
**МОДИФИКАЦИЯ ИНДЕКСОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ
В МЕЖДУНАРОДНЫХ СПРАВОЧНЫХ МОДЕЛЯХ ИОНОСФЕРЫ IRI И IRI-Plas
В СВЯЗИ С ПЕРЕСМОТРОМ РЯДА ЧИСЕЛ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН**

**MODIFICATION OF SOLAR ACTIVITY INDICES
IN THE INTERNATIONAL REFERENCE IONOSPHERE IRI AND IRI-Plas
MODELS DUE TO RECENT REVISION OF SUNSPOT NUMBER TIME SERIES**

Т.Л. Гуляева

*Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн РАН,
Москва, Россия, gulyaeva@izmiran.ru*

T.L. Gulyaeva

*Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio
Wave Propagation RAS,
Moscow, Russia, gulyaeva@izmiran.ru*

Аннотация. Международная справочная модель ионосферы IRI использует в качестве показателя уровня солнечной активности эффективный ионосферный индекс IG_{12} , выведенный по измерениям критической частоты f_oF_2 сетью ионозондов. В модели ионосферы и плазматосферы IRI-Plas в качестве эффективного показателя уровня солнечной активности используется глобальное электронное содержание (GEC , global electron content), сглаженное скользящим 12-месячным фильтром, GEC_{12} . Расчеты GEC основаны на глобальных картах полного электронного содержания (TEC, total electron content) с 1998 г., а реконструкция его за предыдущие годы и прогноз на будущее выполнены по эмпирической модели линейной зависимости GEC от солнечной активности. В настоящее время возникла необходимость переоценки солнечных и ионосферных индексов в ионосферных моделях в связи с переходом с 1 июля 2015 г. на обновленный расчет ряда солнечных пятен — $SSN2$ [Clette et al., 2014]. Использование $SSN2$ вместо прежнего ряда $SSN1$ приводит к увеличению погрешности прогнозов по ионосферной модели. Предлагается формула для преобразования сглаженного 12-месячным скользящим фильтром ряда $SSN2_{12}$ в эквивалент ранее принятого базового индекса $SSN1_{12}=R_{12}$, используемого для долгосрочного прогнозирования в моделях IRI и IRI-Plas. Выведены регрессионные соотношения между GEC_{12} , индексом солнечных пятен R_{12} и индексом потока солнечного радиоизлучения на волне 10.7 см $F10.7_{12}$. Сравнение расчетов по моделям IRI-Plas и IRI с данными наблюдений и прогноза по Москве в 23-м и 24-м циклах солнечной активности показало преимущество использования индекса GEC_{12} с моделью IRI-Plas.

Ключевые слова: глобальное электронное содержание, число солнечных пятен, поток солнечного радиоизлучения, ионосфера, плазматосфера, модель, IRI, IRI-Plas.

Abstract. The International Reference Ionosphere (IRI) imports global effective ionospheric IG_{12} index based on ionosonde measurements of the critical frequency f_oF_2 as a proxy of solar activity. Similarly, the global electron content (GEC), smoothed by the sliding 12-months window (GEC_{12}), is used as a solar proxy in the ionospheric and plasmaspheric model IRI-Plas. GEC has been calculated from global ionospheric maps of total electron content (TEC) since 1998 whereas its productions for the preceding years and predictions for the future are made with the empirical model of the linear dependence of GEC on solar activity. At present there is a need to re-evaluate solar and ionospheric indices in the ionospheric models due to the recent revision of sunspot number ($SSN2$) time series, which has been conducted since 1st July, 2015 [Clette et al., 2014]. Implementation of $SSN2$ instead of the former $SSN1$ series with the ionospheric model could increase model prediction errors. A formula is proposed to transform the smoothed $SSN2_{12}$ series to the proxy of the former basic $SSN1_{12}=R_{12}$ index, which is used by IRI and IRI-Plas models for long-term ionospheric predictions. Regression relationships are established between GEC_{12} , the sunspot number R_{12} , and the proxy solar index of 10.7 cm microwave radio flux, $F10.7_{12}$. Comparison of calculations by the IRI-Plas and IRI models with observations and predictions for Moscow during solar cycles 23 and 24 has shown the advantage of implementation of GEC_{12} index with the IRI-Plas model.

Keywords: global electron content, sunspot number, solar radio flux, ionosphere, plasmasphere, model, IRI, IRI-Plas.

ВВЕДЕНИЕ

Трансионосферное распространение радиоволн обуславливает возможность передачи сигналов нави-

гационных спутников при наземно-космической и межспутниковой связи. Для обеспечения надежности передачи и приема сигнала при долговременном планировании космических экспериментов используется

прогноз состояния ионосферы с помощью известных моделей, таких как эмпирическая Международная справочная модель ионосферы IRI (International Reference Ionosphere) и ее расширение на высоты плазмосферы IRI-Plas [Bilitza et al., 2011; Gulyaeva, Bilitza, 2012], Российская стандартная модель ионосферы SMI [Chasovitin et al., 1987], эмпирическая модель для расчетов трансionoсферного распространения радиоволн NeQuick [Nava et al., 2008]. Результаты расчетов зависят от задания солнечных и ионосферных управляющих параметров моделей. В настоящее время возникла необходимость переоценки солнечных и ионосферных управляющих параметров ионосферных моделей в связи с недавним обновлением многолетнего ряда чисел солнечных пятен за период с 1818 г. по настоящее время [Clette et al., 2014]. Второе поколение ряда чисел солнечных пятен — *SSN2* значительно отличается от исходного многолетнего ряда *SSN1*. Значения *SSN2* вблизи максимума солнечной активности зачастую выше значений индекса потока солнечного радиоизлучения на волне 10.7 см *F10.7*, которые, в свою очередь, в среднем на 60 единиц превышают значения *SSN1* [Ahluwalia, 2016]. Прямое использование *SSN2* вместо *SSN1* в прикладных задачах, в том числе в прогнозах по ионосферным моделям, может привести к заметным ошибкам в результатах модельных расчетов.

Отдельные блоки ионосферных моделей IRI, IRI-Plas, SMI, NeQuick основаны на различных индексах солнечной активности или их ионосферных эквивалентах. В этих моделях трехмерное представление электронной плотности базируется на привязке вертикального распределения плотности электронов к максимальной электронной плотности и высоте слоя F2 ионосферы по планетарным картам, разработанным международным радиосоюзом ITU-R [CCIR Atlas, 1983]. Планетарные карты критической частоты f_oF2 и фактора распространения радиоволн M3000F2, связанного с высотой максимума ионизации h_mF2 , построены на основе коэффициентов разложения в ряд с помощью сферического гармонического анализа указанных параметров по измерениям ионозондов. Коэффициенты ряда получены в зависимости от широты, долготы, мирового времени (UT) от 0 до 24 ч с шагом в 1 ч, сезонных изменений для двенадцати месяцев года и четырех уровней солнечной активности $R_{12}=0, 50, 100, 150$, с соответствующей интерполяцией для промежуточных значений этих параметров [Jones, Gallett, 1965].

Блок расчета критической частоты слоя F2 f_oF2 (или связанной с ней максимальной плотности электронов N_mF2) в модели IRI при вводе карт ITU-R использует в качестве показателя уровня солнечной активности эффективный ионосферный индекс IG_{12} , выведенный по измерениям критической частоты f_oF2 сетью ионозондов [Liu et al., 1983]. При расчете высоты максимума h_mF2 в моделях IRI и IRI-Plas на основе карт M3000F2 (ITU-R) используются критические частоты f_oF2 и f_oE и 12-месячное сглаженное значение R_{12} на основе первичного ряда чисел солнечных пятен *SSN1* [Bilitza et al., 1979]. Ионосферный индекс солнечной активности IG [Liu et al.,

1983] и его сглаженный 12-месячным скользящим фильтром ряд IG_{12} основаны на полуденных значениях критической частоты f_oF2 по измерениям 13 ионозондов, приведенных к масштабу чисел солнечных пятен R_{12} . Сравнение индексов IG_{12} и R_{12} за последние шесть солнечных циклов [Bilitza et al., 2012] показывает их различия, наиболее заметные в максимуме и минимуме солнечной активности.

В литературе приводятся различные комбинации индексов солнечной активности для использования в ионосферных моделях. В работе [Деминев, 2016] показано, что при долгосрочном прогнозировании критической частоты f_oF2 индекс потока солнечного радиоизлучения F_{12} более эффективен, чем R_{12} . Согласно работе [Ратовский и др., 2015], локальная модель параметров максимума слоя F2 линейно зависит от индекса $F10.7$, нормированного к значению $F10.7=100$ е.и. (единица индекса 1 е.и. = 10^{-22} Вт·м⁻²·Гц⁻¹). Для модели карт полного электронного содержания (TEC, total electron content) наилучшую точность показало применение комбинированного индекса потока солнечного радиоизлучения $F10.7$, а также числа солнечных пятен *SSN1*, осредненных по сумме трех компонентов: скользящего среднего за 3 дня, среднего за 27 предыдущих дней и среднего за 81 предыдущий день [Maruyama, 2010]. Регрессионная зависимость между рядом чисел солнечных пятен *SSN1* и индексом $F10.7$, используемая в моделях IRI и IRI-Plas, стабильно сохранялась до 2000 г., но после 2001 г. эта связь изменилась [Lukianova, Mursula, 2011]. В настоящий момент все прежние оценки эффективности числа солнечных пятен в метрике *SSN1* нуждаются в пересмотре, поскольку с 1 июля 2015 г. этот индекс не измеряется, а вместо него проводится мониторинг солнечной активности по индексу *SSN2* [Clette et al., 2014].

В ионосферно-плазмосферной модели IRI-Plas для расчета критической частоты f_oF2 и высоты максимума h_mF2 по картам ITU-R в качестве индикатора солнечной активности используется глобальное электронное содержание в ионосфере и плазмосфере Земли (*GEC*, global electron content), определяемое по картам полного электронного содержания [Афраймович, Перевалова, 2006; Afraimovich et al., 2008; Gulyaeva, Veselovsky, 2014]. Преимущество модельной системы IRI-Plas по сравнению с IRI заключается в наличии модели плазмосферы, дополняющей расчет высотных профилей электронной плотности и температуры до высоты 20 200 км над Землей (орбита навигационных спутников системы GPS), тогда как IRI позволяет делать расчеты только до высоты 2000 км в ионосфере.

Исследование параметра *GEC* в качестве индикатора солнечной активности и сравнение его с другими солнечными и ионосферными индексами проводится в данной работе с учетом модернизации ряда чисел солнечных пятен. Целью исследования является обновление набора управляющих параметров модели IRI-Plas, в том числе при расчете по исходным картам максимума электронной плотности и высоты слоя F2, и предостережение пользователей моделей от возможных ошибок, связанных с применением обновленного ряда чисел солнечных пятен для управления ионосферными моделями.

ДИНАМИКА СОЛНЕЧНЫХ И ИОНОСФЕРНЫХ ИНДЕКСОВ

Таблица 1

Коэффициенты линейной регрессии между индексами солнечной активности, сглаженными 12-месячным скользящим фильтром

№	Y	X	A	B
2.1	$SSN1_{12}$	$F10.7_{12}$	1.0588	-63.2760
2.2	$SSN2_{12}$	$F10.7_{12}$	1.4929	-88.5781
2.3	GEC_{12}	GEC_{12U}	57.5362	-46.0550
2.4	GEC_{12}	$SSN1_{12}$	0.9703	1.4447
2.5	GEC_{12}	$SSN2_{12}$	0.6511	1.1512
2.6	GEC_{12}	$F10.7_{12}$	0.9516	-59.5356

На рис. 1 представлен временной ход 12-месячных сглаженных рядов чисел солнечных пятен $SSN1_{12}$ и $SSN2_{12}$ начиная с 1931 г., включая прогноз до конца 24-го цикла солнечной активности в 2019 г., и потока солнечного радиоизлучения $F10.7_{12}$ с 1957 г. Значения $F10.7_{12}$ на 40–60 единиц превышают соответствующие значения $SSN1_{12}$ (рис. 1), а начиная с 2001 г. заметно превышение $F10.7_{12}$ и над $SSN2_{12}$ [Lukianova, Mursula, 2011]. Видно, что значения нового ряда $SSN2_{12}$ значительно выше значений $SSN1_{12}$, а вблизи максимумов солнечной активности 19-го и 21-го циклов значения $SSN2_{12}$ превышают даже значения индекса потока солнечного радиоизлучения $F10.7_{12}$, чего никогда не наблюдается для ряда $SSN1_{12}$.

Сглаженный 12-месячным скользящим фильтром ряд $SSN1_{12}$ (обозначенный R_{12}) используется для масштабирования управляющих параметров IG_{12} и GEC_{12} при расчетах по картам ИТУ-R, а на их основе и в указанных трехмерных ионосферных моделях. Верхний предел $R_{12}=150$ ограничивает применяемый ряд значений коэффициентов ИТУ-R в силу насыщения максимальной электронной плотности в ионосфере, т. е. плотность электронов достигает предельного уровня и перестает увеличиваться с дальнейшим увеличением солнечной активности [Деминов, 2016]. Эффект насыщения демонстрируется на рис. 2, где показано изменение ионосферного индекса IG_{12} , рассчитываемого по наблюдениям критической частоты f_oF2 [Liu et al., 1983], с ростом индекса солнечной активности R_{12} . Эту зависимость удобно выразить полиномом второго порядка (сплошная кривая на рис. 2):

$$IG_{12} = -0.0031R_{12}^2 + 1.5332R_{12} - 11.5634. \quad (1)$$

С учетом эффекта насыщения уровень солнечной активности при числе пятен R_{12} , превышающем 150 единиц, заменяется предельным значением $R_{12}=150$, и применяется соответствующий верхний предел набора коэффициентов ИТУ-R для расчета параметров максимума слоя F2, т. е. экстраполяция коэффициентов ИТУ-R выше предела насыщения не предусмотрена. Как видно из рис. 1 и будет показано далее, при использовании ряда $SSN1_{12}$ такие предельные ограничения применимы только в максимуме 19-го (1957–1958 гг.) и частично в максимуме 21-го солнечных циклов (1980 г.). В то же время непосредственное использование ряда $SSN2_{12}$ при расчетах по картам ИТУ-R приведет к игнорированию фактического значения индекса $SSN2_{12}$ выше верхнего предела насыщения ($R_{12}=150$) в шести солнечных циклах (17, 18, 19, 21, 22, 23) из восьми (рис. 1).

На рис. 3 показана регрессионная связь старого и нового рядов чисел солнечных пятен с потоком солнечного радиоизлучения $F10.7_{12}$.

$$Y = AX + B. \quad (2)$$

Параметры X и Y и коэффициенты A и B уравнения регрессии (2) указаны в табл. 1. Будем далее обозначать уравнение регрессии (2) по номеру в первом столбце табл. 1 с указанием коэффициентов

в соответствующей строке под номером (2.1), (2.2) и т. д. При отсутствии наблюдательных данных соответствующие значения $SSN1_{12}$ и $SSN2_{12}$ могут быть вычислены на основании их линейной зависимости от параметра $F10.7_{12}$ по формулам (2.1) и (2.2). Эти уравнения можно использовать также в сомнительных случаях для проверки принадлежности рядов солнечных данных к первичному ($SSN1_{12}$) или обновленному ($SSN2_{12}$) ряду — расчетные значения по формулам (2.1) и (2.2) покажут модельную принадлежность данных.

Наиболее перспективным представляется преобразование обновленного ряда $SSN2_{12}$ к масштабу ряда $SSN1_{12}$, с тем чтобы получить управляющие параметры модели, на основе которых были построены и остаются актуальными карты ИТУ-R. На рис. 4 показана линейная зависимость между прежним и обновленным рядами чисел солнечных пятен $SSN1_{12}$ и $SSN2_{12}$. Из этой зависимости следует, что обновленный ряд чисел пятен $SSN2_{12}$, сглаженный 12-месячным фильтром, приводится к соответствующему сглаженному ряду R_{12} ($SSN1_{12}$) с помощью масштабировющего множителя 0.7:

$$R_{12} = 0.7SSN2_{12}. \quad (3)$$

Заметим, что это соотношение справедливо только для указанных рядов, сглаженных 12-месячным скользящим фильтром. Таким образом, из текущих данных $SSN2_{12}$ однозначно выводится ряд чисел солнечных пятен R_{12} , используемый для управления расчетами в ионосферных моделях.

Рассмотрим параметр GEC , который представляет собой интегральную сумму электронов в околоземном космическом пространстве на высотах от 65 до 200 км. Он измеряется в единицах $GECU = 10^{32}$ электронов [Афраймович, Перевалова, 2006] и варьирует в пределах от 0.1 до 5.0 $GECU$. При расчетах по глобальным картам TEC получают ежечасные значения GEC для 0, 1, ..., 23 ч UT по наблюдениям за сигналами навигационных спутников с сентября 1998 г. по настоящее время. На основе ежечасных данных GEC выводятся суточные, месячные, 12-месячные и другие сглаженные ряды этого параметра, меняющегося в указанных пределах. После сглаживания полученного ряда месячных значений GEC (в единицах $GECU$) 12-месячным скользящим фильтром (обозначим сглаженный ряд GEC_{12U}) для использования в качестве индикатора солнечной активности в модели IRI-Plas ряд значений GEC_{12U} приводится к масштабу R_{12} с помощью уравнения регрессии (2.3) с коэффициентами, приведенными в строке 2.3 табл. 1.

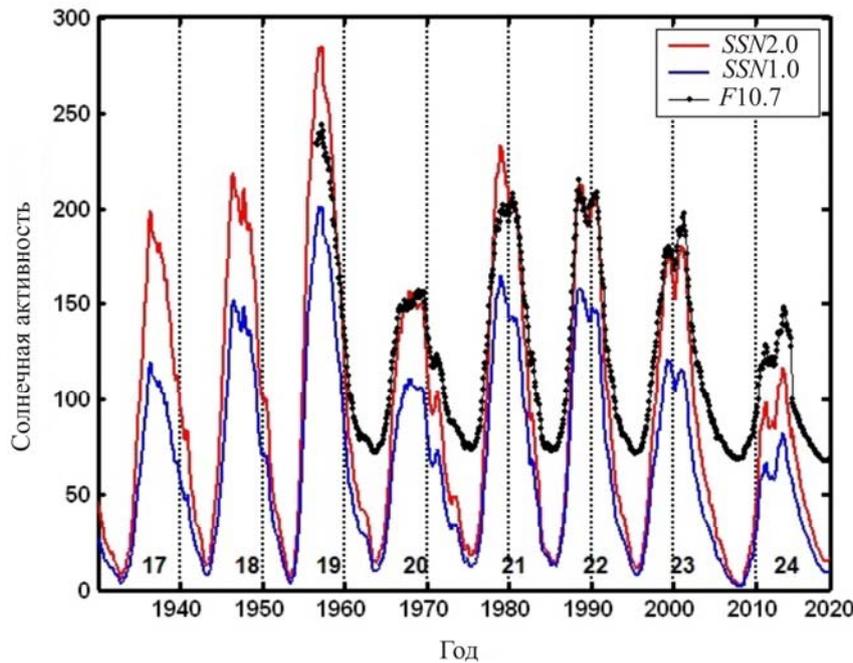


Рис. 1. Временной ход 12-месячных сглаженных рядов чисел солнечных пятен $SSN1_{12}$ и $SSN2_{12}$ и потока солнечного радиоизлучения $F10.7_{12}$

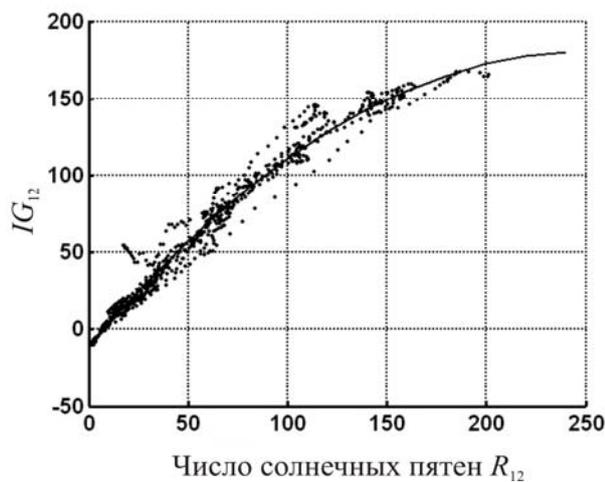


Рис. 2. Изменение сглаженного 12-месячным скользящим фильтром ионосферного индекса IG_{12} , рассчитываемого по измерениям критической частоты f_oF2 в полдень в 1957–2015 гг. сетью ионозондов, в зависимости от индекса солнечной активности R_{12} . Кривая — модель по формуле (1)

Уравнение (2.3) применено ко всем полученным значениям GEC_{12U} за период имеющихся исходных глобальных карт GIM-TEC с сентября 1998 г. по настоящее время. Для использования в качестве эквивалента солнечной активности в модели IRI-Plas этот ряд индексов необходимо дополнить за предыдущие годы рядом значений, реконструированных по модели [Gulyaeva, Veselovsky, 2014].

Ряд значений GEC_{12U} непрерывно пополняется по мере поступления новых карт TEC, соответственно, модельный ряд коэффициентов GEC_{12} требует ежемесячного обновления. Подобным образом ежемесячно обновляются ряды индексов солнечной активности и их прогноз на ближайшие месяцы и годы. С целью регулярного обновления управляю-

щих параметров модели IRI-Plas будем использовать регрессионные соотношения (2.4), (2.5), (2.6) между GEC_{12} и индексами солнечной активности. Вывод этих соотношений демонстрируется на рис. 5, где показана регрессионная связь параметра GEC_{12} с рядами чисел солнечных пятен $SSN1_{12}$ (2.4), $SSN2_{12}$ (2.5) и потоком солнечного радиоизлучения $F10.7_{12}$ (2.6). Коэффициент корреляции между указанными 12-месячными сглаженными рядами равен соответственно 0.9938 (2.4), 0.9955 (2.5) и 0.9962 (2.6). С помощью этих уравнений получаем, в частности, прогноз индекса GEC_{12} на основе прогноза $SSN1_{12}$ (2.4) или $F10.7_{12}$ (2.6) на ближайшие месяцы вплоть до декабря 2019 г.

Рисунок 6 иллюстрирует высокую точность аппроксимации индекса R_{12} в 19–24-м циклах солнечной активности параметром GEC_{12} , представленным результатами масштабирования параметра GEC по формуле (2.3) с марта 1999 г. по декабрь 2015 г. и прогнозом по формуле (2.4) в остальные годы. Для сравнения здесь же приводится расчет эквивалентного числа солнечных пятен R_{F12} по уравнению квадратичной регрессии между параметром F_{12} и R_{12} (см. формулу (2) [Деминов, 2016]), используемой в модели IRI [Bilitza, 2015]. Согласно выводам работы [Деминов, 2016], при долгосрочном прогнозировании критической частоты f_oF2 более эффективен индекс R_{F12} , чем R_{12} . При этом прогноз f_oF2 оценивался по параметру IG_{12} , показывающему значительное расхождение с R_{12} [Bilitza et al., 2012]. Результаты рис. 6 показывают заметное отличие индекса R_{F12} как от R_{12} , так и от близкого к нему индекса GEC_{12} , наиболее заметное вблизи максимума циклов 21–24. С учетом того, что карты ITU-R были разработаны для фиксированных уровней R_{12} , именно этот индекс и наиболее близкий к нему по значениям индекс GEC_{12} исполь-

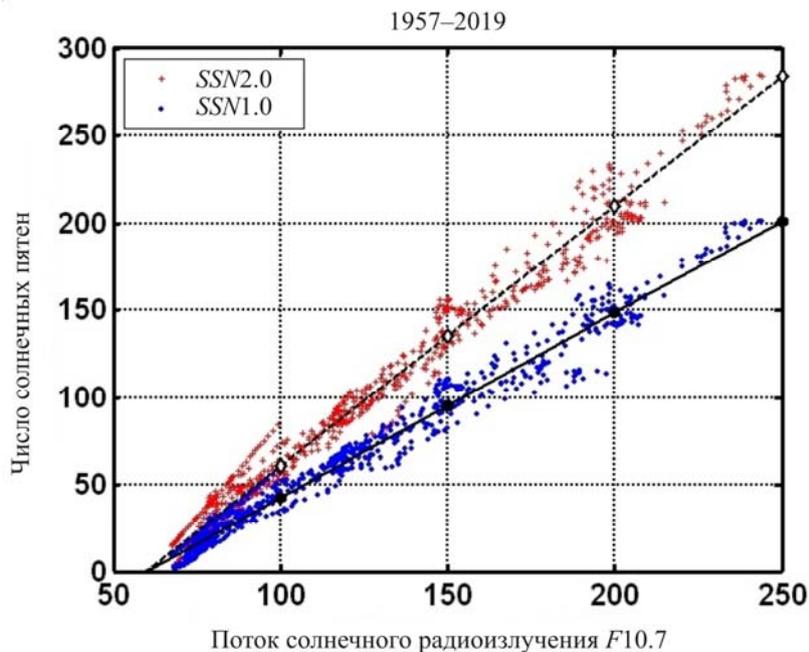


Рис. 3. Регрессионная связь старого и нового рядов солнечных пятен, сглаженных 12-месячным скользящим фильтром, со сглаженным аналогично потоком солнечного радиоизлучения на волне 10.7 см (2800 МГц) $F10.7_{12}$

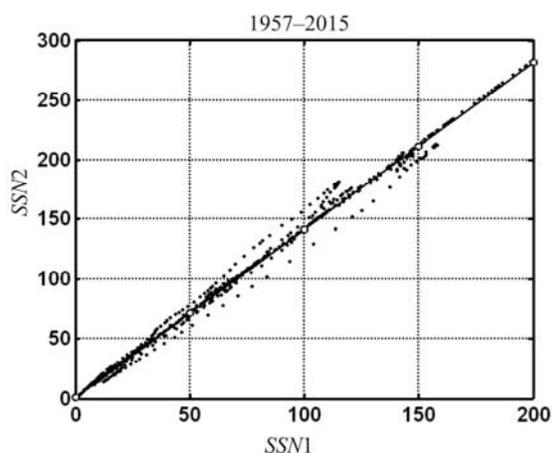


Рис. 4. Линейная зависимость между прежним базовым индексом числа солнечных пятен $SSN1_{12}$ и обновленным рядом $SSN2_{12}$

зуются в качестве управляющих параметров солнечной активности в модели IRI-Plas.

СРАВНЕНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ ДАННЫХ С МОДЕЛЬНЫМ ПРОГНОЗОМ

Вариации параметров $SSN1_{12}$, $SSN2_{12}$, GEC_{12} и IG_{12} в 19–24-м циклах солнечной активности представлены на рис. 7. Уровень насыщения $R_{12}=150$ для максимальной электронной плотности N_mF2 (пропорциональной f_oF2^2) отмечен горизонтальной чертой. При расчете f_oF2 по картам ITU-R все значения указанных индексов, превышающие 150 единиц, заменяются на этот верхний предел. На рис. 7 хорошо видна та часть значений, которая будет исключена из расчетов по ионосферным моделям вблизи максимума циклов, а именно, наибольшие потери будут в случае использования индекса $SSN2_{12}$.

На рис. 7 заметна минимальная мощность 24-го солнечного цикла с наименьшими значениями всех рассмотренных индексов вблизи максимума цикла. Нисходящая ветвь 24-го цикла после максимума относится к долгосрочному прогнозу солнечной активности на 2016–2019 гг. В этот период заметно отличие индекса IG_{12} от других индексов в сторону его увеличения в 2018–2019 гг. по данным в файле `ig_rz.dat` от 10.03.2016 в системе IRI [<http://irimodel.org/indices/>].

Прогноз IG_{12} в этот период предполагает минимум 24-го цикла в октябре 2017 г. Не исключено, что прогноз по индексам $SSN1$, $SSN2$ и $F10.7$ нисходящей ветви солнечной активности к минимуму 24-го цикла в декабре 2019 г. будет скорректирован по мере получения новых данных [Ahluwalia, 2016]. Однако отличия в прогнозе управляющего параметра IG_{12} для модели IRI приведут к отличиям в долгосрочном прогнозе модельных параметров с использованием этого индекса, как показано ниже при использовании указанных индексов для расчета ионосферных параметров по моделям IRI и IRI-Plas для Москвы (географические координаты (55.5° N, 37.3° E)).

На рис. 8 представлены данные наблюдений и расчет по модели IRI-Plas для Москвы с 1996 по 2015 г. в 23-м и 24-м циклах солнечной активности. Данные f_oF2 и h_mF2 получены по наблюдениям ионозонда «Парус-А» в ИЗМИРАН, данные ТЕС вычислены по картам JPL GIM-TEC для указанных координат в Москве. Расчеты по модели IRI-Plas выполнены с вводом карт ITU-R под управлением двух индексов солнечной активности: $SSN1_{12}$ и $SSN2_{12}$. Сравнение результатов для 23-го и 24-го циклов солнечной активности показывает более слабую ионизацию ионосферы в 24-м цикле по сравнению с 23-м циклом активности, подобно наблюдениям

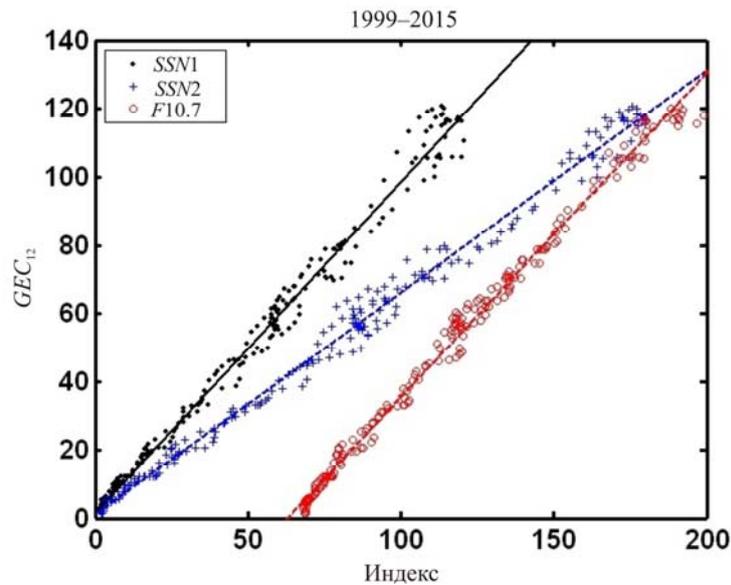


Рис. 5. Изменение параметра GEC_{12} в зависимости от солнечной активности, представленной рядами чисел солнечных пятен $SSN_{1,2}$ и потока солнечного радиоизлучения $F_{10.7,12}$

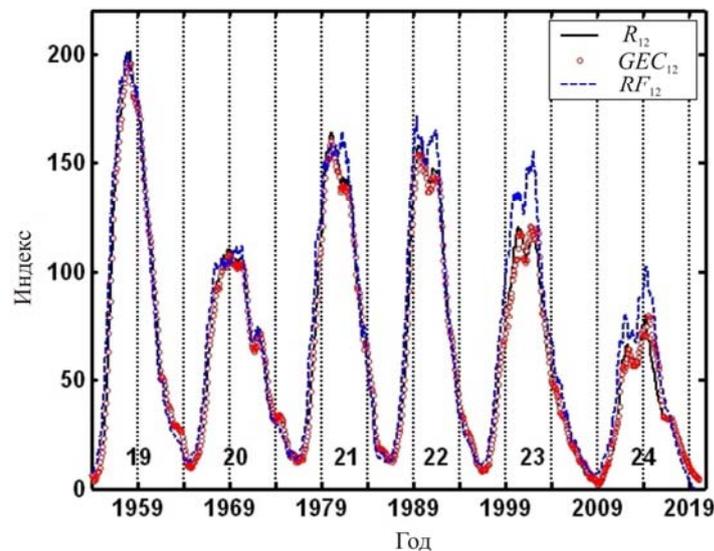


Рис. 6. Базовый индекс числа солнечных пятен R_{12} в 19–24-м циклах и эквивалентный индекс солнечной активности — глобальное электронное содержание GEC_{12} , вычисленное по картам GIM-TEC и приведенное к масштабу числа пятен по формуле (2.3) с марта 1999 г. по декабрь 2015 г., дополненное реконструкцией по модели (2.4) в остальные годы

на ионозонде в Японии и глобально-осредненному TEC в работе [Нао et al., 2014]. Низкий уровень крайнего ультрафиолетового излучения Солнца (EUV), наблюдавшийся во время продолжительного минимума солнечной активности в 2007–2009 гг., продолжает сохраняться в 24-м цикле, обуславливая пониженную ионизацию ионосферной плазмы. Что касается расчетов по модели IRI-Plas, то значения ионосферных параметров, полученные с использованием $SSN_{2,12}$, заметно выше и данных наблюдений, и значений, рассчитанных по ряду $SSN_{1,12}$. Максимальное превышение среднемесячных результатов расчетов с индексом $SSN_{2,12}$ над наблюдательными данными составляет 32 % для f_0F_2 , 12 % для h_mF_2 и 38 % для TEC. Эти различия могут варьировать в зависимости от времени суток, сезона, географических и геомагнитных координат места наблюдения и

уровня солнечной активности, оценки которых имеются в литературе.

Имеющийся прогноз ряда индексов солнечной активности на 2016–2019 гг. использован для прогноза ионосферных параметров f_0F_2 , h_mF_2 и TEC для Москвы. Хотя рассматриваемый период выходит за пределы существующей базы ионосферных данных и модельный расчет нельзя сопоставить с наблюдениями, примем за уровень отсчета результаты расчета с использованием индекса $R_{12}=SSN_{1,12}$ как базового индекса, на котором основаны карты ITU-R. Результаты прогноза по моделям IRI-Plas и IRI показаны на рис. 9, а полученные за каждый год среднеквадратичные отклонения от результатов расчета по базовым индексам солнечной активности приведены в табл. 2. Результаты показывают наилучшее совпадение с базовым прогнозом (наименьшие

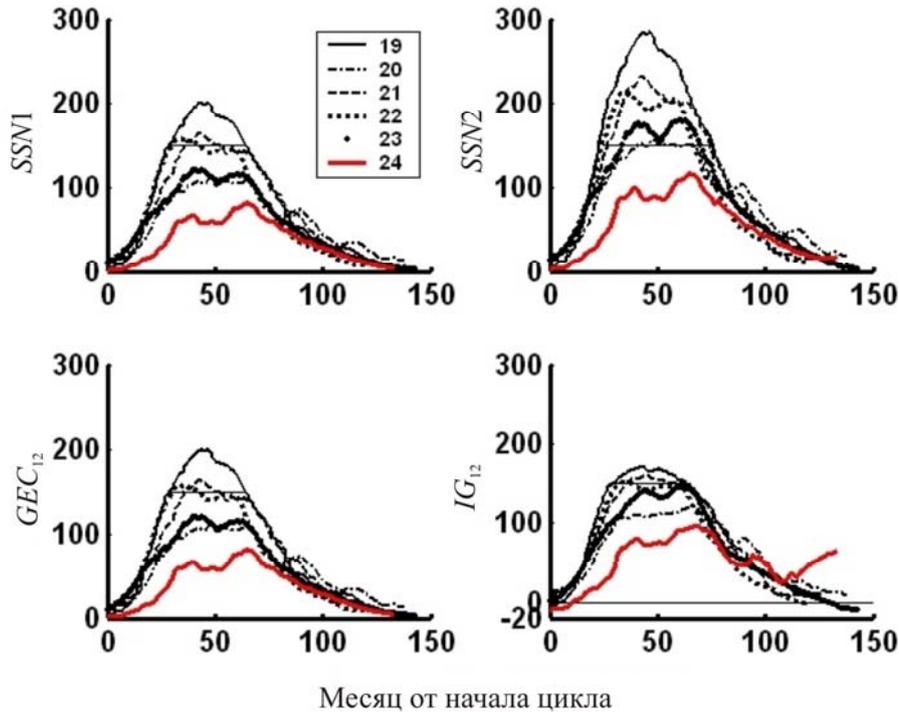


Рис. 7. Вариации индексов солнечной и ионосферной активности $SSN1_{12}$, $SSN2_{12}$, GEC_{12} и IG_{12} для шести солнечных циклов (19–24)

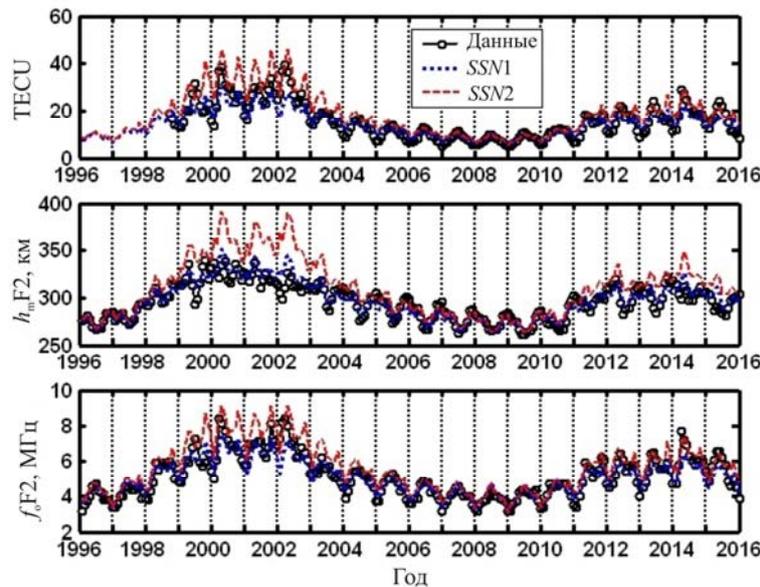


Рис. 8. Сравнение данных наблюдений (данные) и прогноза по модели IRI-Plas ($SSN1$, $SSN2$) для Москвы с 1996 по 2015 г. в 23-м и 24-м цикла солнечной активности. Параметры f_oF2 и h_mF2 — по наблюдениям ионозонда «Парус-А» в ИЗМИРАН, данные TEC — по картам JPL GIM-TEC для Москвы

RMS-отклонения) при использовании параметра GEC_{12} для прогноза критической частоты f_oF2 , высоты максимума h_mF2 и полного электронного содержания TEC в модели IRI-Plas. Использование индекса $SSN2_{12}$ в модели IRI-Plas дает завышенные значения, наиболее заметные в 2016 г. и убывающие к минимуму 24-го цикла. Противоположная тенденция наблюдается при использовании индекса IG_{12} в модели IRI: значения прогнозируемых параметров испытывают наибольшее отклонение от базового расчета к концу рассматриваемого периода.

Расчет TEC по модели IRI в 2016–2018 гг. дает заниженные значения по сравнению с базовым расчетом в силу интегрирования TEC в модели IRI только до высоты 2000 км, в то время как базовый расчет по модели IRI-Plas включает высоты до 20 200 км. Однако в 2019 г. прогнозные значения TEC по модели IRI превысили результаты расчета по базовой модели вследствие роста управляющего параметра IG_{12} . Приблизить результаты расчетов по модели IRI к базовой системе индексов до конца 24-го цикла солнечной активности можно путем исполь-

Таблица 2

Среднеквадратичное отклонение (RMS, в единицах измерения и %) результатов прогноза ионосферных параметров для Москвы на 2016–2019 гг. при расчетах с управляющими индексами $SSN2_{12}$, GEC_{12} , IG_{12} от расчета с базовым индексом $R_{12}=SSN1_{12}$ (среднее значение за год указано в угловых скобках)

Год	$\langle f_oF2 \rangle$	RMS		$\langle h_mF2 \rangle$	RMS		$\langle TEC \rangle$	RMS	
		МГц	%		км	%		TECU	%
IRI-Plas, $SSN2_{12} \sim SSN1_{12}$									
2016	5.0	.37	8.0	295.6	7.52	2.6	13.8	2.40	20.3
2017	4.7	.29	6.4	290.4	6.07	2.1	12.3	1.76	16.3
2018	4.3	.15	3.6	281.5	3.25	1.2	10.0	0.86	9.3
2019	4.1	.07	1.8	276.1	1.56	0.6	8.7	0.40	4.9
IRI-Plas, $GEC_{12} \sim SSN1_{12}$									
2016	4.5	.12	2.5	287.5	1.34	0.5	11.4	0.56	4.7
2017	4.4	.11	2.5	283.9	1.33	0.5	10.4	0.49	4.5
2018	4.1	.12	2.8	277.5	1.54	0.6	8.9	0.46	5.0
2019	3.9	.12	2.9	273.7	1.57	0.6	8.0	0.42	5.1
IRI, $IG_{12} \sim SSN1$									
2016	5.0	0.44	9.5	289.9	3.79	1.3	9.6	2.34	19.8
2017	4.6	0.27	6.1	285.1	2.88	1.0	8.0	2.96	27.4
2018	4.7	0.64	15.2	283.9	6.96	2.5	7.8	1.77	19.1
2019	5.2	1.31	32.7	286.4	14.64	5.3	9.3	2.16	26.0

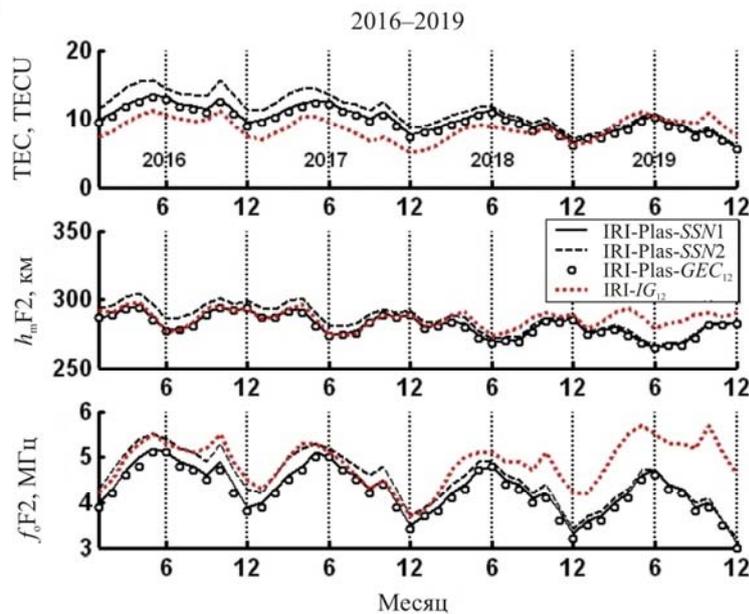


Рис. 9. Результаты прогноза ионосферных параметров f_oF2 , h_mF2 и TEC для Москвы на 2016–2019 гг. в 24-м цикле солнечной активности с указанными солнечными и ионосферными управляющими параметрами по моделям IRI-Plas и IRI

зования коэффициентов IG_{12} , рассчитанных по формуле (1) на основе прогноза солнечных пятен R_{12} на 2016–2019 гг. Эту замену легко произвести, используя вместо исходных коэффициентов в файле `ig_rz.dat` значения IG_{12} по формуле (1) при расчете онлайн на сайте IRI.

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены управляющие параметры солнечной активности в моделях IRI-Plas и IRI. Показано, что в связи с переходом на обновленный ряд чисел солнечных пятен $SSN2$ [Clette et al., 2014] необходима корректировка и избирательное использование солнечных и ионосферных управляющих параметров моделей. Получен масштабирующий

коэффициент 0.7 для получения базовых индексов чисел солнечных пятен $R_{12}=SSN1_{12}$, сглаженных 12-месячным фильтром, из нового ряда индекса $SSN2_{12}$. Выведены регрессионные соотношения между GEC_{12} , индексом солнечных пятен R_{12} и индексом потока солнечного радиоизлучения на волне 10.7 см $F10.7_{12}$. Сравнение расчетов по модели IRI-Plas с данными наблюдений по Москве в 23-м и 24-м циклах солнечной активности показало преимущество использования индекса $SSN1_{12}$ по сравнению с $SSN2_{12}$. При сравнении прогнозов по моделям IRI-Plas и IRI для Москвы в 2016–2019 гг. на нисходящей ветви 24-го цикла солнечной активности получено наименьшее расхождение с прогнозом по исходному ряду R_{12} при использовании индекса GEC_{12} с моделью IRI-Plas.

Пользователям моделей IRI и IRI-Plas предлагается критически отнестись к заданию управляющих параметров солнечной активности в этих моделях, а именно проверять представленные в Интернете ряды чисел солнечных пятен на предмет соответствия их набору базовых индексов $R_{12}=SSN_{12}$, на основе которых построены карты IUTU-R параметров максимума слоя F2. В свете обнаруженного отличия в прогнозе ионосферного индекса IG_{12} от остальных рассмотренных индексов солнечной активности предлагается при расчете по модели IRI вместо этого индекса ввести рассчитанный по формуле (1) на основе прогноза ряда значений чисел солнечных пятен R_{12} на ближайшие годы.

Автор благодарит SIDC, Бельгия, за индексы $SSN1$ и $SSN2$ [<http://sidc.oma.be/silso/>]; SWC, Канада, за данные $F10.7$ [ftp://ftp.geolab.nrcan.gc.ca/data/solar_flux/daily_flux_values/]; ИЗМИРАН, Москва, за данные ионизации «Парус» [<http://www.izmiran.ru/services/iweather/>]; JPL, США, за карты GIM-TEC [ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/iono_daily/]; Д. Билитца, США, за коэффициенты и расчеты онлайн по модели IRI [<http://irimodel.org/indices/>]. Модель IRI-Plas предоставлена ИЗМИРАН [<http://ftp.izmiran.ru/pub/izmiran/SPIM/>]. Расчеты онлайн по модели IRI-Plas выполняются на сайте IONOLAB [<http://www.ionolab.org/>]. Работа выполнена с частичной поддержкой гранта TUBITAK EEEAG 115E915. Автор благодарит двух рецензентов за ценные замечания и предложения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2006. 480 с.

Деминов М.Г. Индекс солнечной активности для долгосрочного прогноза ионосферы // Космические исследования. 2016. Т. 54, № 1. С. 3–9. DOI: 10.7868/S0023420616010064.

Ратовский К.Г., Ойнац А.В., Медведев А.В. Сходства и различия регулярных вариаций параметров F2-слоя полярной и среднеширотной ионосферы в восточно-сибирском секторе // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 2. С. 70–79. DOI: 10.12737/7832.

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Oinats A.V., et al. Global electron content: a new conception to track solar activity // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26, N 2. P. 335–344.

Ahluwalia H.S. The descent of the solar cycle 24 and future space weather // *Adv. Space Res.* 2016. V. 57, iss. 2. P. 710–714. DOI: 10.1016/j.asr.2015.11.015.

Bilitza D., Sheikh N.M., Eyfrig R. A global model for the height of the F2 peak using M3000 values from the CCIR // *Telecomm. J.* 1979. V. 46. P. 549–553.

Bilitza D., McKinnell L.A., Reinisch B., Fuller-Rowell T. The international reference ionosphere today and in the future // *J. Geodesy.* 2011. V. 85. P. 909–920. DOI: 10.1007/s00190-010-0427-x.

Bilitza D., Brown S.A., Wang M.Y., et al. Measurements and IRI model predictions during the recent solar minimum // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2012. V. 86. P. 99–106. DOI: 10.1016/j.jastp.2012.06.010.

Bilitza D. The International Reference Ionosphere — Status 2013 // *Adv. Space Res.* 2015. V. 55, iss. 8. P. 1914–1927. DOI: 10.1016/j.asr.2014.07.032.

CCIR Atlas of Ionospheric Characteristics // Comite Consultatif International des Radio Communications Rep. 340. Geneva: International Telecommunication Union, 1983.

Chasovitin Yu.K., Shirochkov A.V., Besprozvannaya A.S., et al. An empirical model for the global distribution of density,

temperature and effective collision frequency of electrons in the ionosphere // *Adv. Space Res.* 1987. V. 7, iss. 6. P. 49–52.

Clette F., Svalgaard L., Vaquero J.M., Cliver E.W. Revisiting the sunspot number: a 400-year perspective on the solar cycle // *Space Sci. Rev.* 2014. V. 186, iss. 1. P. 35–103.

Gulyaeva T.L., Bilitza D. Towards ISO Standard Earth Ionosphere and Plasmasphere Model // *New Developments in the Standard Model.* Nova Science Publishers Inc., 2012. P. 1–39. Available at https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=35812. (дата обращения 1 сентября 2016 г.).

Gulyaeva T.L., Veselovsky I.S. Imaging Global Electron Content backwards in time more than 160 years ago // *Adv. Space Res.* 2014. V. 53, iss. 3. P. 403–411. DOI: 10.1016/j.asr.2013.11.036.

Hao Y.Q., Shi H., Xiao Z., Zhang D.H. Weak ionization of the global ionosphere in solar cycle 24 // *Ann. Geophys.* 2014. V. 32. P. 809–816. DOI: 10.5194/angeo-32-809-2014.

Jones W.B., Gallet R.M. Representation of diurnal and geographical variations of ionospheric data by numerical method // *Telecomm. J.* 1962. V. 29. P. 129; 1965. V. 32. P. 18.

Liu R., Smith P., King J. A new solar index which leads to improved f_oF2 prediction using the CCIR atlas // *Telecomm. J.* 1983. V. 50. P. 408–414.

Lukianova R., Mursula K. Changed relation between sunspot numbers, solar UV/EUV radiation and TSI during the declining phase of solar cycle 23 // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011. V. 73, iss. 2–3, P. 235–240. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.04.002.

Maruyama T. Solar proxies pertaining to empirical ionospheric total electron content models // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. A04306. DOI: 10.1029/2009JA014890.

Nava B., Coisson P., Radicella S.M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008. V. 70, iss. 15. P. 1856–1862. DOI: 10.1016/j.jastp.2008.01.015.

URL: <http://sidc.oma.be/silso/> (дата обращения 1 сентября 2016 г.).

URL: ftp://ftp.geolab.nrcan.gc.ca/data/solar_flux/daily_flux_values/ (дата обращения 1 сентября 2016 г.).

URL: <http://www.izmiran.ru/services/iweather/> (дата обращения 1 сентября 2016 г.).

URL: ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/iono_daily/ (дата обращения 1 сентября 2016 г.).

URL: <http://irimodel.org/indices/> (дата обращения 1 сентября 2016 г.).

URL: <http://ftp.izmiran.ru/pub/izmiran/SPIM/> (дата обращения 1 сентября 2016 г.).

URL: <http://www.ionolab.org/> (дата обращения 1 сентября 2016 г.).

REFERENCES

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

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Oinats A.V., Yasukevich Yu.V., Zhivetiev I.V. Global electron content: a new conception to track solar activity. *Ann. Geophys.* 2008, vol. 26, no. 2, pp. 335–344.

Ahluwalia H.S. The descent of the solar cycle 24 and future space weather. *Adv. Space Res.* 2016, vol. 57, iss. 2, pp. 710–714. DOI: 10.1016/j.asr.2015.11.015.

Bilitza D., Sheikh N.M., Eyfrig R. A global model for the height of the F2 peak using M3000 values from the CCIR. *Telecomm. J.* 1979, vol. 46, pp. 549–553.

Bilitza D., McKinnell L.A., Reinisch B., Fuller-Rowell T. The international reference ionosphere today and in the future. *J. Geodesy.* 2011. vol. 85, pp. 909–920. DOI: 10.1007/s00190-010-0427-x.

Bilitza D., Brown S.A., Wang M.Y., Souza J.R., Roddy P.A. Measurements and IRI model predictions during the recent

solar minimum. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2012, vol. 86, pp. 99–106. DOI: 10.1016/j.jastp.2012.06.010.

Bilitza D. The International Reference Ionosphere — Status 2013. *Adv. Space Res.* 2015, vol. 55, iss. 8, pp. 1914–1927. DOI: 10.1016/j.asr.2014.07.032.

CCIR Atlas of Ionospheric Characteristics. *Comite Consultatif International des Radio Communications Rep. 340*. Geneva, International Telecommunication Union, 1983.

Chasovitin Yu.K., Shirochkov A.V., Besprozvannaya A.S., Gulyaeva T.L., Denisenko P.F., Armenskaya O.A., Ivanova S.E., Kashirin A.I., Klueva N.M., Koryakina E.A., Mironova L.S., Sykilinda T.N., Shushkova V.B., Vodolazkin V.I., Sotsky V.V., Sheidakov N.E. An empirical model for the global distribution of density, temperature and effective collision frequency of electrons in the ionosphere. *Adv. Space Res.* 1987, vol. 7, iss. 6, pp. 49–52.

Clette F., Svalgaard L., Vaquero J.M., Cliver E.W. Revisiting the sunspot number: a 400-year perspective on the solar cycle. *Space Sci. Rev.* 2014, vol. 186, iss. 1, pp. 35–103.

Gulyaeva T.L., Bilitza D. Towards ISO Standard Earth Ionosphere and Plasmasphere Model. *New Developments in the Standard Model*. Nova Science Publishers Inc., 2012, pp. 1–39. Available at https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=35812 (accessed September 1, 2016).

Gulyaeva T.L., Veselovsky I.S. Imaging Global Electron Content backwards in time more than 160 years ago. *Adv. Space Res.* 2014, vol. 53, iss. 3, pp. 403–411. DOI: 10.1016/j.asr.2013.11.036.

Deminov M.G. Solar activity index for long-term ionospheric forecasts. *Cosmic Research*. 2016, vol. 54, no. 1, pp. 1–7. DOI: 10.1134/S0010952516010068.

Hao Y.Q., Shi H., Xiao Z., Zhang D.H. Weak ionization of the global ionosphere in solar cycle 24. *Ann. Geophys.* 2014, vol. 32, pp. 809–816. DOI: 10.5194/angeo-32-809-2014.

Jones W.B., Gallet R.M. Representation of diurnal and geographical variations of ionospheric data by numerical method. *Telecomm. J.* 1962, vol. 29, p. 129; 1965, vol. 32, p. 18.

Liu R., Smith P., King J. A new solar index which leads to improved f_oF_2 prediction using the CCIR atlas. *Telecomm. J.* 1983, vol. 50, pp. 408–414.

Lukianova R., Mursula K. Changed relation between sunspot numbers, solar UV/EUV radiation and TSI during the declining phase of solar cycle 23. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011, vol. 73, iss. 2–3, pp. 235–240. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.04.002.

Maruyama T. Solar proxies pertaining to empirical ionospheric total electron content models. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A04306. DOI: 10.1029/2009JA014890.

Nava B., Coisson P., Radicella S.M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model. *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2008, vol. 70, iss. 15, pp. 1856–1862. DOI: 10.1016/j.jastp.2008.01.015.

Ratovsky K.G., Oinats A.V., Medvedev A.V. Similarities and differences between regular variations of F2-layer parameters of the polar and midlatitude ionosphere in East Siberian sector. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terr. Phys.]. 2015, vol. 1, no. 2, pp. 70–79. DOI: 10.12737/7832. (In Russian).

URL: <http://sidc.oma.be/silso/> (accessed September 1, 2016).

URL: ftp://ftp.geolab.nrcan.gc.ca/data/solar_flux/daily_flux_values/ (accessed September 1, 2016).

URL: <http://www.izmiran.ru/services/iweather/> (accessed September 1, 2016).

URL: ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/iono_daily/ (accessed September 1, 2016).

URL: <http://irimodel.org/indices/> accessed September 1, 2016).

URL: <http://ftp.izmiran.ru/pub/izmiran/SPIM/> (accessed September 1, 2016).

URL: <http://www.ionolab.org/> (accessed September 1, 2016).