

# ТОНКАЯ СТРУКТУРА ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН (17 – 24-й ЦИКЛЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ). I. ДИНАМИКА СТРУКТУРЫ ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН В 17 – 24-м ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ДЛЯ ПЕРИОДОВ 120 – 220 ДНЕЙ. ВЫЧИСЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

И. П. Безродных, Е. И. Морозова,  
А. А. Петрукович, М. В. Кожухов

**Основная цель настоящей работы** изучение временной динамики структуры вариаций числа солнечных пятен для периодов  $\sim 120 - 220$  дней в 17 – 24-м циклах солнечной активности. Вариации солнечной активности с периодами  $\sim 120 - 220$  дней (Rieger-тип периодичности) наблюдаются на всех уровнях солнечной атмосферы, в хромосфере, фотосфере, солнечной короне, проявляются в динамике магнитосферных и гелиосферных параметров. Обнаруженные в различных солнечных, межпланетных и геомагнитных индексах эти вариации являются важным фактором для изучения взаимосвязи различных процессов в системе Солнце – Земля – гелиосфера. Анализируются спектры мощности вариаций суточных величин солнечных пятен в 17 – 24-х циклах солнечной активности. Отдельно для двух групп периодов 120 – 180 и 180 – 220 дней получены данные о тонкой структуре спектральных параметров вариаций солнечных пятен (периодов вариаций и спектральной мощности вариаций), показана связь динамики структуры вариаций солнечных пятен с динамикой числа солнечных пятен, в максимуме цикла солнечной активности (фактически с динамикой крупномасштабного магнитного поля). Были получены следующие зависимости: в диапазоне периодов 120 – 180 дней при увеличении числа солнечных пятен периоды вариаций уменьшаются (коэффициент корреляции отрицательный  $\sim -0,76$ ) и равен 182-м дням для 113 солнечных пятен (число пятен в максимуме солнечного цикла) и 126-ти дням при числе солнечных пятен 269; при увеличении числа солнечных пятен спектральная мощность вариаций для этих периодов значительно увеличивается (коэффициент корреляции достаточно высокий  $\sim 0,78$ ). Для обеих групп периодов вариаций 120 – 180 и 180 – 220 дней динамика периодов вариаций находится в противофазе с динамикой числа солнечных пятен в максимуме цикла, а динамика спектральной мощности вариаций – в фазе с динамикой числа солнечных пятен. Экспериментальные величины периодов вариаций послужили основой для вычисления напряженности крупномасштабных магнитных полей для 17 – 24-х солнечных циклов. Для вычисления использовалась зависимость между периодами вариаций и величиной магнитного поля для быстрой гармоника магнитных волн Россби с волновыми числами  $m = 1$ ,  $n = 4$ . Для периодов 120 – 180 дней регистрируется почти линейная связь между периодами вариаций и вычисленными значениями магнитного поля, с увеличением магнитного поля период вариаций уменьшается:  $V_{\max} = 26$  кГс для периода 182 дня (число солнечных пятен равно 113) и  $V_{\max} = 54,4$  кГс для периода 126 дней (число солнечных пятен равно 269). Полученные результаты указывают на прямую связь динамики числа солнечных пятен в максимуме цикла с динамикой магнитных полей (коэффициент корреляции  $R = 0,87$ ).

**Ключевые слова:** солнечные пятна, спектр мощности вариаций, волны Россби, волновые числа, крупномасштабное магнитное поле Солнца.

## Введение

Основная цель настоящей работы изучение временной динамики структуры вариаций числа солнечных пятен (SSN) для периодов  $\sim 120 - 220$  дней (Rieger-тип вариаций) и для квазидвухлетних вариаций  $\sim 1,2 - 2,5$  года (Quasi-biennial, QBO-периоды). Вариации с периодами  $\sim 158$  дней (Rieger-вариации) и с периодами  $\sim 1,2 - 3$  года (QBO-вариации, квазидвухлетние вариации) являются наиболее значимыми проявлениями динамики солнечной активности для периодов  $< 4$ -х лет. В настоящее время физические механизмы, ответственные за появление такого типа вариаций, неясны. Сравнение динамики основных спектральных параметров для обоих типов вариаций и их связи с динамикой солнечных пятен (фактически с динамикой магнитного поля) поможет решить вопрос – какие динамо-процессы (один или несколько) формируют эти типы вариаций. В первой части работы исследуется тонкая структура вариаций солнечных пятен в 17-м – 24-х циклах для периодов  $\sim 120 - 220$  дней. Тонкая структура вариаций для периодов 1,2 – 1,5 и 1,8 – 2,5 года рассмот-

рена во второй части. В третьей части работы проводится сравнение структуры вариаций и динамики спектральных параметров для вариаций Rieger-типа и QBO-вариаций.

Периоды  $\sim 154$  дней впервые были зарегистрированы в 1980 г. при анализе временного распределения  $\gamma$ -вспышек (энергия  $\sim 0,3 - 100$  МэВ) по измерениям на спутнике SMM (Solar Maximum Mission) [1]. Вариации с периодом  $\sim 158$  дней были выявлены в динамике площади и числа солнечных пятен [2]. Периоды  $\sim 150 - 158$  дней были обнаружены в распределении числа  $\text{Na}$  вспышек [3], в распределении вспышек с регистрацией высокоэнергичных протонов [4] и электронов [5, 6]), в динамике II и IV типов электромагнитного излучения [7]. На рис. 1 представлено распределение мощности вариаций в диапазоне 100 – 300 дней для параметров, определяющих солнечную активность: число всплесков III типа – электроны в короне от солнечных вспышек (черный цвет), число солнечных пятен (красный), солнечный 10,7 см поток (зеленый) и индекс солнечных вспышек (SFI, голубой) [8].

Максимумы распределений в диапазоне (кроме SFI) зарегистрированы для периода  $\sim 152$  дня, для SFI – для периода  $\sim 158$  дней (распределение более широкое). Исследование вариаций радиовсплесков в диапазоне частот 410 – 15 400 МГц показало присутствие вариации  $\sim 155$  дней на всех уровнях солнечной атмосферы, в хромосфере, фотосфере, солнечной короне [7, 9]. Rieger-типа периодичность можно рассматривать как фундаментальное свойство динамо-процессов, управляющих солнечной активностью. Вариации солнечной активности с периодами  $\sim 120$  – 220 дней также проявляются в динамике магнитосферных параметров [10]. Rieger-типа периодичности, обнаруженные в вариациях различных солнечных, межпланетных и геомагнитных индексах, являются важным фактором для изучения взаимосвязи различных процессов в системе Солнце – Земля – гелиосфера.

Далее мы рассмотрим временную динамику структуры Rieger-типа вариаций солнечных пятен для 8-ми солнечных циклов (17 – 24-й циклы).

#### Спектральные параметры вариаций солнечных пятен, 17 – 24-й циклы. Тонкая структура периодических вариаций

В работе рассматривается динамика спектров мощности вариаций (СМВ) отдельно для двух выделенных групп периодов 120 – 180 и 180 – 220 дней для каждого солнечного цикла (17 – 24-й циклы). На рис. 2 для 17 – 24-го солнечных циклов представлена динамика спектров мощности вариаций (СМВ, относительных единиц (о. е.)) суточных величин солнечных пятен SSN (URL: <http://www.sidc.be/silso/datafiles>) для периодов 80 – 300 дней (преобразование Фурье). График дает некоторую усредненную за  $\sim 100$  лет динамику спектров мощности вариаций SSN, и соответственно зарегистрированные в группах периодов 120 – 180 и 180 – 220 дней максимальные мощности для периодов 158 и 188 дней являются «средними» величинами.

Для оценки вклада отдельных физических механизмов в формирование структуры вариаций SSN необходимо рассмотреть структуру вариаций в каждом цикле с достаточно высоким разрешением. Для получения структуры вариаций внутри выделенных групп (увеличения разрешения) мы применили для каждого цикла при Фурье-преобразовании последовательное клонирование данных (для увеличения числа используемых точек до  $\sim 35\,000$ ), при этом спектральное разрешение по сравнению с суммарным спектром (рис. 2)

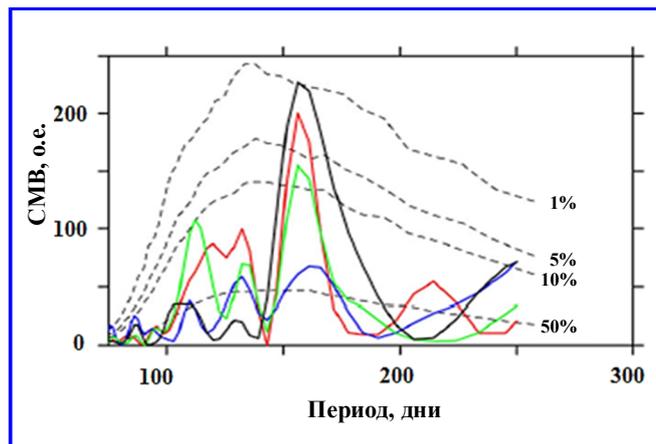


Рис. 1. Распределение числа всплесков III типа (черный цвет), числа солнечных пятен (красный), солнечного 10,7 см потока (зеленый) и вспышечного индекса (SFI, голубой) [8]

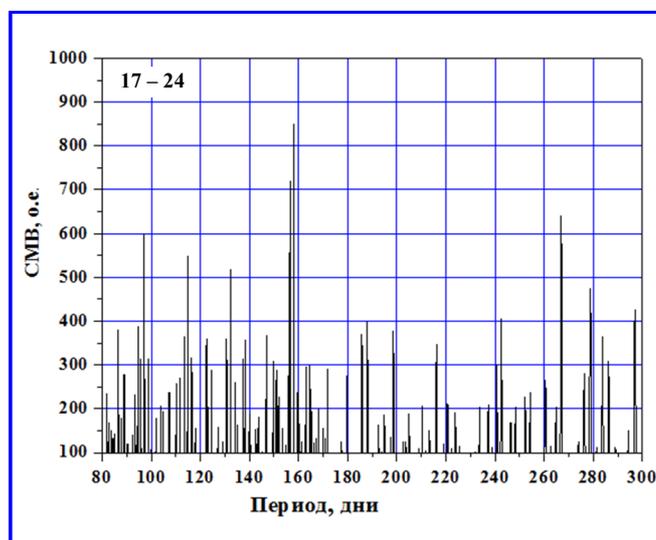


Рис. 2. Динамика вариаций СМВ, о. е. для периодов 80 – 300 дней в 17 – 24-м солнечных циклах

увеличилось в  $\sim 10$  раз. Это позволило получить тонкую структуру вариаций для каждой группы периодов и сравнить динамику вариаций между циклами в каждой группе. СМВ отдельно для каждого солнечного цикла представлены на рис. 3 и 4. На рис. 3 представлены спектры мощности вариаций суточных величин солнечных пятен для 22-го (а), 18-го (б), 24-го (в) и 17-го (г) циклов, на рис. 4 представлены спектры мощности вариаций суточных величин солнечных пятен для 23-го (а), 20-го (б), 21-го (в) и 19-го (г) солнечных циклов.

Сравним структуру вариаций SSN в 17-м, 18-м, 22-м и 24-м солнечных циклах (рис. 3). Максимальная величина СМВ в группе 120 – 180 дней зарегистрирована для периода 160 дней в 17-м цик-

ле, для периода 135 дней в 18-м цикле, для периода 152 дня в 22-м цикле и для периода 182 дня в 24-м цикле. Максимальная величина СМВ в группе 180 – 220 дней зарегистрирована для периода 182 дня в 21-м цикле и для периода 217 дней в 24-м цикле. Изменение значения периода с максимальной величиной СМВ при изменении SSN наблюдается при сравнении динамики СМВ для 23-го, 21-го, 20-го и 19-го солнечных циклов (рис. 4). Анализ показывает значительные отличия между циклами в структуре вариаций в каждой группе.

Подробные результаты анализа тонкой структуры СМВ солнечных пятен для 17 – 24-го солнечных циклов представлены в табл. Для каждой группы приведены значения периодов с макси-

мальной мощностью вариаций и величина максимальной мощности (СМВ, о. е.). В таблице для сравнения указаны средние в группе значения периодов для 17 – 24-го циклов (в таблице – средний период) и значения периодов, выделенные при общем анализе вариаций (рис. 2) 17 – 24-го циклов (в таблице – средний период, 17 – 24-й циклы). Отметим, что мы рассматриваем величины СМВ  $\geq 150$  о. е. с достоверностью не менее 95%. Анализ динамики периодов максимальной в группе мощности показывает связь структуры вариаций SSN с числом солнечных пятен в максимуме цикла: большие периоды регистрируются при меньших значениях числа SSN (далее везде SSN – число солнечных пятен в максимуме цикла).

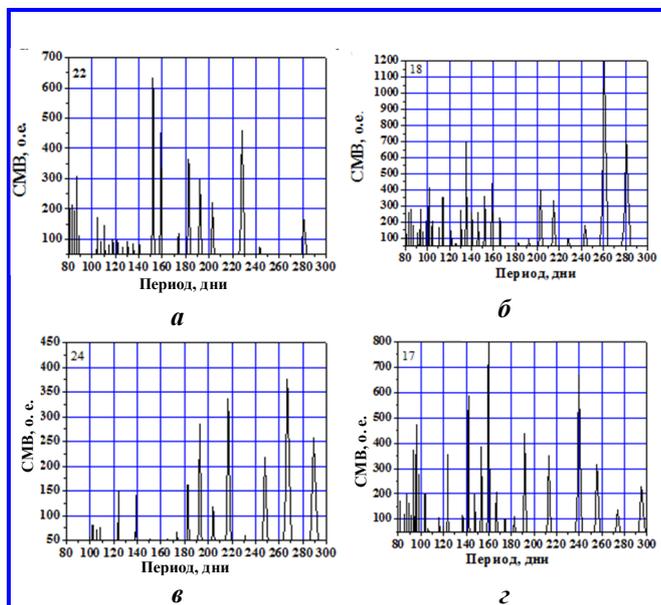


Рис. 3. Динамика спектров мощности вариаций суточных величин солнечных пятен для 22 (а), 18 (б), 24 (в) и 17 (г) циклов

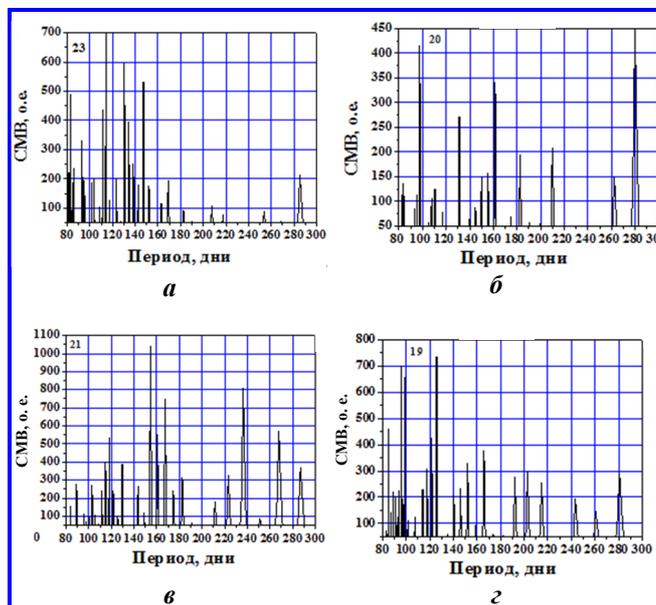


Рис. 4. Динамика СМВ суточных значений числа солнечных пятен для 23 (а), 20 (б), 21 (в) и 19 (г) солнечных циклов

Таблица

Периоды	№ цикла	17	18	19	20	21	22	23	24
120 – 180	Период, дни	160	135	126	161	154	152	147	182
	СМВ, о. е.	820	693	734	340	1039	634	532	163
	Средний период	152							
	Средний период, 17 – 24-й	158							
180 – 220	Период, дни	192	203	203	210	182	182	–	217
	СМВ, о. е.	438	398	297	208	315	365	–	337
	Средний период	198							
	Средний период, 17 – 24-й	188							
SSN		191	215	269	150	220	211	174	113
$V_{\text{макс}}$ , кГц		35,4	48,6	54,4	34,9	38,1	39,4	41,8	26

Следует отметить отличие вариаций СМВ для четных и нечетных циклов: СМВ каждого последующего четного цикла меньше СМВ предыдущего нечетного. В среднем отношение СМВ для нечетных и четных циклов равно  $\sim 1,7$ . На рис. 5 для 8-ми циклов представлена динамика СМВ (а), динамика периодов максимальной мощности (б). Для обозначенных параметров для нечетных циклов использованы красные точки, для четных – черные. В динамике периодов нет вариаций между четными и нечетными циклами (рис. 5, б). В формате графика на рис. 5, б, хорошо видна зависимость периода вариаций от SSN: в 18-м цикле период равен 135-ти дням при SSN = 215, в 24-м цикле период равен 182 дням при SSN = 113.

Далее подробно рассмотрим для каждой группы периодов зависимость максимальной мощности СМВ и периода от числа солнечных пятен в максимуме цикла. Результаты анализа динамики спектров мощности вариаций при изменении числа солнечных пятен представлены в графическом виде на рис. 6.

В диапазоне периодов 120 – 180 дней (диапазон Rieger-периодов) при увеличении числа SSN величины периодов уменьшаются (коэффициент корреляции отрицательный  $\sim -0,76$ , рис. 6, в) и равны 182-м дням для SSN = 113 и 126-ти дням при SSN = 269. При увеличении SSN максимальная мощность СМВ значительно увеличивается (коэффициент корреляции достаточно высокий  $\sim 0,78$ , рис. 6, а). В диапазоне периодов 180 – 220 дней при увеличении числа SSN значения периодов с максимальной мощностью уменьшаются (коэффициент корреляции отрицательный  $\sim -0,55$ , рис. 6, г), максимальная мощность слабо растет, разброс точек значительный (коэффициент корреляции  $\sim 0,22$ , рис. 6, б). Отметим близкое подобие типа зависимостей СМВ и периодов от SSN для обеих групп вариаций. Группу вариаций 180 – 220 дней можно рассматривать как низкочастотную часть Rieger-типа вариаций 120 – 180 дней. Можно сделать некоторый общий вывод: в среднем для обеих групп динамика периодов вариаций находится в противофазе с динамикой SSN, а динамика максимальной СМВ – в фазе с динамикой SSN. Далее сопоставим наши данные с динамикой Rieger-процессов.

### Волны Россби. Оценка динамического магнитного поля

Два основных параметра определяют динамику солнечной активности: это слабое магнитное поле Солнца (полоидальное, меридиональное) и дифференциальное вращение Солнца [11, 12]. Дифференциальное

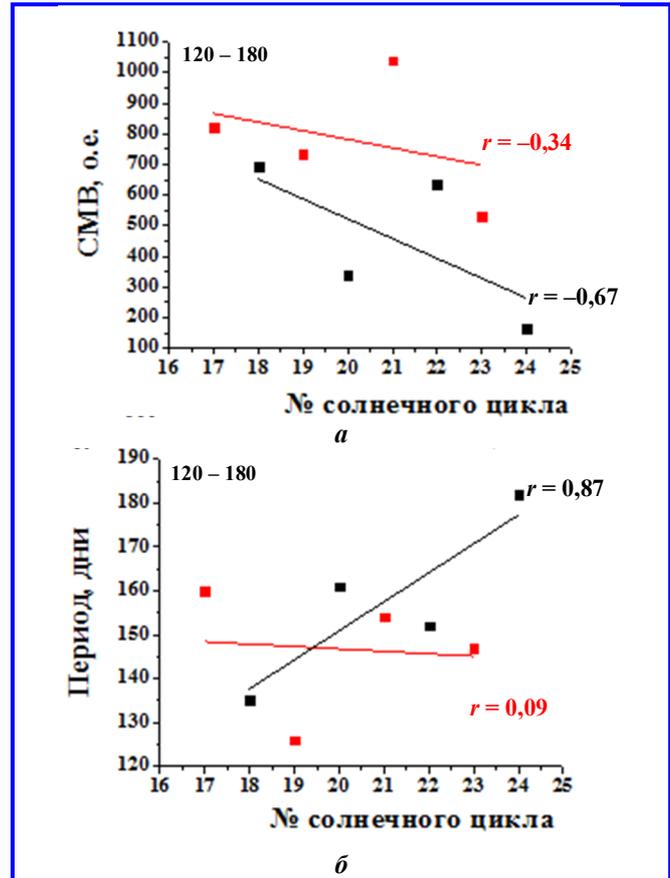


Рис. 5. Динамика СМВ для четных (красные точки) и нечетных (черные точки) солнечных циклов (а); динамика периодов вариаций для четных (красные точки) и нечетных (черные точки) солнечных циклов (б);  $r$  – коэффициент корреляции

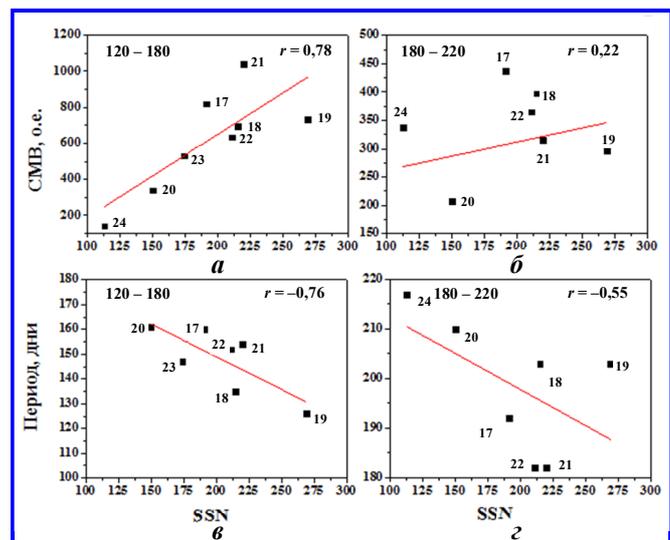


Рис. 6. Зависимость от числа SSN следующих параметров: а – максимальная СМВ о. е. и в – период для диапазона 120 – 180 дней; б – максимальная СМВ о. е. и г – период для диапазона 180 – 220 дней;  $r$  – коэффициент корреляции. Для каждого значения СМВ цифрами указаны номера соответствующих циклов

вращение (экваториальные области Солнца вращаются быстрее, чем полярные) заставляет магнитное поле расширяться в тороидальном (по широте) направлении, закручиваясь около Солнца. При этом тороидальное поле усиливается. Генерация тороидального магнитного поля происходит в сравнительно узкой области вблизи границы конвективной и лучистой зон Солнца (тахоклине), на глубине около 200 000 километров под фотосферой Солнца, где дифференциальная скорость вращения зоны конвекции сменяется на однородную скорость вращения лучистой зоны. На определенном этапе закручивания, когда тороидальное магнитное поле достигнет некоторой максимальной величины (~10 000 Гс), магнитное поле в конвективной зоне становится нестабильным и распадается на отдельные силовые трубки. Часть силовых трубок за счет градиента плотности плазмы вне и внутри трубок (внутри трубки плотность меньше) поднимается вверх конвективной зоны (так называемая магнитная плавучесть), образуя на поверхности низкотемпературные области высоких значений (~кГс) магнитного поля – солнечные пятна. Динамика солнечных пятен фактически отражает динамику крупномасштабного магнитного поля Солнца (или динамического магнитного поля).

В работе [13] было показано, что вариации магнитного поля на поверхности Солнца можно объяснить магнитными волнами Россби в тахоклине. Динамика магнитных волн Россби определяется величиной тороидального магнитного поля (динамическое поле) в области тахоклина и широтным дифференциальным вращением Солнца. Вариации этих параметров приводят к появлению определенного типа волн в верхней части тахоклина. Нестабильные гармоники магнитных волн Россби приводят к периодическому возникновению магнитного потока на поверхности Солнца из-за магнитной плавучести, что вызывает наблюдаемую периодичность в магнитной активности и соответственно определяет периодичность вариаций солнечных пятен. Дисперсионное соотношение для сферических гармоник магнитных волн Россби при наличии дифференциального вращения и тороидального магнитного поля в динамо-слое вблизи основания конвекционной зоны (в тахоклине) было получено в работах [14, 15]. Анализ показал, что периоды вариаций сферической гармоники быстрых магнитных волн Россби с  $m = 1$  и  $n = 4$  ( $m$  и  $n$  соответственно тороидальное и полоидальное волновые числа) лежат в области Rieger-типа периодичности. Периоды магнитных волн Россби зависят от величины магнитного поля [13] в тахоклине. Динамика вейвлет спектров SSN в 14 – 24-м солнечных циклах рассмотрена

в [15]. Анализ показал, что Rieger-тип периодичности наблюдается во всех циклах, при этом периоды 185 – 195 дней характерны для слабых циклов, 14-го, 15-го и 24-го циклов, а периоды 155 – 165 дней для сильных циклов, 16 – 23-го циклов. С использованием дисперсионного соотношения были сделаны оценки магнитного поля: ~40 кГс для сильных циклов и ~20 кГс для слабых. Для оценки динамики магнитного поля в 17 – 24-м циклах мы использовали значения периодов вариаций SSN, полученные при вычислении тонкой структуры вариаций (таблица). При вычислении величины магнитного поля было использовано дисперсионное соотношение для быстрой гармоники магнитных волн Россби с  $m = 1$  и  $n = 4$  (формула 21 в [15]) для типичной плотности  $\rho = 0,2 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$  в области тахоклина и  $R_0 = 5 \cdot 10^{10} \text{ см}$  (расстояние от центра Солнца). При вычислении учитывались изменения параметров дифференциального вращения между циклами [16].

На рис. 7, а, представлена величина магнитного поля ( $B_{\text{макс}}$ , кГс), рассчитанная по данным тонкой структуры Rieger-типа периодичности (периоды 120 – 180 дней) в 17 – 24-м солнечных циклах (таблица). Для сравнения с экспериментальными данными измерения магнитных полей в области солнечных пятен на рис. 7, а отложены значения магнитного поля на широте  $\theta = 45$  град.,  $B_{\text{макс}} = 1/2$  величины магнитного поля в тахоклине. Величины  $B_{\text{макс}}$  представлены в нижней строчке таблицы.

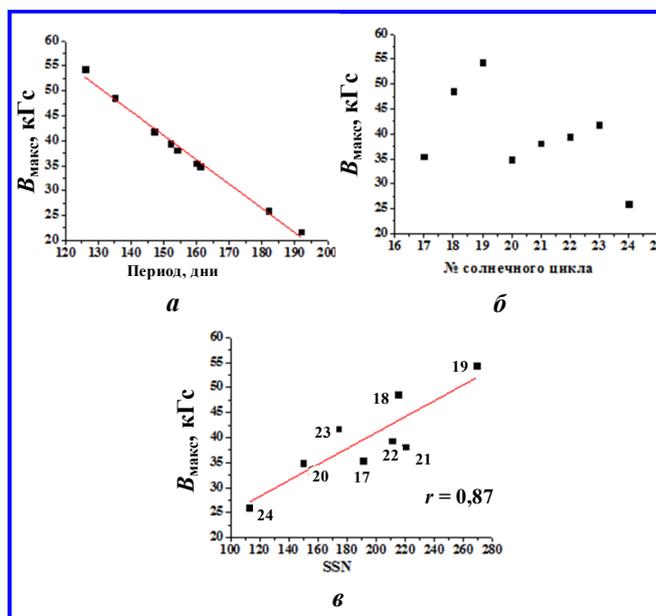


Рис. 7. Зависимость от величины магнитного поля  $B_{\text{макс}}$ : а – периодов вариаций SSN; б – величины магнитных полей для 17 – 24-го солнечных циклов; в – числа солнечных пятен;  $r$  – коэффициент корреляции. Для каждого значения СВМ цифрами указаны номера соответствующих циклов

Полученные результаты показывают, что в области периодов 120 – 180 дней регистрируется почти обратная линейная зависимость между периодом вариации SSN и величиной магнитного поля (красная линия на рис. 7, а). Такой результат является прямым следствием обратной зависимости между числом SSN и периодами вариации SSN (рис. 6, в). Для периодов 182 (SSN = 113) и 126 дней (SSN = 269)  $B_{\text{макс}}$  соответственно равняется ~26 и ~54,4 кГс. На рис. 7, в представлена зависимость числа солнечных пятен в максимуме цикла от величины магнитного поля  $B_{\text{макс}}$  на широте 45 град. Корреляция достаточно сильная,  $R = 0,87$ . Этот, казалось бы, естественный результат, еще раз подтверждает, что число солнечных пятен является хорошей мерой крупномасштабного магнитного поля Солнца. На рис. 7, б, показаны величины магнитных полей для 17 – 24-го солнечных циклов. Таким образом, анализ динамики тонкой структуры вариаций числа SSN в диапазоне Rieger-типа периодичности позволяет получить динамику магнитных полей в солнечных циклах.

### Основные результаты

В работе исследуется связь динамики структуры вариаций спектральных параметров солнечных пятен для Rieger-типа периодичности с динамикой солнечных пятен (фактически с динамикой крупномасштабного динамического магнитного поля). Для получения тонкой структуры вариаций отдельно для двух групп периодов 120 – 180 и 180 – 220 дней при Фурье-преобразовании для каждого цикла (17 – 24-й циклы солнечной активности) применялось последовательное клонирование данных. Анализ показал связь тонкой структуры Rieger-типа вариаций SSN в циклах с числом солнечных пятен в максимуме цикла. Были получены следующие численные результаты: в диапазоне периодов 120 – 180 дней при увеличении числа SSN периоды вариаций уменьшаются (коэффициент корреляции отрицательный ~-0,76) и равны 182 дням для SSN = 113 и 126 дням для SSN = 269; при увеличении SSN в среднем между циклами спектральная мощность вариаций этих периодов значительно увеличивается (коэффициент корреляции достаточно высокий ~0,78). В среднем для обеих групп периодов динамика периодов вариаций находится в противофазе с динамикой SSN в максимуме цикла, а динамика СМБ – в фазе с динамикой SSN. Экспериментальные величины периодов вариаций послужили основой для вычисления крупномасштабных магнитных полей для 17 – 24-го солнечных циклов. Для вычисления использовалась зависи-

мость между периодами вариаций и величиной магнитного поля для быстрой гармоника магнитных волн Россби с волновыми числами  $m = 1, n = 4$ . Для периодов 120 – 180 дней регистрируется почти линейная связь между периодами вариаций и вычисленными значениями магнитного поля, с увеличением магнитного поля период вариаций уменьшается:  $B_{\text{макс}} = 26$  кГс для периода 182 дня (SSN = 113) и  $B_{\text{макс}} = 54,4$  кГс для периода 126 дней (SSN = 269). Полученные результаты указывают на прямую связь динамики числа солнечных пятен в максимуме цикла с динамикой крупномасштабных магнитных полей (коэффициент корреляции  $R = 0,87$ ). Временная динамика процессов, определяющих динамику космической погоды на шкале ~120 – 220 дней, фактически связана с Rieger-типа вариациями солнечных параметров.

### Литература

1. A 154-day periodicity in the occurrence of hard solar flares? / E. Rieger, G. Kanbach, C. Reppin [et al.] // Nature. – 1984. – Vol. 312. – P. 623 – 625. – DOI : 10.1038/312623a0.
2. The 1,3-year and 156-day periodicities in sunspot data : Wavelet analysis suggests a common origin / N. A. Krivova, S. K. Solanki // A&A. – Vol. 394. – P. 701 – 706 (2002). – DOI : 10.1051/0004-6361:20021063.
3. Periodic behavior of solar flare index during solar cycles 20 and 21 / A. Özgüç, T. Ataç // Solar Physics. – 1989. – Vol. 123. – P. 357 – 365. – URL : <https://doi.org/10.1007/BF00149111>.
4. Periodicities in solar flare occurrence: analysis of cycles 19 – 23 / T. Bai // The Astrophysical Journal. – 2003. – Vol. 591. – P. 406 – 415.
5. Periodicities of solar electron flare occurrence: analysis of cycles 21 – 23 / P. Chowdhury, P. C. Ray // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2006. – Vol. 373. – P. 1577 – 1589.
6. A 153 Day Periodicity in the Occurrence of Solar Flares Producing Energetic Interplanetary Electrons / W. Droge, K. Gibbs, J. M. Grunsfeld [et al.] // ApJS. – 1990. – Vol. 73. – P. 279.
7. Search for a 152 – 158 days periodicity in the occurrence rate of solar flares inferred from spectral data of radio bursts / V. K. Verma, G. C. Joshi, W. Uddin [et al.] // Astron. Astrophys. Suppl. – 1991. – Ser. 90. – P. 83 – 87.
8. Rieger-type periodicity in the occurrence of solar type III radio bursts / V. V. Lobzin, I. H. Cairns, P. A. Robinson // Astrophysical Journal Letters. – 2012. – 754 (2). – L28. – DOI : 10.1088/2041-8205/754/2/L28.
9. Mid-term Periodicities in Solar Radio Emission Corresponding to Sunspot Number During Solar Cycle 23 / M. Aroori, P. Vemareddy, P. Chowdhury [et al.] // Solar Physics. – 2021. – Vol. 296. – P. 43. – DOI : 10.1007/s11207-021-01793-6.
10. Short-term periodicities in interplanetary, geomagnetic and solar phenomena during solar cycle 24 / P. Chowdhury, D. P. Choudhary, S. Gosain [et al.] // Astrophys Space Sci. – 2014. – 356 (1). – DOI : 10.1007/s10509-014-2188-0.
11. Introduction to the solar activity cycle : overview of causes and consequences/ A. Balogh, H.S. Hudson, K. Pe-

- trovay [et al.] // Space Sci Rev. – 2014. – Vol. 186 (1 – 4). – P. 1 – 15. – DOI : 10.1007/s11214-014-0125-8.
12. Dynamo models of the solar cycle / P. Charbonneau // Living Reviews in Solar Physics. – 2020. – Vol. 17. – P. 4. – DOI : 10.1007/s41116-020-00025-6.
13. Global shallow water magnetohydrodynamic waves in the solar tachocline / T. V. Zaqarashvili, R. Oliver, J. L. Ballester // The Astrophysical Journal. – 2009. – Vol. 691. – P. L41 – L44. – DOI : 10.1088/0004-637X/691/1/L41.
14. Magnetic rossby waves in the solar tachocline and rieger-type periodicities / T. V. Zaqarashvili, M. Carbonell, R. Oliver [et al.] // The Astrophysical Journal. – 2010. – Vol. 709. – P. 749 – 758. – DOI : 10.1088/0004-637X/709/2/749.
15. Rieger-type periodicity during solar cycles 14 – 24: estimation of dynamo magnetic field strength in the solar interior / E. Gurgenashvili, T. V. Zaqarashvili, V. Kukhianidze [et al.] // The Astrophysical Journal. – 2016. – Vol. 826. – P. 55. – DOI : 10.3847/0004-637X/826/1/55.
16. Long-Term Variations in Solar Differential Rotation and Sunspot Activity / J. Javariah, L. Bertello, R. K. Ulrich // Solar Physics. – 2005. – Vol. 232. – P. 25 – 40. – DOI : 10.1007/s11207-005-8776-y.

Поступила в редакцию 27.05.2021

**Иннокентий Петрович Безродных**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,  
т. (495) 333-20-00, e-mail: d54x@mail.ru.  
(ИКИ РАН),  
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

**Евгения Ивановна Морозова**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,  
т. (495) 333-20-00, e-mail: morozova.evgeniya2014@yandex.ru.  
(ИКИ РАН).

**Анатолий Алексеевич Петрукович**, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН,  
директор ИКИ РАН, т. (495) 333-32-67, e-mail: apetruko@iki.rssi.ru.  
(ИКИ РАН).

**Максим Владимирович Кожухов**, кандидат технических наук, начальник лаборатории,  
т. (495) 366-38-38, e-mail: d18188@mail.ru.  
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

## FINE STRUCTURE OF PERIODIC VARIATIONS OF SUNSPOTS (17 – 24 CYCLES OF SOLAR ACTIVITY). I. DYNAMICS OF THE STRUCTURE OF VARIATIONS OF SUNSPOTS IN 17 – 24 CYCLES OF SOLAR ACTIVITY FOR PERIODS OF 120 – 220 DAYS. CALCULATION OF THE DYNAMIC MAGNETIC FIELD

**I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova,  
A. A. Petrukovich, M. V. Kozhukhov**

The main goal of this work is to study the temporal dynamics of the structure of variations in the number of sunspots for periods of ~120 – 220 days in 17 – 24 cycles of solar activity. Variations in solar activity with periods of ~ 120 – 220 days (Rieger-type of periodicity) are observed at all levels of the solar atmosphere, in the chromosphere, photosphere, solar corona, and are manifested in the dynamics of magnetospheric and heliospheric parameters. Found in various solar, interplanetary and geomagnetic indices, these variations are an important factor for studying the relationship between various processes in the Sun-Earth-heliosphere system. The paper analyzes the power spectra of variations in the daily values of sunspots in 17 – 24 solar activity cycles. Separately for two groups of periods of 120 – 180 days and 180 – 220 days, data on the fine structure of spectral parameters of sunspot variations (periods of variations and spectral power of variations-CMB) were obtained, the relationship between the dynamics of the structure of sunspot variations and the dynamics of sunspots at the maximum of the cycle SSN (actually with large-scale magnetic field dynamics). The following dependencies were obtained: in the range of periods of 120-180 days, with an increase in the number of SSNs, the periods of variations decrease (the correlation coefficient is negative ~ -0,76) and is equal to 182 days for SSN = 113 and 126 days with SSN = 269; with an increase in SSN, the spectral power of variations (SMV) for these periods significantly increases (the correlation coefficient is rather high, ~0,78). For both groups of periods 120 – 180 days and 180 – 220 days, the dynamics of the periods of variations is in antiphase with the dynamics of SSN at the maximum of the cycle, and the dynamics of SMV is in phase with the dynamics of SSN. The experimental values of the periods of variations served as the basis for calculating the strength of large-scale magnetic fields for 17 – 24 solar cycles. For the calculation, we used the relationship between the periods of variations and the magnitude of the magnetic field for the fast harmonic of magnetic Rossby waves with wave numbers  $m = 1$ ,  $n = 4$ . For periods of 120 – 180 days, an almost linear relationship is recorded between the periods of variations and the calculated values of the magnetic field; with an increase in the magnetic field, the period of variations decreases:  $B_{max} = 26$  kG for a period of 182 days (SSN = 113) and  $B_{max} = 54,4$  kG for a period of 126 days (SSN = 269). The results obtained indicate a direct relationship between the dynamics of the number of sunspots at the maximum of the cycle and the dynamics of magnetic fields (correlation coefficient  $R = 0.87$ ).

**Key words:** sunspots, power spectrum of variations, Rossby waves, wavenumbers, large-scale magnetic field of the Sun.

## References

1. A 154-day periodicity in the occurrence of hard solar flares? / E. Rieger, G. Kanbach, C. Reppin [et al.] // Nature. – 1984. – Vol. 312. – P. 623 – 625. – DOI : 10.1038/312623a0.
2. The 1,3-year and 156-day periodicities in sunspot data : Wavelet analysis suggests a common origin / N. A. Krivova, S. K. Solanki // A&A. – Vol. 394. – P. 701 – 706 (2002). – DOI : 10.1051/0004-6361:20021063.
3. Periodic behavior of solar flare index during solar cycles 20 and 21 / A. Özgüç, T. Ataç // Solar Physics. – 1989. – Vol. 123. – P. 357 – 365. – URL : <https://doi.org/10.1007/BF00149111>.
4. Periodicities in solar flare occurrence: analysis of cycles 19 – 23 / T. Bai // The Astrophysical Journal. – 2003. – Vol. 591. – P. 406 – 415.
5. Periodicities of solar electron flare occurrence: analysis of cycles 21 – 23 / P. Chowdhury, P. C. Ray // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2006. – Vol. 373. – P. 1577 – 1589.
6. A 153 Day Periodicity in the Occurrence of Solar Flares Producing Energetic Interplanetary Electrons / W. Droge, K. Gibbs, J. M. Grunsfeld [et al.] // ApJS. – 1990. – Vol. 73. – P. 279.
7. Search for a 152 – 158 days periodicity in the occurrence rate of solar flares inferred from spectral data of radio bursts / V. K. Verma, G. C. Joshi, W. Uddin [et al.] // Astron. Astrophys. Suppl. – 1991. – Ser. 90. – P. 83 – 87.
8. Rieger-type periodicity in the occurrence of solar type III radio bursts / V. V. Lobzin, I. H. Cairns, P. A. Robinson // Astrophysical Journal Letters. – 2012. – 754 (2). – L28. – DOI : 10.1088/2041-8205/754/2/L28.
9. Mid-term Periodicities in Solar Radio Emission Corresponding to Sunspot Number During Solar Cycle 23 / M. Aroori, P. Vemareddy, P. Chowdhury [et al.] // Solar Physics. – 2021. – Vol. 296. – P. 43. – DOI : 10.1007/s11207-021-01793-6.
10. Short-term periodicities in interplanetary, geomagnetic and solar phenomena during solar cycle 24 / P. Chowdhury, D. P. Choudhary, S. Gosain [et al.] // Astrophys Space Sci. – 2014. – 356 (1). – DOI : 10.1007/s10509-014-2188-0.
11. Introduction to the solar activity cycle : overview of causes and consequences/ A. Balogh, H.S. Hudson, K. Petrovay [et al.] // Space Sci Rev. – 2014. – Vol. 186 (1 – 4). – P. 1 – 15. – DOI : 10.1007/s11214-014-0125-8.
12. Dynamo models of the solar cycle / P. Charbonneul // Living Reviews in Solar Physics. – 2020. – Vol. 17. – P. 4. – DOI : 10.1007/s41116-020-00025-6.
13. Global shallow water magnetohydrodynamic waves in the solar tachocline / T. V. Zaqarashvili, R. Oliver, J. L. Ballester // The Astrophysical Journal. – 2009. – Vol. 691. – P. L41 – L44. – DOI : 10.1088/0004-637X/691/1/L41.
14. Magnetic rossby waves in the solar tachocline and rieger-type periodicities / T. V. Zaqarashvili, M. Carbonell, R. Oliver [et al.] // The Astrophysical Journal. – 2010. – Vol. 709. – P. 749 – 758. – DOI : 10.1088/0004-637X/709/2/749.
15. Rieger-type periodicity during solar cycles 14 – 24: estimation of dynamo magnetic field strength in the solar interior / E. Gurgenashvili, T. V. Zaqarashvili, V. Kukhianidze [et al.] // The Astrophysical Journal. – 2016. – Vol. 826. – P. 55. – DOI : 10.3847/0004-637X/826/1/55.
16. Long-Term Variations in Solar Differential Rotation and Sunspot Activity / J. Javariah, L. Bertello, R. K. Ulrich // Solar Physics. – 2005. – Vol. 232. – P. 25 – 40. – DOI : 10.1007/s11207-005-8776-y.

**Innokentii Petrovich Bezrodnykh**, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Senior Researcher,  
tel.: + 7 (495) 333-20-00, e-mail: [d54x@mail.ru](mailto:d54x@mail.ru).  
IKI RAN (Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences).  
(JC «VNIEM Corporation»).

**Evgeniia Ivanovna Morozova**, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Senior Researcher,  
tel.: + 7 (495) 333-20-00, e-mail: [morozova.evgeniya2014@yandex.ru](mailto:morozova.evgeniya2014@yandex.ru).

**Anatolii Alexeevich Petrukovich**, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences,  
Deputy Director General of IKI RAN, tel.: + 7 (495) 333-32-67, e-mail: [apetruko@iki.rssi.ru](mailto:apetruko@iki.rssi.ru).  
IKI RAN (Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences).

**Maxim Vladimirovich Kozhukhov**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of Laboratory,  
tel.: (495)366-38-38, e-mail: [d18188@mail.ru](mailto:d18188@mail.ru).  
(JC «VNIEM Corporation»).