

Том I, с. 230-234

УДК: 550.388.2+551.510.535

## СТАТИСТИКА СРАВНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И МОДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

О. А. Мальцева, Т. В. Никитенко

*Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики,  
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194  
E-mail: mal@ip.rsu.ru*

**Аннотация.** В настоящее время ощущается повышенный интерес к использованию эмпирических моделей ионосферы в высоких широтах, делаются попытки увеличить точность определения параметров в этой зоне. Одной из таких моделей является SIMP. В данной работе проводится сравнение модельных (IRI, IMP) значений foF2 и hmF2 с экспериментальными величинами на примере данных станций Norilsk и Longyearbyen. Для станции Longyearbyen среднегодовые оценки абсолютных и относительных отклонений для foF2 (0.5 МГц и 14 %) близки к среднеширотным. Микроскопическое преимущество соответствует модели IRI. Для станции Norilsk выявлена зависимость результатов сравнения от солнечной активности: при высокой активности модель SIMP дает результаты лучше, чем IRI, для foF2 и хуже для hmF2, при низкой активности модель SIMP дает результаты лучше для hmF2 и хуже для foF2. Для средней активности очевидно преимущество модели SIMP при определении обоих параметров. Всё большую роль при определении состояния ионосферы начинают играть измерения полного электронного содержания ТЕС. В данной работе значения ТЕС для моделей IRI-Plas и NeQuick сравниваются с данными глобальных карт. Для обеих станций лучшее соответствие получено для модели IRI-Plas. Для станции Longyearbyen обе модели занижают значения. Для станции Norilsk модель IRI-Plas завышает значения для всех сезонов, кроме летнего, модель NeQuick занижает значения во все сезоны.

**Ключевые слова:** модели ионосферы; высокие широты; полное электронное содержание

## STATISTICS OF COMPARISON OF EXPERIMENTAL AND MODEL PARAMETERS OF THE IONOSPHERE IN HIGH LATITUDES

O. A. Maltseva, T. V. Nikitenko

**Abstract.** Now, heightened interest exists to use the empirical ionospheric models in high latitudes, attempts to increase accuracy of obtaining parameters in this zone are made. One of such models is SIMP. In the present work, comparison of model (IRI, SIMP) values of foF2 and hmF2 with experimental ones is performed on an example of data of stations Norilsk and Longyearbyen. For station Longyearbyen, annual estimations of absolute and relative deviations for foF2 (0.5 MHz and 14 %) are close to the middle-latitude values. Microscopic advantage corresponds to the IRI model. For station Norilsk, dependence of comparison results on solar activity is revealed: at high activity the SIMP model yields results better, than IRI, for foF2 and worse for hmF2, at low activity the SIMP model gives results better for hmF2 and worse for foF2. Advantage of the SIMP model is obvious for moderate activity at definition of both parameters. Measurements of the total electron content TEC start to play the increasing role at description of ionospheric conditions. In the present work, values of TEC for models IRI-Plas and NeQuick are compared to data of global maps. For both stations the best conformity is obtained for the IRI-Plas model. For station Longyearbyen, both models underestimate TEC values. For station Norilsk, the IRI-Plas model overestimates values for all seasons, except summer, the NeQuick model underestimates values during all seasons.

**Keywords:** ionospheric models; high latitudes; the total electron content

### Введение

В последние годы повысился интерес к эмпирическим моделям ионосферы, например [1]. Интерес подтвержден в работе [2]. Рекомендовано использовать, в частности, модель ИПГ Росгидромета, представленную в качестве ГОСТа РФ, и ограничено модели IRI [3] и NeQuick [4].

Таблица 1. Сравнение точностей определения foF2 с помощью моделей IRI и SIMP по данным станции Longyearbyen

	Longyearbyen	2010	2011	2012	2013	2014	среднее
1	$\Delta(\text{IRI})$	0.44	0.31	-0.01	0.39	0.52	0.33
2	$\Delta(\text{SIMP})$	-0.44	-0.18	-0.29	-0.07	0.59	-0.08
3	$ \Delta(\text{IRI}) $	0.51	0.42	0.36	0.48	0.70	0.49
4	$ \Delta(\text{SIMP}) $	0.51	0.47	0.47	0.47	0.68	0.52
5	$\sigma(\text{IRI})$ , МГц	0.63	0.55	0.44	0.64	0.89	0.63
6	$\sigma(\text{SIMP})$ , МГц	0.65	0.59	0.59	0.60	0.81	0.65
7	$\sigma(\text{IRI})$ , %	15.62	12.44	9.84	13.04	15.87	13.36
8	$\sigma(\text{SIMP})$ , %	16.20	13.33	13.16	12.23	14.46	13.88

Как известно, в основе модели ИПГ лежит статья [5] и одной из задач было улучшение представления ионосферных параметров foF2 и hmF2 в области высоких широт.

Особое внимание уделяется параметру TEC. В этой связи представляет интерес тестирование этих моделей в высокоширотной зоне. В представляемой работе такое тестирование проводится по данным станций Norilsk и Longyearbyen. Варианты тестирования определяются наличием данных. Для станции Норильск значения foF2 и hmF2 были доступны в базе DIDbase (<http://ulcar.uml.edu/DIDBase/>) в период 2003-2012 с пропуском в 2004-2005. Для станции Longyearbyen данные для foF2 были доступны в базе spidr (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp>) с апреля 2010 по май 2013. TEC для обеих станций вычислялся из IONEX файлов для карт JPL, CODE, UPC (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>). Параметры модели IRI2016 вычислялись online на сайте ([http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2016\\_vitmo.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2016_vitmo.html)), для модели SIMP отсчитывались с экрана на сайте (<http://www.space-weather.ru/index.php?page=rascet-sostoyaniya-ionosfery-po-modeli-sim>), значения TEC для модели IRI-Plas вычислялись на сайте (<http://www.ionolab.org/index.php?language=en>), для модели NeQuick – на сайте – (<https://t-ict4d.ictp.it/nequick2/nequick-2-web-model>).

Целью работы является оценка качества использования самых современных эмпирических моделей в высоких широтах. Оценка проводится сравнением модельных и экспериментальных значений параметров.

### Сравнение значений foF2 и hmF2

Результаты сравнения для параметра foF2 для станции Longyearbyen приводятся в табл. 1 в виде среднегодовых значений.

Первые две строки показывают кроме величины знак среднегодовых отклонений  $\Delta = \text{foF2}(\text{obs}) - \text{foF2}(\text{mod})$ : если  $\Delta > 0$ , модель занижает значения, при  $\Delta < 0$  модель завышает значения. Видно, что модель IRI занижает значения во все годы, кроме 2012. Модель SIMP занижает значения во все годы, кроме 2014. Строки 3-4 представляют среднегодовые абсолютные значения: для одних двух лет отклонения IRI меньше, для других двух лет отклонения меньше у модели SIMP, в 2010 году наблюдались одинаковые отклонения. Строки 5-6 представляют СКО  $\sigma$  в МГц, которые соответствуют строкам 3-4. Наибольшие отклонения  $\sigma$  соответствуют году максимума 2014. Строки 7-8 показывают относительные отклонения в %. Эти оценки близки к среднеширотным. Если сравнивать средние за 5 лет оценки (последний столбец), то микроскопическое преимущество соответствует модели IRI. Для станции Норильск были доступны данные по foF2 и hmF2. Итоговая таблица 2 приведена для лет высокой (2003), средней (2012) и низкой (2009) солнечной активности. Даются среднегодовые абсолютные и относительные отклонения.

При высокой активности модель SIMP дает результаты лучше, чем IRI, для foF2 и хуже для hmF2, при низкой активности модель SIMP дает результаты лучше для hmF2 и хуже для

Таблица 2. Сравнение точностей определения foF2 и hmF2 с помощью моделей IRI и SIMP по данным станции Norilsk

	$\Delta$ foF2		$\Delta$ hmF2		$\sigma$ (foF2)		$\sigma$ (hmF2)	
	МГц	МГц	км	км	IRI	%	IRI	%
	IRI	SIMP	IRI	SIMP	IRI	SIMP	IRI	SIMP
2003	0.52	0.44	17.46	19.21	12.64	10.72	6.70	7.93
2009	0.31	0.56	35.09	23.60	11.69	18.95	15.49	11.41
2012	0.69	0.61	26.14	21.18	19.97	17.87	10.52	8.93

foF2. Для средней активности очевидно преимущество модели SIMP при определении обоих параметров. Детали сезонного хода представлены на рис. 1.

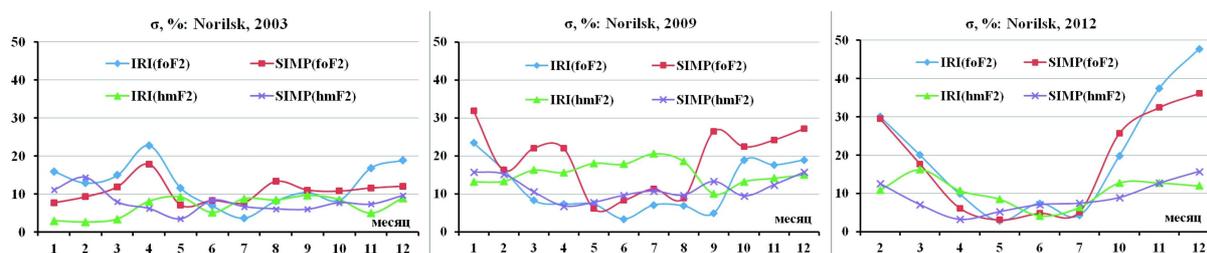


Рис. 1. Сезонный ход СКО в зависимости от солнечной активности.

Видно, что в максимуме солнечной активности обе модели обеспечивают результаты на уровне среднеширотных, при низкой активности результаты хуже: в зимние месяцы относительные отклонения для foF2 начинают превышать отклонения для hmF2. В период средней активности наблюдается резкая сезонная зависимость: обе модели дают неудовлетворительные результаты для foF2 в зимний период. Пример суточного хода в этом случае дается на рис. 2.

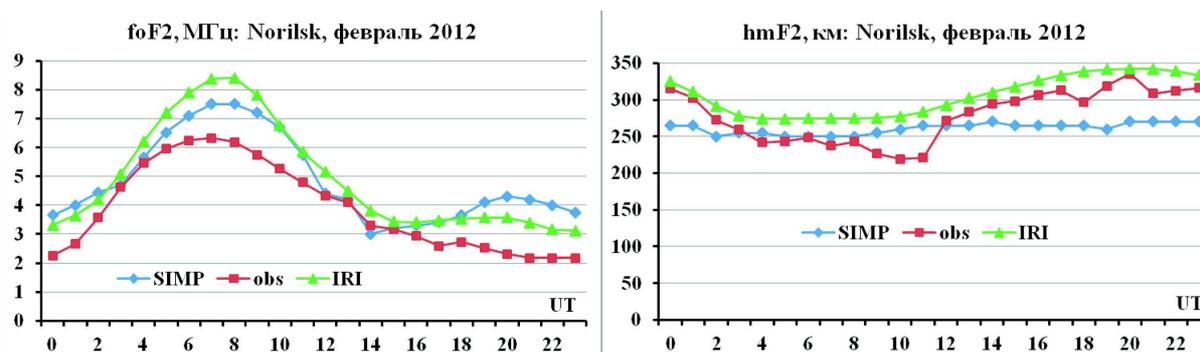


Рис. 2. Пример сравнения экспериментального и модельных суточных ходов foF2 и hmF2 в феврале 2012.

Тренды сезонного хода сводятся к следующему. Модель IRI завышает или дает близкие значения foF2 при высокой солнечной активности, в условиях средней активности завышает, а при низкой активности занижает значения. Модель SIMP при высокой и низкой активности может, как завышать, так и занижать значения, при средней активности завышает. При определении hmF2 модель IRI при высокой и средней активности завышает значения, при низкой активности занижает. Модель SIMP при высокой и низкой активности дает отклонения различных знаков, при средней активности завышает.

Таблица 3. Сравнение точностей определения TEC с помощью моделей IRI-Plas и NeQuick по данным станции Longyearbyen

	JPL		CODE		UPC	
$\sigma$ , TECU	IRI-Plas	NeQuick	IRI-Plas	NeQuick	IRI-Plas	NeQuick
2011	3.45	6.09	2.59	3.94	2.70	5.01
2012	3.48	6.26	2.76	4.07	2.73	5.08
2013	4.11	7.05	3.36	4.83	3.44	5.86
2014	5.97	10.32	4.61	8.18	5.53	9.56
средн	4.25	7.43	3.33	5.25	3.60	6.38

### Сравнение значений TEC

Большинство работ относится к сравнению экспериментальных TEC и значений модели IRI, которая имеет 3 опции расчета этого параметра, причем эти сравнения проводятся в среднеширотных, низкоширотных и экваториальных зонах. Необходимо отметить, что такое сравнение не совсем корректно, поскольку высота  $N(h)$ -профиля модели IRI, интегрирование которого дает значение TEC, ограничена 2000 км, тогда как определение TEC проводится с помощью навигационных спутников с орбитами на высотах порядка 20000 км. Этому недостатка лишены модели IRI-Plas и NeQuick. В данной работе значения этих моделей сравниваются с глобальными картами JPL, CODE, UPC, поскольку их значения могут различаться. Пример суточно-сезонного поведения значений для 2012 приведен на рис. 3.

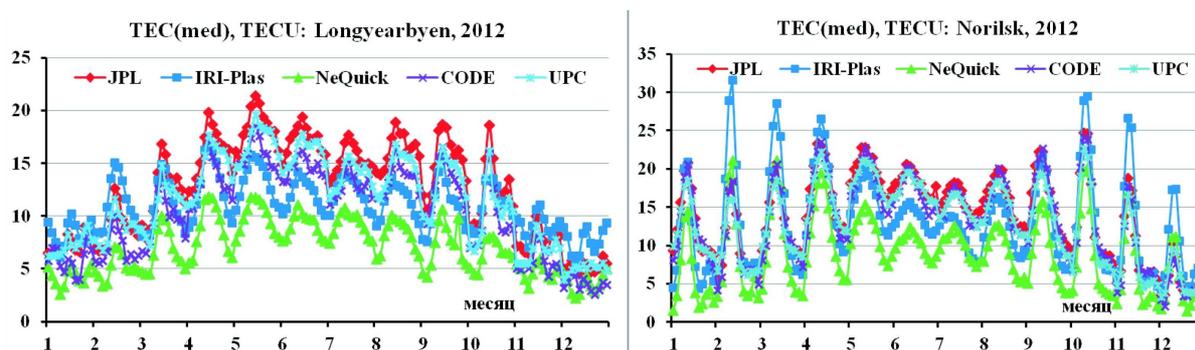


Рис. 3. Пример поведения модельных и экспериментальных значений TEC.

Статистика СКО дается на примере станции Longyearbyen в табл. 3.

Соответствие значений TEC лучше для модели IRI-Plas. Видна зависимость от солнечной активности: расхождение увеличивается с ростом активности. Это относится и к относительным отклонениям, которые составляют  $\sim 30\%$  для IRI-Plas и  $\sim 50\%$  для NeQuick.

### Заключение

По данным двух станций показано, что модель SIMP существенно улучшает определение  $foF2$  и  $hmF2$  по сравнению с моделью IRI в высоких широтах в условиях умеренной солнечной активности. В условиях высокой и низкой активности преимуществ нет. При сравнении значений TEC для обеих станций лучшее соответствие получено для модели IRI-Plas. Для станции Longyearbyen обе модели занижают значения. Для станции Norilsk модель IRI-Plas завышает значения для всех сезонов, кроме летнего, модель NeQuick занижает значения во все сезоны.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта БЧN3.9696.2017/8.9 Минобрнауки РФ.

### Список литературы

1. Козлов С.И., Ляхов А.Н., Якубовский С.В., Беккер С.З., Гаврилов Б.Г., Яким В.В. Обоснование требований к моделям ионосферы, используемым в радиолокационных системах дециметрового и метрового диапазона длин волн // Сб. докладов V Всеросс. научн.-техн. конф. «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». 23-25 мая 2018г. ВКА имени А.Ф.Можайского. г. Санкт-Петербург. С. 455-457.
2. Козлов С.И., Аксенов О.Ю., Беккер С.З., Ляхов А.Н., Яким В.В., Якубовский С.В. Какие модели необходимо разрабатывать в интересах радиолокационных систем сантиметрового, дециметрового и метрового диапазона длин волн? // Тезисы Четырнадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» ИКИ РАН, 11-15 февраля 2019 г. С. 127.
3. Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., Huang X. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions // Space Weather. – 2017. – V. 15. – P. 418–429.
4. Nava B., Coisson P., Radicella S.M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2008. – V.70, N 15. - P. 1856–1862.
5. Лещинская Т.Ю., Михайлов В.В. Модель SIMP-1: картирование месячных медиан foF2 по северному полушарию // Геомагнетизм и аэрномия. 2016. – Т. 56, № 6. - С. 772–780.