### АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

### Циклические вариации потоков солнечного излучения в начале XXI века

Е. А. Бруевич<sup>*a*</sup>, В. В. Бруевич<sup>*a*</sup>, Г. В. Якунина<sup>*b*</sup>

Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ). Россия, 119234, Москва, Университетский пр-т, д. 13. E-mail: <sup>a</sup> red-field@yandex.ru, <sup>b</sup> yakunina@sai.msu.ru

Статья поступила 19.04.2017, подписана в печать 02.06.2017.

Анализируется солнечная активность в текущем 24-м цикле. Проведены оценки циклических вариаций числа солнечных пятен (SSN) и потоков излучения в различных спектральных диапазонах в сравнении с общим уровнем излучения Солнца, традиционно определяемым по потоку радиоизлучения  $F_{10.7}$  на волне 10.7 см (2.8 ГГц). Сравнительный анализ вариаций солнечной постоянной и солнечных индексов в УФ-диапазоне, важных параметров для моделирования состояния земной атмосферы, в слабом 24-м цикле и сильных 22-м и 23-м циклах показал относительные различия в амплитудах вариаций от минимума к максимуму цикла. Учет влияния эффекта гистерезиса между индексами активности и  $F_{10.7}$  в 24-м цикле дает возможность уточнить прогноз УФ-индексов и солнечной постоянной в зависимости коэффициентов квадратичной регрессии, связывающие солнечные индексы с  $F_{10.7}$ , в зависимости от фазы цикла.

*Ключевые слова*: активность Солнца, индексы активности, циклы солнечной активности. УДК: 523.98: 523.982. PACS: 96.60.Q-, 96.60.Ub, 96.60.tg, 96.60.qd.

### Введение

Анализ солнечной активности имеет большое практическое значение для понимания физических явлений, происходящих на Солнце, прогнозирования космического климата и процессов в земной атмосфере. Активность Солнца с 1650 года оценивалась по индексу относительного числа солнечных пятен (SSN). С 1947 г. начались регулярные радионаблюдения Солнца на волне 10.7 см (2.8 ГГц) индекс F<sub>10.7</sub>. Он связан с излучением от всего диска и в настоящее время чаще других используется при мониторинге и прогнозе солнечной активности. Переменность солнечного излучения при наблюдениях SSN и  $F_{10.7}$  характеризуется цикличностью, длительность основного цикла пятнообразовательной деятельности Солнца (цикл Швабе-Вольфа) составлет примерно 11 лет. Текущий 24-й цикл активности является самым слабым солнечным циклом более чем за последние 100 лет. Следующий минимум солнечной активности между циклами 24 и 25 ожидается примерно в 2018-2019 гг. В 24-м цикле сохраняется тенденция последних лет, связанная с заметным уменьшением вариаций солнечных пятен в 11-летнем цикле. После максимума 21-го цикла (примерно в 1980 г.) в последующих 22-м-23-м циклах четно-нечетный порядок объединения солнечных циклов по правилу Гневышева-Оля не соблюдается. Согласно этому правилу четные солнечные циклы являются более слабыми, чем следующие за ними нечетные. Многие ученые, занимающиеся прогнозом солнечной активности в NASA, полагают,

что 25-й цикл активности будет примерно таким же, как 24-й цикл, или слабее.

На рис. 1 представлены ряды числа солнечных пятен SSN и относительных площадей солнечных пятен А, измеряемых в миллионных долях полусферы (мдп или mvh). Данные получены с 1600 по 1850 гг. согласно косвенным оценкам и с 1850 г. по настоящее время согласно прямым наблюдениям (достоверный ряд) [1]. В сильных циклах максимум SSN достигает величины порядка 250, суммарная площадь А — 1400. В самых слабых — амплитуды в 4-5 раз меньше. Видно, что ряды SSN и A хорошо скоррелированы между собой. Отмечены минимум Маундера (по оценкам площадей пятен с 1645 по 1715 гг.) и минимум Дальтона (с 1790 по 1820 гг.). Минимум, наблюдаемый в настоящее время, имеет вид, сходный с минимумом Дальтона. Он связан, по-видимому, с одновременным наступлением в начале XXI в. минимумов вековой и двухвековой цикличности, которые накладываются на 11-летнюю цикличность. В [2] проведено численное моделирование вариаций солнечной активности с использованием данных наблюдений числа солнечных пятен за период 1750-2050 гг. С учетом механизма формирования магнитных полей в солнечных пятнах на основе представлений теории динамо решалось уравнение эволюции для ряда числасолнечных пятен. Результаты моделирования [2] хорошо коррелируют с наблюдениями и прогнозируют длительный период низкой активности вплоть до 2050 г., сходный с минимумом Дальтона: ожидается, что последующие циклы 25 и 26 также будут относительно слабыми.



Рис. 1. Среднеговые значения отночительного числа солнечных пятен с 1700 по 2016 гг. (внизу) и суммарная площадь солнечных пятен с 1600 по 2016 г. (вверху)

В настоящее время налажен непрерывный мониторинг нескольких глобальных индексов солнечной активности с целью отслеживания ситуации на Солнце и построения различных прогнозов. Высокая степень корреляции потока на волне 10.7 см *F*<sub>10.7</sub> со всеми основными индексами активности предполагает сильную зависимость индексов от параметров плазмы, где эти потоки формируются, притом что области их формирования пространственно близки. Цели работы:

 изучение солнечной активности в 24-м цикле с помощью наблюдений в различных диапазонах спектра;

 определение для 24-го цикла и последующих слабых циклов коэффициентов квадратичной регрессии для прогноза величины индексов в зависимости от общего уровня активности Солнца с учетом фазы цикла.

### 1. Индексы солнечной активности в 24-м цикле. Сравнение с 22-м и 23-м циклами

### 1.1. Относительное число солнечных пятен в 22-м-24-м циклах

Индекс относительного числа солнечных пятен W (в настоящее время используется термин SSN), определенный Рудольфом Вольфом как  $W = k \cdot (f + 10g)$ , где f — число всех отдельных пятен на диске, g — число образованных ими групп), отражает вклад в солнечную активность не только от самих пятен, но и от всей активной области, в основном занятой факелами. Индекс SSN хорошо согласуются с современными более точными индексами, например с величиной потока радиоизлучения  $F_{10.7}$ . Ряды наблюдений этих двух индексов активности самые длинные среди остальных индексов, большая часть которых наблюдается



Рис. 2. Временные ряды наблюдений среднемесячных величин относительного числа солнечных пятен в 22-м, 23-м и 24-м циклах. Зависимость от времени с начала цикла

с использованием спутниковой аппаратуры с 70-х гг. прошлого века. На рис. 2 приводятся среднемесячные данные наблюдения числа солнечных пятен в 22-м, 23-м и 24-м циклах активности. Сплошными линиями показаны линии квадратичной регрессии, когда минимизируется сумма квадратов отклонений наблюдаемых среднемесячных значений относительного числа солнечных пятен от их оценок (имеются в виду оценки с помощью линий регресси). Эти линии регрессии практически совпадают с линиями, описывающими скользящие средние величины с периодом, равным году. Скользящие средние обычно используются с данными временных рядов для сглаживания краткосрочных колебаний и выделения основных тенденций или циклов. Видно, что в 23-м цикле число пятен заметно меньше, чем в 22-м цикле, которые, наряду с 19-м циклом, являются самыми сильными за последние 140 лет. В 24-м цикле число пятен уменьшилось уже в два раза по сравнению с 22-м циклом. Это связано, согласно [1], с одновременным наступлением минимумов столетнего и двухсотлетнего цикла. С помощью частотно-временного анализа рядов среднегодовых значений числа солнечных пятен в [3, 4] подтверждено существование циклов с вековым и двухвековым периодами, минимумы которых приходятся на начало XXI века.

### 1.2. Поток радиоизлучения F<sub>10.7</sub> в 22-м — 24-м циклах

Поток излучения  $F_{10.7}$ , наряду с относительным числом солнечных пятен, является наиболее часто используемым солнечным индексом, характеризующим текущий уровень активности Солнца. Этот поток измеряется в единицах «sfu» (solar flux units). 1 sfu соответствует потоку в  $10^{-22}$  Вт·м<sup>-2</sup>. Гц<sup>-1</sup>.

Данные об  $F_{10.7}$  и относительном числе солнечных пятен доступны в архиве http://lasp.colorado. edu/lisird/tss/noaa\_radio\_flux.html.

На рис. З приводятся среднемесячные данные наблюдения F<sub>10.7</sub> в 22-м, 23-м и 24-м циклах активности. Видно, что 22-й и 23-й циклы имеют очень похожий вид и практически равны по величине за исключением того, что 23-й цикл длиннее на 2 года. В 24-м цикле потоки уменьшаются почти в два раза по сравнению с 22-м циклом, что согласуется с вариациями числа солнечных пятен. Поток F<sub>10.7</sub> от полного диска Солнца, доступный в режиме реального времени, достаточно хорошо коррелирует с потоками в УФ-области солнечного спектра. Он может использоваться в качестве базового индекса для прогноза потоков и в этих интервалах солнечного спектра в моменты, когда существуют пропуски в спутниковых наблюдениях или когда требуются данные УФ-наблюдений в режиме реального времени.



Рис. 3. Временные ряды наблюдений среднемесячных величин потока радиоизлучения F<sub>10.7</sub> в 22-м, 23-м и 24-м циклах. Зависимость от времени с начала цикла

# 1.3. Поток ультрафиолетового излучения в линии MgII 280 нм (ядро/крылья) в 22-м — 24-м циклах

Поток излучения от Солнца в УФ-области составляет малую часть в общем потоке излучения Солнца, но при этом играет заметную роль в формировании верхней атмосферы Земли. Потоки ультрафиолетового и рентгеновского излучений являются входными параметрами во все ионосферные модели земной атмосферы.

Индекс MgII (280 нм), характеризующий отношение потоков в центре и в крыльях, непрерывно наблюдается со спутников с 1970-х гг. Этот индекс является хорошим индикатором состояния как солнечной хромосферы (ядро линии), так и фотосферы (крылья линии). Индекс MgII (ядро/крылья) измеряется в относительных величинах.



*Рис.* 4. Данные наблюдений MgII 280 нм (ядро/ /крылья) на спутниках GOME (1995–2011), SCIAMACHY (2002–2012), GOME-2A (2007–2017) и GOME-2B (2012–2017) по архивным данным Bremen composite в 22-м, 23-м и 24-м циклах. Зависимость от времени с начала цикла

На рис. 4 приводятся среднемесячные данные спутниковых наблюдений в 22-м-24-м циклах, приведеные к единой абсолютной калибровке [5]. Архив данных доступен на http://www.iup.unibremen.de/UVSAT/Datasets/mgii. Видно, что максимальные амплитуды в циклах 22 и 23 практически одной величины, тогда как максимальная амплитуда в 24-м цикле заметно меньше. Индекс MgII (ядро/крылья) очень хорошо коррелирует с  $F_{10.7}$ , эти индексы характеризуют как состояние солнечной активности в целом, так и области верхней хромосферы и нижней короны, где они формируются.

### 1.4. Поток ультрафиолетового излучения в линии Лайман-альфа 121.6 нм в 22-м—24-м циклах

Поток излучения в ультрафиолетовой линии водорода Лайман-альфа  $F_{L\alpha}$  от полного солнечного диска — важный индикатор, характеризующий состояние хромосферы и переходной области [6].  $F_{L\alpha}$  измеряется в 10<sup>11</sup> phot·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.



Рис. 5. Данные наблюдений  $F_{L\alpha}$  121.6 нм на спутниках AE-E, SME и UARS в циклах 22, 23 и 24. Зависимость от времени с начала цикла

На рис. 5 приводятся среднемесячные данные спутниковых наблюдений с 1976 г. по настоящее время, приведеные к единой абсолютной калибровке в лаборатории атмосферной и космической физики в университете Колорадо (Lyman alpha composite). Архив этих данных доступен на http://lasp.colorado.edu/lisird/tss/composite\_ lyman\_alpha.html. Видно, что максимальные амплитуды в циклах 22 и 23 немного различаются, тогда как максимальная амплитуда в 24-м цикле заметно меньше. Тот факт, что существует хорошая корреляция  $F_{L\alpha}$  с потоком излучения на волне 10.7 см, использовался в Lyman alpha composite в моменты, когда не было прямых спутниковых наблюдений *F*<sub>Lα</sub>, вычислялся согласно текущим корреляционным соотношениям с F<sub>10.7</sub>.

## 1.5. Солнечная постоянная TSI (Total Solar Irradiation) в 22-м, 23-м и 24-м циклах

Солнечная постоянная — суммарная мощность солнечного излучения, проходящего через единичную площадку, ориентированную перпендикулярно потоку, на расстоянии одной астрономической единицы от Солнца вне земной атмосферы. На величину влияют два основных фактора: расстояние между Землей и Солнцем, изменяющееся в течение года по причине эллиптичности орбиты Земли, и изменения солнечной активности. Вариации в солнечном цикле связаны с изменением потока излучения при изменении числа и суммарной площади солнечных пятен, суммарной площади и относительнойь яркости факелов, при этом поток излучения меняется сильнее всего в ультрафиолетовом, рентгеновском и радиодиапазоне. Существуют два основных ряда наблюдений полной солнечной радиации TSI composite — ACRIM и РМОД. С 1978 по 2008 гг. ACRIM composite демонстрирует слабо положительный временной тренд, PMOD composite - слабо отрицательный тренд.



Рис. 6. Солнечная постоянная (TSI) согласно наблюдениям на спутниках Nimbus 7, ACRIM 1–3 по архивным данным TSI PMOD composite — в циклах 22, 23 и 24 в зависимости от времени с начала цикла

На рис. 6 приводятся среднемесячные данные спутниковых наблюдений в 22-м-24-м циклах, приведеные к единой абсолютной калибровке TSI PMOD composite [7, 8], доступные на http://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solardata/solar-indices/total-solar-irradiance/. Как в случае со спутниковыми наблюдениями в ультрафиолетовой области спектра, нет единого спутника, который непрерывно измеряет TSI за последние 30 лет. Сравнительный анализ современных рядов, приведенных к единому стандарту с помощью разных моделей — ACRIM composite и PMOD composite — показал, что последний ряд, использующий калибровочную модель SATIRE-S, наиболее реально отражает вариации TSI [9]. Видно, что вариации солнечной постоянной в циклах 22 и 23 практически не различаются, тогда как потоки в 24-м цикле заметно меньше.

# 2. Эффект гистерезиса индексов солнечной активности в 24-м цикле. Прогноз величин потоков

В соответствии с исследованиями последних лет, в частности [2], следующий цикл активности 25, начало которого ожидается в 2018-2019 гг., будет примерно равным по силе или чуть слабее, чем текущий цикл 24. В [10] на основе анализа эффекта гистерезиса (проявляющегося в неоднозначной взаимосвязи между потоками солнечного излучения на фазах роста и спада цикла) выявлены закономерности, позволяющие для циклов 22 и 23 прогнозировать величины различных индексов активности по величине потока F<sub>10.7</sub>. Поскольку для взаимосвязи индексов с F<sub>10.7</sub> на фазах роста и спада цикла существуют значимые различия (с уровнем значимости  $\alpha = 0.05$ ), важно исследовать регрессионные соотношения отдельно для этих фаз с целью повысить качество прогноза индексов. Исследования эффекта гистерезтса солнечных индексов в 24-м цикле может быть полезно для прогноза величин потоков излучения в 25-м цикле, который ожидается подобным

$AI \leftrightarrow F_{10.7}$	A	<i>C</i> <sub>1</sub>	$C_2$	σΑ	$\sigma C_1$	$\sigma C_2$
$SSN \leftrightarrow F_{10.7}, R$	-169.54	2.88	-0.0057	5.32	0.07	$5.18 \cdot 10^{-4}$
$SSN \leftrightarrow F_{10.7}, D$	-115.55	2.01	-0.0028	7.71	0.08	$7.47 \cdot 10^{-4}$
$TSI \leftrightarrow F_{10.7}, \ R$	1358.68	0.037	$-1.37 \cdot 10^{-4}$	0.071	0.0014	$6.71 \cdot 10^{-6}$
$TSI \leftrightarrow F_{10.7}, D$	1359.58	0.022	$-7.51 \cdot 10^{-5}$	0.301	0.0043	$1.49\cdot 10^{-5}$
$F_{L\alpha} \leftrightarrow F_{10.7}, \ \mathbf{R}$	1.43	0.039	$-1.15 \cdot 10^{-4}$	1.43	$9.38 \cdot 10^{-4}$	$4.32\cdot 10^{-6}$
$F_{L\alpha} \leftrightarrow F_{10.7}, D$	1.94	0.031	$-7.48 \cdot 10^{-5}$	0.062	$9.87\cdot 10^{-4}$	$3.79\cdot 10^{-6}$
MgII $\leftrightarrow$ $F_{10.7}$ , R	0.134	$2.85\cdot 10^{-4}$	$-6.91 \cdot 10^{-7}$	$2.52\cdot 10^{-4}$	$4.9\cdot 10^{-6}$	$2.23\cdot 10^{-8}$
MgII $\leftrightarrow$ $F_{10.7}$ , D	0.135	$2.75\cdot 10^{-4}$	$-6.19 \cdot 10^{-7}$	$5.33\cdot 10^{-4}$	$8.65\cdot 10^{-6}$	$3.39\cdot 10^{-8}$
$F_{0.1-0.8} \leftrightarrow F_{10.7}, \mathbf{R}$	$2.03\cdot 10^{-7}$	$-1.15 \cdot 10^{-8}$	$1.3 \cdot 10^{-10}$	$1.1 \cdot 10^{-8}$	$1.2 \cdot 10^{-9}$	$5.81 \cdot 10^{-12}$
$F_{0.1-0.8} \leftrightarrow F_{10.7}, D$	$-1.7 \cdot 10^{-6}$	$2.8 \cdot 10^{-8}$	$-4.1 \cdot 10^{-11}$	$0.9 \cdot 10^{-7}$	$1.1 \cdot 10^{-9}$	$3.19 \cdot 10^{-12}$

Коэффициенты квадратичной регрессии для ежедневных значений солнечных индексов активности (AI) в 22-м цикле на фазах роста (R — rise) и спада (D — decline)

24-му циклу по силе и длительности. Коэффициенты квадратичной регрессии, описывающие соотношения между индексами активности и потоком  $F_{10.7}$  на фазах роста и спада слабого цикла, подобного циклу 24, представлены в таблице. Для прогноза величин потоков излучения в сильном цикле (как в 22-м) с учетом эффекта гистерезиса коэффициенты квадратичной регрессии представлены в [10].

На рис. 7, а показаны вариации ежедневных значений числа солнечных пятен в зависимости от  $F_{10.7}$  в 24-м цикле; сплошными линиями показаны кривые полиномиальной регрессии на фазах роста (rise cycle's phase) и спада (decline cycle's phase) солнечного цикла, рассчитанные для данных ежедневных наблюдений. Эффект гистерезиса солнечных индексов исследуется с помощью полиномов второго порядка. Использование полиномов более высоких порядков нецелесообразно, так как соответствующие

члены уравнений регрессии пренебрежимо малы. Оценивались RSS (Residual Sum of Squares) — меры несоответствия между наблюдательными данными и моделью (регрессионной линией). Небольшая величина RSS показывает плотное прилегание модели к данным. В нашем случае величины RSS минимальны при описании зависимости индексов активности от величины F<sub>10.7</sub> с помощью полиномов второго порядка. Видно, что на фазах роста и спада цикла существует неоднозначная связь между индексами, что связано с задержкой между временами наступления минимумов циклов у этих индексов [10, 11]. Максимальная величина гистерезиса (наибольшее относительное отклонение в цикле) составляет примерно 10-15%, что существенно при прогнозах величины солнечных индексов. На рис. 7,6 приведены данные ежедневных величин потоков F<sub>La</sub> в зависимости от F<sub>10.7</sub> в 24-м цикле. Сплошными



*Рис.* 7. a — Эффект гистерезиса ежедневных значений числа солнечных пятен в зависимости от  $F_{10.7}$ ,  $\delta$  — эффект гистерезиса ежедневных величин потока в линии Лайман-альфа (121.6 нм) в зависимости от  $F_{10.7}$ 



*Рис. 8. а* — Эффект гистерезиса ежедневных значений солнечной постоянной в зависимости от  $F_{10.7}$ ,  $\delta$  — эффект гистерезиса ежедневных MgII 280 нм (ядро/крылья) в зависимости от  $F_{10.7}$ ,  $\beta$  — эффект гистерезиса ежедневных  $F_{0.1-0.8}$  в зависимости от  $F_{10.7}$ 

линиями показаны кривые регрессии на фазах роста и спада солнечного цикла, рассчитанные для данных ежедневных наблюдений. В таблице приведены коэффициенты регрессии для ежедневных значений индексов солнечной активности отдельно для фаз роста и спада в соответствии с уравнением квадратичной регрессии (1), приведенным ниже. Видно, что в 24-м цикле величина гистерезиса (наибольшее относительное отклонение в цикле) достигает примерно 10–12 %.

На рис. 8, а показаны ежедневные значения солнечной постоянной TSI с использованием наблюдений TSI PMOD сотрозіте в зависимости от  $F_{10.7}$ в 24-м цикле. Отмечены кривые регрессии на фазах роста и спада солнечного цикла в соответствии с уравнением квадратичной регрессии (1). Видно, что величина гистерезиса достигает примерно 15% максимальной амплитуды вариации TSI в цикле.

На рис. 8,  $\delta$  приведены ежедневные значения индекса MgII 280 нм (ядро/крылья) с использованием данных MgII Bremen composite в зависимости от  $F_{10.7}$  в 24-м цикле. Величина гистерезиса в 24-м

цикле достигает примерно 7-10% максимальной амплитуды вариации MgII 280 нм в цикле.

На рис. 8, в приведены ежедневные значения величин потоков рентгеновского излучения вне вспышек в диапазоне 0.1-0.8 нм ( $F_{0.1-0.8}$ ) с использованием данных наблюдений на спутнике «GOES-15» [12]. Величина гистерезиса достигает примерно 10% максимальной амплитуды вариации  $F_{0.1-0.8}$  в 24-м цикле.

Квадратичные регрессии, показанные на рис. 7 и 8, для индексов активности (Activity Indices, AI) описываются как для фазы роста, так и для фазы спада уравнением

$$AI = A + C_1 \cdot F_{10.7} + C_2 \cdot F_{10.7}^2, \tag{1}$$

где A,  $C_1$  и  $C_2$  — коэффициенты квадратичной регрессии, представленные в таблице. С помощью коэффициентов квадратичной регрессии из таблицы можно прогнозировать ежедневные величины индексов солнечной активности по потоку  $F_{10.7}$ , доступному в режиме реального времени. Если речь идет о фазах роста и спада цикла активности,

учет различия коэффициентов регрессии для этих фаз позволяет улучшить точность прогноза величин индексов.

### Заключение

1. Анализ 24-го цикла солнечной активности, самого слабого среди всех циклов за последние сто лет, показал, что относительные различия в амплитудах вариаций индексов активности от минимума к максимуму цикла существенно изменяются при переходе от циклов 22 и 23 к 24-му циклу. При этом число солнечных пятен и поток в линии  $F_{L\alpha}$  сильно уменьшились уже в 23-м цикле по сравнению с циклом 22. Все остальные индексы активности в 22-м и 23-м циклах имеют примерно одинаковые амплитуды и уменьшаются в 2 раза в 24-м цикле.

2. Изучение эффекта гистерезиса между индексами активности и  $F_{10.7}$  в 24-м цикле показало, что в слабом 24-м цикле существуют значимые различия регрессионных коэффициентов на фазах роста и спада цикла. Коэффициенты регрессии на разных фазах цикла приведены в таблице. Учет влияния эффекта гистерезиса в 24-м цикле дает возможность уточнить прогноз вариаций УФ-индексов, солнечной постоянной и потока рентгеновского излучения  $F_{0.1-0.8}$  вне вспышек в слабых циклах.

### Список литературы

- Наговицын Ю.А., Тлатов А.Г., Наговицына Е.Ю. // Астрон. журн. 2016. 93. Р. 819. (Nagovitsyn Yu.A., Tlatov A.G., Nagovitsyna E.Yu. // Astronomy Reports. 2016. 60. Р. 831.)
- Kleeorin Y., Saifullin N., Kleeorin N. et al. // Monthly Notices of the Royal Astron. Soc. 2016. 460. P. 3960.
- Shimanovskaya E.V., Bruevich V.V., Bruevich E.A. // Research Astron. Astrophys. 2016. 16, N 9. P. 148.
- 4. Бруевич Е.А., Якунина Г.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2015. № 4. Р. 66. (Bruevich E.A., Yakunina G.V. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2015. **70**, N 4. P. 282.)
- 5. Snow M., Weber M., Machol J. et al. // J. Space Weather Space Clim. 2014. 4. P. A04.
- Bachmann K., White O. // Solar Phys. 1994. 150. P. 347.
- Krivova N.A., Solanki S.K. // J. Astrophys. Astron. 2008. 29. P. 151.
- 8. Yeo K.L., Krivova N.A., Solanki S.K., Glassmeier K.H. // Astron. Astrophys. 2014. **570**. P. A85.
- Kopp G., Krivova N., Lean J., Wu C.J. // Solar Phys. 2016. 291. P. 2951.
- Бруевич Е.А., Якунина Г.В. // Астрофизика. 2016. 59.
  P. 413. (Bruevich E.A., Yakunina G.V. // Astrophysics. 2016. 59. P. 369.)
- Bruevich E.A., Kazachevskaya T.V., Katushina V.V. et al. // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. 56, N 8. P. 1075.
- 12. «GOES-15» X-ray archive data.

### Cyclic variations in the solar radiation fluxes at the beginning of the 21st century

### E. A. Bruevich<sup>a</sup>, V. V. Bruevich<sup>a</sup>, G. V. Yakunina<sup>b</sup>

Sternberg State Institute of Astronomy, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119234, Russia. E-mail: <sup>a</sup> red-field@yandex.ru, <sup>b</sup> yakunina@sai.msu.ru.

The solar activity in the current, that is, the 24th, sunspot cycle is analyzed. Cyclic variations in the sunspot number (SSN) and radiation fluxes in various spectral ranges have been estimated in comparison with the general level of the solar radiation, which is traditionally determined by the radio emission flux  $F_{10.7}$  at a wavelength of 10.7 cm (2.8 GHz). The comparative analysis of the variations in the solar constant and solar indices in the UV range, which are important for modeling the state of the Earth's atmosphere, in the weak 24th cycle and strong 22nd and 23rd cycles has shown relative differences in the amplitudes of variations from the minimum to the maximum of the cycle. The influence of the hysteresis effect between the activity indices and  $F_{10.7}$  in the 24th cycle, which is taken into account here, makes it possible to refine the forecast of the UV indices and solar constant depending on the quadratic regression coefficients that associate the solar indices with  $F_{10.7}$  depending on the phase of the cycle.

Keywords: solar activity, activity indexes, cycles of solar activity. PACS: 96.60.Q-, 96.60.Ub, 96.60.tg, 96.60.qd. Received 19 April 2017.

English version: Moscow University Physics Bulletin. 2018. 72, No. 2. Pp. 216-222.

### Сведения об авторах

- 1. Бруевич Елена Александровна канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-16-72, e-mail: red-field@yandex.ru.
- 2. Бруевич Василий Владимирович науч. сотрудник; тел.: (495) 939-22-45, e-mail: brouev@sai.msu.ru.
- 3. Якунина Галина Валентиновна инженер; тел.: (495) 939-19-73, e-mail: yakunina@sai.msu.ru.