

УДК 621.371/372

## МОДЕЛЬ IRI: АНАЛИЗ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРНОГО ПРОХОЖДЕНИЯ РАДИОВОЛН В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

И.В. Крашенинников, Н.М. Павлова, Ю.С. Ситнов

Поступила в редакцию 11 мая 2016 г.

Представлены результаты анализа соответствия модельным представлениям усредненных суточных ходов критических частот и высотных профилей плазменной частоты в локальный полдень по станции ИЗМИРАН для средних месяцев 4-х сезонов 2014 г. — года максимума солнечной активности в текущем 24-м цикле. Показано, что модель IRI, в целом, достаточно достоверно описывает суточные вариации  $foF2$ , а наименьшее расхождение достигается при задании входного параметра ионосферным индексом солнечной активности —  $IG12$ . Исключением является месяц апрель, для которого наблюдается принципиальное несоответствие с моделью как в суточном ходе критической частоты —  $foF2$ , так и в  $N_e(h)$ -профиле. Для этого месяца неадекватность в модельном представлении высотного распределения электронной плотности оказалась весьма существенной и в расчете МПЧ — относительная погрешность может достигать 20%. Результаты моделирования подтверждаются данными наклонного радиозондирования ионосферы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** СТАТИСТИЧЕСКАЯ ИОНОСФЕРНАЯ МОДЕЛЬ, IRI, ИНДЕКСЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ, МАКСИМАЛЬНО ПРИМЕНИМАЯ ЧАСТОТА, МПЧ.

### ВВЕДЕНИЕ

Статистические ионосферные модели, в частности IRI, рекомендованная URSI как базовая модель в прогнозировании распространения радиоволн, построены на основе большого массива экспериментальных данных, в основном, методами радиозондирования ионосферы: вертикального (наземного и спутникового) и некогерентного рассеяния [1]. Эти данные разбиты на группы соответствующие низкому, среднему и высокому уровням солнечной активности. Основным управляющим параметром модели является среднемесячный индекс солнечной активности. Он может быть задан как в форме числа солнечных пятен —  $R_z$  или через  $F_{10.7}$  — поток солнечного радиоизлучения (пересчет производится внутренней процедурой программы), которые измеряются солнечными обсерваториями. Наиболее корректным, с точки зрения принципов построения модели, считается использование сглаженного скользящим 12-ти месячным фильтром числа солнечных пятен —  $R12$  [1], базовым источником которого является Европейский центр — SILSO (Sunspot Index and Long-term Solar Observations), Брюссель, Бельгия. Данные потока солнечного радиоизлучения предоставляет центр космической погоды SWPC (Space Weather Prediction Center), Боулдер, США. Третьим источником для определения базового входного параметра модели является ионосферный индекс солнечной активности —  $IG12$  [2], вычисляемый как среднее для определенного набора ионосферных станций в локальное полуденное время из условия соответствия измеренного и табулированного (функция от  $R_z$ ) значений  $foF2$  — плазменной частоты в максимуме слоя F2 ионосферы [2,3]. Поскольку модель является медианной (среднемесячной), то корректную оценку эффективности модельного представления при использовании конкретного индикатора входного параметра можно получить из анализа медианных (среднемесячных) зависимостей наиболее значимых ионосферных параметров. Как правило, для вертикального радиозондирования ионосферы это критическая частота F2-слоя, а для задачи прогнозирования ионосферного прохождения радиоволн — максимально применимая частота (МПЧ) радиотрассы, зависящая не только от положения главного ионосферного максимума ( $foF2$ ,  $hmF2$ ), но и от высотного распределения электронной плотности.

В данной работе представлены результаты анализа соответствия модельным представлениям усредненных суточных ходов  $foF2$  и высотных профилей плазменной частоты в локальный полдень

по станции ИЗМИРАН для средних месяцев сезонов 2014 г., максимума 24-го солнечного цикла, в зависимости от природы индекса солнечной активности. Оценивались погрешности в расчете МПЧ для стандартных дальностей в 1000, 2000 и 3000 км. Рассмотрен комбинированный подход к формированию индикатора солнечной активности из солнечных данных для прогнозирования ионосферного распространения декаметровых радиоволн на основе модели IRI.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Анализировались данные вертикального радиозондирования ионосферы на ст. ИЗМИРАН (ионозонд “Парус-А”) за четыре месяца 2014 г. — года максимума 24-го цикла солнечной активности: январь, апрель, июль и октябрь. Для каждого месяца, характеризующего сезон года, рассчитывались две усредненные за месяц функции: суточный ход  $foF2$  и высотный профиль плазменной частоты -  $f_n(h)$  для локального полудня — 10:00 UT. Из общего массива данных удалялись дни, для которых дневной индекс геомагнитной активности —  $K_p$  превышал 3. Для каждого часа определялись среднее значение  $foF2$  и его доверительный интервал. Полученные результаты суточных ходов иллюстрируются рис. 1. Высотный профиль плазменной частоты в МГц  $f_n(h) = \sqrt{n_e(h)e^2/\pi m_e} \approx \sqrt{80.6n_e(h)}$ , где  $n_e(h)$  — электронная плотность в  $\text{см}^{-3}$  (также может использоваться другое обозначение —  $N_e(h)$  — профиль), для большей достоверности, рассчитывался в операторском (ручном) режиме обработки ионограмм ВЗ, входящем в состав средств ионозонда “Парус-А”, на основе модифицированной процедуры полиномиального анализа [4] с модельным представлением выше максимума  $F2$ -слоя. В целом, процедура включала в себя два этапа. На первом, использовалось интерполяционное представление исходных узловых точек профиля  $f_n(h)$ , полученных из операции обращения ионограммы ВЗ, и определялось распределение на фиксированном базисе высот 60–450 км с шагом 5 км. Затем выполнялась статистическая обработка по дням и далее, сплайн-аппроксимационным методом, строился итоговый сглаженный среднемесячный высотный профиль электронной плотности в форме плазменной частоты — рис. 2.

### МОДЕЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Достоверность модельного представления экспериментальных данных в среднемесячном масштабе анализировалась исходя из трех подходов в задании базового параметра, отражающего уровень солнечной активности: а)  $R12$  — классический индекс сглаженного числа солнечных пятен, б) оптимизированное (обобщенное) значение —  $R_m^g$ , сформированное из  $R12$  и  $F10.7(12)$ , и с) ионосферный индекс —  $IG12$ . Индекс 12 означает скользящее усреднение в годовом интервале. Под комбинированным (оптимизированным)  $R_m^g$  вариантом задания параметра  $R_z$  в модели IRI, основываясь на статистической связи числа солнечных пятен и потока солнечного радиоизлучения [5]

$$\begin{aligned} F_{10.7} &= 64.604 + 6.694(R/10) + 0.282(R/10)^2 - 0.0085(R/10)^3 \\ R &= -114.553 + 21.846(F_{10.7}/10) - 0.715(F_{10.7}/10)^2 + 0.0140(F_{10.7}/10)^3, \end{aligned} \quad (1)$$

будем понимать взвешенное среднее между  $R12$  и эквивалентным величине  $F12$  значением  $R$  из (1) –

$$R_m^g(12) = w_1 R12 + w_2 R(F10.7(12)) \quad (2)$$

и  $w_1 = w_2 = 0.5$  [6]. Индекс  $m$  (month) означает среднемесячный, а  $g$  (generalized) — обобщенный. Равные весовые коэффициенты в (2) выбраны из общего положения, что оба индикатора уровня солнечной активности равнозначны, оба измеряются инструментально и характеризуют две стороны одного процесса. Прогнозирование  $R12$  и  $F10.7(12)$  (сокращенное обозначение  $F12$ ) выполняется независимо и есть основание полагать, что такая комбинированная оценка входного параметра модели IRI может дать более надежный долгосрочный прогноз распространения радиоволн в ионосфере. В каче-

стве источника числа солнечных пятен будем использовать данные служб SILCO и IPS, Австралия (в обновленном виде — SWS — Space Weather Services), а потока солнечного радиоизлучения — прогностический центр космической погоды SWPC, США. Численные величины индексов солнечной активности за 2014 г., где значение R12 получено в методике подсчета числа солнечных пятен до 01 июля 2015 г. (версия 1, до реформы 01 июля 2015 г.), сведены в табл. 1. В частности, можно выделить общую закономерность — ионосферный индекс солнечной активности превышает классический аналог R12 для всех месяцев. Введенный комбинированный вариант индикатора для модели —  $R_m^g$  занимает некое промежуточное положение, и, в целом, он также меньше IG12.

Таблица 1.  
Индексы солнечной активности (версия 1) – 2014 г.

Месяц	R12	IG12	F10.7(12)	$R_m^g$
Январь	77.4	92.1	137.3	81.9
Апрель	82.0	94.8	143.5	87.7
Июль	78.7	96.8	145.2	86.6
Октябрь	67.5	87.8	138.4	77.6

Экспериментальные данные радиозондирования ионосферы представляют собой усредненные в месячном масштабе результаты обработки ионограмм и они крайне незначительно отличаются от медианных (для ионозонда “Парус” разность находится в пределах инструментальной погрешности). Анализ модельных зависимостей  $foF2$  производился для CCIR коэффициентов модели IRI, что является методологически согласованным вариантом. Суточный ход плазменной частоты в максимуме слоя F2 для четырех месяцев, где модельные кривые отражают характер зависимости от величины индекса солнечной активности, представлен на рис. 1. Численные статистические характеристики соответствия экспериментальных и модельных временных зависимостей приведены в табл. 2, где  $\Delta(MГц)$  — среднее отклонение модельных значений от экспериментальных,  $\delta(MГц)$  — среднеквадратичное отклонение, а  $\delta(\%)$  — среднеквадратичное относительное к экспериментальным измерениям. Наименьшее отклонение, как в абсолютном, так и относительном измерении наблюдается для ионосферного индекса солнечной активности — IG12, что подтверждает результаты как базовых положений [2], так и, например, работы [7], где отмечается, что, в целом, он предпочтительнее для медианы  $foF2$  в масштабе месяца. Для случая  $R_z = R12$  хорошо видно, что модельные значения  $foF2$  имеют наибольшее систематическое отрицательное отклонение и имеют максимальное среднеквадратичное отклонение. Также нужно отметить, что существует некий нижний предел среднеквадратичного отклонения модельного представления в масштабе года, который можно оценить, примерно, как 0.5 МГц, и близкий по величине к фактору ионосферной изменчивости в спокойных условиях [7]. Из всего набора анализируемых данных выделяется месяц апрель, для которого имеет место весьма существенное статистическое отклонение модельного представления для всех способов задания индикатора солнечной активности. Особенно большая невязка наблюдается для классического случая  $R_z$  в форме числа солнечных пятен — R12. Наибольшие абсолютные отклонения модельного представления в большинстве случаев имеют место в околополуденное время.

Другим важным элементом при прогнозировании прохождения радиоволн, кроме положения главного ионосферного максимума, является высотная зависимость электронной плотности, т.к., к примеру, уровень отражения базового прогнозируемого параметра — МПЧ F2 радиотрассы находится внутри слоя F2 ионосферы, примерно на одной трети от максимума — рис. 2. Высотные полуденные профили электронной плотности в форме плазменной частоты представлены на рис. 2 для варианта задания уровня солнечной активности оптимизированным значением —  $R_m^g(12)$ . Для сравнения также построены профили, адаптированные к положению главного ионосферного максимума.

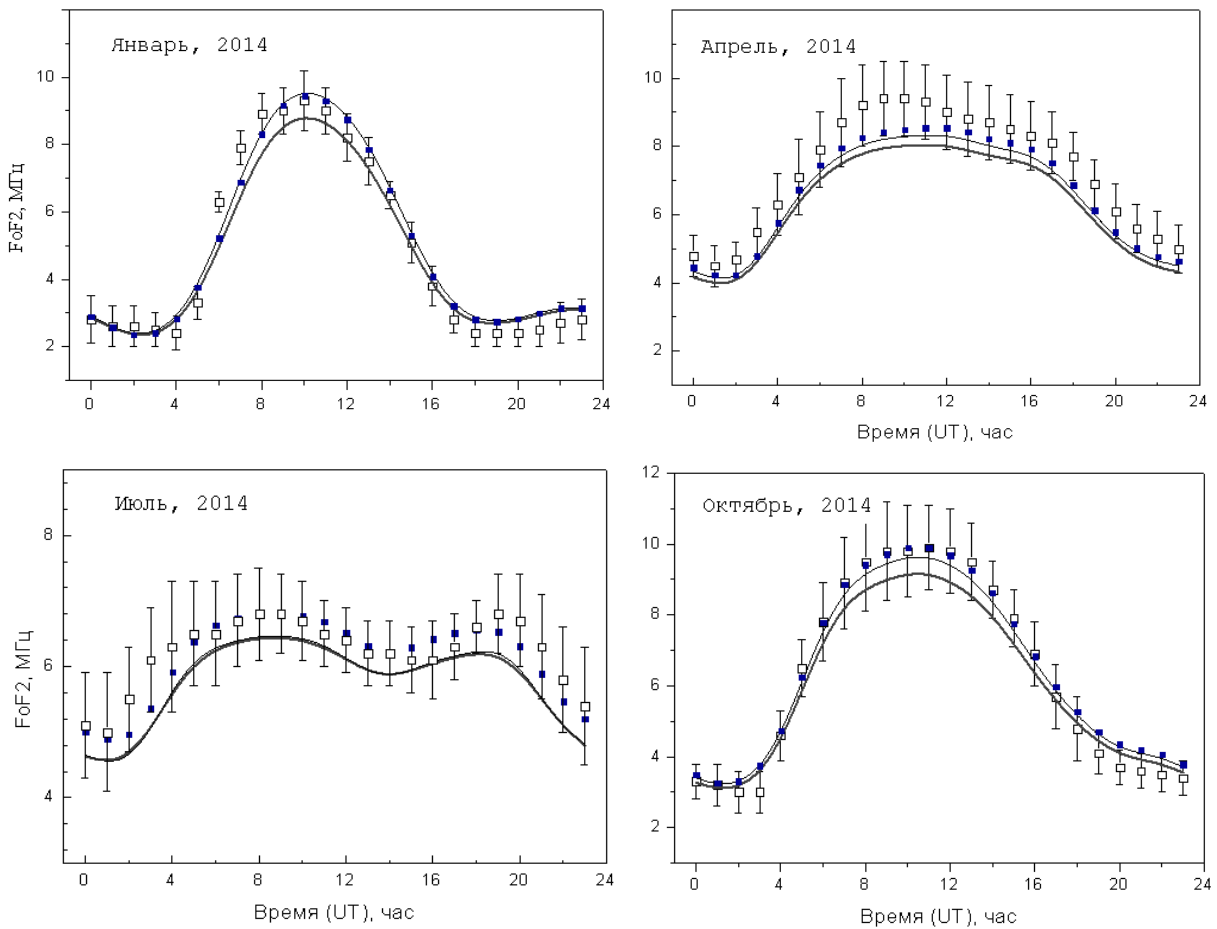


Рис. 1. Экспериментальные данные (полые квадратики) и модельные суточные зависимости критической частоты  $foF2$  для средних месяцев сезонов 2014 г. с варьированием базового параметра — индикатора солнечной активности: сплошные квадратики (темно-синий цвет) — для ионосферного индекса IG12, толстая линия — R12, тонкая линия —  $R_m^g$ .

Таблица 2.  
Сравнительные характеристики суточных ходов  $foF2$

Месяц	$R(12)$			$R_m^g(12)$			$IG(12)$		
	$\Delta, \text{МГц}$	$\delta, \text{МГц}$	$\delta, \%$	$\Delta, \text{МГц}$	$\delta, \text{МГц}$	$\delta, \%$	$\Delta, \text{МГц}$	$\delta, \text{МГц}$	$\delta, \%$
Январь	0.14	0.53	10.8	0.05	0.49	10.8	-0.12	0.45	9.5
Апрель	0.96	0.99	15.4	0.79	0.82	12.5	0.57	0.61	9.0
Июль	0.46	0.52	9.4	0.3	0.39	6.9	0.13	0.34	5.8
Октябрь	0.28	0.54	8.3	0.14	0.43	6.9	-0.17	0.34	6.5
Среднее	0.46	0.65	11.0	0.32	0.53	9.3	0.10	0.44	7.7

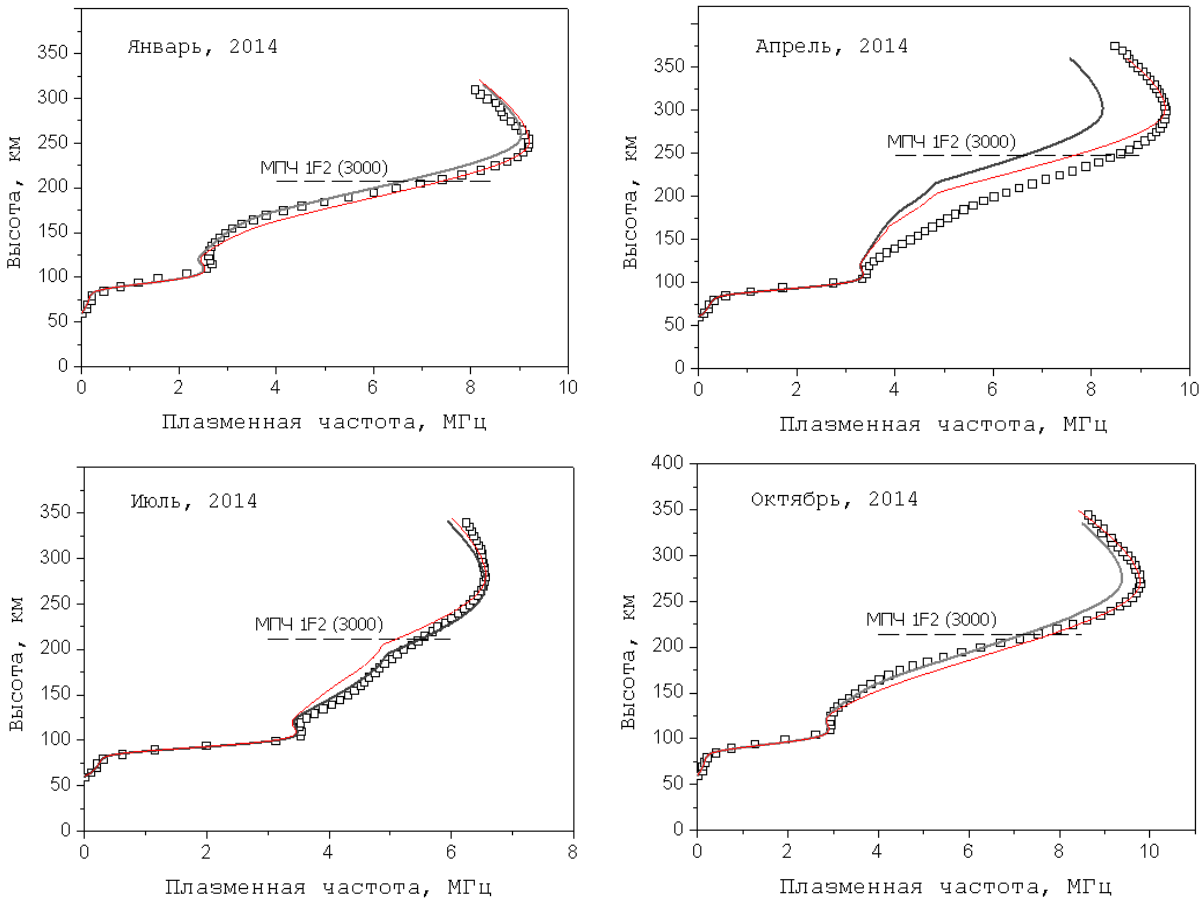


Рис. 2. Высотные профили плазменной частоты для оптимизированных значений индекса солнечной активности в локальный полдень (10:00 UTC) для ст. ИЗМИРАН: квадратики — экспериментальные значения, толстая линия — модель IRI и тонкая (красная) линия — модель IRI, адаптированная к положению максимума слоя F2. Пунктирной линией отмечена высота отражения МПЧ 1F2 для дальности 3000 км.

Таблица 3.  
Сравнительные характеристики  $N_e(h)$ -профилей

Месяц	$R_z(12)$		$R_m^g$		$IG(12)$	
	$\delta, \text{МГц}$	$\delta_u, \text{МГц}$	$\delta, \text{МГц}$	$\delta_u, \text{МГц}$	$\delta, \text{МГц}$	$\delta_u, \text{МГц}$
Январь	0.33	0.26	0.38	0.37	0.34	0.35
Апрель	1.24	0.77	1.24	0.71	1.19	0.67
Июль	0.22	0.26	0.15	0.25	0.17	0.17
Октябрь	0.35	0.36	0.26	0.43	0.26	0.48
Среднее	0.54	0.41	0.51	0.44	0.49	0.42

Исследование этого аспекта модели IRI важно в технологии ее применения к данным проекта GIRO (Global Ionospheric Radio Observatory), где локальное высотное распределение ионосферных параметров строится с адаптацией модели IRI к параметрам главного ионосферного максимума [8]. Для других способов определения входного параметра в модели IRI результаты не имеют каких-либо принципиальных отличий. Общие статистические результаты сопоставления экспериментальных и модельных профилей собраны в табл. 3. В целом, за исключением апреля месяца, имеет место непло-

ное, как качественное, так и количественное, соответствие – среднеквадратичное отклонение составляет  $\sim 0.3$  МГц и практически инвариантно к применению процедуры адаптации. Общее расхождение значительно выше ( $\sim 0.5$  МГц), а скорректированные профили имеют, в целом, меньшие отклонения ( $\sim 0.4$  МГц), что и иллюстрирует адаптационные свойства модели IRI и ее возможности, как основы, в проекте реальной ионосферы — IRI-RTAM (Real Time Assimilative Mapping) с данными GIRO. Также, в частности, такая процедура оправдана в применении к оперативному (масштаб времени 3-4 часа вперед) прогнозированию распространения радиоволн с учетом текущих данных радиондирования ионосферы [6,9].

В задаче прогнозирования прохождения радиоволн (двухточечная задача) фундаментальным параметром является максимально применимая частота (МПЧ), определяющая верхнюю границу актуального частотного интервала. МПЧ для конкретного ионосферного слоя является геометрическим параметром, т.е. ее величина определяется только пространственным распределением электронной плотности, в частности, высотной зависимостью, и рассчитывается в численной процедуре решения краевой задачи в лучевом подходе теории распространения радиоволн с варьированием частоты. Применяемая и в данной работе численная реализация в квазитрехмерном приближении краевой задачи описана в [6,9].

Таблица 4.  
Погрешности вычисления МПЧ 1F2 (апрель, 2014)

P/трасса D/МПЧ 1F2		R(12)				$R_m^g(12)$				IG(12)			
км/МГц		МГц	$\delta, \%$	МГц	$\delta_u, \%$	МГц	$\delta, \%$	МГц	$\delta_u, \%$	МГц	$\delta, \%$	МГц	$\delta_u, \%$
1000	14.4	11.7	18.8	13.5	6.2	11.7	18.8	13.5	6.2	11.7	18.8	13.5	6.2
2000	22.6	18.3	19.5	21.1	6.6	18.2	19.5	21.3	5.7	18.3	19.0	21.2	6.2
3000	28.4	22.5	20.8	26.0	8.5	22.5	20.8	26.1	8.1	22.6	20.4	26.1	8.1

Расчеты выполнялись для абстрагированных радиотрасс в изотропном приближении с дальностями 1000, 2000 и 3000 км в одномерном представлении распределения ионосферной плазмы в т. ИЗМИРАН, т.е. рассматривалось только проявление высотной неоднородности электронной концентрации. Результаты для апреля 2014 г. с тремя способами задания параметра солнечной активности сведены в табл. 4. Значения МПЧ в первой секции таблицы получены для экспериментального высотного распределения и далее они сопоставлялись с модельными величинами для базового и адаптированного профилей (рис. 2) — абсолютное и относительное отклонения приведены в соответствующих разделах. Как и следовало ожидать, различие как в параметрах максимума слоя F2, так и в форме  $N_e(h)$ -профилей привели к весьма существенной погрешности в оценке МПЧ. Так для дальности в 3000 км абсолютное отклонение составило  $\sim 6$  МГц, а относительное  $\sim 20\%$ , причем, практически, они не зависят от способа задания параметра солнечной активности. Адаптация модели IRI к положению максимума слоя F2 дает значительное уменьшение погрешности и это справедливо для всех месяцев, что можно видеть из усредненных по радиотрассам данных — табл. 5, где в МГц дано абсолютное значение, а  $\delta_u$  — относительное отклонение с учетом экспериментальных значений  $foF2$  и  $hmF2$ . Следует отметить высокую достоверность модели IRI в долгосрочном прогнозировании МПЧ, как в классическом, так и в адаптированном применении, для января и октября, т.е. месяцев года, когда отсутствует слой F1 ионосферы. В отличие от рассмотренного выше суточного хода  $foF2$  для комбинированного индекса солнечных данных, ионосферный индекс IG12, практически, не дает заметного выигрыша в погрешности расчета МПЧ 1F2 в наиболее проблемном временном интервале — локальном околополуденном времени.

Таблица 5.  
Точностные характеристики МПЧ 1F2 (моделирование)

Месяц	$R_z(12)$		$R_m^g$		$IG(12)$	
	$\delta, \%$	$\delta_u, \%$	$\delta, \%$	$\delta_u, \%$	$\delta, \%$	$\delta_u, \%$
Январь	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Апрель	19.7	7.1	19.7	6.7	19.4	6.8
Июль	4.6	4.2	5.4	4.2	8.6	3.3
Октябрь	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Наличие кардинального отклонения в модельном описании МПЧ 1F2 для апреля месяца в период высокой солнечной активности подтверждают и результаты прямых экспериментальных исследований. Измерения МПЧ 1F2 методом наклонного ЛЧМ-радиозондирования на двух практически ортогональных радиотрассах: меридиональной — Кипр — ИЗМИРАН и широтной — Англия — ИЗМИРАН с дальностями ~ 2300 и ~2500 км проводились в 2002 г., в максимуме предыдущего цикла солнечной активности. Значения R12 и F12 равнялись 111 и 192, соответственно, оптимизированный индекс  $R_m^g(12) \sim 125$ , что выше сглаженного числа солнечных пятен. Результат сопоставления усредненных экспериментальных и модельных данных представлен на рис. 3, на котором модельная кривая для оптимизированного индекса солнечной активности нанесена толстой линией (тонкой красной линией отображается зависимость для реформированных солнечных данных и адаптированных весовых коэффициентов — см. ниже). Хорошо видно: а) систематическое и весьма существенное превышение экспериментальных значений над модельными, и б) максимальное отклонение приходится на около-полуденные часы, достигая ~ 4 МГц для радиотрассы южного направления, что близко к оценочным величинам в табл. 4. Для широтной радиотрассы это различие меньше (~ 3 МГц), что можно объяснить более слабым проявлением слоя F1 ионосферы в северных широтах для данного времени года. Для классического индикатора в форме числа солнечных пятен различие будет еще более существенным. Как показывают результаты работы [10], также как и на рис. 3, для МПЧ регистрируется значительное статистическое превышение экспериментальных значений над модельными (IRI), полученное на достаточно большом объеме данных наклонного радиозондирования ионосферы. В среднем стандарт отклонения составляет ~ 3 МГц, а в отдельные месяцы (март) может доходить до ~ 4 МГц. Это также указывает на весьма вероятную проблему в модели IRI с высотным профилем в весенний период года.

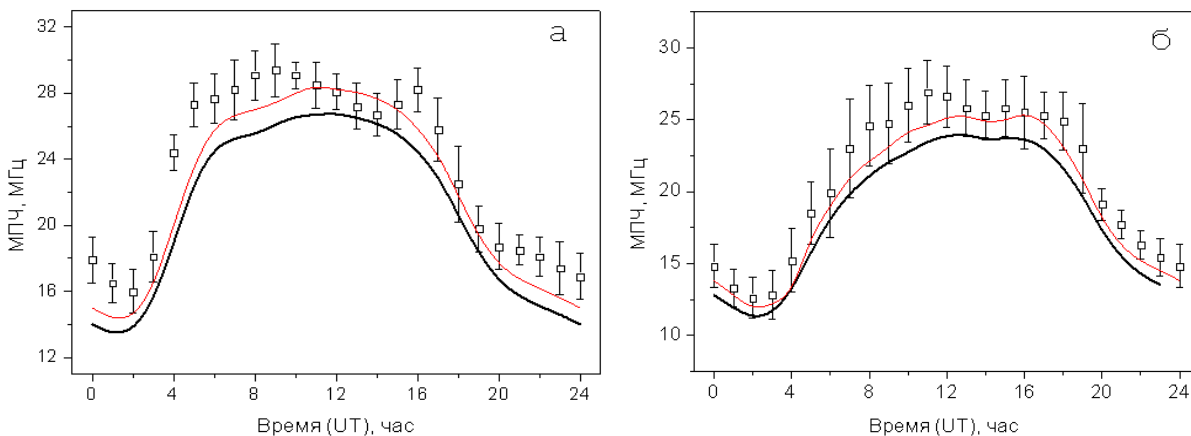


Рис. 3. Экспериментальные (МНЧ) и модельные суточные зависимости МПЧ 1F2 для апреля 2002 г.: Кипр — ИЗМИРАН (а) и Инскип(Англия) — ИЗМИРАН (б).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С 1 июля 2015 г. была введена новая методика оценки солнечной активности в форме числа солнечных пятен и были пересчитаны архивные данные с 1947 г., что привело к значительному возрастанию индекса R(R12) (в среднем коэффициент увеличения  $\sim 1.7$ ) — [11]. Индекс F10.7 не изменился. В таблице 6 приведены старые и новые значения R12: R12-ov — в старой и R12-nv — в новой версии данных. Учитывая преобладание формирования индекса F10.7(F12), можно рассматривать три возможных пути задания индикатора солнечной активности в задаче прогнозирования распространения радиоволн в ионосфере на основе модели IRI: а) использовать только индекс F12, б) основываясь на соотношениях (1,2), подстроить весовые коэффициенты в (2) и в) встать на ионосферный индекс IG12.

Таблица 6.  
Индексы солнечной активности (версия 2) — 2014 г.

Месяц	R12-ov	R12-nv	$R_m^g$ -nv	IG12
<i>Январь</i>	77.4	109.3	92.5	92.1
<i>Апрель</i>	82.0	116.4	98.9	94.8
<i>Июль</i>	78.7	112.6	99.2	96.8
<i>Октябрь</i>	67.5	97.3	90.3	87.8

В работе [12] показано, что индекс F12 более эффективен в долгосрочном прогнозировании критической частоты  $foF2$ , чем R12, а в [9] аналогичный результат получен для МПЧ 1F2, когда число солнечных пятен определялось из F12 не внутренней процедурой IRI, а на основе соотношения (1). Как отмечается в [7] ионосферный индекс солнечной активности наиболее эффективен в описании среднемесячных ходов  $foF2$ , что также можно видеть из табл. 2, но, практически, в рамках различий не дает существенного улучшения в расчете МПЧ — табл. 5. Поэтому представляется оправданным адаптировать комбинированный способ (2) к новым индексам R12, что, также, соответствует физическим основам модели IRI, в частности, с коэффициентами CCIR. Выбор весовых коэффициентов ограничен двумя условиями — модель должна быть оптимальна в применении как к  $foF2$ , так и к МПЧ. Из первого условия следует, что индекс  $R_m^g$  должен быть близок к ионосферному индексу IG12, и из второго — рассчитанные значения МПЧ не должны существенно отличаться от экспериментальных (желательно быть в пределах доверительных интервалов). Исходя из среднего соотношения старых и новых индексов в  $\sim 0.6$  (как утверждают авторы реформы) можно определить верхний предел коэффициента  $w_1 \sim 0.3$ . В качестве рабочего варианта были выбраны величины весовых коэффициентов:  $w_1 = 0.25$  и  $w_2 = 0.75$ . Таким образом, комбинированный индекс солнечных данных, в основном, будет определяться потоком солнечного радиоизлучения F12 и не потеряет, как можно надеяться, устойчивость, обусловленную независимым прогнозированием обоих реальных показателей солнечной активности. Обновленные индексы  $R_m^g$  в новой версии приведены в табл. 6 для анализируемых месяцев 2014 г. и видно, что они близки к IG(12). Для апреля 2002 г. коэффициент R12 в новой версии составляет 174 и  $R_m^g \sim 149$ , и модельная дневная зависимость МПЧ 1F2 отражена тонкой (красной) кривой на рис. 3, для которой можно видеть как качественное, так и существенное уменьшение среднеквадратичного отклонения от эксперимента. Следует отметить, что при этом сохраняется, хотя и уменьшается в величине, расхождение экспериментальных и модельных значений МПЧ 1F2 в околополуденное время, обусловленное, как показано выше, внутренним недостатком модели IRI в представлении высотного профиля (рис. 2) для сезона весна. Для меридиональной радиотрассы также характерен более быстрый рост экспериментальных МПЧ, по сравнению с рассчитанными модельными, в утренние часы (рис. 3, левая панель), что связано с действием поперечного



градиента электронной плотности на терминаторе, т. е., с существенно трехмерным характером распространения радиоволн..

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты анализа соответствия модельным представлениям усредненных суточных ходов  $foF2$  и высотных профилей плазменной частоты в локальный полдень по станции ИЗМИРАН для средних месяцев сезонов 2014 г. при высоком уровне солнечной активности позволяют заключить:

1. модель IRI, в целом, достаточно уверенно описывает среднемесячный суточный ход критической частоты  $foF2$  – наиболее эффективным входным параметром модели является ионосферный индекс солнечной активности. Исключением является месяц апрель, для которого наблюдается принципиальное расхождение, как в суточном ходе критической частоты, так и в высотном профиле для локального полуденного времени.

2. Для апреля месяца влияние неадекватности в модельном представлении электронной плотности весьма существенно проявляется в расчете МПЧ - относительная погрешность может достигать 20%, что и подтверждается экспериментальными данными НЗ. В остальные сезоны года модель IRI достаточно достоверна в оценке МПЧ для наиболее сложного интервала времени – окрестности локального полудня.

3. Использование оптимизированного индекса солнечной активности с учетом, как числа солнечных пятен, так и потока солнечного радиоизлучения, на наш взгляд, в принципе может дать большую надежность результатов долгосрочного прогнозирования ионосферного прохождения декаметровых радиоволн.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-29-06052.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Bilitza D., Altadil D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., Richards Ph., McKinnel 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.
2. Liu R., Smith P., King J. A new solar index which leads to improved foF2 prediction using the CCIR atlas // Telecommun. J.V., 1983. No.8. V.50. P.408–414.
3. Perrone L., Franceschi G. Solar, ionospheric and geomagnetic indices. // Annali di Geofisika, 1998. V. 41, N. 5–6, P. 843–855.
4. Titheridge J.E. The real height of ionograms: a generalized formulating // Radio Science, 1988. V.23. No.5. P. 831-849.
5. Кононович Э.В., Шефов Н.Н., Храмова М.Н. Аппроксимация соотношений между индексами солнечной активности — числа Вольфа солнечных пятен и потока радиоизлучения на волне 10.7 см // Геомагнетизм и аэрномия, 2002. Т. 42. № 4. С. 455–459.
6. Krasheninnikov I., Egorov I.B. IRI-2001 model efficiency in ionospheric radiowave propagation forecasting. // Jour. ASR. 2010. V.45. No.2. P.268–275.
7. Деминов М.Г., Жеребцов Г.А., Пирог О.М., Шубин В.Н. Регулярные изменения критической частоты F2-слоя спокойной ионосферы средних широт // Геомагнетизм и аэрномия, 2009. Т. 49. № 3. С. 393-399.
8. Galkin I.A., Reinisch B.W., Huang X., Bilitza D. Assimilation of GIRO data into a real-time IRI // Radio Science, 2012. V. 47, RSOL07, doi:10.1029/2011RS004952.
9. Крашенинников И.В., Егоров И.Б., Павлова Н.М. Эффективность прогнозирования прохождения радиоволн в ионосфере на основе ионосферной модели IRI-2001 // Геомагнетизм и аэрномия, 2008. Т.48. № 4. С. 526–533.
10. Пономарчук С.Н., Котович Г.В., Романова Е.Б., Тащилин А.В. Прогноз характеристик распространения декаметровых радиоволн на основе глобальной модели ионосферы и плазмосферы // Солнечно-земная физика, 2015. Т.1. №3. С. 49–54.
11. Clette F. Switching to the new Sunspot Number on July 1, 2015: a challenging transition // <http://www.stce.be/press/01/welcome.html>. 2015.
12. Деминов М.Г. Индекс солнечной активности для долгосрочного прогноза ионосферы // Космические исследования, 2016. Т.54. №1. С. 1–9.

## MODEL IRI: ANALYSIS OF MONTH MEAN PARAMETERS IN THE PROBLEM OF POINT-TO-POINT IONOSPHERIC RADIO WAVES PROPAGATION IN THE HIGH SOLAR ACTIVITY CONDITIONS

Krashennikov I.V., Pavlova N.M., Sitnov Yu.S.

The results of analysis the month averaged variations critical frequency -  $f_oF2$  and the height profiles of plasma frequency in local midday on the IZMIRAN ionospheric station to their modal representations for the four middle seasons months of 2014, the year of a peak the current 24-th cycle of solar activity, are presented. It is shown, that IRI model, on the whole, gives good enough description of the daily critical frequency variations and the best results are obtained with the ionospheric index of solar activity — IG12 as input basic parameter of the model. April is an exception – for it the principal discordance takes place as in the  $f_oF2$  variations, so in the  $N_e(h)$ -profile. For this month, an inadequacy in the model distribution of electron density became the quite influencing reason in an accuracy of MUF calculations and the relative error can reach ~20%. Results of modeling are confirmed by the oblique sounding data.

**KEYWORDS:** STATISTICAL IONOSPHERIC MODELS, IRI, SOLAR ACTIVITY INDICES, MAXIMUM USABLE FREQUENCY, MUF.

### REFERENCES

1. Bilitza D., Altadil D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., Richards Ph., McKinnel 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.
2. Liu R., Smith P., King J. A new solar index which leads to improved foF2 prediction using the CCIR atlas // *Telecommun. J.V.*, 1983. No.8. V.50. P.408-414.
3. Perrone L., Franceschi G. Solar, ionospheric and geomagnetic indices. // *Annali di Geofisika*, 1998. V. 41, N. 5-6, Pp. 843-855.
4. Titheridge J.E. The real height of ionograms: a generalized formulating // *Radio Science*, 1988. V.23. No.5. P. 831-849.
5. Kononovich E.V., Shefov N.N., Khranova M.N. Approximation of the Relationships Between Solar Activity Indices: Sunspot Wolf Numbers and Radio Emission Flux at a 10.7-cm Wavelength // *Geomagnetism and Aeronomy*, V. 42 No. 4. P. 430 - 431.
6. Krashennikov I., Egorov I.B. IRI-2001 model efficiency in ionospheric radiowave propagation forecasting. // *Jour. ASR*. 2010. V.45. No.2. P.268-275.
7. Deminov M.G., Zherebtsov G.A., Pirog O.M., Shubin V.N. Regular changes in the critical frequency of the F2 layer of the quiet midlatitude ionosphere // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2009. V.49. №3. P. 374-380.
8. Galkin I.A., Reinisch B.W., Huang X., Bilitza D. Assimilation of GIRO data into a real-time IRI // *Radio Science*, 2012. V. 47, RSOL07, doi:10.1029/2011RS004952.
9. Krashennikov I.V., Egorov I.B., Pavlova N.M. Effectiveness of predicting radiowave propagation in the ionosphere based on the IRI-2001 ionospheric model // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2008. V. 48. No. 4. P. 504 – 510.
10. Ponomarchuk S.N., Kotovich G.V., Romanova E.V., Tashchilin A.E. Forecasting characteristics of propagation of decimeter radio waves using the global ionosphere and plasmasphere model // *Solar-Terrestrial Physics*, 2015. V.1. Iss. 3. P. 49-54.
11. Clette F. Switching to the new Sunspot Number on July 1, 2015: a challenging transition // <http://www.stce.be/press/01/welcome.html>. 2015.
12. Deminov M.G. Solar activity index for long-term ionospheric forecasts // *Cosmic Research*, 2016. V. 54. No. 1. P. 1-7.