УДК 523.98;550.388.2

# СРЕДНЕСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ЕЖЕДНЕВНЫМ ДАННЫМ

© 2022 г. Т. Л. Гуляева<sup>1, \*</sup>, Р. А. Гуляев<sup>1, \*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия \*e-mail: gulyaeva@izmiran.ru \*\*e-mail: rgulyaev@izmiran.ru Поступила в редакцию 16.02.2022 г. После доработки 03.03.2022 г. Принята к публикации 30.03.2022 г.

Эмпирические ионосферные модели отображают зависимость ключевых ионосферных характеристик от 12-месячных сглаженных индексов солнечной активности. Эти индексы определяются с запаздыванием на 6 мес. по отношению к текущему моменту времени, поэтому для применения модели в реальном времени используется прогноз солнечной активности, погрешности которого влияют на точность ионосферного прогноза. Для управления ионосферной моделью в реальном времени можно использовать 81-дневные сглаженные прокси-индексы солнечной активности, включающие ежедневные индексы за предыдущие 40 дней, наблюдение или прогноз на текущий день и прогноз на последующие 40 дней. В данной работе предложен способ прогноза солнечной активности на 45 дней (MSA45), равно пригодный для применения с индексами потока солнечного радиоизлучения F10.7 и числа солнечных пятен SSN2. Модель основана на подобии данных в текущей фазе солнечного цикла с индексами солнечной активности в аналогичной фазе предыдущего солнечного цикла. Входными параметрами модели являются ежедневные индексы солнечной активности F10.7 или SSN2 за 45 предыдущих дней ( $d_{-45}, ..., d_{-1}$ ), фаза солнечного цикла  $\Phi(d)$  для текущего дня и ежедневные индексы солнечной активности за 45 последующих дней  $(d_1, ..., d_{45})$  в соответствующей фазе Ф предшествующего солнечного цикла. Прогноз числа солнечных пятен SSN2 на 45 дней выполнен впервые с точностью от 5.1 ед. при низкой и до 23.1 ед. при высокой солнечной активности. Сравнение прогноза индекса F10.7 по модели MSA45 с прогнозом этого параметра US-AF-45DF и с наблюдательными данными показало улучшение точности прогноза от 15% в максимуме до 50% в минимуме солнечной активности.

**DOI:** 10.31857/S0016794022040095

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Изменчивость солнечной активности (СА) лежит в основе регулярных и иррегулярных изменений в ионосфере. Спектр изменений максимальной плотности электронов в ионосфере включает 11-летние изменения с солнечным циклом (СЦ), 27-дневные изменения с солнечным оборотом, 24-часовые (суточные) изменения и краткосрочные (минуты и секунды) возмущения в ионосфере [Liu et al., 2011]. Одиннадцатилетний цикл формируется под влиянием эволюции солнечного динамо, генерирующего магнитное поле Солнца, со сменой знака магнитной полярности в полярных областях на Солнце каждые 11 лет [Balogh et al., 2014]. Многие явления в околоземном пространстве показывают зависимость от 11-летней цикличности, в том числе и ионосферные процессы.

Одиннадцатилетние изменения СА принято оценивать 12-месячными скользящими средними значениями числа солнечных пятен SSN, наблюдения которых имеются на протяжении 400 лет, включая достоверный ряд ежедневных значений числа солнечных пятен с 1849 г. [Clette et al., 2014]. Эти 12-месячные сглаженные индексы SSN<sub>12</sub> используются в эмпирических ионосферных моделях в качестве управляющих параметров, наряду с другими индексами CA [Gulyaeva and Bilitza, 2012; Gulyaeva et al., 2018; Laštovička et al., 2019; Данилов и Константинова, 2020; Деминов и др., 2020; Данилов, 2021; Shubin and Gulyaeva, 2021, 2022]. 12-месячные индексы для данного месяца рассчитываются как среднее значение индексов за 6 предшествующих месяцев и 6 последующих месяцев, центрированное на данный месяц. Таким образом, они отображают состояние СА с запаздыванием в 6 мес. по отношению к текущему моменту. Для использования ионосферной модели в



**Рис. 1.** Наблюдения и прогноз 12-месячных сглаженных чисел солнечных пятен серии SSN2 в январе 2022 г. по данным SILSO. Метод прогноза: ML – McNish, Lincoln; SC – Standard Curve; CM – Combined method; KFML, KFSC, KFCM – Kalman filter optimization.

реальном времени применяется прогноз 12-месячных сглаженных индексов на последние 6 мес., что увеличивает погрешность модельных расчетов за счет погрешности прогноза СА [Гуляева, 2016; Gulyaeva, 2019].

На рисунке 1 приведен пример ряда наблюдаемых и прогнозируемых 12-месячных сглаженных чисел солнечных пятен серии SSN2 в январе 2022 г. согласно Международному центру данных SILSO в Бельгии (https://wwwbis.sidc.be/silso/). Последнее наблюдаемое значение 12-месячного сглаженного индекса относится к июню 2021 г. Стрелкой показан прогноз в текущий момент времени – январь 2022 г. Адаптивный фильтр Кальмана (KF) (Kalman, 1960) применяется к другим методам прогноза 12-месячного сглаженного числа солнечных пятен для уточнения прогноза отсутствующих сглаженных индексов за последние 6 месяцев к заданному моменту времени (Podladchikova and Van der Linden, 2012). Однако даже с применением фильтра Кальмана видно различие прогнозов от 5 до 45 единиц, так что погрешность прогноза SSN2 сопоставима по величине с ежедневными наблюдаемыми значениями солнечных пятен в январе 2022 г.

При сравнении различных индексов СА для управления ионосферными моделями было показано преимущество комбинированного индекса потока солнечного радиоизлучения *F*10.7<sub>*p*</sub>для повышения точности модели [Liu et al., 2006]. Ин-

декс F10.7<sub>P</sub> отображает интенсивность солнечного потока ультрафиолетового излучения и рекомендуется для использования в ионосферных моделях с учетом наличия многолетних записей и надежной доступности в реальном времени. Индекс F10.7 риспользуется вместо индекса потока радиоизлучения Солнца на волне 10.7 см. Он включает в себя полу-сумму ежедневного значения F10.7 и 81-дневного скользящего среднего, F10.7<sub>4</sub>, центрированного на данный день. Для расчета прокси-индекса F10.7<sub>A</sub> используются индексы за 81 день, включая данные за предыдущие 40 дней, текущий день и последующие 40 дней. Термин "прокси" используется в качестве "заме-стителя" основного измеренного индекса, в данном случае он характеризует сглаженное 81-дневным фильтром значение потока солнечного радиоизлучения на волне 10.7 см.

Долговременные изменения индекса  $F10.7_A$  и аналогичного индекса числа солнечных пятен SSN2<sub>A</sub> иллюстрируются на рис. 2a, б. Здесь показаны ежедневные значения числа солнечных пятен SSN2 с 1848 г. и F10.7 с 1947 г. по 2021 г. и соответствующие им 81-дневные сглаженные индексы SSN2<sub>A</sub> и F10.7<sub>A</sub>. Видно, что сглаженные индексы SSN2<sub>A</sub> и F10.7<sub>A</sub> хорошо отображают долговременные изменения CA и в этом качестве пригодны для использования с ионосферной моделью.



**Рис. 2.** Долговременные изменения ежедневных значений индексов солнечной активности и 81-дневного скользящего среднего: (*a*) число солнечных пятен SSN2; (*б*) поток солнечного радиоизлучения *F*10.7.

Для определения прокси-индекса типа  $F10.7_{A}$ или аналогичного прокси-индекса по числу солнечных пятен SSN2, в реальном времени мы имеем наблюдаемые ежедневные значения индексов F10.7 и SSN2 за предылушие 40 дней. К ним необходимо добавить прогноз ежедневных индексов на текущий день и прогноз для последующих 40 дней. Такого типа прогноз на 45 дней имеется в открытом доступе в Интернет для индекса F10.7 (USAF-45DF), предоставляемый ежедневно Центром прогноза космической погоды NOAA/ SWPC (https://swpc-drupal.woc.noaa.gov/products/ usaf-45-day-ap-and-f107cm-flux-forecast). Методика расчета USAF-45DF неизвестна, а использование результатов прогноза зависит от регулярной доступности в сети. Метода среднесрочного прогноза числа солнечных пятен SSN2 на 45 дней до настояшего времени не сушествует, а он также необходим для управления ионосферной моделью. Поэтому необходимо разработать независимый метод прогноза двух параметров СА – числа солнечных пятен SSN2 и потока солнечного радиоизлучения F10.7 на 45 дней.

Целью данной работы является разработка модели прогноза солнечной активности по индексам *F*10.7 и SSN2 на 45 дней (MSA45) для использования с ионосферной моделью в реальном времени.

#### 2. МЕТОД ПРОГНОЗА

Представим ежедневные индексы СА в зависимости от фазы Ф солнечного цикла:

$$\Phi = \pm \frac{Yd - m}{M - m},\tag{1}$$

$$Yd = Y + \frac{(doy - 1)}{nnd}.$$
 (2)

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ том 62 № 5 2022

Здесь параметр Yd означает день года, представленный в виде суммы: года Y и дробной части (формула 2), выраженной через номер дня в году doy и годового числа дней nnd (366 в високосном году и 365 дней в остальные годы). В данной статье под понятием фазы роста солнечного цикла понимается отрезок времени [m, M] от точки минимума цикла m до точки максимума M, фаза спада [M, m] – от максимума M до минимума m СЦ. Момент Yd относится к ближайшей паре предельных значений:  $m \le Yd \le M$  или  $M \ge Yd \ge m$ . Знак "+" в формуле (1) относится к восходящей ветви СЦ, знак "—" к нисходящей ветви.

Ежедневные индексы *F*10.7 приведены на рис. За и индексы SSN2 на рис. Зб для СЦ22 и СЦ23 в зависимости от фазы  $\Phi$ , где фаза роста показана для значений  $0 \le \Phi \le 1$ , и фаза спада для значений  $-1 \le \Phi \le 0$ . На практике фаза роста СЦ предшествует фазе спада цикла, но здесь они показаны в зависимости от  $\Phi$ , меняющейся от -1 до +1. Видно подобие изменения тех и других классов индексов в двух последовательных циклах.

Более детально подобие ежедневных индексов в 22, 23 и 24-м солнечных циклах иллюстрируется в таблице 1. В ней приводится коэффициент корреляции Пирсона:

$$\rho = \frac{\sum_{1}^{n} (y_i - y_m)(x_i - x_m)}{\sqrt{\sum_{1}^{n} (y_i - y_m)^2} \sqrt{\sum_{1}^{n} (x_i - x_m)^2}},$$
(3)

где n — число сравниваемых индексов в паре двух солнечных циклов;  $y_i$  и  $x_i$  — индивидуальные значения индексов в каждом из циклов, представленные в зависимости от фазы цикла  $\Phi$ ;  $y_m$  и  $x_m$  средние значения индексов за каждый СЦ. Из таблицы 1 виден высокий уровень корреляции



**Рис. 3.** Ежедневные индексы солнечной активности в зависимости от фазы солнечного цикла Ф в 22 и 23-м циклах СА: (*a*) поток солнечного радиоизлучения *F*10.7; (*б*) число солнечных пятен SSN2.

( $\rho \ge 0.8$ ) во всех случаях. Наиболее высокий коэффициент корреляции ( $\rho \ge 0.98$ , выделенный жирным шрифтом) наблюдается между парами индексов *F*10.7 и SSN2 для одного и того же СЦ. Мы приходим к выводу, что для среднесрочного прогноза ежедневных индексов на 45 дней в текущем СЦ можно использовать базу данных в предыдущем СЦ для соответствующих значений фазы цикла  $\Phi$ .

Не уменьшая общности, будем считать, что высокая корреляция между индексами в двух последовательных циклах сохраняется также на малых промежутках времени. В частности, рассмотрим промежуток в течение 45 дней, предшествующих выбранному значению фазы цикла Ф в текущем цикле, и сравним его с изменениями индекса в предыдущем СЦ. Будем обозначать ряд индексов текущего СЦ как "модельную" серию (*MS*), а предыдущего СЦ как "тренировочную" серию (*TS*). Аппроксимация зависимости между этими наборами данных выражается полиномом 2-й степени (формула 4а):

$$f(x) = p_1 x^2 + p_2 x + p_3.$$
 (4a)

В уравнении (4а) переменная *х* представляет ряд ежедневных индексов из *TS* в течение –45 дней  $(d_{TS} = -45d_{TS} \dots -1d_{TS})$  до момента Ф, переменная *у* из *MS* изменяется в течение –45 дней  $(d_{MS} = -45d_{MS} \dots -1d_{MS})$  до момента Ф, а коэффициенты  $p_1, p_2, p_3$  определяются статистически методом наименьших квадратов.

Для прогноза на последующие 45 дней ( $d_{MS} = 1d_{MS} \dots 45d_{MS}$ ) используем формулу (46) с подстановкой коэффициентов  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  из уравне-

**Таблица 1.** Коэффициент корреляции между ежедневными индексами солнечной активности SSN2 и *F*10.7 в солнечных циклах (СЦ) 22, 23 и 24, представленными в зависимости от фазы солнечного цикла Ф

Индекс(СЦ)	SSN2(22)	SSN2(23)	SSN2(24)	F10.7(22)	F10.7(23)	F10.7(24)
SSN2(22)	1.00	0.94	0.81	0.99	0.95	0.82
SSN2(23)		1.00	0.85	0.93	0.99	0.85
SSN2(24)			1.00	0.80	0.85	0.98
F10.7(22)				1.00	0.94	0.81
F10.7(23)					1.00	0.85
F10.7(24)						1.00



**Рис. 4.** (*a*) Связь между индексами *F*10.7, наблюдаемыми в текущем и предшествующем циклах СА в течение –45 дней до фиксированного значения Ф в начале прогноза. (*б*) Данные наблюдений и прогноз индекса *F*10.7 с 20.12.2021 г. по 2.02.2022 г.: модель MSA45 (звездочки) и USAF-45DF (крестики).

ния (4а) и дополнением калибровочного весового коэффициента *w*<sub>d</sub>:

$$f(x) = w_d(p_1 x^2 + p_2 x + p_3).$$
(46)

Значения параметра *х* для прогноза вводятся в (46) из ежедневных наблюдений соответствующих индексов в *TS* для 45 дней ( $d_{TS} = 1d_{TS}$  ...  $45d_{TS}$ ), начиная от значения Ф. Калибровочный весовой коэффициент  $w_d$  линейно изменяется ото дня ко дню  $d = d_{MS}$  (d = 1, ..., 45) по формуле:

$$w_d = w_{d-1} + \left( y(-1d_{MS}) / f(x(1d_{TS})) - 1 \right) / 45.$$
 (5)

Здесь параметр  $w_0 = y(-1d_{MS})$  – последнее наблюдаемое значение индекса *MS* до начала прогноза. Величина  $f(x(1d_{TS}))$  вычисляется по формуле (4а) с подстановкой индекса  $x(1d_{TS})$ . Весовые коэффициенты  $w_d$  в уравнении (4б) позволяют улучшить прогноз путем масштабирования зависимости (4а) к наблюдаемым индексам в текущем СЦ.

Расчеты по указанной методике выполняются последовательно для индексов *F*10.7 и SSN2. В результате получаем прогноз каждого из указанных параметров на 45 дней. Прогноз *F*10.7 и SSN2 выполняется ежедневно, и результаты предоставляются в открытом доступе на сайте "Ионосферная погода" ИЗМИРАН (https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/).

Связь между наборами соответствующих индексов за — 45 дней до прогнозируемого начального значения  $\Phi$  в модельном ряде *MS* от 5.11.2010 г. по 19.12.2010 г. и ряде *TS* от 5.11.2021 г. по 19.12.2021 г. приведена на рис. 4*a*. Аппроксимация полиномом 2-го порядка по формуле (4а) показана сплошной кривой. На рис. 4*б* приведены данные наблюдений индекса *F*10.7 с 20.12.2021 г. по 2.02.2022 г. (кривая с кружочками) и результаты прогноза MSA45 по формулам (4а), (4б) и (5) (кривая со звездочками). Для сравнения начерчен также прогноз USAF-45DF (штриховая кривая с крестиками) на тот же период времени. Среднеквадратичная ошибка прогноза MSA45 составляет 15.8 ед., что значительно меньше, чем ошибка прогноза USAF-45DF (24.4 ед.).

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗА

Результаты прогноза индекса F10.7 показаны на рис. 5*a* и индекса SSN2 на рис. 5*b*. Прогнозы на 45 дней представлены по модели MSA45, выполненные ежедневно в течение 12 дней с 19.12.2021 г. по 31.12.2021 г. Для сравнения показаны наблюдения (кривая с кружками) с 20.12.2021 г. по 2.02.2022 г. Виден последовательный сдвиг прогнозируемого ряда день ото дня. При этом сохраняется подобие формы между кривыми, основанное на соответствии результатов прогноза модельного ряда *MS* наблюдаемым данным ряда *TS* (формулы 4a, 6–5), которое медленно изменяется на отрезке длиной в 45 дней, со сдвигом на 1 день ото дня ко дню в течение 13 последовательных дней.

На рисунке 6 приведены примеры прогноза на 45 дней по модели MSA45 для низкой CA (вверху, 2008 г.) и высокой CA (внизу, 2015–2016 гг.). Левая часть относится к индексу SSN2, правая часть – к индексу F10.7. Прогноз сравнивается с наблюдениями (кривая с кружками). Кроме того, для сравнения приведен прогноз USAF-45DF параметра F10.7 (рис. 66, *е* – штриховая линия). Среднеквадратичное отклонение прогноза MSA45 со-



Рис. 5. Данные наблюдений и результаты прогноза, выполненные ежедневно в течение 12 дней с 19.12.2021 г. по 31.12.2021г.: (*a*) индекс F10.7; (*b*) индекс SSN2.



**Рис. 6.** Сравнение наблюдений и прогноза на 45 дней для низкой СА (*a*, б) и высокой СА (*b*, *c*). (*a*, *b*) данные и прогноз по модели MSA45 и USAF-45DF индекса SSN2; (*b*, *c*) данные и прогноз по модели MSA45 и USAF-45DF индекса F10.7.

ставляет (в единицах индекса): (*a*) 5.1; (*b*) 2.7; (*b*) 23.1; (*c*) 31.0. Среднеквадратичное отклонение прогноза USAF-45DF составляет: (*b*) 10.6; (*c*) 35.6, что превышает погрешность прогноза MSA45 от 15% в максимуме CA до 50% в минимуме CA. Результаты показывают улучшение точности прогноза по модели MSA45 по сравнению с прогнозом USAF-45DF.

### 4. ВЫВОДЫ

Разработан метод прогноза солнечной активности на 45 дней (MSA45) с использованием индекса потока солнечного радиоизлучения, F10.7, и числа солнечных пятен, SSN2. Модель основана на подобии данных в текущей фазе солнечного цикла с индексами СА в аналогичной фазе предыдущего солнечного цикла. Входными параметрами модели являются ежедневные индексы СА F10.7 или SSN2 за 45 предыдущих дней ( $d_{-45}$ , ...,  $d_{-1}$ ), фаза солнечного цикла  $\Phi(d)$  для текущего дня, и ежедневные индексы CA за 45 последующих дней ( $d_1$ , ...,  $d_{45}$ ) дней в соответствующей фазе  $\Phi$  предшествующего солнечного цикла.

Предлагается использовать прогноз на 45 дней для определения 81-дневного сглаженного прокси-индекса СА для управления эмпирическими ионосферными моделями вместо прогноза 12-месячных сглаженных индексов солнечной активности, которые запаздывают на 6 месяцев по отношению к текущему моменту времени. Прогноз числа солнечных пятен SSN2 на 45 дней выполнен впервые с точностью от 5.1 ед. при низкой СА до 23.1 ед. при высокой СА. Сравнение прогноза индекса F10.7 по модели MSA45 с прогнозом этого параметра USAF-45DF и с наблюдательными данными показало улучшение точности прогноза от 15% в максимуме СА до 50% в минимуме СА. Наш метод прогноза может быть применен к любым индексам солнечной активности, если имеются непротиворечивые данные измерений этого индекса в текущем и предыдущем солнечном цикле.

### 5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность редактору журнала и уважаемым рецензентам статьи за уделенное время и внимание, а также за ценные замечания и предложения. Мы ценим роль редактора и рецензентов в процессе публикации наших работ, которые являются их первыми читателями и квалифицированными критиками.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке совместного проекта Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-52-250001\_Кипр\_а, и Национального исследовательского фонда Кипра RPF Bilateral/Russia(RFBR)1118/0004 (RENAM).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гуляева Т.Л. Модификация индексов солнечной активности в международной справочной модели ионосферы IRI и IRI-Plas в связи с пересмотром ряда чисел солнечных пятен // Солнечно-земная физика. Т. 2. № 3. С. 59–68.

https://doi.org/10.12737/20872. https://naukaru.ru/ru/nauka/ issue/660/view. 2016.

— Данилов А.Д., Константинова А.В. Тренды параметров слоя F2 и 24-й цикл солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 5. С. 619–630. 2020. https://doi.org/10.31857/S0016794020050041

*— Данилов А.Д.* Индексы солнечной активности в 24-м цикле и поведение слоя *F*2 ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 61. № 2. С. 218–223. 2021. https://doi.org/10.31857/S0016794021020048

*— Деминов М.Г., Непомнящая Е.В., Обридко В.Н.* Индексы солнечной активности для параметров ионосферы в циклах 23 и 24 // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 1. С. 3–8. 2020.

#### https://doi.org/10.31857/S0016794020010058

- Balogh A., Hudson H.S., Petrovay K., von Steiger R. Introduction to the solar activity cycle: Overview of causes and consequences // Space Sci. Rev. V. 186. N 1. P. 1–15. 2014. - *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. V. 186. P. 35–103. 2014.

- Gulyaeva T.L., Bilitza D. Towards ISO Standard Earth Ionosphere and Plasmasphere Model // New Developments in the Standard Model. Ed. R.J. Larsen. P. 1–39. New York: NOVA. Hauppauge. https://ftp.izmiran.ru/ pub/izmiran/SPIM/NOVA2012GulyaevaBilitza.pdf. 2012. https://ftp.izmiran.ru/pub/izmiran/SPIM/NOVA2012 GulyaevaBilitza.pdf

- Gulyaeva T.L., Arikan F., Sezen U., Poustovalova L.V. Eight proxy indices of solar activity for the International Reference Ionosphere and Plasmasphere model // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 172. P. 122–128. 2018. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.03.025

- Gulyaeva T.L. Predicting indices of the ionosphere response to solar activity for the ascending phase of the 25th solar cycle // Adv. Space Res. V. 63. Is. 5. P. 1588–1595. 2019.

https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.11.002

- *Kalman R.E.* A new approach to linear filtering and prediction problems // Trans. ASME J. Basic Eng. V. 82. P. 35. 1960.

– Laštovička J., Burešová D., Kouba D., Križan P. Stability of solar correction for calculating ionospheric trends // Ann. Geophys. V. 34. P. 1191–1196. 2019.

-Liu L., Wan W., Ning B. et al. Solar activity variations of the ionospheric peak electron density // J. Geophys. Res. – Space. V. 111. A08304. 2006. https://doi.org/10.1029/2006JA011598

- Liu L.B., Wan W.X., Chen Y.D., Le H.J. Solar activity effects of the ionosphere: A brief review // Chinese Sci. Bull. V. 56. N 12. P. 1202–1211. 2011. https://doi.org/10.1007/s11434-010-4226-9

- Podladchikova T., Van der Linden R. A Kalman Filter Technique for Improving Medium-Term Predictions of the Sunspot Number // Solar Phys. V. 277. P. 397–416. 2012. https://doi.org/10.1007/s11207-011-9899-y

*– Shubin V.N., Gulyaeva T.L.* Solar forcing on the ionosphere: Global model of the F2 layer peak parameters driven by re-calibrated sunspot numbers // Acta Astronautica. V. 179. P. 197–208. 2021.

https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.10.029

*– Shubin V.N., Gulyaeva T.L.* Global mapping of Total Electron Content from GNSS observations for updating IRI-Plas model // Adv. Space Res. V. 69. № 1. P. 168–175. 2022.

https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.09.032