytin

*Institute of Ionosphere National Centre for Space Research and Technology,
Almaty, Kazakhstan, kapytinsanct@mail.ru*

A.M. Malimbayev

*Institute of Ionosphere National Centre for Space Research and Technology,
Almaty, Kazakhstan, nanozavr@mail.ru*

Аннотация. В работе приводятся результаты исследования поведения ионосферных параметров: полного электронного содержания $I(t)$ и электронной концентрации в максимуме слоя F2 N_m — над Алма-Атой (Казахстан) [43.25° N; 76.92° E] за 1999–2013 гг. Рассматриваемый временной интервал охватывает разные уровни солнечной активности. Показано, что при $F10.7 > 175$ летом и при $F10.7 > 225$ зимой наблюдается эффект насыщения, т. е. с ростом уровня солнечной активности значения $I(t)$ не увеличиваются. Наблюдаемая нелинейная зависимость полного электронного содержания ионосферы от потока радиоизлучения Солнца $F10.7$ является следствием нелинейной зависимости солнечного ультрафиолетового излучения от потока радиоизлучения Солнца.

Исследование изменчивости параметров среднеширотной ионосферы при разных уровнях солнечной и геомагнитной активности показало, что стандартное отклонение $\sigma(x)$ и средний сдвиг x_{ave} флуктуаций $I(t)$ и N_m относительно спокойного уровня слабо зависят от уровня солнечной активности, а зависимость от геомагнитной активности значительна при $F10.7 < 100$.

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

Abstract. The paper presents the results of a study of the behavior of ionospheric parameters of the total electron content, $I(t)$, and electron density in the maximum F2 layer, N_m , over Almaty (Kazakhstan) [43.25° N; 76.92° E] in 1999–2013. The time interval under study covers different solar activity levels. We have shown that at $F10.7 > 175$ in summer and at $F10.7 > 225$ in winter there is a saturation effect, i.e. with increasing solar activity level values of $I(t)$ do not increase. The observed nonlinear relationship between the total electron content of the ionosphere and the solar radiation flux $F10.7$ results from the nonlinear relationship between the solar ultraviolet radiation and the solar radiation flux.

The study of the variability of the mid-latitude ionosphere parameters during different solar and geomagnetic activity levels has shown that the standard deviation $\sigma(x)$ and average shift x_{ave} of $I(t)$ and N_m fluctuations relative to the quiet level weakly depend on solar activity, but greatly depend on geomagnetic activity when $F10.7 < 100$.

Keywords: total electron content, solar activity, ionosphere.

ВВЕДЕНИЕ

Радиозондирование ионосферы с помощью сигналов глобальной навигационной системы 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 мониторинга и исследования глобальной и локальной

структуры ионосферы [Mannucci et al., 1998; Schaer et al., 1998a, b]. Эти исследования важны для понимания динамических процессов в околоземном космическом пространстве. Они дают возможность понять, как внешние факторы, такие как солнечная активность, влияют на динамические структуры Земли, в частности на околоземное космическое пространство. Исследованиям изменчивости ионосферных параметров в зависимости от солнечной и геомагнитной активности в последние годы посвящено немало работ [Araujo-Pradere et al., 2005;

Mandrikova et al., 2018; Shreedevi et al., 2018; Bolaji et al., 2019]. Пространственная изменчивость ионосферы в зависимости от сезона исследуется с применением современных статистических методов, например вейвлет-анализа [Shi et al., 2014]. Ведутся работы по модификации индексов солнечной активности в международных справочных моделях ионосферы IRI и IRI-Plas [Гуляева, 2016]. Для изучения изменчивости электронной концентрации ионосферы предлагается локальная эмпирическая модель электронной концентрации для условий низкой геомагнитной активности, которая применима при любом уровне солнечной активности [Деминов и др., 2015].

В данной работе изучена изменчивость ионосферных параметров — полного электронного содержания $I(t)$ (ПЭС) и электронной концентрации в максимуме слоя F2 N_m над Казахстанским регионом за достаточно длительный период времени, охватывающий различные уровни солнечной активности. В качестве характеристики солнечной активности используется индекс $F10.7$ — поток солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см. Геомагнитная активность характеризовалась с помощью A_p -индекса. Цель исследования — выявление зависимости характеристик ионосферы от вариаций внешних факторов, к которым относится поток солнечной радиации. Представлены результаты анализа изменчивости ионосферных параметров над Алма-Атой (Казахстан) для двух значений местного времени (полдень и полночь), трех сезонов, для низкой ($F10.7 < 100$) и высокой ($F10.7 > 170$) солнечной активности; невозмущенных ($A_p < 9$) и возмущенных ($A_p > 27$) геомагнитных условий. Результаты, полученные с применением современных спутниковых технологий, ориентированных на работу с данными ПЭС на основе GPS-мониторинга, а также путем измерений на Алма-атинской станции вертикального зондирования, позволяют выявить региональные особенности среднеширотной ионосферы.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

В работе значения ПЭС $I(t)$ получены по картам IONEX в узле GIM [42.5° N; 75.0° E], наиболее близком к координатам г. Алма-Ата [43.25° N; 76.92° E]. Используются GIM-карты [ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex] в формате IONEX, рассчитанные Швейцарским центром CODE (Center for Orbit Determination in Europe, University of Berne, Switzerland) на основе данных более 150 приемных пунктов GPS. Каждый IONEX-dat-файл содержит значения вертикального ПЭС за одни сутки по шкале мирового времени (UT) с временным разрешением 2 ч. Вертикальное ПЭС рассчитывается с учетом состояния солнечно-геомагнитных условий по сферическим гармоническим формулам [Афраймович, Перевалова, 2006]. Общепринятая единица ПЭС — TECU (total electron content unit), равная 10^{16} м^{-3} . Поведение полного электронного содержания рассматривается совместно с вариациями электронной концентрации N_m в максимуме ионосферного слоя F2, измеренными на ионосферной станции вертикального зондирования г. Алма-Аты [43.25° N; 76.92° E].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость ионосферных параметров от уровня солнечной активности

Рассмотрим вариации ионосферных параметров за временной интервал 1999–2013 гг., который охватывает разные уровни солнечной активности: высокий (1999–2002 гг.), когда поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см $F10.7 > 150$; средний, $F10.7 = 100 \div 150$ (2003–2004 гг. — фаза спада солнечной активности, а также 2011–2013 гг. — фаза роста и аномально низкого максимума солнечной активности); низкий, $F10.7 < 100$ (2005–2010 гг., на которые приходится наиболее глубокий минимум солнечной активности за последние 100 лет). Развитие 24-го цикла солнечной активности и его особенности описаны в работах [Ишков, 2012; Бруевич и др., 2018].

На рис. 1, а приведены вариации суточных значений индекса $F10.7$. 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 1999–2013 гг. полуденных и полуночных значений $I(t)$ приведены на рис. 1, б и в соответственно. Сплошной утолщенной кривой показано скользящее среднее с 81-дневным временным окном, построенное для исключения сезонных вариаций.

Среднегодовые значения $F10.7$, полуденных и полуночных значений $I(t)$ и N_m приведены в табл. 1. Полуденные значения $I(t)$ уменьшаются в ~5 раз, от 63.1 TECU в максимуме солнечной активности (1999 г.) до 12.7 TECU в минимуме солнечной активности (2009 г.).

Полуденные значения N_m уменьшаются в ~4.3 раза, от $175.6 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ в максимуме солнечной активности (2001 г.) до $40.3 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ в минимуме солнечной активности (2008 г.). Полуночные значения $I(t)$ уменьшаются в ~3 раза, от 18.3 TECU в максимуме солнечной активности (2002 г.) до 6.1 TECU в минимуме солнечной активности (2008 г.). Полуночные значения N_m уменьшаются в ~2.6 раза, от $41.7 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ в максимуме солнечной активности (2000 г.) до $16.1 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ в минимуме солнечной активности (2008 и 2009 гг.).

Полуночные значения как ПЭС, 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 $(41 \pm 3) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ соответственно.

Регрессионные зависимости полуденных зимних (верхняя панель) и летних (нижняя панель) значений $I(t)$ от уровня солнечной активности за 1999–2013 гг. показаны на рис. 2. Регрессионные зависимости получены на основе 1201 полуденных зимних значений (ноябрь, декабрь, январь, февраль) и 1260 полуденных летних значений (май, июнь, июль, август) $I(t)$ за период 1999–2013 гг. При $F10.7 > 100$ полуденные значения $I(t)$ зимой выше, чем летом, и эта разли-

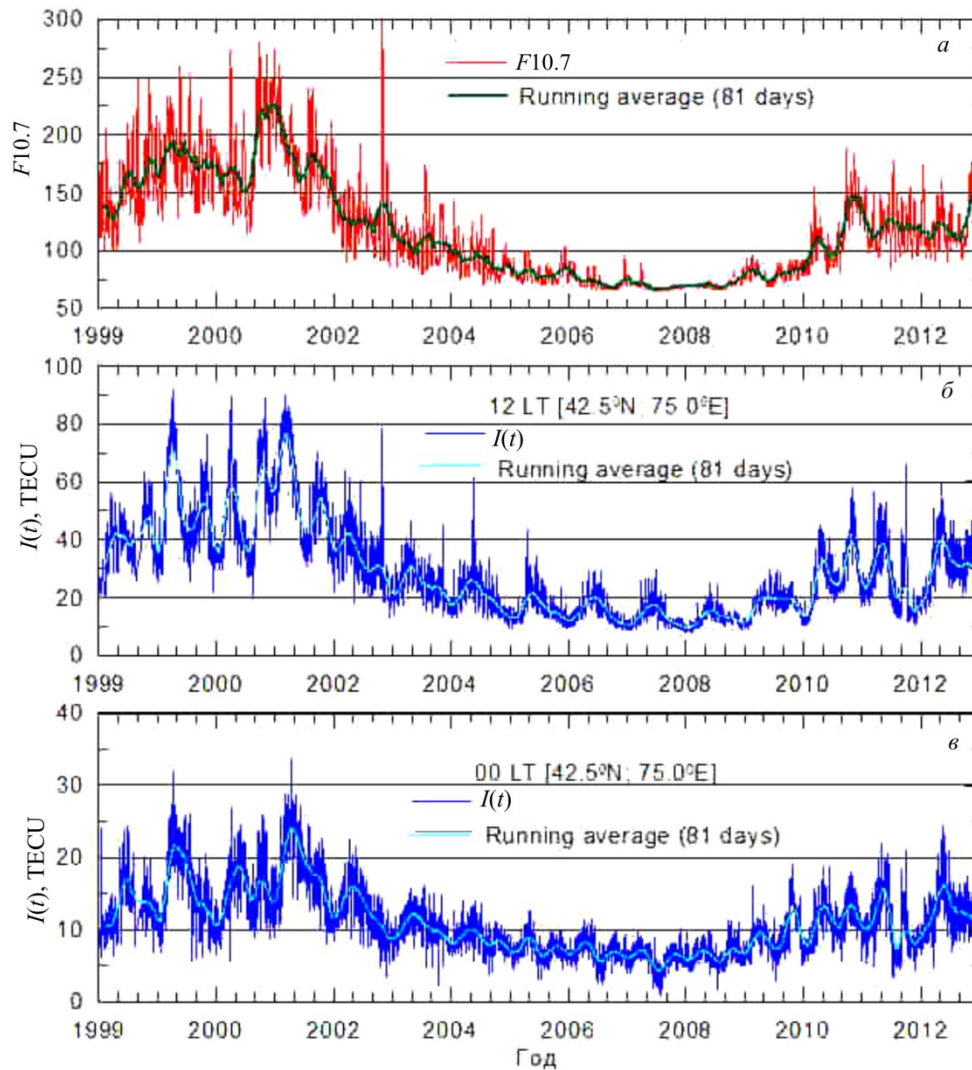


Рис. 1. Вариации потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см $F_{10.7}$ (а), полуденных (б) и полуночных (в) значений ПЭС $I(t)$, полученных по картам IONEX в узле GIM [42.5°N; 75°E], за 1999–2013 гг. Сплошная утолщенная кривая — скользящее среднее с 81-дневным временным окном

Таблица 1

Среднегодовые значения индекса солнечной активности $F_{10.7}$, полуденных и полуночных значений ПЭС $I(t)$ и электронной концентрации в максимуме слоя F2 N_m

Годы	Среднегодовые значения					Уровни солнечной активности
	$F_{10.7}$	$I(t)$, TECU		N_m , 10^{10} м^{-3}		
		12 LT	00 LT	12 LT	00 LT	
1999	153.7	63.1	13.2	131.5	31.0	Высокий $F_{10.7} > 150$
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	–	–	Средний (фаза спада солнечной активности) $F_{10.7} = 100 \div 150$
2003	128.8	33.2	12.7	104.9	26.2	
2004	106.5	24.4	10.3	83.4	26.2	
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) $F_{10.7} < 100$
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	
2011	113.4	27.9	11.3	83.4	25.1	Средний (фаза роста и аномально низкого максимума солнечной активности) $F_{10.7} = 100 \div 150$
2012	119.9	25.3	10.6	98.2	27.4	
2013	122.8	31.1	12.6	104.9	27.4	

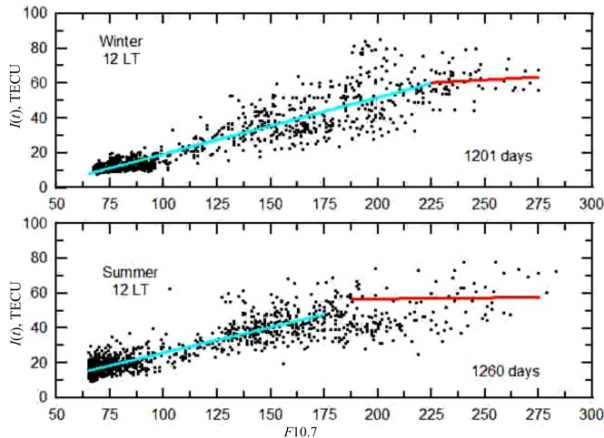


Рис. 2. Регрессионная зависимость полуденных зимних (вверху) и летних (внизу) значений ПЭС от уровня солнечной активности

ца увеличивается с ростом солнечной активности. Наблюдается положительная корреляция полуденных зимних значений $I(t)$ с солнечной активностью при $F10.7 < 225$. 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 $R_{sq} = 0.85$. При $F10.7 > 225$ зимой наблюдается эффект насыщения, т. е. с ростом уровня солнечной активности значения $I(t)$ более не увеличиваются: $I(t) = (60 \pm 18)$ TECU. Для летних условий при $F10.7 < 175$ регрессионную зависимость можно представить в виде линейной функции с $b_1 = 0.293$, $b_0 = -3.477$ с коэффициентом регрессии $R_{sq} = 0.80$. Эффект насыщения летом наблюдается при $F10.7 > 175$: $I(t) = (55 \pm 18)$ TECU. Тенденция к насыщению ионосферы при высоких значениях $F10.7$ была нами обнаружена ранее по данным регистрации эффекта Фарадея при приеме сигналов с частотой $f = 136.112$ МГц геостационарного ИСЗ ETS-II за период с сентября 1985 г. по декабрь 1989 г. на радиополигоне «Орбита» (Алма-Ата, 43.2°N ; 76.9°E) [Мукашева, 1999].

Аналогичная зависимость ПЭС ионосферы от потока радиоизлучения Солнца отмечается в работе [Balan et al., 1993], в которой представлены результаты анализа ПЭС по данным пяти станций в Северном полушарии за период измерений с декабря 1980 г. по декабрь 1985 г., когда поток радиоизлучения Солнца менялся от 66 до 303 единиц. Balan et al. [1993] отмечают, что наблюдаемая нелинейная связь ПЭС ионосферы и индекса $F10.7$ является следствием нелинейной зависимости солнечного ультрафиолетового излучения от потока радиоизлучения Солнца на длине волны $\lambda = 10.7$ см, что подтверждается модельными расчетами и спутниковыми измерениями [Titheridge, 1973; Tobiska, 1991; Shreedevi et al., 2018]. Так, согласно [Balan et al., 1993], вариации всего ультрафиолетового диапазона солнечного излучения показывают линейно возрастающую зависимость от $F10.7$ до значений $F10.7 < \sim 200$. При значениях $F10.7 > 200$ наблюдается следующее:

1) суммарный солнечный ультрафиолетовый поток ($50\text{--}1050 \text{ \AA}$) очень медленно возрастает с увеличением значений $F10.7$;

2) потоки солнечного ультрафиолетового излучения, играющие существенную роль при нагревании термосферы, в хромосферных линиях He II (303.78 \AA) и H Lyman- β (1025.72 \AA) и хромосферные эмиссии $850\text{--}900 \text{ \AA}$ не изменяются с увеличением значений $F10.7$;

3) потоки солнечного ультрафиолетового излучения в корональных линиях Fe XV (284.15 \AA) и корональные эмиссии $300\text{--}350 \text{ \AA}$ показывают даже уменьшение с увеличением значений $F10.7$;

4) потоки солнечного ультрафиолетового излучения в линиях Lyman- α (1216 \AA) и He I (10.830 \AA), измеренные спутником SME (Solar Mesosphere Explorer) во время 21-го цикла солнечной активности, также не изменяются с увеличением значений $F10.7$.

В работе [Бруевич и др., 2018] на основе исследования эффекта гистерезиса (проявляющегося в неоднозначной взаимосвязи между потоками солнечного излучения на фазах роста и спада цикла солнечной активности) показано также, что ежедневные величины потока в линии Lyman- α (1216 \AA) при $F10.7 > \sim 180\text{--}200$ не увеличиваются с ростом $F10.7$.

Изменчивость среднеширотной ионосферы при разных уровнях солнечной и геомагнитной активности

Представленные ниже результаты анализа изменчивости параметров ионосферы $I(t)$ и N_m над Алма-Атой (Казахстан) получены для двух значений местного времени (полдень и полночь), трех сезонов (зима — ноябрь, декабрь, январь, февраль; равноденствие — март, апрель, сентябрь, октябрь; лето — май, июнь, июль, август), для низкой ($F10.7 < 100$) и высокой ($F10.7 > 170$) солнечной активности; невозмущенных ($A_p < 9$) и возмущенных ($A_p > 27$) геомагнитных условий (см. табл. 2 и 3). В качестве фонового уровня $I(t)_0$ и N_{m0} выбирались средние значения при низкой геомагнитной активности $A_p < 9$ в зависимости от уровня солнечной активности ($F10.7 < 100$ и $F10.7 > 170$), времени суток (LT=12 и LT=24) и сезона. Длина выборки n для фонового уровня $I(t)_0$ при $F10.7 < 100$ и $A_p < 9$ составляла для зимы 520, равноденствия — 511, лета — 548 точек; для $F10.7 > 170$ и $A_p < 9$ составляла для зимы 258, равноденствия — 177, лета — 287 точек. Длина каждой выборки в зависимости от сезона и солнечной активности $n > 450$. Выбранные средние значения использовались для анализа свойств флуктуаций ионосферных параметров по стандартному отклонению $\sigma(x)$ и среднему сдвигу x_{ave} [Деминев и др., 2015]:

$$x_{ave} = (1/n) \sum_i x_i; \quad \sigma^2(x) = (1/n) \sum_i (x_i - x_{ave})^2.$$

Здесь $x_i = (I(t)_i / I(t)_0 - 1) \cdot 100$ % или

$$x_i = (N_m(t)_i / N_{m0} - 1) \cdot 100$$

в зависимости от выбранного ионосферного параметра. \sum_i обозначает суммирование по индексу i от 1 до n , где n — число значений данной выборки.

Таблица 2

Стандартное отклонение $\sigma(x)$ и средний сдвиг x_{ave} флуктуаций $I(t)$ и N_m относительно спокойного уровня над ст. «Алматы» в полдень (LT=12) и полночь (LT=24) для трех сезонов (зима, равноденствие, лето) при низкой ($F10.7 < 100$) и высокой ($F10.7 > 170$) солнечной активности

Сезон	LT=12				LT=00			
	$F10.7 < 100$		$F10.7 > 170$		$F10.7 < 100$		$F10.7 > 170$	
	$\sigma(x)$, %	x_{ave} , %	$\sigma(x)$, %	x_{ave} , %	$\sigma(x)$, %	x_{ave} , %	$\sigma(x)$, %	x_{ave} , %
$I(t)$								
Зима	25.9	4.5	33.9	3.7	24.9	0.2	26.7	4.1
Равноденствие	29.4	4.2	24.5	0.8	25.7	-0.7	30.4	0.1
Лето	27.8	3.7	22.4	-0.4	32.7	4.8	23.5	-1.0
N_m								
Зима	33.8	5.3	25.3	4.7	29.1	0.9	32.0	5.4
Равноденствие	31.9	3.3	23.3	-3.1	29.4	1.0	36.1	-2.3
Лето	30.6	4.1	22.8	-0.01	32.4	2.1	23.5	-3.2

Таблица 3

Стандартное отклонение $\sigma(x)$ и средний сдвиг x_{ave} флуктуаций $I(t)$ и N_m относительно спокойного уровня над ст. «Алматы» в полдень (LT=12) и полночь (LT=24) для трех сезонов (зима, равноденствие, лето) при спокойных ($A_p < 9$) и возмущенных ($A_p > 27$) геомагнитных условиях в зависимости от уровня солнечной активности

Сезон	LT=12				LT=00			
	$A_p < 9$		$A_p > 27$		$A_p < 9$		$A_p > 27$	
	$\sigma(x)$, %	x_{ave} , %	$\sigma(x)$, %	x_{ave} , %	$\sigma(x)$, %	x_{ave} , %	$\sigma(x)$, %	x_{ave} , %
$I(t), F10.7 < 100$								
Зима	21.7	0.034	46.4	60.0	25.4	0.015	24.6	12.8
Равноденствие	27.0	-0.001	42.5	38.3	26.5	0.027	23.6	-4.6
Лето	23.9	0.001	60.9	47.9	31.5	0.000	19.6	21.7
$I(t), F10.7 > 170$								
Зима	33.9	0.001	32.7	14.5	24.5	0.015	32.7	13.4
Равноденствие	22.3	0.001	23.3	1.2	30.2	0.003	26.3	-6.5
Лето	21.1	0.001	28.9	3.0	22.3	0.002	28.9	-4.5
$N_m, F10.7 < 100$								
Зима	29.6	0.007	45.3	37.2	28.0	0.005	24.9	-1.3
Равноденствие	29.6	0.009	45.8	29.1	28.6	0.003	31.4	10.3
Лето	26.7	0.011	56.4	46.0	31.6	-0.006	35.0	23.8
$N_m, F10.7 > 170$								
Зима	23.5	0.001	28.1	13.2	26.2	-0.008	34.2	13.8
Равноденствие	19.4	0.002	23.2	-4.4	33.6	-0.008	27.4	-12.3
Лето	21.1	0.004	26.3	0.0	21.7	0.005	24.5	-9.2

Стандартное отклонение $\sigma(x)$ рассматриваемых ионосферных параметров, как видно из табл. 2, слабо зависит не только от солнечной активности, но и от сезона: в среднем $\sigma(x)$ изменяется в пределах 27–30 % во все сезоны при любом уровне солнечной активности. При любом уровне солнечной активности и для полуденных, и для полуночных значений $I(t)$ и N_m выполняется условие $\sigma^2(x) \gg x_{ave}^2$.

Можно видеть (табл. 3), что во все сезоны в полдень при $F10.7 < 100$ и высокой геомагнитной активности ($A_p > 27$) стандартное отклонение $\sigma(x)$ больше примерно в 1.5–2.5 раза, чем при низкой геомагнитной активности ($A_p < 9$). Поскольку фоновые значения $I(t)_0$ и N_{m0} рассчитывались для условий $A_p < 9$ в зависимости от сезона и уровня солнечной активности, то, естественно, значения среднего сдвига x_{ave}

близко к нулю при $A_p < 9$ (см. табл. 3). При $F10.7 < 100$ и высокой геомагнитной активности выполняется условие $x_{ave}^2 \geq \sigma^2(x)$, т. е. средний сдвиг флуктуаций $I(t)$ и N_m относительно спокойного уровня превышает стандартное отклонение этих флуктуаций по абсолютной величине. При $F10.7 > 170$ изменчивость в зависимости от геомагнитной активности менее выражена как для полуденных, так и для полуночных значений стандартного отклонения $\sigma(x)$ ионосферных параметров $I(t)$ и N_m . Изменчивость состояния ионосферы в спокойных условиях определяется внутренними атмосферными процессами, флуктуации электронной концентрации в ночное время определяют диффузионные потоки ионосферной плазмы между сопряженными областями ионосферы, плазмосферные потоки, эффекты магнитных суббурь,

термосферный ветер [Essex, Klobuchar, 1980; Shi et al., 2014; Деминов и др., 2011, 2015; Shreedevi et al., 2018].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием современных технологий GIM и данных вертикального зондирования ионосферы ст. «Алматы» [43.25° N; 76.92° E] исследовано поведение ионосферных параметров $I(t)$ и N_m за период 1999–2013 гг. над Казахстанским регионом. Рассматриваемый временной интервал охватывает разные уровни солнечной активности. Показано, что 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 солнечным индексом $F10.7$ при $F10.7 < 225$. Регрессионную зависимость можно представить в виде линейной функции с коэффициентом регрессии $R_{sq} = 0.85$. При $F10.7 > 175$ летом и при $F10.7 > 225$ зимой наблюдается эффект насыщения, т. е. с ростом уровня солнечной активности значения $I(t)$ более не увеличиваются. Наблюдаемая нелинейная связь полного электронного содержания ионосферы и потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см является следствием нелинейной зависимости солнечного ультрафиолетового излучения от потока радиоизлучения Солнца, что подтверждается модельными расчетами и спутниковыми измерениями [Titheridge, 1973; Tobiska, 1991; Balan et al., 1993; Shreedevi et al., 2018].

Исследование особенностей изменчивости параметров среднеширотной ионосферы при разных уровнях солнечной и геомагнитной активности показало, что стандартное отклонение $\sigma(x)$ и средний сдвиг x_{ave} флуктуаций $I(t)$ и N_m относительно спокойного уровня над ст. «Алматы» [43.25°N; 76.92°E] слабо зависят от уровня солнечной активности, а зависимость от геомагнитной активности значительна. При низкой солнечной ($F10.7 < 100$) и высокой геомагнитной активности x_{ave} одного порядка с $\sigma(x)$. При высокой солнечной активности ($F10.7 > 170$) зависимость от геомагнитной активности менее выражена и для полуденных, и для полуночных значений как стандартного отклонения $\sigma(x)$, так и ионосферных параметров $I(t)$ и N_m .

Принципиального различия изменчивости ионосферных параметров $I(t)$ и N_m в зависимости от уровня солнечной и геомагнитной активности не отмечается, особенности изменчивости ПЭС определяются в основном изменчивостью электронной концентрации в максимуме слоя F2. Последнее позволяет использовать параметр $I(t)$, полученный по технологии GIM, для контроля состояния среднеширотной ионосферы с целью решения вопросов надежного функционирования систем космической навигации и мобильной связи, что актуально для Казахстана, имеющего территорию 2 725 000 км² и единственную станцию вертикального зондирования ионосферы в г. Алма-Ата.

Работа выполнена при поддержке программно-целевого финансирования научно-технической про-

граммы О.0799 Аэрокосмическим комитетом Министерства цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности Республики Казахстан, проект № 0118PK00799.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2006. 480 с.
- Бруевич Е.А., Бруевич В.В., Якунина Г.В. Циклические вариации потоков солнечного излучения в начале XXI века // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 2018. № 2. С. 93–99.
- 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. 2, № 3. С. 59–68. DOI: [10.12737/20872](https://doi.org/10.12737/20872).
- Деминов М.Г., Деминова Г.Ф., Жеребцов Г.А., Пирог О.М., Полех Н.М. Изменчивость параметров максимума F2-слоя спокойной среднеширотной ионосферы при низкой солнечной активности: 1. Статистические свойства // Геомагнетизм и аэрономия. 2011. Т. 51, № 3. С. 360–367.
- 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. DOI: [10.12737/6558](https://doi.org/10.12737/6558).
- Ишков В.Н. Текущий 24 цикл солнечной активности: эволюция, особенности, активные явления, прогноз развития // Polar 2012. IZMIRAN: <http://www.izmiran.ru> POLAR2012/REPORTS/POLAR_2012_Ischkov.pdf (дата обращения: 13.05.2019).
- Мукашева С.Н. Морфология поведения интегрального электронного содержания ионосферы над Казахстаном (по данным трансionoсферного зондирования): дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.03.03. Алматы, 1999. 120 с.
- Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Bilitza D. Characteristics of the ionospheric variability as a function of season, latitude, local time, and geomagnetic activity // Radio Sci. 2005. V. 40. RS5009. DOI: [10.1029/2004RS003179](https://doi.org/10.1029/2004RS003179).
- 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. DOI: [10.1016/0032-0633\(93\)90043-2](https://doi.org/10.1016/0032-0633(93)90043-2).
- Bolaji O.S., Adebisi S.J., Fashae J.B. Characterization of ionospheric irregularities at different longitudes during quiet and disturbed geomagnetic conditions // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2019. V. 182. P. 93–100.
- Essex E.A., Klobuchar J.A. Mid-latitude nighttime increases in the Total Electron Content of the Ionosphere // J. Geophys. Res. 1980. V. 85, N A11. P. 6011–6020. DOI: [10.1029/JA085iA11p06011](https://doi.org/10.1029/JA085iA11p06011).
- 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. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.10.019](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.10.019).
- 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. DOI: [10.1029/97RS02707](https://doi.org/10.1029/97RS02707).
- Schaer S., Beutler G., Rothacher M. Mapping and predicting the ionosphere // Proc. of the IGS AC. Workshop. Darmstadt, Germany. February 9–11. 1998a. P. 307–320.
- Schaer S., Gurtner W., Feltens J. IONEX: The Ionosphere Map Exchange Format Version 1 // Proc. of the IGS AC. Workshop. Darmstadt, Germany. February 9–11. 1998b. P. 233–247.

Shi H., Zhang D., Liu Y., Hao Y. Analysis of the ionospheric variability based on wavelet decomposition // *Sci. China Tech. Sci.* 2014. V. 58, iss. 1. P. 174–180. DOI: [10.1007/s11431-014-5709-8](https://doi.org/10.1007/s11431-014-5709-8).

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) // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. V. 179. P. 425–434. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.09.010](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.09.010).

Titheridge J. E. The electron content of the southern mid-latitude ionosphere, 1965–1971 // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1973. V. 35. P. 981–1001. DOI: [10.1016/0021-9169\(73\)90077-9](https://doi.org/10.1016/0021-9169(73)90077-9).

Tobiska W. K. Revised solar extreme ultraviolet flux model // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1991. V. 53. P. 1005–1018. DOI: [10.1016/0021-9169\(91\)90046-A](https://doi.org/10.1016/0021-9169(91)90046-A).

URL: <http://www.swpc.noaa.gov> (дата обращения 20 мая 2019 г.).

URL: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex> (дата обращения 20 мая 2019 г.).

REFERENCES

Afraimovich E.L., Perevalova N.P. *GPS-monitoring verkhnei atmosfery Zemli* [GPS-Monitoring of the Upper Atmosphere of the Earth]. Irkutsk, ISTP SB RAS, 2006, 480 p. (In Russian).

Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Bilitza D. Characteristics of the ionospheric variability as a function of season, latitude, local time, and geomagnetic activity. *Radio Sci.* 2005, vol. 40, RS5009. DOI: [10.1029/2004RS003179](https://doi.org/10.1029/2004RS003179).

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, vol. 41, no. 2, pp. 141–145. DOI: [10.1016/0032-0633\(93\)90043-2](https://doi.org/10.1016/0032-0633(93)90043-2).

Bolaji O.S., Adebisi S.J., Fashae J.B. Characterization of ionospheric irregularities at different longitudes during quiet and disturbed geomagnetic conditions. *Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2019. vol. 182, pp. 93–100. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.11.007](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.11.007).

Bruevich E.A., Bruevich V.V., Yakunina G.V. Cyclic variations in the solar radiation fluxes at the beginning of the 21st century. *Moscow University Physics Bulletin.* 2018, vol. 72, no. 2, pp. 216–222.

Deminov M.G., Deminova G.F., Zhrebtsov G.A., Pirog O.M., Polekh N.M. Variability of parameters of the F2-layer maximum in the quiet midlatitude ionosphere under low solar activity: 1. Statistical properties. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2011, vol. 51, no. 3, pp. 348–355. DOI: [10.1134/S0016793211020058](https://doi.org/10.1134/S0016793211020058).

Deminov M.G., Deminova G.F., Zhrebtsov G.A., Polekh N.M. Properties of the F2-layer maximum density variability over Irkutsk under different levels of the solar and geomagnetic activity. *Solar-Terrestrial Physics.* 2015, vol. 1, no. 1, pp. 56–62. DOI: [10.12737/6558](https://doi.org/10.12737/6558). (In Russian).

Essex E.A., Klobuchar J.A. Mid-latitude nighttime increases in the total electron content of the ionosphere. *J. Geophys. Res.* 1980, vol. 85, no. A11, pp. 6011–6020. DOI: [10.1029/JA085iA11p06011](https://doi.org/10.1029/JA085iA11p06011).

Gulyaeva T.L. Modification of solar activity indices in the International Reference Ionosphere IRI and IRI-Plas models due to recent revision of sunspot number time series. *Solar-Terrestrial Physics.* 2016, vol. 2, no. 3, pp. 87–98. DOI: [10.12737/22287](https://doi.org/10.12737/22287).

Ishkov V.N. *Tekushchii 24 tsikl solnechnoi aktivnosti: evolyutsiya, osobennosti, aktivnye yavleniya, prognoz razvitiya* [The current 24th cycle of solar activity: evolution, characteristics, active phenomena, development forecast]. Polar 2012. http://www.izmiran.ru/POLAR2012/REPORTS/POLAR_2012_Ischkov.pdf (accessed 13 May 2019).

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, vol. 181, pp. 116–126. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.10.019](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.10.019).

Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., Ho C.H., Lindqwister U.J., Runge T.F. A global mapping technique for GPS-derived ionosphere TEC measurements. *Radio Sci.* 1998, vol. 33, no. 3, pp. 565–582. DOI: [10.1029/97RS02707](https://doi.org/10.1029/97RS02707).

Mukasheva S.N. *Morfologiya povedeniya integral'nogo elektronnoygo sodержaniya ionosfery nad Kazakhstanom (po dannym transionosfernoygo zondirovaniya)*. Dis. ... kand. fiz.-mat. nauk [Morphology of the behavior of the integrated electron content of the ionosphere over Kazakhstan (according to TRANS-ionospheric sounding) Dr. phys. and math. sci. diss.]. Almaty, 1999, 120 p. (In Russian).

Schaer S., Beutler G., Rothacher M. Mapping and predicting the ionosphere. *Proc. of the IGS AC. Workshop. Darmstadt, Germany. February 9–11.* 1998a, pp. 307–320.

Schaer S., Gurtner W., Felten J. IONEX: The Ionosphere Map Exchange Format Version 1. *Proc. of the IGS AC. Workshop. Darmstadt, Germany. February 9–11.* 1998b, pp. 233–247.

Shi H., Zhang D., Liu Y., Hao Y. Analysis of the ionospheric variability based on wavelet decomposition. *Sci. China Tech. Sci.* 2014, vol. 58, iss. 1, pp. 174–180. DOI: [10.1007/s11431-014-5709-8](https://doi.org/10.1007/s11431-014-5709-8).

Shreedevi P.R., Choudhary R.K., Yadav S., Thampi S.V., Ajesh A. 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). *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 179, pp. 425–434. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.09.010](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.09.010).

Titheridge J.E. The electron content of the southern mid-latitude ionosphere, 1965–1971. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1973, vol. 35, pp. 981–1001. DOI: [10.1016/0021-9169\(73\)90077-9](https://doi.org/10.1016/0021-9169(73)90077-9).

Tobiska W.K. Revised solar extreme ultraviolet flux model. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1991, vol. 53, pp. 1005–1018. DOI: [10.1016/0021-9169\(91\)90046-A](https://doi.org/10.1016/0021-9169(91)90046-A).

URL: <http://www.swpc.noaa.gov> (accessed May 20, 2019).

URL: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex> (accessed May 20, 2019).

Как цитировать эту статью

Мукашева С.Н., Каптыгин В.И., Малимбаев А.М. Вариации ионосферных параметров над Алма-Атой (Казахстан) в 1999–2013 гг. *Солнечно-земная физика* 2019. Т. 5, № 4. С. 110–116. DOI: [10.12737/szf-54201912](https://doi.org/10.12737/szf-54201912).