

## ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

УДК 550.388.2

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-31-41

### ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ IRI ПО ДАННЫМ РОССИЙСКИХ ИОНОСФЕРНЫХ СТАНЦИЙ ЛОВОЗЕРО, САЛЕХАРД, ДИКСОН, ТУНГУСКА И ЯКУТСК

Ю.А. ШМЕЛЕВ<sup>\*1,3</sup>, О.А. МАЛЬЦЕВА<sup>2</sup>, В.Е. МОРОЗОВ<sup>3</sup>,  
Д.И. ШИЛОВ<sup>3</sup>, С.А. БЕЗВЫТНЫЙ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> — Научно-исследовательский институт физики, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>3</sup> — Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

\*shmelev.juri@yandex.ru

### TESTING OF THE IRI MODEL BY DATA FROM LOVOZERO, SALEKHARD, DICKSON, TUNGUSKA AND YAKUTSK IONOSPHERIC STATIONS

J.A. SHMELEV<sup>\*1,3</sup>, O.A. MALTSEVA<sup>2</sup>, V.E. MOROZOV<sup>3</sup>,  
D.I. SHILOV<sup>3</sup>, S.A. BEZVYTYNYJ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, , Russia

<sup>2</sup> — Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>3</sup> — St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

\*shmelev.juri@yandex.ru

Received January, 24, 2018

Accepted April, 17, 2018

*Keywords:* Arctic region, critical frequency, Ionosphere, total electron content.

#### Summary

Empirical models are one of effective ways to set and predict a condition of the ionosphere. To estimate an accuracy of such setting it is necessary to test models by means of experimental data. One of most widely used models is IRI (International Reference Ionosphere), however it is insufficiently tested in the region of high latitudes. In the given article results of testing of the model IRI according to vertical sounding on Russian ionosondes, located in subauroral and high-latitude zones in March–

---

**Citation:** J.A. Shmelev, O.A. Maltseva, V.E. Morozov, D.I. Shilov, S.A. Bezvytnyj. Testing of the IRI Model by Data from Lovozero, Dickson, Tunguska, and Yakutsk Ionospheric Stations. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (1): 31–41. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-31-41

---

April 2016 are presented. Feature of the period is presence of several geomagnetic disturbances. The studied parameter is a critical frequency foF2, the basic analyzed magnitude is the deviation of a model value from experimental one and its relative mean square deviation. Despite increase last years of numbers of ionosondes in a Russian Arctic zone by efforts of AARI, their number is not enough for detailed monitoring. Additionally, it is possible to use receivers of signals of navigation satellites of such systems, as GPS, GLONASS, providing the information about a total electron content (TEC). In a number of papers, possibility of use of TEC to obtain critical frequencies is shown. In the present paper, confirmation of this possibility is given in subauroral and high-latitude regions. Results are presented for five Russian stations (Lovozero, Salekhard, Dickson, Tunguska, Yakutsk) in comparison with data of reference middle-latitude station Juliustuh. It is shown, that deviations of model values of foF2 from experimental medians in high latitudes are at level of middle-latitude values, relative deviations for instant values of foF2 day by day do not exceed 20–25 %. The TEC usage allows decreasing this estimation in 2 times. Values of correlation coefficients between foF2 and TEC, defining possibility to use TEC for obtaining foF2, lay within 0.6–0.99. The TEC usage allows filling absent values of foF2.

*Поступила 24 января 2018 г.*

*Принята к печати 17 апреля 2018 г.*

*Ключевые слова:* ионосфера, критическая частота, полное электронное содержание, арктическая зона

В данной статье приводятся результаты тестирования модели IRI (International Reference Ionosphere) по данным вертикального зондирования на российских ионозондах, расположенных в арктической зоне, в марте–апреле 2016 г. Особенностью периода является наличие нескольких геомагнитных возмущений. Полученные в работе данные подтверждают возможность использования TEC для определения критических частот в арктическом регионе. Результаты исследования приводятся для пяти российских станций (Ловозеро, Салехард, Диксон, Тунгуска, Якутск) в сравнении с данными эталонной среднеширотной станции Юлиусрух. Показано, что отклонения модельных значений foF2 от экспериментальных медиан в высоких широтах находятся на уровне среднеширотных, для мгновенных значений foF2 день ото дня относительные изменения могут составлять до 20–25 %. Использование TEC позволяет в 2 раза уменьшить эту оценку. Значения коэффициентов корреляции между foF2 и TEC, определяющей возможность использования TEC для расчета foF2, лежат в пределах 0,6–0,99.

## ВВЕДЕНИЕ

Для функционирования современных систем связи и навигации необходима информация о параметрах ионосферы [1]. Это особенно существенно для региона высоких широт. Для получения этой информации существуют две возможности: 1) базы экспериментальных данных, 2) модели ионосферы. К основным параметрам ионосферы относятся критическая частота слоя F2, его высота hmF2, полное электронное содержание (Total Electron Content, TEC). Существующие трудности в получении экспериментальных данных заставляют широко использовать модели ионосферы, в частности эмпирические модели. Существует множество эмпирических моделей, однако наиболее применяемой является Международная справочная модель ионосферы IRI [2], поэтому она используется в данной статье. Однако существует мнение, что она обеспечивает хорошие точности в средних широтах и недостаточно хорошо работает в высоких широтах. Это связано с меньшим количеством станций, чем в средних широтах, данные которых использовались при построении модели, с намного большей изменчивостью поведения ионосферы и т. д., поэтому необходимы конкретные оценки соответствия между модельными и экспериментальными

значениями параметров в высоких широтах. В данной статье внимание уделяется критической частоте foF2, непосредственно связанной с максимальной применимой частотой при распространении КВ-радиоволн вдоль трасс.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И РАССЧИТЫВАЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

Рассматриваются данные за март–апрель 2016 г. Значения foF2 выбраны из базы SPIDR (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr>), значения TEC из системы глобальных карт IGS рассчитываются по данным файлов IONEX (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex>), Dst-индекс брался из базы всемирного центра World Data Center for Geomagnetism, Kyoto ([http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_final/index.html](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/index.html)). В качестве модели IRI использовалась online версия IRI2016 на сайте ([http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2016\\_vitmo.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2016_vitmo.html)), чтобы избежать неточностей, связанных с введением новых солнечных индексов [3]. Необходимо сделать замечание по поводу использования базы SPIDR: университет Colorado CIRES сообщил, что работа базы прекращена из-за недостатка компьютерного ресурса и возможных проблем с безопасностью в мае 2016 г. Данные для проведенного исследования были выбраны до закрытия базы.

В марте 2016 г. средний индекс F10.7 = 90,6 sfu. В год максимума солнечной активности (2014) F10.7 = 148,4 sfu, в следующем, 2015 г. F10.7 = 73,9 sfu, т.е. март 2016 г. характеризуется средним уровнем активности. То же самое можно сказать и об апреле с его средним значением F10.7 = 94,1 sfu. Уровень геомагнитной активности для этих месяцев представлен на рис. 1 в виде поведения индекса Dst для каждого дня.

Видно, что март 2016 г. характеризуется довольно сильным возмущением 6–7 марта с минимальным значением Dst = -96 nT. В первой половине апреля 2016 г. довольно регулярно наблюдаются умеренные возмущения.

Основными анализируемыми величинами являются отклонения рассчитанных значений foF2 от экспериментальных величин. Это в первую очередь относится

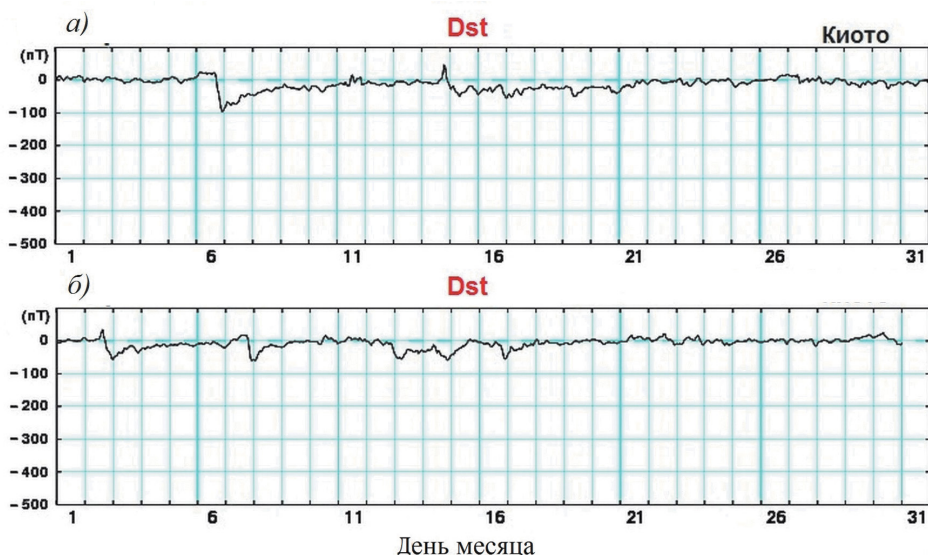


Рис. 1. Поведение индекса Dst в марте (а) и апреле (б) 2016 г.  
Fig. 1. Behaviour of index Dst in March (a) and April (b) 2016

к значениям модели IRI (foF2(IRI)). Поскольку модель является медианной, она не описывает вариации foF2 день ото дня. Особенностью подхода является использование мгновенных значений TEC для расчета foF2, что позволяет определить вариации ото дня ко дню. Традиционный метод определения foF2 по TEC основан на использовании эквивалентной толщины ионосферы  $\tau$ (IRI) для модели IRI ( $\tau$ (IRI) = TEC(IRI)/NmF2(IRI)) [4–6]. Мгновенные значения NmF2 получаются при использовании экспериментальных значений TEC(obs), т.е. реконструированные (reconstruction) значения NmF2(rec) = TEC(obs)/ $\tau$ (IRI). В работе [7] предложена экспериментальная медиана эквивалентной толщины ионосферы  $\tau_{\text{мед}}$  и получены некоторые результаты, показывающие возможность использования как самой модели, так и TEC в высоких широтах. Необходима дополнительная статистика, подтверждающая эти результаты в других условиях солнечной активности.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В табл. 1 приводятся статистические данные, характеризующие соответствие между модельными и экспериментальными значениями критической частоты foF2 для марта 2016 г. Эта статистика не является всеобъемлющей, но дает пример, ограниченный наличием данных. В первом столбце приводятся станции. Первой стоит среднеширотная станция Юлиусрух, являющаяся эталонной. Остальные станции расположены в порядке увеличения долготы. В столбцах 2–3 даются географические и геомагнитные (в скобках) координаты станций (широта и долгота) в градусах. Столбцы 4–6 содержат абсолютные отклонения модельных foF2 от экспериментальных значений для трех опций: 1) сравнение значений модели IRI с экспериментальными медианами (основная характеристика точности модели, так как модель обеспечивает медианные значения), 2) сравнение значений модели IRI с мгновенными экспериментальными значениями (характеризует средние отклонения foF2 день ото дня при использовании значений модели для описания ежедневных значений), 3) сравнение для оценки эффективности использования TEC. Столбцы 7–9 показывают соответствующие среднеквадратические отклонения. Последний столбец

Таблица 1

Статистика сравнения модельных и экспериментальных значений foF2 в марте 2016 г.

Станция	Широта	Долгота	$\Delta$ foF2 , MHz			$\sigma$ , %			$\rho$ (foF2, TEC)
			Медиана	IRI	$\tau_{\text{мед}}$	Медиана	IRI	$\tau_{\text{мед}}$	
Юлиусрух	54°36' (53°56') с.ш.	13°24' (99°31') в.д.	0,27	0,57	0,30	8,40	15,3	8,10	0,97
Ловозеро	67°97' (63°34') с.ш.	35°02' (127°03') в.д.	0,32	0,75	0,52	9,5	18,8	8,1	0,83
Салехард	66°30' (58°28') с.ш.	66°30' (149°58') в.д.	0,41	1,05	0,79	10,4	23,6	14,4	0,68
Диксон	73°30' (64°26') с.ш.	80°24' (162°35') в.д.	0,66	0,96	0,44	17,3	20,7	9,8	0,6
Тунгуска	62° (52°32') с.ш.	90° (166°41') в.д.	0,36	0,43	0,11	8,6	10,5	8,5	0,99
Якутск	62° (52°46') с.ш.	129°36' (162°46') в.д.	0,21	0,44	0,31	5,6	12,2	8,5	0,94

включает значения коэффициента корреляции между foF2 и TEC, рассчитанного по двухчасовым значениям за все дни месяца. Видно, что станции расположены как в субавторальной, так и в высокоширотной зонах.

Цифры для станции Юлиусрух являются ориентиром. Видно, что отклонения для медиан у арктических станций не намного хуже, чем у среднеширотной, т.е. модель IRI вполне адекватно описывает среднее состояние ионосферы. Это отличается от распространенного мнения, что модель IRI плохо работает в высоких широтах. За исключением станции Диксон СКО не превышает 10 %. Случай станции Диксон можно использовать для иллюстрации особенностей и трудностей получения и использования ионосферной информации. На рис. 2 показано поведение ионосферных параметров для станции Диксон в период с 1 по 8 марта 2016 г. Для foF2 результаты даются для четырех опций: 1) экспериментальные значения (черные точки), 2) значения модели IRI (полые квадраты), 3) значения, рассчитанные с использованием TEC (треугольники), 4) экспериментальные медианы (крестики). Для TEC приводятся экспериментальные значения и медианы.

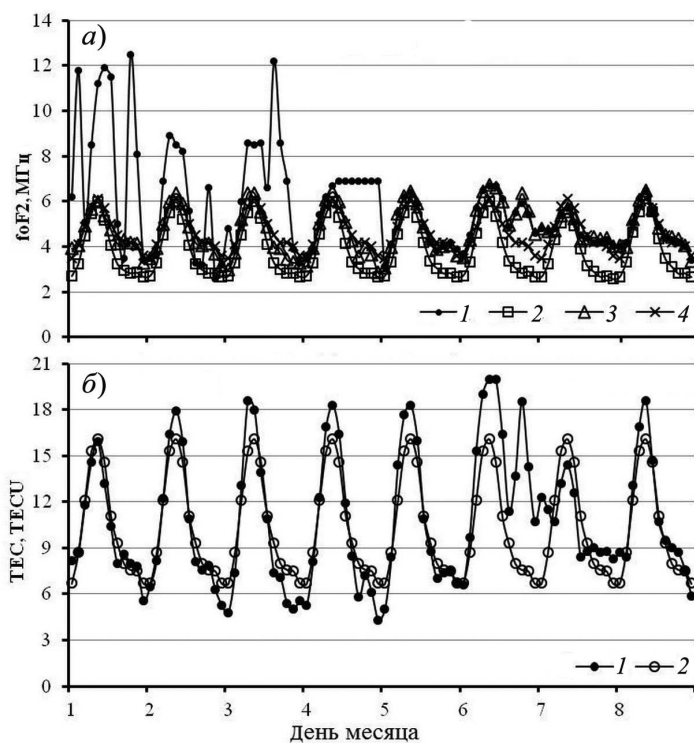


Рис. 2. Поведение параметров ионосферы в период 1–8 марта 2016 г.

*a)* 1 — экспериментальные значения; 2 — значения модели IRI; 3 — значения, рассчитанные с использованием TEC; 4 — экспериментальные медианы; *б)* 1 — экспериментальные значения; 2 — экспериментальные медианы

Fig. 2. Behaviour of ionospheric parameters in March, 1–8st 2016.

*a)* 1 — experimental values; 2 — model IRI values; 3 — values calculated using TEC; 4 — experimental medians; *б)* 1 — experimental values; 2 — experimental medians

Видны всплески ионизации в первые три дня, для которых нет соответствия в поведении ТЕС. Это может свидетельствовать о наличии спорадической ионизации в слое E, которая была принята во время съема информации за foF2 и привела к большим отклонениям. Определенным свидетельством в пользу такого объяснения может быть наличие спорадической ионизации 4 марта 2016 г. и четкое соответствие foF2 и ТЕС во время типичных дневных и ночных усилений 6 марта 2014 г., связанных с геомагнитными возмущениями в соответствии с поведением индекса Dst.

Возвращаясь к таблице, можно увидеть, что и точность описания состояний день ото дня для выбранных станций не сильно отличается от среднеширотной. Что касается использования ТЕС, то в данном случае получаемые отклонения всегда меньше отклонений для случая день ото дня модели IRI примерно в 2 раза и часто лежат на уровне оценок для медиан и лучше. В последнем столбце приводятся коэффициенты корреляции между foF2 и ТЕС. Видно, что везде корреляция значимая, причем в высоких широтах она может быть на уровне среднеширотных значений. Это свидетельствует о том, что коэффициент пропорциональности (эквивалентная толщина ионосферы  $\tau$ ) между foF2 и ТЕС может использоваться для определения foF2 по экспериментальным значениям ТЕС. В работе [8] показана важная роль  $\tau$  для

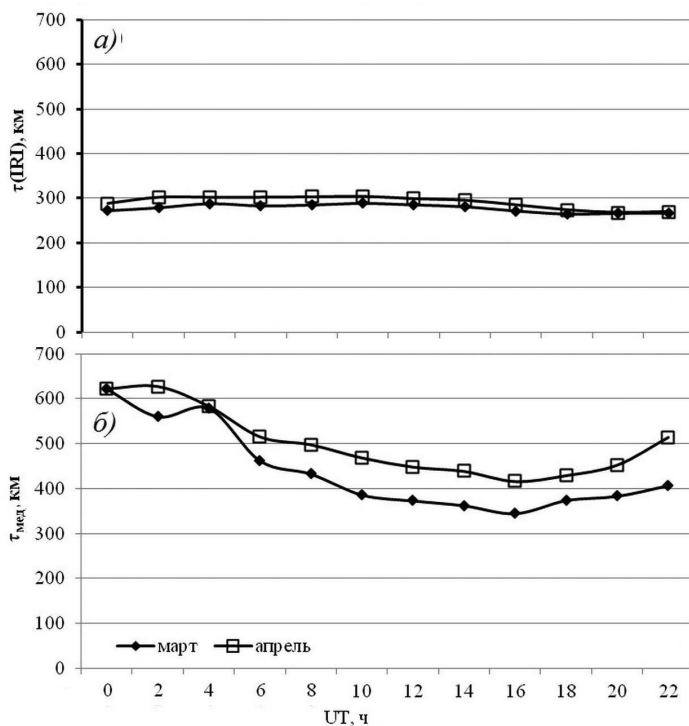


Рис. 3. Сравнение эквивалентной толщины ионосферы для модели  $\tau(\text{IRI})$  (а) с экспериментальной медианой  $\tau_{\text{мед}}$  (б). Ловозеро, март–апрель 2016 г.

Fig. 3. Comparison of an equivalent slab thickness of the ionosphere for the IRI model  $\tau(\text{IRI})$  (а) with an experimental median  $\tau_{\text{мед}}$  (б). Lovozero, March-April 2016

характеристики и мониторинга состояния ионосферы и ее отличие от модельных значений. На рис. 3 иллюстрируются различия между  $\tau$ (IRI) и экспериментальной медианой  $\tau_{\text{мел}}$  на примере станции Ловозеро для марта и апреля 2016 г.

Видны принципиальные различия как по характеру поведения, так и по величине. Такие же различия характерны и для всех других станций, в том числе и для среднеширотной.

Дополнительно можно привести результаты для апреля 2016 г. Здесь данных было меньше. Этот случай характеризует табл. 2.

Таблица 2

**Статистика сравнения модельных и экспериментальных значений foF2 в апреле 2016 г.**

Станция	Широта	Долгота	$\Delta$ foF2 , MHz			$\sigma$ , %			$\rho$ (foF2, TEC)
			Медиана	IRI	$\tau_{\text{мел}}$	Медиана	IRI	$\tau_{\text{мел}}$	
Юлиусрух	54°36' (53°56') с.ш.	13°24' (99°31') в.д.	0,16	0,44	0,23	3,9	11,6	7,5	0,96
Ловозеро	67°97' (63°34') с.ш.	35°02' (127°03') в.д.	0,26	0,54	0,37	7,7	16,4	6,1	0,75
Тунгуска	62° (52°32') с.ш.	90° (166°41') в.д.	0,55	0,68	0,31	13,8	18,2	9	0,92
Якутск	62° (52°46') с.ш.	129°36' (162°46') в.д.	0,36	0,58	0,35	9	15,2	11,6	0,92

В целом подтверждается статистика марта 2016 г. Ввиду того, что отклонения для арктических станций существенно больше, чем в среднеширотной зоне, необходимо посмотреть, не играет ли роль возмущенное состояние. Для этого на рис. 4 приводятся графики отклонений совместно со среднесуточными значениями индекса Dst (уменьшенными в 10 раз для наглядности) для четырех станций.

При очень низких значениях Dst отклонения увеличены, но четкой связи с индексом Dst не видно. Это подтверждается и соответствующими коэффициентами корреляции между отклонениями и Dst, которые составили  $-0,295$ ;  $0,175$ ;  $0,319$ ;  $-0,209$  для этих станций по всем дням месяца.

Важным аспектом использования ТЕС является возможность восстанавливать значения foF2 при отсутствии данных ионозонда. Среди исследуемых случаев данные отсутствовали с 1 по 12 марта 2016 г. для станции Якутск. Эти значения были восстановлены по измерениям ТЕС с использованием медиан  $\tau_{\text{мел}}$  рассчитанных по данным с 13 по 31 марта. Результаты для этих периодов представлены на рис. 5 в виде суточных ходов ТЕС и foF2. На рис. 5а и 5б приводятся результаты для периода с 13 по 31 марта с целью контроля соответствия, на рис. 5в и 5г — для периода с 1 по 12 марта. Приведены мгновенные значения (точки) и медианы. Крестиками и полыми треугольниками показаны значения foF2, восстановленные по экспериментальным значениям ТЕС в эти периоды. На графиках (рис. 5а и 5б) видно, что восстановленные значения foF2 ближе к экспериментальным, чем медианы и тем более чем значения для модели IRI, не показанные на рисунках, и отражают характер поведения, в частности, положительные и отрицательные возмущения.

Это позволяет предположить, что и динамика поведения foF2 в период с 1 по 12 марта воспроизведена правильно.

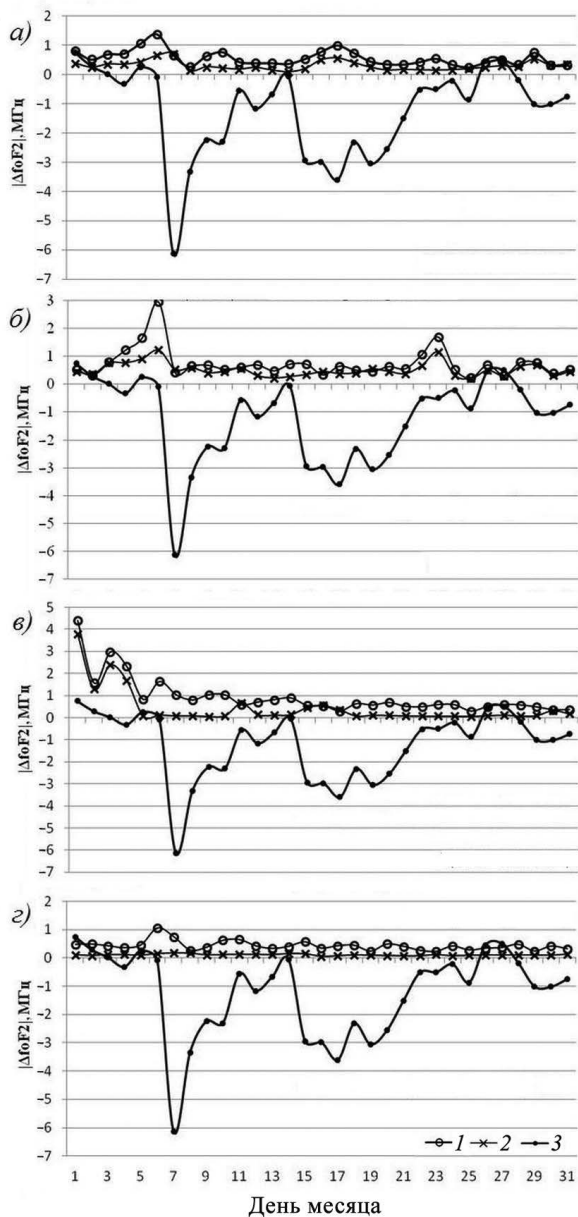


Рис. 4. Иллюстрация связи между отклонениями foF2 и индексом Dst в марте 2016 г.  
 а) — Юлиусрух, б) — Ловозеро, в) — Диксон, г) — Тунгуска; 1 — IRI, 2 —  $\tau_{\text{мес}}$ , 3 — 0,1Dst (среднее)  
 Fig. 4. An illustration of connection between deviations of foF2 and index Dst.  
 а) — Juliusruh, б) — Lovozero, в) — Dixon, г) — Tunguska; 1 — IRI, 2 —  $\tau_{\text{мес}}$ , 3 — 0,1Dst (average)



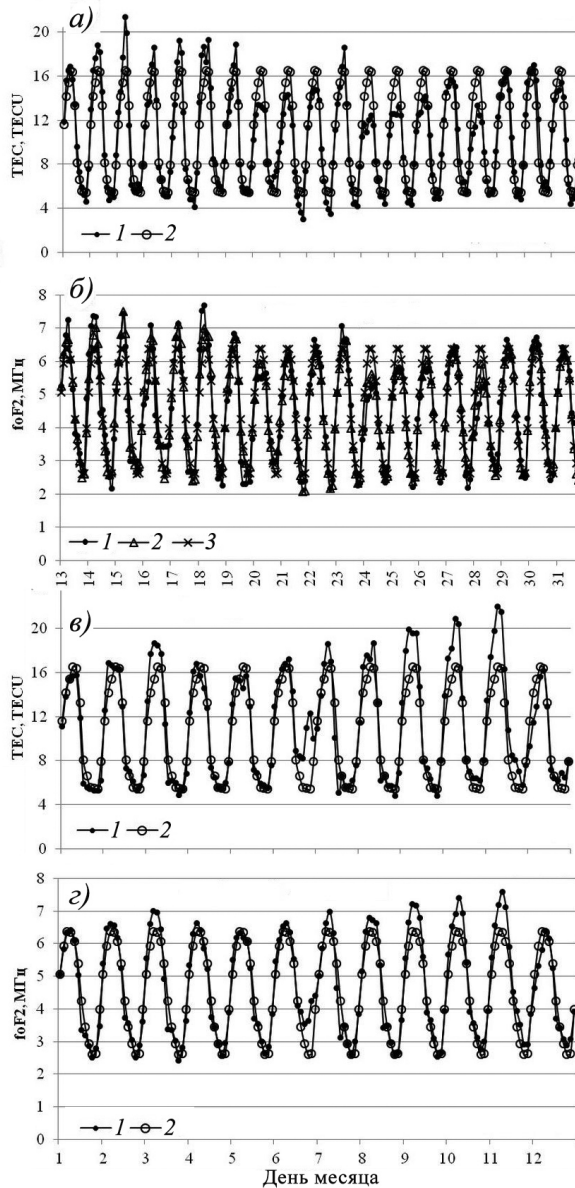


Рис. 5. Иллюстрация результатов восстановления отсутствующих значений foF2.

*a)* — Якутск (13–31 марта 2016 г.): 1 — экспериментальные значения, 2 — рассчитанные медианы; *б)* — Якутск (13–31 марта 2016 г.): 1 — экспериментальные значения, 2 — восстановленные значения, 3 — рассчитанные медианы; *в)* — Якутск (1–12 марта 2016 г.): 1 — экспериментальные значения, 2 — рассчитанные медианы; *г)* — Якутск (1–12 марта 2016 г.): 1 — восстановленные значения, 2 — рассчитанные медианы

Fig. 5. An illustration of results of reconstruction of absent values of foF2.

*a)* — Yakutsk (13–31 March 2016): 1 — experimental values, 2 — calculated medians; *б)* — Yakutsk (13–31 March 2016): 1 — experimental values, 2 — recovered values, 3 — calculated medians; *в)* — Yakutsk (1–12 March 2016): 1 — experimental values, 2 — calculated medians; *г)* — Yakutsk (1–12 March 2016): 1 — recovered values, 2 — calculated medians

## ВЫВОДЫ

В результате сравнения рассчитанных и экспериментальных foF2 получено, что отклонения модельных значений foF2 от медиан в субавроральных и высоких широтах находятся на уровне среднеширотных, для мгновенных значений foF2 отклонения могут составлять до 20–25 %. Использование TEC позволяет в 2 раза уменьшить эту оценку. Значения коэффициентов корреляции между foF2 и TEC, определяющей возможность использования TEC для задания foF2, лежат в пределах 0,6–0,99. Это, возможно, связано с малой долей плазмосферной части в TEC.

**Благодарности.** Авторы благодарят группы исследователей, разрабатывающих модель IRI, за предоставление online версии; группы исследователей, обеспечивающих данные баз SRIDR и глобальных карт GIM TEC. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18–05–00343А. Авторам были предоставлены данные вертикального зондирования для станций Юлиусрух, Ловозеро, Салехард и других для марта и апреля 2016 г., загруженные из базы данных SRIDR до прекращения доступа.

**Acknowledgments.** Authors thank groups of the researchers, developing the IRI model, for providing an online option of the model; groups of the researchers, providing of SRIDR database and global maps GIM TEC. This work is supported by the Russian Foundation for Basic Research, Grant 18–05–00343A. Authors were provided with vertical sounding data for stations Juliusruh, Lovozero, Salekhard and others for March and April 2016, downloaded from the SPIDR database prior to the termination of access.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Goodman J.M.* Operational communication systems and relationships to the ionosphere and space weather // *Adv. Space Res.* 2005. V. 36. C. 2241–2252. doi:10.1016/j.asr.2003.05.063.
2. *Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., Richards P., McKinnell L.-A., Reinisch B.* The International Reference Ionosphere 2012 — a model of international collaboration // *J. Space Weather Space Clim.* 2014. V. 4, A07. doi: 10.1051/swsc/2014004.
3. *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. V. 2. No. 3. doi:10.12737/20872.
4. *McNamara L.F.* The use of total electron density measurements to validate empirical models of the ionosphere // *Adv. Space Res.* 1985. V. 5 (7). P. 81–90.
5. *Houminer Z., Soicher H.* Improved short-term predictions of foF2 using GPS time delay measurements // *Radio Science.* 1996. V. 31 (5). P. 1099–1108.

## REFERENCES

1. *Goodman J.M.* Operational communication systems and relationships to the ionosphere and space weather. *Adv. Space Res.* 2005, 36: 2241–2252. doi: 10.1016/j.asr.2003.05.063.
2. *Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., Richards P., McKinnell L.-A., Reinisch B.* The International Reference Ionosphere 2012 — a model of international collaboration. *J. Space Weather Space Clim.* 2014, 4 (A07). doi: 10.1051/swsc/2014004.
3. *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, 2 (3). doi: 10.12737/20872.
4. *McNamara L.F.* The use of total electron density measurements to validate empirical models of the ionosphere. *Adv. Space Res.* 1985, 5 (7): 81–90.
5. *Houminer Z., Soicher H.* Improved short-term predictions of foF2 using GPS time delay measurements. *Radio Science.* 1996, 31 (5): 1099–1108.

6. *Gulyaeva T.L.* International standard model of the Earth's ionosphere and plasmasphere // *Astronomical and Astrophysical Transaction*. 2003. V. 22 (4). P. 639–643.

7. *Maltseva O.A., Mozhaeva N.S., Nikitenko T.V.* Comparison of model and experimental ionospheric parameters at high latitudes // *Adv. Space Res.* 2013. V. 51. No. 4. P. 599–609. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.009>.

8. *Stankov S.M., Warnant R.* Ionospheric slab thickness — Analysis, modelling and monitoring // *Adv. Space Res.* 2009. V. 44. P. 1295–1303. doi:10.1016/j.asr.2009.07.010.

6. *Gulyaeva T.L.* International standard model of the Earth's ionosphere and plasmasphere. *Astronomical and Astrophysical Transaction*. 2003, 22 (4): 639–643.

7. *Maltseva O.A., Mozhaeva N.S., Nikitenko T.V.* Comparison of model and experimental ionospheric parameters at high latitudes. *Adv. Space Res.* 2013, 51 (4): 599–609. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.009>.

8. *Stankov S.M., Warnant R.* Ionospheric slab thickness — Analysis, modelling and monitoring. *Adv. Space Res.* 2009, 44: 1295–1303. doi:10.1016/j.asr.2009.07.010.